

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 12.05.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 17.11.23 Bulletin 23/46.

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

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) ETABLISSE-  
MENT PUBLIC A CARACTERE SCIENTIFIQUE ET  
TECHNOLOGIQUE — FR, SAFRAN Société anonyme  
— FR et ECOLE NORMALE SUPERIEURE ETABLIS-  
SEMENT PUBLIC NATIONAL A CARACTERE SCIEN-  
TIFIQUE, CULTUREL, PROFESS — FR.

72 Inventeur(s) : FRAGNAUD Cédric, REMACHA  
Clément, ROUX Stéphane et BETANCUR Julian.

73 Titulaire(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE (CNRS) ETABLISSEMENT PUBLIC A  
CARACTERE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE,  
SAFRAN Société anonyme, ECOLE NORMALE SUPE-  
RIEURE ETABLISSEMENT PUBLIC NATIONAL A CARAC-  
TERE SCIENTIFIQUE, CULTUREL, PROFES.

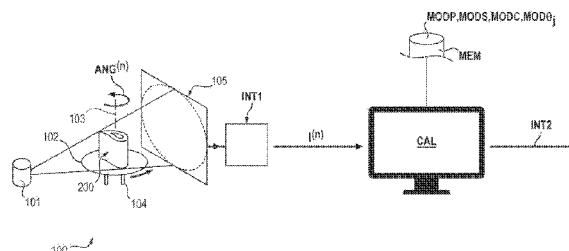
74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 Procédé, système et programme d'ordinateur de contrôle d'une pièce par radiographie aux rayons X.

57 L'invention porte sur un procédé de contrôle non  
destructif fondé sur une modélisation volumique d'une pièce  
(200), comprenant :

l'acquisition, par un dispositif de radiographie aux  
rayons X (100), d'images de la pièce selon différents angles  
de projection ( $\theta$ ) ; le calcul de projections à partir des images  
acquises selon les différents angles de projection ; à cha-  
cune de plusieurs itérations : la génération de projections si-  
mulées correspondant aux projections calculées, à partir  
d'un modèle de référence d'une surface externe de la pièce  
et d'un vecteur de paramètres de transformation du modèle  
de référence ; la modification du vecteur en vue de réduire  
un écart entre les projections simulées et les projections  
calculées ; la détermination d'un modèle corrigé de la sur-  
face externe par transformation du modèle de référence au  
moyen du vecteur issu des itérations ; la détermination d'un  
modèle effectif de la pièce au moyen du modèle corrigé.

Figure pour l'abrégé : Figure 1



## **Description**

### **Titre de l'invention : Procédé, système et programme d'ordinateur de contrôle d'une pièce par radiographie aux rayons X**

#### **Domaine technique**

[0001] Le domaine de l'invention est celui du contrôle non destructif par radiographie aux rayons X de pièces, par exemple des pièces aéronautiques telles que des aubes de turbine.

#### **Technique antérieure**

[0002] Le contrôle non destructif (CND) des pièces aéronautiques est un élément essentiel de la sûreté de fonctionnement des avions dont l'objectif est d'éviter tout défaut qui pourrait provoquer une défaillance en vol. Parmi les méthodes de CND, la radiographie aux rayons X se distingue par sa capacité à visualiser l'intérieur de la pièce de manière peu intrusive et à résoudre des détails jusqu'à une taille micrométrique.

[0003] Une radiographie aux rayons X normalisée est interprétée comme une image de l'atténuation des rayons X lors de la traversée de la pièce, atténuation elle-même reliée à l'épaisseur traversée par une loi qui est souvent approximée par une fonction exponentielle comme pour la loi de Beer-Lambert.

[0004] La tomographie consiste en l'acquisition d'un ou plusieurs milliers de radiographies lors d'une rotation, la plupart du temps complète, d'une pièce dans le but de calculer une image tridimensionnelle complète de la pièce. L'important temps d'acquisition de ces images tomographiques conduit les industriels à ne considérer qu'un nombre limité d'images radiographiques (de l'ordre d'une dizaine) pour réaliser le CND de santé matière et dimensionnel.

[0005] La sanction de pièce par radiographie aux rayons X à partir d'un faible nombre de vues est habituellement effectuée manuellement : des contrôleurs, techniciens spécialistes formés à cette tâche, analysent les images à la recherche de toute variation anormale des niveaux de gris.

[0006] Toutefois, des artefacts d'images altèrent ces niveaux de gris, rendant incertaine et difficile la sanction car lorsqu'un faible nombre d'images est considéré, les artefacts d'images ont un fort poids et ne peuvent pas être négligés. Pour des tensions d'accélération autour de 350 keV, typiquement utilisées pour acquérir des images d'aube de turbine, les artefacts à traiter sont essentiellement le durcissement de faisceau et la diffusion Compton.

[0007] Par ailleurs, une variabilité inter et intra contrôleur existe, réduisant la fiabilité de la sanction. Enfin, l'analyse minutieuse des images par les contrôleurs constitue un travail laborieux et fatigant.

[0008] Cédric Fragnaud et al. CAD-based X-ray CT calibration and error compensation. Measurement Science and Technology, IOP Publishing, vol. 33, n° 6, 065024, (2022) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ac5133> propose une solution de CND basée sur la comparaison entre des images radiographiques acquises et simulées. Cette solution exploite un modèle de référence de la pièce inspectée, typiquement son modèle de conception assistée par ordinateur CAO, pour apporter une connaissance *a priori* permettant d'effectuer une calibration basée sur l'alignement des images acquises et simulées.

### **Exposé de l'invention**

[0009] L'invention a pour objectif de fournir une solution de CND permettant, avec un nombre limité d'images radiographiques, de caractériser avec un haut niveau de fiabilité la géométrie 3D d'une pièce et sa conformité dimensionnelle.

[0010] Pour ce faire, l'invention propose de venir générer un modèle d'une pièce inspectée rendant mieux compte de la géométrie 3D réelle de la pièce qu'un modèle de référence qui lui rend compte d'une géométrie attendue de la pièce. Plus particulièrement l'invention propose un procédé de contrôle non destructif d'une pièce fondé sur une modélisation volumique de la pièce, comprenant :

- [0011] • l'acquisition, par un dispositif de radiographie aux rayons X, d'images de la pièce selon différents angles de projection ;
- le calcul de projections à partir des images acquises selon les différents angles de projection ;
- à chacune de plusieurs itérations :
  - la génération de premières projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir d'un modèle de référence d'une surface externe de la pièce et d'un vecteur  $\#$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe;
  - la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;
  - la modification du vecteur  $\#$  en vue de réduire ledit écart ;
- la détermination d'un modèle corrigé de la surface externe par transformation du modèle de référence de la surface externe au moyen du vecteur  $\#$  issu des itérations ;
- la détermination d'un modèle effectif de la pièce au moyen du modèle corrigé de la surface externe.

