

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 28.06.18.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 03.01.20 Bulletin 20/01.

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) : B<>COM FCS — FR et ORANGE Société anonyme — FR.

72 Inventeur(s) : GILLES ANTONIN et GIOIA PATRICK.

73 Titulaire(s) : B<>COM FCS, ORANGE Société anonyme.

74 Mandataire(s) : JACOBACCI CORALIS HARLE.

54 **PROCEDE DE GENERATION D'UN HOLOGRAMME NUMERIQUE, DISPOSITIF, SYSTEME DE RESTITUTION HOLOGRAPHIQUE ET PROGRAMME D'ORDINATEUR ASSOCIES.**

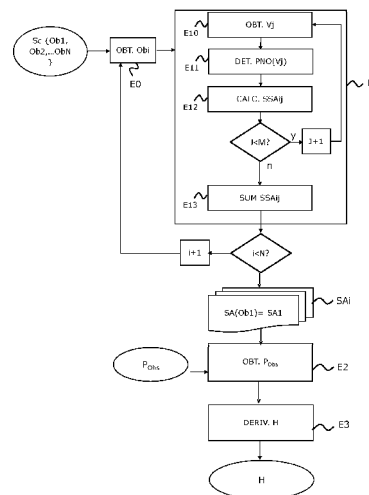
57 L'invention concerne un procédé de génération d'un hologramme numérique représentatif d'une scène 3D comprenant au moins un objet (Obj), un objet étant défini par une pluralité de points et leur intensité associée, ledit procédé comprenant :

Par objet, une étape préalable de calcul d'un spectre angulaire « omnidirectionnel » du champ lumineux émis par un objet de la scène à la surface d'un solide géométrique centré sur ledit objet, une surface dudit solide étant échantillonnée selon une grille prédéterminée, un échantillon de la grille étant associé à un vecteur de fréquences ($f = (f_{>x}, f_{>y}, f_{>z})$);

Pour la scène, les étapes suivantes :

- Obtention d'une pose (Pu) d'un observateur dans le référentiel monde (Rm);
- Dérivation de l'hologramme (H) de la scène en fonction de la pose obtenue à partir des spectres angulaires « multidirectionnels » ($SA_{>j}$) calculés par objet.

L'invention est particulière en ce que l'étape de calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène prend en compte une pluralité de directions de visualisation prédéterminées (Vj).



Procédé de génération d'un hologramme numérique, dispositif, système de restitution holographique et programme d'ordinateur associés

1. Domaine de l'invention

5 Le domaine de l'invention est celui de l'holographie numérique, en particulier de la génération d'un hologramme numérique à partir des informations géométriques d'une scène 3D.

L'invention concerne une méthode de calcul rapide d'un hologramme numérique et peut notamment, mais non exclusivement, s'appliquer à la restitution temps réel d'une scène 3D sur un visiocasque dans un contexte de réalité virtuelle ou augmentée. . Le visiocasque holographique
10 immerge l'utilisateur dans un monde tridimensionnel virtuel superposé ou non à l'environnement réel, dans lequel il peut se déplacer librement. En fonction des mouvements et déplacements de l'utilisateur, l'hologramme affiché sur le visiocasque doit être recalculé en temps réel, nécessitant une grande puissance de calcul.

15 2. Présentation de l'art antérieur

On connaît de la demande de brevet américain publiée sous le numéro US2016/0231706 A1 une méthode de génération d'un hologramme numérique à partir d'un spectre angulaire omnidirectionnel pré-calculé d'un objet d'une scène 3D. Les informations de description de la scène comprennent un maillage de l'objet. Comme illustré par la Figure **1**, le spectre angulaire
20 omnidirectionnel de l'objet correspond à la décomposition en ondes planes du champ lumineux émis par la scène. Chaque onde plane est représentée par un vecteur de coordonnées fréquentielles correspondant à sa direction de propagation et par une amplitude complexe. Selon cette méthode, le spectre angulaire du champ lumineux émis par l'objet est calculé sur la surface d'une sphère centrée sur cet objet. La surface de cette sphère est échantillonnée par subdivisions successives d'un
25 icosaèdre régulier, un sommet du maillage icosaèdre étant associé à un vecteur de coordonnées fréquentielles du spectre.

Comme illustré par la Figure **2**, le plan de l'hologramme est perpendiculaire à un axe qui passe par le centre de la sphère. La position de ce plan est définie par un angle de rotation et par une distance au centre de la sphère.

30 Pour chaque point de l'objet, on considère un cône de visualisation centré sur une normale à la surface de ce point et dont l'angle est égal ou inférieur à un angle de diffraction maximum de l'hologramme, lui-même lié à la taille des pixels de l'hologramme et à la longueur d'onde. Les

vecteurs de coordonnées fréquentielles inclus dans ce cône sont sélectionnés. Ils sont ensuite testés pour déterminer s'ils coupent un maillage de l'objet. Ceux qui n'intersectent pas l'objet, ne sont pas occultés donc servent à calculer un coefficient de Fourier du spectre angulaire du champ lumineux émis par l'objet. Les coefficients de Fourier obtenus pour chacune des mailles de l'objet sont accumulés pour former le spectre angulaire « omnidirectionnel ».