[0012] Certains aspects préférés mais non limitatifs de ce procédé sont les suivants :

- [0013] – la génération, à chacune des itérations, des premières projections simulées, est également réalisée à partir d'un modèle de référence d'une ou plusieurs cavités internes de la pièce, le vecteur  $\mu$  comprenant également des paramètres de transformation du modèle de référence de la ou des cavités internes ;
- il comprend en outre la détermination d'un modèle corrigé de la ou des cavités internes par transformation du modèle de référence de la ou des cavités internes au moyen du vecteur  $\mu$  issu des itérations;
- la détermination du modèle effectif de la pièce est également réalisée au moyen du modèle corrigé de la ou des cavités internes ;
- à chacune des itérations :
- la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises comprend, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection correspondant à l'écart entre la première projection simulée pour cet angle de projection et la projection calculée à partir de l'image acquise pour cet angle de projection ; et
  - la modification du vecteur  $\mu$  comprend :
    - pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la première projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\mu$  ;
    - le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\mu^*$  comme étant le vecteur  $\delta\mu$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité;
    - la mise à jour du vecteur  $\mu$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\mu^*$  ;
- le calcul du vecteur correctif  $\delta\mu^*$  comprend la minimisation de la somme sur les angles de projection des normes au carré des différences pondérées entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection ;
- chaque itération comprend en outre suite à la modification du vecteur  $\mu$  :
- la génération de deuxièmes projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle de référence de la surface externe, d'un modèle d'une sous-partie numéro  $j$  d'intérêt de la pièce, du vecteur  $\mu$  modifié et d'un vecteur  $\theta_j$  de paramètres géométriques de la sous-partie numéro  $j$  d'intérêt

- de la pièce ;
- la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;
- la modification du vecteur  $\theta_j$  en vue de réduire ledit écart ;
- à chacune des itérations :
  - la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises comprend, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection correspondant à l'écart entre la deuxième projection simulée pour cet angle de projection et la projection calculée à partir de l'image acquise pour cet angle de projection ; et
  - la modification du vecteur  $\theta_j$  comprend :
    - pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la deuxième projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\theta_j$  ;
    - le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  comme étant le vecteur  $\delta\theta_j$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\theta_j$  par les champs de sensibilité;
    - la mise à jour du vecteur  $\theta_j$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  ;
- le calcul du vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  comprend la minimisation de la somme sur les angles de projection des normes au carré des différences pondérées entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\theta_j$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection ;
- il comprend en outre la détermination d'un modèle corrigé de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  par transformation du modèle de référence de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  au moyen du vecteur  $\theta_j$  issu des itérations, la détermination du modèle effectif de la pièce étant également réalisée au moyen du modèle corrigé de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  ;
- la génération des premières projections simulées est en outre réalisée à partir d'un vecteur  $\mathcal{P}$  de paramètres caractérisant la géométrie de projection de l'acquisition ;

- il comprend en outre, au moyen d'un vecteur de paramètres d'un modèle d'artefacts d'image, une correction d'artefacts dans les projections calculées à partir des images acquises ou une génération d'artefacts dans les premières projections simulées ;
- il comprend en outre une sanction de la pièce au moyen du modèle effectif de la pièce ;
- la sanction de la pièce comprend :
  - la génération de troisièmes projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle effectif de la pièce ;
  - la comparaison des projections calculées à partir des images acquises et des troisièmes projections simulées à partir du modèle effectif de la pièce.

### **Brève description des dessins**

- [0014] D'autres aspects, buts, avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :
- [0015] - la [Fig.1] est un schéma d'un système de modélisation volumique d'une pièce selon un mode de réalisation possible de l'invention ;
- [0016] - la [Fig.2] est un schéma représentant différentes étapes d'un procédé de modélisation volumique d'une pièce selon un mode de réalisation possible de l'invention ;
- [0017] - la [Fig.3] illustre une modélisation possible d'une sous-partie d'intérêt de type trou de perçage.
- [0018] **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**
- [0019] L'invention concerne un procédé et un système de contrôle non destructif fondé sur une modélisation volumique d'une pièce présentant une surface externe et potentiellement une ou plusieurs cavités internes. La pièce est typiquement, mais non nécessairement, une pièce composée d'un seul matériau. La pièce peut être réalisée selon différents procédés de fabrication, par exemple par fonderie à la cire perdue ou par fabrication additive. L'invention trouve application au contrôle non destructif de pièces aéronautiques, typiquement des aubes de turbine, à l'issue de leur fabrication ou lors d'opérations de maintenance afin d'y détecter d'éventuels défauts pouvant par exemple provoquer une défaillance en vol.
- [0020] En référence aux figures 1 et 2, le système 1 de modélisation volumique comporte un dispositif 100 de radiographie aux rayons X permettant d'acquérir des images d'une

pièce réelle 200 selon différents angles de projection. Ces images sont notées  $I^{(n)}$  où  $n$  désigne le numéro de l'un des angles de projection ou encore de l'une des vues de la pièce.

[0021] Le système de contrôle non destructif 1 de la pièce 200 comporte, et le procédé de contrôle non destructif de la pièce 200 utilise, un ou plusieurs calculateurs CAL. Le calculateur CAL peut être ou comprendre un ou plusieurs ordinateurs, un ou plusieurs serveurs, une ou plusieurs machines, un ou plusieurs processeurs, un ou plusieurs microprocesseurs, une ou plusieurs mémoires permanentes MEM, une ou plusieurs mémoires vives MEM. Le calculateur CAL peut comprendre une ou plusieurs interfaces physiques INT1 d'entrée de données, une ou plusieurs interfaces physiques INT2 de sortie de données. Cette ou ces interfaces physiques INT1 d'entrée de données peuvent être ou comprendre un ou plusieurs claviers d'ordinateur, un ou plusieurs ports physiques de communication de données, un ou plusieurs écrans tactiles, ou autres. Cette ou ces interfaces physiques INT2 de sortie de données peuvent être ou comprendre un ou plusieurs ports physiques de communication de données, un ou plusieurs écrans, ou autres. Un programme d'ordinateur peut être enregistré et exécuté sur le calculateur CAL et comporter des instructions de code, qui lorsqu'elles sont exécutées sur celui-ci, mettent en œuvre tout ou partie du procédé de modélisation volumique de la pièce 200 suivant l'invention, dont la réception des images  $I^{(n)}$  au cours de l'étape E1.

[0022] Le dispositif 100 de radiographie aux rayons X comporte une source 101 de rayons X, un support 102 sur lequel se trouve la pièce 200, un mécanisme 104 de contrôle pour faire tourner le support 102 et la source 101 l'un par rapport à l'autre 101 autour d'un axe 103 de rotation, pouvant être par exemple vertical (par exemple la source 101 est fixe et le support 102 est mis en rotation autour de l'axe 103), un détecteur 105 des rayons X traversant la pièce 200, la pièce 200 se trouvant donc sur le trajet des rayons X entre la source 101 et le détecteur 105. La source 101, le support 102 et le détecteur 105 sont disposés dans une cabine à rayons X de haute puissance. Le détecteur 105 fournit les images  $I^{(n)}$  de la pièce permettant de calculer des projections  $P^{(n)}$  de la pièce 200 au cours d'une première étape E1 du procédé selon l'invention. Le mécanisme 104 de contrôle est contrôlé pour l'acquisition à N angles ANG(n) de projection, différents les uns des autres, de la pièce 200 vis-à-vis des rayons X, par le détecteur 105, de N images  $I^{(n)}$ . N est un entier naturel prescrit, supérieur ou égal à 1. L'entier naturel  $n$  va de 1 à N et désigne le numéro de l'angle ANG(n) de projection respectif et donc le numéro de l'image  $I^{(n)}$  acquise et de la projection  $P^{(n)}$  calculée. Le dispositif 100 de radiographie permet ainsi à l'étape E1 de calculer N projections  $P^{(n)}$  du volume de la pièce 200 sous respectivement les N angles ANG(n) de

projection. Une réalisation de  $P^{(n)}$  est  $P^{(n)} = -\log \left( I^{(n)} / I_0 \right)$  où  $I^{(n)}$  désigne une image d'intensité des rayons X ayant traversés la pièce pour la vue  $n$  et  $I_0$  l'image de blanc (i.e. l'image captée par le détecteur en l'absence de pièce). L'important temps d'acquisition des images acquises par rayons X conduit à ne considérer qu'un nombre limité N de projections  $P^{(n)}$ , typiquement inférieur à 100.

- [0023] Une étape de calibration E2, postérieure à la première étape E1, peut être mise en œuvre par le calculateur CAL afin d'identifier les paramètres d'un modèle paramétrique décrivant la formation des images  $I^{(n)}$  et rendant compte de phénomènes se produisant au cours de l'acquisition, comme la diffusion Compton et le durcissement du faisceau. Cette étape E2 vise plus particulièrement à estimer des paramètres représentatifs de la géométrie projective du dispositif de radiographie 100 et à estimer des paramètres d'un modèle d'artefacts d'images attendus pour le matériau constituant la pièce et la puissance du faisceau de rayons X utilisé.
- [0024] Cette étape E2 exploite un modèle numérique de référence MODP de la pièce en tant que connaissance a priori. Ce modèle MODP, qui peut être enregistré à l'avance dans la mémoire MEM du calculateur CAL, est une référence géométrique de la pièce 200 par exemple un modèle de conception assistée par ordinateur (ou CAO en abréviation) de la pièce 200, reproduisant une pièce 200 idéale. Ce modèle MODP peut tenir compte de la composition du matériau de la pièce 200.
- [0025] Partant de ce modèle numérique de référence MODP de la pièce 200, le calculateur CAL peut simuler des radiographies attendues de la pièce. Le calculateur peut ainsi générer des projections simulées correspondant aux projections observées (i.e. les projections calculées à partir des images acquises) selon les différents angles de projection. Les paramètres représentatifs de la géométrie projective du dispositif de radiographie sont pris en considération lors de cette génération. Par ailleurs, les paramètres du modèle d'artefacts d'images peuvent être utilisées pour reproduire dans les images simulées ou corriger dans les images acquises les artefacts.
- [0026] La détermination de ces différents paramètres peut être réalisée en suivant la procédure détaillée dans l'article suscitée et dont une rapide description est donnée ci-dessous.
- [0027] Pour l'estimation de la géométrie projective, il convient de déterminer un vecteur  $P$  de paramètres  $P_i$  de projection lors de l'acquisition des images selon les différents angles de projection. Pour les artefacts il convient de déterminer un vecteur  $C$  de paramètres  $C_k$  d'étalonnage de durcissement de faisceau du rayonnement et un vecteur  $A$  de paramètres  $A_j$  de l'effet de la diffusion Compton sur les images acquises selon les différents angles de projection. La différence ou résidu  $\rho^{(n)}$  entre  $P^{(n)}$ , la projection observée pour la vue numéro  $n$ , et  $\tilde{P}^{(n)}$ , la projection simulée pour la vue numéro  $n$ ,

est minimisée par rapport aux paramètres contenus dans les vecteurs  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{c}$  et  $\mathbf{a}$ .

L'équation suivante établit le calcul du résidu pour la vue numéro  $n$  :

$\rho^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \mathbf{a}) = P^{(n)}(\mathbf{x}) - \tilde{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \mathbf{a})$  où  $\mathbf{x}$  désigne un pixel du détecteur de rayons X.

[0028] L'équation suivante établit le calcul de la projection simulée numériquement  $\tilde{P}^{(n)}$  en utilisant les vecteurs de paramètres  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{c}$  et  $\mathbf{a}$  seulement. Elle formalise comment la projection simulée numériquement encode la géométrie de projection entre la cabine et la pièce avec le vecteur  $\mathbf{p}$ , les phénomènes de durcissement de faisceau avec le vecteur  $\mathbf{c}$  et la fonction  $u$ , et le phénomène de diffusion Compton avec le paramètre  $\mathbf{a}$  et le noyau de convolution  $K$ .

[0029] 
$$\tilde{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \mathbf{a}) = u\left(\hat{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}); \mathbf{c}\right) * K(\mathbf{x}; \mathbf{a})$$

[0030] avec  $\hat{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p})$  la projection simulée pour l'épaisseur de matière traversée dans la pièce pour la vue numéro  $n$  en utilisant le vecteur  $\mathbf{p}$  et le modèle de référence de la pièce MODP,  $u(y; \mathbf{c})$  une fonction définie par le vecteur  $\mathbf{c}$  pour étalonner l'épaisseur traversée  $y = \hat{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p})$  et donc modéliser le phénomène de durcissement de faisceau de rayonnement,  $*$  l'opérateur de convolution, et  $K(\mathbf{x}; \mathbf{a})$  un noyau de convolution au pixel  $\mathbf{x}$ . La convolution avec le noyau  $K(\mathbf{x}; \mathbf{a})$  définie par le vecteur  $\mathbf{a}$  modélise l'effet de la diffusion Compton.

[0031] La détermination des paramètres contenus dans les vecteurs  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{c}$  et  $\mathbf{a}$  permettant de minimiser les résidus peut exploiter des champs de sensibilité en suivant une procédure itérative à trois étapes comme cela est décrit dans l'article suscité, cette procédure itérative exploitant des estimations initiales  $\mathbf{p}_{ini}$ ,  $\mathbf{c}_{ini}$  et  $\mathbf{a}_{ini}$  des vecteurs  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{c}$  et  $\mathbf{a}$ .

[0032] On a vu précédemment que le modèle numérique de référence MODP représente une pièce 200 idéale. Comme détaillé ci-après, le système et procédé selon l'invention permettent de déterminer un modèle, dit modèle effectif MODE, reproduisant de manière plus fine et plus précise la pièce réelle que le modèle MODP. Dans un mode de réalisation possible de l'invention ce modèle effectif est à même de reproduire des défauts de positionnement entre différentes entités 3D composant la pièce par exemple entre la surface externe et une sous-partie constituant la pièce, par exemple une cavité interne ou un trou de perçage. Etant donné que la variation de forme des cavités a une incidence sur l'ensemble de la pièce et est à l'origine des défauts de forme critiques, ils sont ici considérés comme un cas particulier. Ainsi, dans la suite, une distinction est faite entre les cavités internes et les autres sous-parties, par exemple le trou de perçage.

[0033] Pour ce faire, le système et procédé selon l'invention considèrent les entités géométriques 3D permettant de représenter l'aube au moyen d'une description de leurs

formes, leurs positions et leurs tailles. Plus précisément, les étapes E3a, E3b et E4 décrites ci-après exploitent un modèle de référence MODS de l'enveloppe de la pièce appelée par la suite surface externe de la pièce par exemple un modèle CAO, et, dans un mode de réalisation possible, un modèle de référence MODC d'une ou plusieurs cavités internes par exemple un modèle CAO. Ces étapes peuvent également exploiter des modèles d'autres sous-parties d'intérêt de la pièce par exemple sous la forme de modèles CAO déformables ou de modèles paramétriques. Ces étapes visent à estimer les positionnements, facteurs d'échelle et déformations affectant le modèle de référence MODP. Le cas échéant, ces étapes permettent également de déterminer les paramètres des modèles d'autres sous-parties d'intérêt pour caractériser leur géométrie par exemple une paroi interne caractérisée par sa position 3D et son épaisseur ou encore un trou de perçage caractérisé par son diamètre et sa profondeur.