A partir de ce spectre angulaire, il est possible de dériver un hologramme situé dans un plan perpendiculaire à un axe passant par le centre de la sphère, tel que celui de la Figure 2, dont la position angulaire et la distance au centre de la sphère sont connus. La connaissance de cette position angulaire du plan de l'hologramme est exploitée pour faire tourner le spectre angulaire omnidirectionnel vers le plan de l'hologramme et pour le convertir en un spectre planaire défini dans un plan tangent à la sphère et parallèle au plan de l'hologramme, tel qu'illustré par la Figure 3. Le spectre angulaire planaire obtenu est ensuite propagé sur la distance qui le sépare du plan de l'hologramme le long d'un axe qui passe par le centre de la sphère. L'hologramme est généré par application d'une transformée de Fourier (inverse) au spectre propagé.

Un premier avantage de cette solution est qu'elle pré-calcule un spectre angulaire omnidirectionnel de l'objet de la scène, à partir duquel elle dérive en temps réel n'importe quel hologramme dont le plan est parallèle à une tangente de la sphère qui englobe l'objet.

Un deuxième avantage de cette solution est qu'elle gère les occultations de tout ou partie de l'objet depuis le point de vue de l'observateur, ce qui fait que l'hologramme généré offre une visualisation réaliste de la scène.

3. Inconvénients de l'art antérieur

Un premier inconvénient de la méthode proposée est qu'elle ne prévoit qu'un seul objet, ce qui limite ses possibilités d'usage.

Un deuxième inconvénient de cette méthode est que la gestion des occultations s'effectue à l'aide d'un test d'intersection entre chaque rayon lumineux et la géométrie de la scène, ce qui est extrêmement coûteux en temps de calcul.

Un troisième inconvénient de cette méthode est qu'elle calcule le spectre angulaire omnidirectionnel sur la surface d'une sphère échantillonnée par subdivisions successives d'un icosaèdre régulier. Pour dériver le spectre planaire de l'hologramme, l'extraction d'ondes planes à partir de cet échantillonnage nécessite l'utilisation d'un algorithme de parcours de graphe pour parcourir l'ensemble des sommets du maillage, ce qui est relativement complexe.

Un quatrième inconvénient de cette méthode est que le pré-calcul du spectre angulaire omnidirectionnel de la scène est dépendant de la taille des pixels de l'hologramme, ce qui empêche le spectre angulaire omnidirectionnel ainsi calculé d'être réutilisable pour des hologrammes présentant des dimensions et résolutions, donc des tailles de pixel différentes de celle initialement prévue.

Un cinquième inconvénient de cette méthode est qu'elle restreint les positions possibles du plan de l'hologramme, comme le montre l'équation 2 du document US2016/0231706, à une rotation dans un plan de la sphère et une translation selon ces rayons. Elle ne permet donc pas de générer un hologramme dont l'axe optique n'est pas orienté vers le centre de l'objet.

10 **4. Objectifs de l'invention**

L'invention vient améliorer la situation.

L'invention a notamment pour objectif de pallier ces inconvénients de l'art antérieur.

Plus précisément, un objectif de l'invention est de proposer une solution qui soit moins complexe tout en garantissant la génération d'un hologramme qui offre une visualisation de qualité de la scène.

Un autre objectif de l'invention est de proposer une solution de génération d'un hologramme adaptée à la visualisation d'une scène comprenant plusieurs objets.

Encore un autre objectif de l'invention est de proposer une solution de génération d'un hologramme qui permette une visualisation de la scène depuis n'importe quelle position.

20 **5. Exposé de l'invention**

Ces objectifs, ainsi que d'autres qui apparaîtront par la suite, sont atteints à l'aide d'un procédé de génération d'un hologramme numérique représentatif d'une scène 3D, ladite scène comprenant au moins un objet, ledit objet étant défini par un ensemble de points et leur intensité associée, ledit procédé comprenant :

25 Par objet, une étape préalable de calcul d'un spectre angulaire « omnidirectionnel » du champ lumineux émis par l'objet à la surface d'un solide géométrique centré sur ledit objet, une surface dudit solide étant échantillonnée selon une grille prédéterminée, un échantillon de la grille étant associé à un vecteur de fréquences et à une amplitude correspondant à une somme de contributions au champ lumineux de points de l'objet selon une direction égale à celle du vecteur de fréquences ;

30

Pour la scène, les étapes suivantes :

- Obtention d'une pose d'un observateur;
- Dérivation d'un spectre angulaire de l'hologramme de la scène en fonction de la pose obtenue et à partir des spectres angulaires « omnidirectionnels » calculés par objet.