- [0034] On relèvera qu'il est notamment pertinent de dissocier la surface externe et les cavités internes lorsque la pièce est issue d'une fabrication en fonderie par cire perdue. En effet, la géométrie de la surface externe et celle des cavités internes sont alors engendrées par des éléments différents. La surface externe est ainsi directement liée à la métrologie du moule d'injection cire alors que les cavités sont à la fois liées à la métrologie du noyau et au système de blocage du noyau dans le moule d'injection cire. Dans ce cas, le modèle MODC peut correspondre au modèle de référence du noyau.
- [0035] Dans une étape E3a, le procédé selon l'invention vient estimer un vecteur  $\mu$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe et, le cas échéant, du modèle de référence de la ou des cavités internes. Prenant l'exemple d'une transformation rigide du modèle de référence de la surface externe et du modèle de référence de la ou des cavités internes, on compte six degrés de liberté (trois translations et trois rotations) pour décrire le mouvement rigide de chaque modèle. Le vecteur  $\mu$  comprend donc douze composantes : six pour une translation 3D de chaque modèle de référence et six pour la rotation 3D de chaque modèle de référence, par exemple via les angles d'Euler ou un quaternion.
- [0036] Dans une étape optionnelle E3b, le procédé selon l'invention vient estimer un vecteur  $\theta_j$  de paramètres géométriques d'une  $j$ -ème sous-partie d'intérêt de la pièce. Cette étape E3b est répétée pour chacune des sous-parties d'intérêt lorsque plusieurs d'entre elles sont considérées.
- [0037] A titre d'exemple, la figure 3 représente un trou de perçage vue en perspective et en coupe dont une modélisation possible est celle d'un cylindre dont la forme est gouvernée par différents paramètres géométriques, par exemple le rayon, la longueur et les paramètres d'orientation de l'axe. Ces différents paramètres géométriques du trou de perçage correspondant à la sous-partie numéro  $j$  sont rassemblés dans le vecteur  $\theta_j$ .

[0038] Dans ce qui suit, on considère une mise en œuvre conjointe des étapes E3a et E3b. Dans ce cadre, l'invention vient déterminer le vecteur colonne  $\mu$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe et du modèle de référence de la ou des cavités internes, et les vecteurs colonnes  $\theta_j$  de paramètres géométriques des différentes sous-parties d'intérêt. Les vecteurs  $\theta_j$  sont rassemblés dans une liste  $\theta$  tel que la  $j$ -ème entrée corresponde au vecteur  $\theta_j$  pour la sous-partie numéro  $j$ .

[0039] La détermination de ces vecteurs est réalisée en exploitant une différence ou résidu  $\rho^{(n)}$  entre  $P^{(n)}$  la projection observée de la vue  $n$  et  $\tilde{P}^{(n)}$  la projection simulée pour la même vue  $n$  qui s'exprime par exemple sous la forme suivante lorsque l'étape E2 de calibration a préalablement été mise en œuvre :

$$\rho^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta) = P^{(n)}(x) - \tilde{P}^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta).$$

[0040] Une réalisation de  $\tilde{P}^{(n)}$  est

$\tilde{P}^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta) = u(\hat{P}^{(n)}(x; p, \mu, \theta); c) * K(x; a)$ , avec  $\hat{P}^{(n)}(x; p, \mu, \theta)$  la projection simulée de l'épaisseur de matière traversée pour la vue numéro  $n$  en utilisant le vecteur  $P$  de projection, les modèles de la pièce caractérisés par le vecteur  $\mu$  et les modèles des sous-parties d'intérêt caractérisés par le vecteur  $\theta$ . Les vecteurs de paramètres  $p, c, a$  décrivent le modèle de la géométrie projective et le modèle d'artefact d'images. La fonction  $u(y; c)$  qui vient corriger l'atténuation du rayonnement en fonction de la longueur traversée  $y = \hat{P}^{(n)}(x; p, \mu, \theta)$  permet de caractériser l'effet du durcissement de faisceau de rayonnement, et la convolution avec le noyau de convolution  $K(x; a)$  permet de caractériser l'effet de la diffusion Compton. Le calcul des vecteurs  $p, c, a$  optimaux est décrit ci-dessus en liaison avec l'article suscit.

[0041] L'étape E3a peut suivre un processus itératif comprenant à chacune de plusieurs itérations :

- [0042] • la génération de premières projections simulées de la pièce  $\tilde{P}^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta_{ini})$  correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle de référence de la surface externe MODS, le cas échéant, du modèle de référence de la ou des cavités internes MODC et du vecteur  $\mu$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe et, le cas échéant, du modèle de référence de la cavité interne ;
- la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;

- la modification du vecteur  $\mu$  en vue de réduire ledit écart.

[0043] Ce processus itératif exploite une estimation initiale  $\mu_{ini}$  du vecteur  $\mu$ , prise par exemple comme représentative d'une transformation identité des modèles de référence de la surface externe et de la ou des cavités internes. Dans ce qui précède,  $\theta_{ini}$  désigne la liste regroupant les valeurs des paramètres géométriques des différentes sous-parties d'intérêt dans la pièce idéale.

[0044] A chacune des itérations, la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises peut comprendre, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection, par exemple selon  $\rho^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta_{ini}) = P^{(n)}(x) - \tilde{P}^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta_{ini})$ , correspondant à l'écart entre la première projection simulée  $\tilde{P}^{(n)}$  pour cet angle de projection et la projection calculée  $P^{(n)}$  à partir de l'image acquise  $I^{(n)}$  pour cet angle de projection.

[0045] Par ailleurs, à chacune des itérations, la modification du vecteur  $\mu$  peut comprendre :

- [0046] • pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la première projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\mu$  ;
- le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\mu^*$  comme étant le vecteur  $\delta\mu$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité;
- la mise à jour du vecteur  $\mu$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\mu^*$ .

[0047] Le champ de sensibilité d'une projection simulée à une variation d'un paramètre  $\mu_k$  du vecteur  $\mu$  s'exprime par exemple selon

$$s^{(n)}(x; \mu_k) = \frac{\partial \tilde{P}^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta_{ini})}{\partial \mu_k}.$$

[0048] Le calcul du vecteur correctif  $\delta\mu^*$  peut comprendre la minimisation de la somme sur les angles de projection des carrés des différences entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection. Ce vecteur correctif représente une erreur faite dans l'estimation des paramètres contenus dans le vecteur  $\mu$  et fournit une quantité selon laquelle le vecteur  $\mu$  doit être modifié pour réduire l'écart entre les projections simulées et les projections observées. Ainsi la mise à jour du vecteur  $\mu$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\mu^*$  à l'issue d'une itération peut être notée  $\mu \leftarrow \mu + \delta\mu^*$ .

[0049] Par exemple, le vecteur correctif  $\delta\mu^*$  est donné par

$$\delta\mu^* = \underset{\delta\mu}{\operatorname{argmin}} \sum_{(n)} \| w^{(n)}(x) (\rho^{(n)}(x; p, c, a, \mu, \theta_{ini}) - s^{(n)}(x; \mu) \delta\mu) \|^2$$

[0050] où  $s^{(n)}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu})$  est la matrice des champs de sensibilité  $s^{(n)}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_k)$  et  $w^{(n)}(\mathbf{x})$  est un terme de pondération qui peut être utilisé pour prendre en compte des incertitudes locales par exemple dues au bruit ou aux pixels morts. L'invention n'est toutefois pas limitée à la résolution d'équations de la forme précédente, mais s'étend par exemple à des méthodes de régularisation, telles que la régularisation de Tikhonov, qui permettent d'introduire de l'*a priori* dans le problème.

[0051] Dans une mise en œuvre possible de l'étape E3b, chacune des itérations comprend en outre suite à la mise à jour du vecteur  $\boldsymbol{\mu}$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\boldsymbol{\mu}^*$  et pour chacune des sous-parties d'intérêt :

- [0052] • la génération de deuxièmes projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle de référence de la surface externe MODS, le cas échéant, du modèle de référence de la ou des cavités internes MODC, du vecteur  $\boldsymbol{\mu}$  mis à jour en utilisant le vecteur correctif  $\delta\boldsymbol{\mu}^*$  et du vecteur  $\boldsymbol{\theta}_j$  des paramètres géométriques de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  en train d'être considérée ;
- la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir d'images acquises ;
  - la modification du vecteur  $\boldsymbol{\theta}_j$  en vue de réduire ledit écart.