5 Selon l'invention, l'étape de calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène comprend, pour une pluralité de directions de visualisation prédéterminées, les sous-étapes suivantes :

- par direction de visualisation:
 - o Une détermination d'un sous-ensemble de points de l'objet, comprenant les points non occultés ;
 - 10 o Un calcul d'un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points du sous-ensemble déterminé; et
- Une sommation sur la pluralité de directions angulaires prédéterminées des amplitudes des sous-spectres angulaires calculés, associées à un même échantillon de la grille.

15 L'invention s'appuie sur l'approche décrite dans l'art antérieur pour la génération d'hologrammes, qui consiste, à pré-calculer un spectre angulaire omnidirectionnel par objet d'une scène sur la surface d'un solide géométrique dont les échantillons sont associés à des vecteurs de fréquences du spectre et, sur réception d'une pose d'un observateur, de dériver des spectres calculés par objet un hologramme de la scène entière adapté à cette pose. En outre, pour le pré-calcul du spectre angulaire omnidirectionnel par objet, l'invention propose de façon tout-à-fait nouvelle et

20 inventive, de ne gérer les occultations de façon exacte que pour un nombre limité de directions de visualisation de la scène. Pour chaque direction de visualisation, elle détermine un sous-ensemble des points de l'objet non occultés puis pré-calculer un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points de ce sous-ensemble. Le spectre angulaire émis par l'objet est ensuite obtenu par accumulation des contributions de chacun de ces sous spectres.

25 Contrairement à l'art antérieur qui gère les occultations de façon exacte par vecteur de fréquences associé à un échantillon de la surface d'une sphère, l'invention propose ainsi une approximation qui permet de rendre le procédé de génération d'un hologramme, en particulier l'étape de pré-calcul, moins complexe.

30 Le solide géométrique utilisé peut être de tout type, par exemple une sphère ou un solide géométrique à faces, tel qu'un cube ou un octaèdre.

Selon un aspect de l'invention, l'étape de détermination du sous-ensemble de points non occultés comprend les sous-étapes suivantes :

- Un rendu 2D+Z de l'objet par projection des points de l'objet selon la direction de visualisation et formation d'une image d'intensités et d'une carte de profondeurs des points projetés ; et
- La projection inverse des points de l'image d'intensité formée en des points de l'objet dans un repère de l'objet et calcul de leurs coordonnées en fonction de la carte de profondeur.

5

Selon ce mode de réalisation de l'invention, le sous-ensemble des points non occultés d'un objet pour une direction de visualisation donnée, est déterminé à l'aide d'une technique de rendu 2D+Z par projection sur une image d'intensités et une carte de profondeurs intermédiaires, suivie d'une projection inverse. Cette projection peut être par exemple perspective ou orthographique. Un avantage de cette approche est qu'elle est simple à mettre en œuvre et que, contrairement à l'art antérieur, elle ne nécessite pas de connaître un modèle maillé de la scène 3D. Le sous-ensemble de points obtenu sert de base à l'invention pour pré-calculer le sous-spectre angulaire associé à la direction de visualisation.

10

Selon un autre aspect de l'invention, l'étape de calcul du sous-spectre angulaire comprend une sous-étape de détermination d'une zone de validité des occultations associées à une direction de visualisation sur la surface du solide géométrique et le calcul des amplitudes des échantillons est effectué pour les échantillons compris dans ladite zone.

15

Un avantage est de délimiter une zone à la surface du solide géométrique dans laquelle les occultations calculées pour une direction de visualisation donnée sont valides, afin de garantir la génération d'un hologramme de bonne qualité.

20

Selon encore un autre aspect de l'invention, les échantillons compris dans la zone de validité vérifient la condition suivante :

$$V_{j,x}x + V_{j,y}y + V_{j,z}z > 0$$

Où (x,y,z) désigne la position de l'échantillon et $(V_{j,x}, V_{j,y}, V_{j,z})$ la direction de visualisation (V_j) dans un repère (R_i) de l'objet (O_{bi}) .

25

Un avantage de cette condition particulière est qu'elle est simple à implémenter. En outre, la portion de la surface du solide géométrique considérée comme valide est incluse dans un cône centré sur la direction de visualisation (V_j) .

Ce cône particulier présente un angle de 90 degrés par rapport à la direction de visualisation, ce qui permet de garantir un recouvrement des spectres angulaires directionnels, même pour un nombre de visualisations faible et donc d'éviter les « sauts » ou ruptures de continuité dans la visualisation

30

de l'hologramme, lorsque la pose de l'observateur change et fait intervenir pour le calcul de l'hologramme, une autre direction de visualisation.

5 Selon un autre aspect de l'invention, le solide géométrique comprend une pluralité de faces planes et la grille prédéterminée est découpée en une pluralité de sous-grilles formant un quadrillage régulier, une sous-grille étant associée à une face du solide.

10 Un avantage d'une grille d'échantillonnage à quadrillage régulier est que le calcul du spectre angulaire de chaque objet est simplifié, car la grille prédéterminé ne comprend pas de subdivisions successives d'un icosaèdre régulier, ni ne nécessite l'utilisation d'un algorithme de parcours de graphe pour parcourir l'ensemble des sommets du maillage et calculer les amplitudes complexes des ondes planes associées aux échantillons. En outre, le stockage de ses échantillons et l'accès à leurs amplitude sont facilités.

Selon encore un autre aspect de l'invention, l'amplitude associée à un échantillon de la sous-grille d'une face du solide, pour le calcul du sous-spectre angulaire selon une dite direction de visualisation, est définie par la formule suivante :

15

$$A_{i,j}(x, y, z) = \sum_{k=1}^{M_x M_y} \sqrt{I_{i,j}(u_k, v_k)} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (f_x x_k + f_y y_k + f_z z_k)\right),$$

Avec M_x , M_y les dimensions des images d'intensité et de profondeur, λ la longueur d'onde utilisée, et $\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ les fréquences associées à l'échantillon (x, y, z) .

20 Un avantage est que cette amplitude ne dépend pas de la résolution ni de la taille des pixels de l'hologramme à dériver. Le spectre angulaire obtenu par sommation des sous-spectres est donc utilisable pour générer un hologramme de dimensions quelconques.

Selon encore un autre aspect de l'invention, le solide géométrique est un cube.

25 Un avantage de ses faces carrées est qu'elles facilitent encore le stockage des échantillons du spectre angulaires et leur accès lors de l'étape de dérivation du spectre de l'hologramme. Il existe en effet des structures de mémoire de type « cube map » dédiées à ce format, et très performantes en termes de stockage.

Selon encore un autre aspect de l'invention, la pluralité de directions de visualisation comprend autant de directions que le solide compte de faces.

30 Un avantage de ce mode de réalisation est qu'il est simple à mettre en œuvre tout en garantissant une répartition uniforme dans l'espace des directions de visualisation.

Selon un autre aspect de l'invention, l'étape de dérivation d'un spectre angulaire de l'hologramme de la scène comprend une dérivation d'un spectre angulaire d'un sous-hologramme par objet de la scène à partir du spectre angulaire dudit objet, une sommation des spectres angulaires des sous-hologrammes dérivés et l'application d'une transformée de Fourier inverse au spectre angulaire dérivé pour obtenir l'hologramme.

Un avantage de ce mode de réalisation est sa simplicité, parce que les spectres angulaires des objets de la scène sont gérés individuellement. Un autre avantage est qu'on peut très facilement manipuler les objets de la scène comme par exemple faire apparaître ou disparaître un objet de la scène, ou encore le déplacer dans la scène indépendamment des autres.

Selon encore un autre aspect de l'invention, le spectre angulaire de l'hologramme est dérivé à partir des spectres angulaires « multidirectionnels » calculés par objet selon la formule suivante :

$$\hat{H}(f_{h,x}, f_{h,y}) = \sum_{i=1}^N SA_i \left(\frac{f_x}{\lambda F}, \frac{f_y}{\lambda F}, \frac{f_z}{\lambda F} \right) \exp \left(j2\pi \left(s_x f_{h,x} + s_y f_{h,y} + s_z \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \right) \right),$$

Où :

$\mathcal{R}_h = (O; \vec{x}_h, \vec{y}_h, \vec{z}_h)$ désigne un repère local de l'hologramme dont l'origine est situé au centre de l'hologramme H, dont les axes définis par \vec{x}_h et \vec{y}_h coïncident avec l'axe horizontal et vertical de l'hologramme, respectivement, et dont l'axe défini par \vec{z}_h coïncide avec l'axe optique de l'hologramme. On note $\vec{x}_h = \begin{pmatrix} x_{h0} \\ x_{h1} \\ x_{h2} \end{pmatrix}$, $\vec{y}_h = \begin{pmatrix} y_{h0} \\ y_{h1} \\ y_{h2} \end{pmatrix}$ et $\vec{z}_h = \begin{pmatrix} z_{h0} \\ z_{h1} \\ z_{h2} \end{pmatrix}$.

$$F = \max(f_x, f_y, f_z),$$

$\begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & x_{h1} & x_{h2} \\ y_{h0} & y_{h1} & y_{h2} \\ z_{h0} & z_{h1} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{pmatrix}$ désigne la position du centre de l'objet Obi dans le repère \mathcal{R}_h , et

$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & y_{h0} & z_{h0} \\ x_{h1} & y_{h1} & z_{h1} \\ x_{h2} & y_{h2} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{h,x} \\ f_{h,y} \\ \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \end{pmatrix}$ désignent les coordonnées fréquentielles du spectre

angulaire de l'hologramme dans le repère (Ri) de l'objet Obi .

Un avantage de ce mode de réalisation est qu'il permet de générer un hologramme adapté à n'importe quelle pose de l'observateur.