[0053] A chacune des itérations, la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises peut comprendre, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection, par exemple selon  $\rho^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \alpha, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}_j) = P^{(n)}(\mathbf{x}) - \tilde{P}^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \alpha, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\theta}_j)^{\text{cor}}$  correspondant à l'écart entre la deuxième projection simulée pour cet angle de projection et la projection calculée à partir de l'image acquise pour cet angle de projection.

[0054] Par ailleurs, à chacune des itérations, la modification du vecteur  $\boldsymbol{\theta}_j$  comprend :

- [0055] • pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la deuxième projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\boldsymbol{\theta}_j$  ;
- le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\boldsymbol{\theta}_j^*$  comme étant le vecteur  $\delta\boldsymbol{\theta}_j$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\boldsymbol{\theta}_j$  par les champs de sensibilité;
  - la mise à jour du vecteur  $\boldsymbol{\theta}_j$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\boldsymbol{\theta}_j^*$ .

[0056] Le champ de sensibilité d'une projection simulée à une variation d'un paramètre  $\theta_{j,k}$

du vecteur  $\theta_j$  s'exprime par exemple selon

$$s^{(n)}\left(\mathbf{x}; \theta_{j,k}\right) = \frac{\partial \tilde{P}^{(n)}\left(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \mathbf{a}, \boldsymbol{\mu}, \theta_j\right)}{\partial \theta_{j,k}}.$$

[0057] Le calcul du vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  peut comprendre la minimisation de la somme sur les angles de projection des carrés des différences entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\theta_j$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection. Ce vecteur correctif représente une erreur faite dans l'estimation des paramètres contenus dans le vecteur  $\theta_j$  et fournit une quantité selon laquelle le vecteur  $\theta_j$  doit être modifié pour réduire l'écart entre les projections simulées et les projections calculées à partir d'images acquises. Ainsi la mise à jour du vecteur  $\theta_j$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  à l'issue d'une itération peut être notée  $\theta_j \leftarrow \theta_j + \delta\theta_j^*$ .

[0058] Par exemple, le vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  est donné par

$$[0059] \delta\theta_j^* = \underset{\delta\theta_j}{\operatorname{argmin}} \sum_{(n)} \left\| v^{(n)}(\mathbf{x}; j) (\rho^{(n)}(\mathbf{x}; \mathbf{p}, \mathbf{c}, \mathbf{a}, \boldsymbol{\mu}, \theta_j) - s^{(n)}(\mathbf{x}; \theta_j) \delta\theta_j) \right\|^2$$

[0060] où  $s^{(n)}(\mathbf{x}; \theta_j)$  est la matrice des champs de sensibilité  $s^{(n)}(\mathbf{x}; \theta_{j,k})$  et  $v^{(n)}(\mathbf{x}; j)$  est un terme de pondération.

[0061] Les itérations sont arrêtées lorsqu'un critère est vérifié, par exemple lorsqu'un nombre maximal d'itérations est atteint, lorsque les résidus calculés à l'issue d'une itération sont inférieurs à un seuil donné ou encore lorsque la diminution de la valeur des résidus entre deux itérations successives est inférieure à un seuil donné.

[0062] Dans une réalisation possible de l'invention, des mesures d'incertitude sur la valeur des paramètres estimés peuvent être réalisées. Par exemple, une mesure d'incertitude sur les paramètres  $\delta\theta_{j,i}^*$  du vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  est donnée par les coefficients de la matrice de covariance  $\mathbf{C}$  de terme  $C_{ik} = \langle \delta\theta_{j,i}^*, \delta\theta_{j,k}^* \rangle$  dont la valeur va dépendre des hypothèses considérées, notamment concernant la nature et les caractéristiques de bruit. Le terme  $\sqrt{C_{kk}}$  indique l'incertitude sur le k-ième paramètre lorsqu'il est considéré indépendamment des autres. Les termes non diagonaux de la matrice de covariance représentent les couplages entre les paramètres.

[0063] Ces mesures peuvent être calculées aussi bien pour les paramètres contenus dans le vecteur  $\boldsymbol{\mu}$  que sur les paramètres contenus dans le ou les vecteurs  $\theta_j$ .

[0064] Au cours d'une quatrième étape E4, le procédé selon l'invention comprend la détermination d'un modèle corrigé de la surface externe par transformation du modèle de

référence de la surface externe au moyen du vecteur  $\mu$  issu des itérations et, le cas échéant, la détermination d'un modèle corrigé de la ou des cavités internes par transformation du modèle de référence de la ou des cavités internes au moyen du vecteur  $\mu$  issu des itérations. Le cas échéant, cette quatrième étape comprend en outre, pour chaque sous-partie d'intérêt, la détermination d'un modèle de la sous-partie d'intérêt au moyen du vecteur  $\theta_j$  issu des itérations.

[0065] Notons ici  $CAOS(\mathbf{v})$  le modèle CAO de référence de la surface externe MODS,  $CAOC(\mathbf{v})$  le modèle CAO de référence de la ou des cavités internes MODC, et  $CAO\theta_j(\mathbf{v})$  le modèle CAO de référence de la sous-partie numéro  $j$  MOD $\theta_j$ , où  $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$  est un point de contrôle de la CAO.

[0066]  $CAOE(\mathbf{v})$ , le modèle CAO du modèle effectif MODE, est obtenu partir de  $CAOS(\mathbf{v})$ , de  $CAOC(\mathbf{v})$  et des paramètres contenus dans le vecteur  $\mu$ , et le cas échéant de  $CAO\theta_j(\mathbf{v})$  et des paramètres contenus dans les vecteurs  $\theta_j$ . Une réalisation du modèle  $CAOE(\mathbf{v})$ , par exemple lors d'un procédé d'inspection de la pièce, est donné par ce qui suit.

[0067] Le modèle effectif  $CAOSE(\mathbf{v})$  de la surface externe correspondant au modèle corrigé  $CAOS(T(\mathbf{v}; \mu_d))$  et le modèle effectif  $CAOCE(\mathbf{v})$  de la ou des cavités internes correspondant au modèle corrigé  $CAOC(T(\mathbf{v}; \mu_c))$  sont issus de la transformation des modèles de référence en utilisant une transformation  $T$ , par exemple une transformation rigide et d'échelle, dépendant des paramètres contenus dans les vecteurs  $\mu_d$  et  $\mu_c$ , tels que  $\mu = (\mu_d, \mu_c)$ .

[0068] Ces deux modèles effectifs  $CAOSE(\mathbf{v})$  et  $CAOCE(\mathbf{v})$  sont ensuite exploités pour déterminer  $CAOE(\mathbf{v})$ . Par exemple,  $CAOE(\mathbf{v}) = \text{différence}(CAOSE(\mathbf{v}), \text{intersection}(CAOSE(\mathbf{v}), CAOCE(\mathbf{v})))$  avec les opérations *différence* et *intersection* définies pour les modèles CAO.