L'invention concerne également un dispositif de génération d'un hologramme numérique adapté pour mettre en œuvre le procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'un quelconque des modes particuliers de réalisation définis ci-dessus.

Ce dispositif de génération d'un hologramme pourra bien sûr comporter les différentes caractéristiques relatives au procédé selon l'invention. Ainsi, les caractéristiques et avantages de ce dispositif sont les mêmes que ceux du procédé, et ne sont pas détaillés plus amplement.

5 Corrélativement, l'invention concerne aussi un système de restitution holographique comprenant un dispositif de génération d'un hologramme selon l'invention.

Selon un aspect de l'invention, ledit système comprend un visiocasque destiné à être porté sur la tête de l'observateur, ledit visiocasque comprenant un module de stockage adapté au stockage du spectre angulaire omnidirectionnel pré-calculé pour le au moins un objet de la scène.

10 Un avantage est que les spectres angulaires des objets étant stockés localement, le visiocasque peut dériver en temps réel un hologramme adapté à la pose de l'observateur.

15 L'invention concerne aussi un programme d'ordinateur comportant des instructions pour la mise en œuvre des étapes d'un procédé de génération d'un hologramme numérique tel que décrit précédemment, lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

Ce programme peut utiliser n'importe quel langage de programmation. Il peut être téléchargé depuis un réseau de communication et/ou enregistré sur un support lisible par ordinateur.

20 L'invention se rapporte enfin à un support d'enregistrement, lisible par un processeur, intégrés ou non au dispositif de génération d'un hologramme numérique selon l'invention, éventuellement amovible, mémorisant respectivement un programme d'ordinateur mettant en œuvre un procédé de génération d'un hologramme numérique, tels que décrits précédemment.

6. Liste des figures

25 D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation particulier de l'invention, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des dessins annexés, parmi lesquels :

- les figures **1** à **3** déjà décrites illustrent de façon schématique une méthode de génération d'un hologramme à partir d'un spectre angulaire calculé sur une sphère, selon l'art antérieur ;
 - la figure **4** présente de façon schématique les étapes d'un procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'invention ;
- 30

- les figures **5A** à **5C** illustrent de façon schématique des exemples de solides géométriques vus en coupes et de direction de visualisation, mis en œuvre par l'invention ;
- la figure **6** décrit de façon plus détaillée l'étape de pré-calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux émis par un objet de la scène sur la surface d'un solide géométrique selon un mode de réalisation de l'invention;
- la Figure **7** illustre de façon schématique un exemple de rendu 2D+Z en projection perspective ou orthographique de l'objet Ob_i selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la Figure **8** illustre de façon schématique l'étape de projection inverse des points de l'image d'intensités et de la carte de profondeurs d'un objet Ob_i d'une vue v_j dans le repère monde, selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la figure **9** illustre de façon schématique un exemple d'échantillonnage selon une grille régulière des faces d'un solide géométrique et de zone de validité pour le pré-calcul du spectre angulaire émis par un objet, selon un mode de réalisation de l'invention;
- la figure **10** illustre de façon plus détaillée l'étape de dérivation de l'hologramme à partir du spectre angulaire omnidirectionnel de chacun des objets de la scène, selon un mode de réalisation de l'invention ;
- La figure **11** illustre de façon schématique l'agencement d'un objet de la scène, d'un solide géométrique à faces centré sur l'objet et du plan de l'hologramme dans un repère monde, selon un mode de réalisation de l'invention ;
- les figures **12** et **13** illustrent de façon schématique des exemples de structures matérielles d'un dispositif de génération d'un hologramme numérique selon un mode de réalisation de l'invention.

7. Description d'un mode de réalisation particulier de l'invention

Le principe général de l'invention repose sur une étape de pré-calcul, dans laquelle le spectre angulaire omnidirectionnel émis par chaque objet de la scène est calculé sur la surface d'un solide géométrique échantillonnée selon une grille régulière. Le spectre angulaire omnidirectionnel correspond à la décomposition en ondes planes du champ lumineux émis par chaque objet. Chaque onde plane est représentée par un vecteur de coordonnées fréquentielles correspondant à sa direction de propagation et par son amplitude complexe. Lors de cette étape de pré-calcul, les occultations de la scène sont prises en compte pour un ensemble de directions prédéterminées. Selon l'invention, pour un objet donné, il est calculé autant de sous-spectres angulaires que de directions.

Les contributions de chacun des sous-spectres associés à la pluralité de direction angulaires sont ensuite cumulées pour former le spectre angulaire de l'objet.

Sur réception d'une nouvelle pose d'un observateur U, l'invention dérive un hologramme dans un plan correspondant à cette pose, à partir du spectre angulaire pré-calculé par objet. Les
5 hologrammes associés à chaque objet sont sommés pour former l'hologramme de la scène entière.

En relation avec la Figure **4**, on décrit un procédé de génération d'un hologramme d'une scène 3D comprenant plusieurs objets Ob1, Ob2, ... , ObN avec N entier non nul, selon un mode de réalisation de l'invention.