[0069] Le cas échéant, le modèle effectif  $CAO\theta_j E(\mathbf{v})$  de chaque sous-partie d'intérêt correspondant au modèle corrigé  $CAO\theta_j(T(\mathbf{v}; \theta_j))$  est issu de la transformation du modèle de référence en utilisant une transformation  $T$  dépendant des paramètres contenus dans le vecteur  $\theta_j$ . Cette transformation dépend de la sous-partie considérée, par exemple l'augmentation de la longueur ou du rayon du cylindre dans le cas d'un trou de perçage tel que représenté dans la figure 3. A ce modèle effectif est associé un opérateur, noté  $F_j$ , modifiant  $CAOE(\mathbf{v})$  de sorte que

$F_j(CAOE(\mathbf{v}), CAO\theta_j E(\mathbf{v}))$  correspond au modèle effectif de la pièce

modifié par le modèle effectif de la sous-partie numéro  $j$ . Par exemple,

$F_j(CAOE(\mathbf{v}), CAO\theta_j E(\mathbf{v})) = \text{différence}(CAOE(\mathbf{v}), \text{intersection}(CAOE(\mathbf{v}), CAO\theta_j E(\mathbf{v})))$

avec les opérations *différence* et *intersection* définies pour les modèles CAO, dans le cas d'un trou de perçage tel que représenté dans la [Fig.3].

- [0070] Le procédé comprend par ailleurs une étape E5 de sanction de la pièce qui exploite le modèle effectif et les modèles effectifs de chaque sous-partie d'intérêt, par exemple de deux manières différentes, d'une part à partir d'informations directement issues du modèle effectif et des modèles effectifs de chaque sous-partie d'intérêt, et d'autre part à partir d'informations issues des différences entre projections simulées à l'aide des modèles effectifs et projections observées.
- [0071] Des indicateurs géométriques qui caractérisent la géométrie de chaque sous-partie, peuvent être calculés à partir de son modèle effectif  $CAO\theta_j E(v)$  et les incertitudes associées peuvent être comparés aux valeurs renseignées dans des documents de cotation afin de sanctionner chaque sous-partie.
- [0072] Par ailleurs, une procédure de contrôle est appliquée sur le modèle effectif. Les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs de la procédure de contrôle appliquée sur le modèle de référence en tenant compte des tolérances. Cela permet un contrôle de parties d'intérêt a posteriori de l'identification des sous-parties.
- [0073] Au cours de l'étape E5, le modèle effectif de la pièce et les paramètres contenus dans les vecteurs  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{a}$  optimaux décrivant la géométrie de projection et les artefacts d'images sont par ailleurs utilisés pour générer de nouvelles projections simulées et évaluer leurs écarts avec les projections observées. Le procédé comprend ainsi les étapes suivantes :
- [0074] • la génération de troisièmes projections simulées de la pièce correspondant aux projections d'atténuation calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle effectif de la pièce ;
- la comparaison des projections calculées à partir des images acquises et des troisièmes projections simulées à partir du modèle effectif de la pièce.
- [0075] En particulier, les différences entre les projections simulées à partir du modèle effectif de la pièce et les projections observées peuvent être comparées à un niveau de bruit présent dans une projection. Cette mesure a pour avantage de dépendre du pixel considéré. Si les différences sont inférieures au niveau de bruit, alors elles sont considérées comme non significatives. Dans le cas contraire, cela signifie que le modèle effectif n'a pas su capturer la variabilité de forme nécessaire à cette comparaison.

## Revendications

[Revendication 1] Procédé de contrôle non destructif d'une pièce (200) fondé sur une modélisation volumique de la pièce (200), comprenant :

- l'acquisition (E1), par un dispositif de radiographie aux rayons X (100), d'images de la pièce selon différents angles de projection ( $I^{(n)}$ ) ;
- le calcul de projections à partir des images acquises selon les différents angles de projection ( $P^{(n)}$ ) ;
- à chacune de plusieurs itérations (E3a):
  - la génération de premières projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir d'un modèle de référence d'une surface externe de la pièce (MODS) et d'un vecteur  $\#$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe;
  - la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;
  - la modification du vecteur  $\#$  en vue de réduire ledit écart ;
- la détermination d'un modèle corrigé de la surface externe par transformation du modèle de référence de la surface externe au moyen du vecteur  $\#$  issu des itérations ;
- la détermination (E4) d'un modèle effectif (MODE) de la pièce au moyen du modèle corrigé de la surface externe.

[Revendication 2] Procédé selon la revendication 1 :

- dans lequel la génération, à chacune des itérations, des premières projections simulées, est également réalisée à partir d'un modèle de référence d'une ou plusieurs cavités internes de la pièce (MODC) et dans lequel le vecteur  $\#$  comprend également des paramètres de transformation du modèle de référence de la ou des cavités internes (MODC) ;
- comprenant en outre la détermination d'un modèle corrigé de la ou des cavités internes par transformation du modèle de

référence de la ou des cavités internes au moyen du vecteur  $\mu$  issu des itérations; et

- dans lequel la détermination (E4) du modèle effectif (MODE) de la pièce est également réalisée au moyen du modèle corrigé de la ou des cavités internes.

[Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel à chacune des itérations :

- la détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises comprend, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection correspondant à l'écart entre la première projection simulée pour cet angle de projection et la projection calculée à partir de l'image acquise pour cet angle de projection ; et
- la modification du vecteur  $\mu$  comprend :
  - pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la première projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\mu$  ;
  - le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\mu^*$  comme étant le vecteur  $\delta\mu$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité;
  - la mise à jour du vecteur  $\mu$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\mu^*$ .

[Revendication 4] Procédé selon la revendication 3, dans lequel le calcul du vecteur correctif  $\delta\mu^*$  comprend la minimisation de la somme sur les angles de projection des normes au carré des différences pondérées entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\mu$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection.

[Revendication 5] Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel chaque itération comprend en outre suite à la modification du vecteur  $\mu$  :

- la génération de deuxièmes projections simulées de la pièce

correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle de référence de la surface externe (MODS), d'un modèle d'une sous-partie numéro  $j$  d'intérêt de la pièce ( $\text{MOD}\theta_j$ ), du vecteur  $\theta$  modifié et d'un vecteur  $\theta_j$  de paramètres géométriques de la sous-partie numéro  $j$  d'intérêt de la pièce ;

- la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;
- la modification du vecteur  $\theta_j$  en vue de réduire ledit écart.

[Revendication 6]

Procédé selon la revendication 5, dans lequel à chacune des itérations :

- la détermination d'un écart entre les deuxièmes projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises comprend, pour chaque angle de projection, le calcul d'un résidu de projection correspondant à l'écart entre la deuxième projection simulée pour cet angle de projection et la projection calculée à partir de l'image acquise pour cet angle de projection ; et
- la modification du vecteur  $\theta_j$  comprend :
  - pour chaque angle de projection, le calcul de champs de sensibilité de la deuxième projection simulée pour cet angle de projection à une variation des paramètres contenus dans le vecteur  $\theta_j$  ;
  - le calcul d'un vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  comme étant le vecteur  $\delta\theta_j$  minimisant un écart entre les résidus de projection et le produit de  $\delta\theta_j$  par les champs de sensibilité;
  - la mise à jour du vecteur  $\theta_j$  en utilisant le vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$ .

[Revendication 7]

Procédé selon la revendication 6, dans lequel le calcul du vecteur correctif  $\delta\theta_j^*$  comprend la minimisation de la somme sur les angles de

projection des normes au carré des différences pondérées entre, pour chaque angle de projection, le résidu de projection calculé pour cet angle de projection et le produit de  $\delta\theta_j$  par les champs de sensibilité calculés pour cet angle de projection.

- [Revendication 8] Procédé selon l'une des revendication 5 à 7, comprenant en outre la détermination d'un modèle corrigé de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  par transformation du modèle de référence de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$  au moyen du vecteur  $\theta_j$  issu des itérations et dans lequel la détermination (E4) du modèle effectif (MODE) de la pièce est également réalisée au moyen du modèle corrigé de la sous-partie d'intérêt numéro  $j$ .
- [Revendication 9] Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel la génération des premières projections simulées est en outre réalisée à partir d'un vecteur  $P$  de paramètres caractérisant la géométrie de projection de l'acquisition.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 9, comprenant en outre, au moyen d'un vecteur de paramètres d'un modèle d'artefacts d'image, une correction d'artefacts dans les projections calculées à partir des images acquises ou une génération d'artefacts dans les premières projections simulées.
- [Revendication 11] Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, comprenant en outre une sanction de la pièce au moyen du modèle effectif de la pièce.
- [Revendication 12] Procédé selon la revendication 11, dans lequel la sanction de la pièce comprend :
- la génération de troisièmes projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir du modèle effectif de la pièce ;
  - la comparaison des projections calculées à partir des images acquises et des troisièmes projections simulées à partir du modèle effectif de la pièce.
- [Revendication 13] Système de contrôle non destructif fondé sur une modélisation volumique d'une pièce, comprenant :
- un dispositif de radiographie aux rayons X apte à acquérir des images d'atténuation de la pièce selon différents angles de projection ; et

- un processeur configuré pour effectuer les étapes suivantes :
  - calcul de projections à partir des images acquises selon les différents angles de projection ;
  - à chacune de plusieurs itérations :
    - génération de premières projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir d'un modèle de référence d'une surface externe de la pièce et d'un vecteur  $\#$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe;
    - détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises;
    - modification du vecteur  $\#$  en vue de réduire ledit écart ;
  - détermination d'un modèle corrigé de la surface externe par transformation du modèle de référence de la surface externe au moyen du vecteur  $\#$  issu des itérations ;
  - détermination d'un modèle effectif de la pièce au moyen du modèle corrigé de la surface externe.

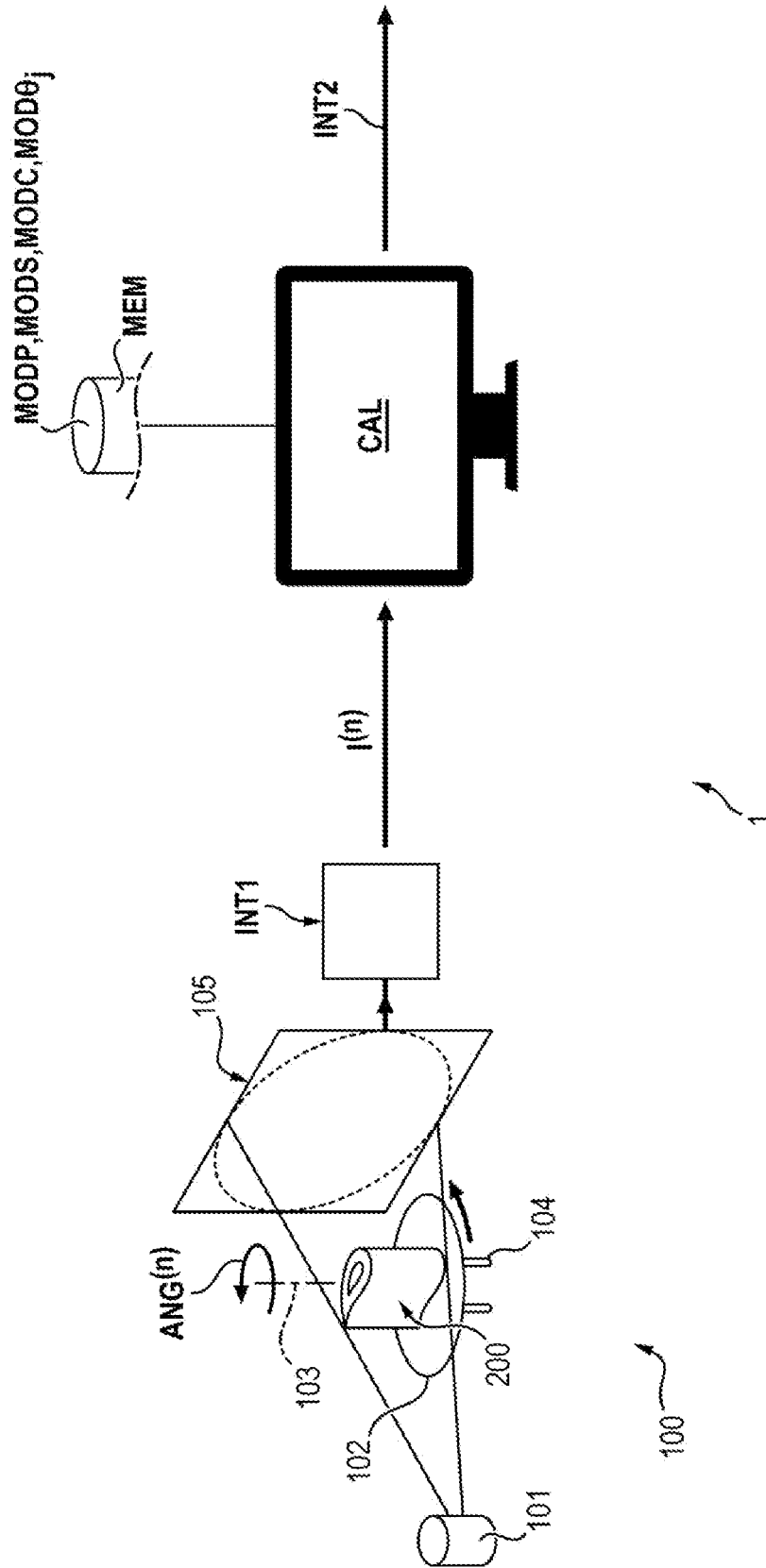
[Revendication 14] Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre les étapes suivantes :

- réception d'images d'une pièce acquises selon différents angles de projection par un dispositif de radiographie aux rayons X ;
- calcul de projections à partir des images acquises selon les différents angles de projection ;
- à chacune de plusieurs itérations :
  - génération de premières projections simulées de la pièce correspondant aux projections calculées à partir des images acquises selon les différents angles de projection, à partir d'un modèle de référence d'une

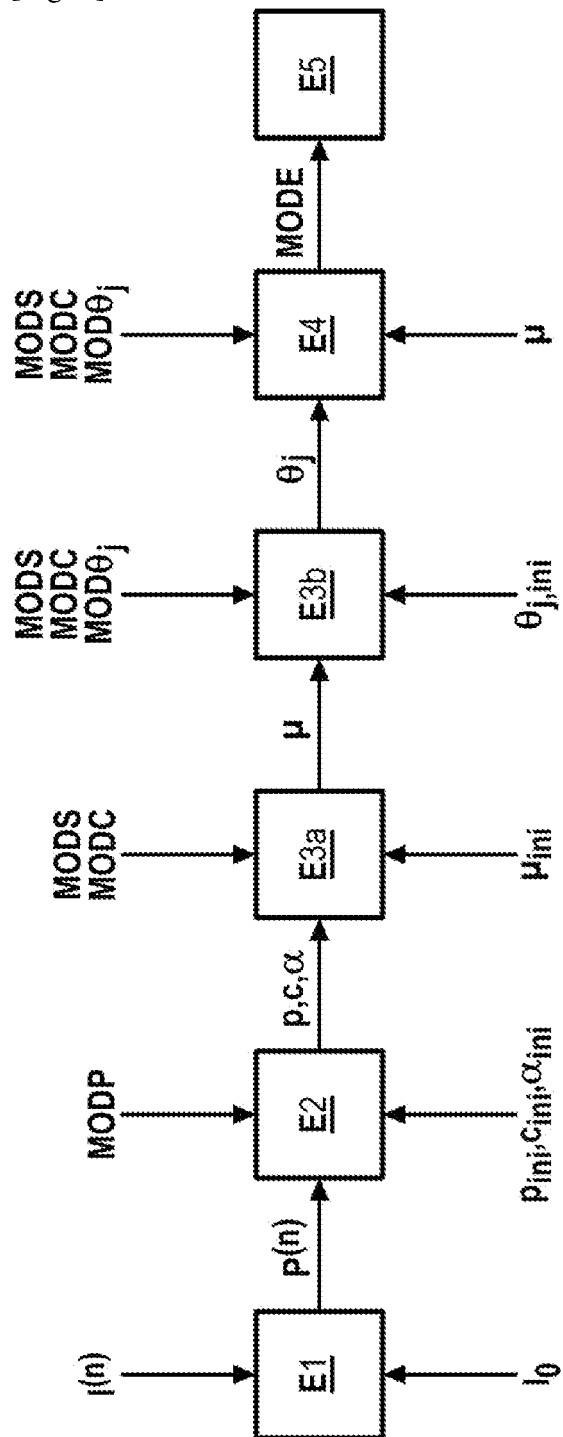
surface externe de la pièce et d'un vecteur  $\mu$  de paramètres de transformation du modèle de référence de la surface externe;