Dans la suite, on considère un repère monde Rm, en trois dimensions (3D), dans lequel on peut
10 localiser un plan d'affichage d'un hologramme d'une scène 3D et un observateur U de l'hologramme.

On suppose que chaque objet de la scène est défini par un nuage de points associés à des intensités dans un repère 3D de l'objet, lui-même localisé dans le repère monde Rm. Bien sûr, l'invention n'est pas limitée à ce type de données représentatives de la scène et s'applique aussi bien par exemple à une représentation maillée de chaque objet. Dans ce cas, les points et leurs intensités associées sont
15 obtenus à partir du maillage.

Selon l'invention, le procédé de génération d'un hologramme comprend les étapes suivantes :

- une étape E0 d'obtention d'un objet Obi parmi la pluralité d'objets que compte la scène ;
- Une étape préalable E1 de pré-calcul d'un spectre angulaire omnidirectionnel de l'objet Obi sur la surface d'un solide géométrique. Dans la suite de la description, on considère plusieurs exemples de
20 solides. Selon un premier exemple illustré par la Figure **5A**, il s'agit d'une sphère. Selon un deuxième exemple illustré par la Figure **5B**, il s'agit d'un solide géométrique à faces, en particulier un cube. Selon un troisième exemple illustré par la Figure **5C**, il s'agit d'un prisme pentagonal. Bien sûr, l'invention n'est pas limitée à ces exemples et s'applique à tout type de solide géométrique, comprenant ou non des faces.

Le spectre angulaire omnidirectionnel correspond à la décomposition en ondes planes du champ lumineux émis par chaque objet Ob1, Ob2...ObN de la scène Sc. Chaque onde plane est représentée par une coordonnée fréquentielle 3D $\mathbf{f} = (f_x, f_y, f_z)$ correspondant à sa direction de propagation, et par son amplitude complexe. Lors de cette étape de pré-calcul, les occultations de la scène sont prises en compte de manière approximative, c'est-à-dire pour un nombre de points de
25 vue limité, correspondant à un nombre de directions de visualisation. Cette étape E1 sera décrite plus en détails en relation avec la Figure **6**;

- Une étape E2 d'obtention d'une pose d'un observateur U. La pose comprend généralement 6 paramètres, 3 angles de rotation et 3 paramètres de translation. L'observateur U est par exemple un utilisateur d'un système de visualisation holographique près de l'œil (pour « near-eye holographic display »), tel que des lunettes de réalité augmentée ou un casque de réalité virtuelle HMD (pour « Head Mounted Display », en anglais). Ce genre de dispositif est généralement associé à un système de réalité virtuelle comprenant un module de suivi positionnel du casque. Ce système peut s'appuyer par exemple sur une boule réfléchissante fixée sur le casque, cette boule étant repérable à l'aide d'une technologie infra-rouge, ou encore sur un capteur inertiel et magnétique. Les informations de suivi positionnel et orientationnel sont transmises au casque ou à un dispositif du système de réalité virtuelle apte à mettre en œuvre le procédé selon l'invention.

A partir de la connaissance de cette pose, on dérive immédiatement une position P_H du plan de l'hologramme dans le repère monde R_m , liée à une fenêtre de visualisation du dispositif HMD;

- Une étape E3 de dérivation de l'hologramme à la volée à partir des spectres angulaires omnidirectionnels précalculés pour chaque objet de la scène et de la pose obtenue. Le temps de calcul de cette étape ne dépend que de la résolution de l'hologramme et pas de la complexité ou de l'échantillonnage de la scène, ce qui permet de maintenir une fréquence d'images (pour « framerate », en anglais) constante tout en assurant une bonne qualité visuelle. Cette étape va être détaillée dans la suite en relation avec la Figure 10.

En relation avec les Figures 4 et 6, on détaille maintenant l'étape E1 de pré-calcul d'un spectre angulaire du champ émis par l'objet O_{bi} selon un mode de réalisation de l'invention.

Pour chaque objet O_{bi} , avec $i \in \{1..N\}$, de la scène, on définit un nombre $M \in \mathbb{N}$ de directions de visualisation $V_j \in \mathbb{R}^3$ (avec $j \in \{1..M\}$), avec M non nul supérieur ou égal à 2, associées à une vue v_j . Pour chacune de ces directions de visualisation, les occultations seront calculées de façon exacte.

En E10, on obtient une direction de visualisation V_j .

En E11, pour la direction de visualisation V_j , on détermine un ensemble de points de l'objet O_{bi} qui ne sont pas occultés. Pour ce faire, selon ce mode de réalisation, un rendu 2D+Z en projection perspective ou orthographique de l'objet i est effectué en E111, comme illustré par la Figure 7. Pour cela, on utilise la matrice de projection 3x4 en coordonnées homogènes donnée par

$$MP_j = K \begin{bmatrix} R_j & -R_j t_j \\ 0^T & 1 \end{bmatrix},$$

avec R_j la matrice de rotation 3x3 et t_j le vecteur de translation de taille 3 correspondant au point de vue j , et K la matrice de projection 3x4 perspective ou orthographique de la caméra, donnée par

$$K = \begin{bmatrix} 1/\Delta & 0 & 0 & M_x/2 \\ 0 & 1/\Delta & 0 & M_y/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

si la projection est orthographique, et par

$$K = \begin{bmatrix} f/\Delta & 0 & M_x/2 & 0 \\ 0 & f/\Delta & M_y/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

si la projection est perspective de distance focale f .

- 5 A l'issue de ce rendu, on obtient une image d'intensité $I_{i,j}$ et une carte de profondeur $D_{i,j}$ associées à la vue v_j .

Pour calculer les occultations dans la direction de visualisation V_j , on utilise par exemple une technique de type algorithme du peintre ou encore z-buffer, connue de l'homme de métier. Pour un objet Ob_i de la scène, la profondeur d'un pixel (coordonnée Z) est stockée dans un tampon (pour « buffer », en anglais, d'où Z-buffer), qui correspond ici à la carte de profondeur $D_{i,j}$. Cette carte est une image à deux dimensions (X et Y), chaque élément correspondant à un pixel de l'image d'intensités $I_{i,j}$ de l'objet Ob_i pour la vue v_j . Si un autre élément de l'objet doit être affiché aux mêmes coordonnées (X,Y), on compare les deux profondeurs (Z), et on ne garde que le pixel le plus proche de la caméra. La valeur Z de ce pixel est ensuite placée dans la carte de profondeur, remplaçant donc l'ancienne. Finalement, l'image dessinée reproduit la perception de la profondeur habituelle et logique, l'objet le plus proche cachant les plus lointains.

10

15

Dans le mode de réalisation décrit ci-après, on fixe $M = 6$ et le rendu de l'objet s'effectue en projection orthographique suivant les directions $+\vec{x}$, $-\vec{x}$, $+\vec{y}$, $-\vec{y}$, $+\vec{z}$ et $-\vec{z}$. On a donc une direction de visualisation par face du cube.

- 20 Par exemple, comme illustré par la Figure 7, pour la direction $+\vec{z}$, on utilise la matrice de projection orthographique suivante :

$$MP + \vec{z} = \begin{bmatrix} 1/\Delta & 0 & 0 & M_x/2 \\ 0 & 1/\Delta & 0 & M_y/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

où Δ désigne la taille des pixels et (M_x, M_y) la résolution de l'image rendue. De même, pour la direction $-\vec{x}$, on utilise la matrice de projection orthographique :

25

$$MP - \vec{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/\Delta & M_x/2 \\ 0 & 1/\Delta & 0 & M_y/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée à ce cas particulier. Elle permet aussi de choisir un nombre M de directions de visualisation V_j inférieur ou supérieur au nombre de faces du solide considéré, comme illustré par les Figures 5B et 5C.

- Etape E112 de reconstruction 3D par projection inverse

Comme illustré par la Figure **8**, pour chacune des images d'intensité $I_{i,j}$ et des cartes de profondeur $D_{i,j}$ rendues, on effectue en E112 la projection perspective ou orthographique inverse des points de l'image d'intensité $I_{i,j}$ et une carte de profondeur $D_{i,j}$ dans l'espace 3D.

5 Soit $\mathcal{R}_i = (O_i; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ le repère local de l'objet O_i dont l'origine se situe au centre de l'objet $O_i = (x_i, y_i, z_i)$ dans le repère monde et dont les axes sont alignés sur ceux du repère monde. Comme la profondeur D est encodée sur 8 bits, dans le cas où la projection utilisée est une projection orthographique suivant l'axe $+\vec{z}$, chaque pixel (u_k, v_k) est projeté en un point k de coordonnées, défini comme suit :

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(u_k - \frac{M_x}{2}\right)\Delta \\ \left(v_k - \frac{M_y}{2}\right)\Delta \\ \frac{255-d}{255}(z_{max} - z_{min}) + z_{min} \end{pmatrix},$$

10 dans le repère \mathcal{R}_i , avec $d = D(u_k, v_k)$, et d'amplitude $\sqrt{I_{i,j}(u_k, v_k)}$.

En E113, on détermine une zone de validité ZV des occultations calculées. Elle correspond à une portion de la surface du solide géométrique considéré, à l'intérieur de laquelle les amplitudes des échantillons associés à des vecteurs de fréquence vont recevoir les contributions de ces points de l'objet O_i pour la direction de visualisation V_j . Autrement dit, il s'agit de déterminer la portion de cette surface qui est incluse dans un cône de visualisation autour de la direction de visualisation V_j . Par simplicité, on peut choisir de ne calculer que les valeurs des échantillons de coordonnées (x, y, z) qui satisfont la condition $V_{j,x}x + V_{j,y}y + V_{j,z}z > 0$. Le cône considéré fait un angle de 90 degrés avec la direction V_j . En relation avec la Figure 5A, quand V_1 correspond à un rayon d'une sphère, la surface de validité V_1 est celle d'une demi-sphère centrée sur V_1 . En relation avec la Figure **9**, quand V_j est orthogonale à une face, cela revient à prendre la surface ZV_j du demi-cube autour de V_j . Les Figures **5B** et **5C** illustrent d'autres exemples de surfaces de validité pour des solides géométriques à faces de type cube ou octaèdre ?