- détermination d'un écart entre les premières projections simulées et les projections calculées à partir des images acquises ;
- modification du vecteur  $\mu$  en vue de réduire ledit écart ;
- détermination d'un modèle corrigé de la surface externe par transformation du modèle de référence de la surface externe au moyen du vecteur  $\mu$  issu des itérations ;
- détermination d'un modèle global de la pièce au moyen du modèle corrigé de la surface externe.

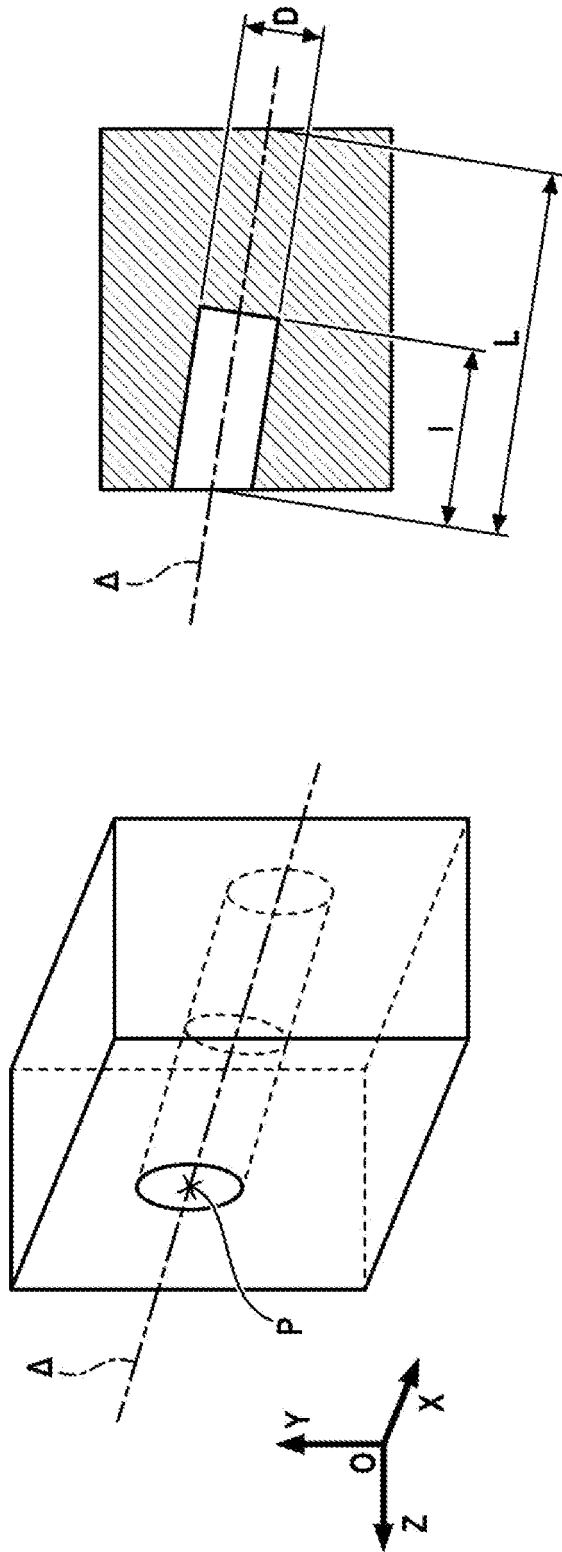
[Fig. 1]



[Fig. 2]



[Fig. 3]



## RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement  
national

**FA 907634**  
**FR 2204535**

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Revendication(s)<br>concernée(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                                                            | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                 |
| <b>X</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>WO 2018/014138 A1 (LYNX INSPECTION INC [CA]) 25 janvier 2018 (2018-01-25)</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>1, 2, 5,<br/>8-10, 13,<br/>14<br/>3, 4, 6, 7</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>G01N23/046</b>                               |
| <b>A</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>* revendication 1; figure 1 *</b><br>-----                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                 |
| <b>X</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>WO 2020/217036 A1 (TIAMA [FR]) 29 octobre 2020 (2020-10-29)</b><br><b>* revendications 1, 6 *</b><br>-----                                                                                                                                                                                      | <b>1, 11-14</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                 |
| <b>A, D</b>                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>FRAGNAUD CÉDRIC ET AL: "CAD-based x-ray CT calibration and error compensation", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 33, no. 6, 29 mars 2022 (2022-03-29), XP020419397, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/1361-6501/AC5133 [extrait le 2022-03-29] * section 3 *</b><br>----- | <b>3, 6</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)</b>     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>G01N<br/>G01B<br/>G06T</b>                   |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Examineur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                 |
| <b>6 décembre 2022</b>                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Steinmetz, Johannes</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                 |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS<br>X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>.....<br>& : membre de la même famille, document correspondant |                                                 |

# **ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE** **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2204535 FA 907634**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **06-12-2022**  
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche |           | Date de<br>publication |           | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) |  | Date de<br>publication |
|-------------------------------------------------|-----------|------------------------|-----------|-----------------------------------------|--|------------------------|
| <b>WO 2018014138</b>                            | <b>A1</b> | <b>25-01-2018</b>      | <b>CA</b> | <b>3031397 A1</b>                       |  | <b>25-01-2018</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>EP</b> | <b>3488233 A1</b>                       |  | <b>29-05-2019</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>US</b> | <b>2020184617 A1</b>                    |  | <b>11-06-2020</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>WO</b> | <b>2018014138 A1</b>                    |  | <b>25-01-2018</b>      |
| -----                                           |           |                        |           |                                         |  |                        |
| <b>WO 2020217036</b>                            | <b>A1</b> | <b>29-10-2020</b>      | <b>CA</b> | <b>3129754 A1</b>                       |  | <b>29-10-2020</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>CN</b> | <b>113728358 A</b>                      |  | <b>30-11-2021</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>EP</b> | <b>3959685 A1</b>                       |  | <b>02-03-2022</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>FR</b> | <b>3095508 A1</b>                       |  | <b>30-10-2020</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>JP</b> | <b>2022532997 A</b>                     |  | <b>21-07-2022</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>US</b> | <b>2022237761 A1</b>                    |  | <b>28-07-2022</b>      |
|                                                 |           |                        | <b>WO</b> | <b>2020217036 A1</b>                    |  | <b>29-10-2020</b>      |
| -----                                           |           |                        |           |                                         |  |                        |