25 Bien sûr, l'invention n'est pas limitée à cette condition particulière. La zone de validité des occultations calculées peut être associée à un cône d'angle plus petit, en fonction du nombre de directions de visualisation V_j et de leur répartition, uniforme ou non dans l'espace. Par exemple, en relation avec la Figure **5A**, si on a 8 directions de visualisation réparties équitablement dans un plan de la sphère, on peut choisir un angle égal à $360/8$ degrés pour garantir un recouvrement entre les zones de validité et éviter les ruptures de continuités lorsqu'on passe d'une direction de visualisation à une autre.

On obtient ainsi un nuage de points PNO par vue v_j de l'objet Ob_i , associée à la direction de visualisation V_j . Autrement dit, il s'agit du sous-ensemble des points de l'objet qui sont visibles, c'est-à-dire non occultés, depuis la direction de visualisation V_j .

- Etape E12 : Calcul du sous-spectre angulaire SSA_{ij} correspondant à la direction de visualisation V_j

- 5 Une fois obtenu le sous-ensemble de points non occultés PNO correspondant à la vue v_j de l'objet Ob_i , l'étape suivante est de calculer le sous-spectre angulaire omnidirectionnel correspondant SSA_{ij} , sur la surface du solide géométrique.

10 Dans la suite, on décrit plus en détails cette étape pour l'exemple d'un cube de côté $2/\lambda$, et dont le centre coïncide avec l'origine du repère \mathcal{R}_i , tel qu'illustré par la Figure **5B**. Bien sûr, l'invention ne se limite pas à ce cas particulier, mais s'applique à tout solide géométrique. S'il s'agit d'une sphère, on utilisera un échantillonnage tel que décrit dans l'art antérieur US2016/0231706 déjà cité.

En relation avec la Figure **9**, on échantillonne les faces de ce cube suivant une grille comprenant un quadrillage régulier, et on affecte à chacun des échantillons (x, y, z) ainsi obtenus la valeur d'amplitude suivante :

15
$$A_{i,j}(x, y, z) = \sum_{k=1}^{M_x M_y} \sqrt{I_{i,j}(u_k, v_k)} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (f_x x_k + f_y y_k + f_z z_k)\right),$$

avec λ la longueur d'onde utilisée, et $\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$.

On constate que ni la résolution ni la taille des pixels de l'hologramme n'interviennent dans la formule précédente, ce qui rend le spectre angulaire générique à tout type d'hologramme.

- 20 Comme évoqué précédemment, on calcule cette amplitude A_{ij} pour les échantillons (x, y, z) situés dans la zone de validité déterminée.

Les trois sous-étapes E10, E11, E12 sont répétées pour chaque direction angulaire V_j , $j \in \{1..M\}$. En E13, on calcule ensuite le spectre angulaire SA_i omnidirectionnel de l'objet Ob_i en accumulant les amplitudes calculées pour l'ensemble des vues v_j avec $j \in \{1..M\}$, comme suit :

$$A_i(x, y, z) = \sum_{j=1}^M A_{i,j}(x, y, z)$$

- 25 Le spectre angulaire omnidirectionnel SA_i obtenu est ensuite stocké dans une mémoire en vue d'une utilisation ultérieure.

Avantageusement, il est stocké dans une structure de type « texture cubemap », bien connue de l'homme du métier et par exemple décrite à l'adresse suivante https://en.wikipedia.org/wiki/Cube_mapping).

Cette structure de stockage présente l'avantage d'être une structure simple dont l'adressage et l'interpolation entre échantillons peuvent être accélérés matériellement.

Les étapes E0 et E1 sont répétées pour chaque objet O_i de la scène.

5 On suppose qu'on obtient en E2 une pose de l'observateur U , dont on dérive une position du plan PH de l'hologramme à générer, comme précédemment décrit.

En relation avec la Figure **10**, on détaille maintenant l'étape E3 de dérivation de hologramme à partir de la pluralité de spectres angulaires SA_i précalculés.

10 On note H l'hologramme à calculer. Sa résolution est donnée par (N_x, N_y) , et ses pixels sont de taille p . Typiquement, les écrans holographiques (SLMs) actuellement disponibles, de type modulateur spatial de lumière ou SLM (pour « Spatial Light Modulator », en anglais), ont une résolution maximale de l'ordre de (3840,2160) et une taille de pixels minimum de l'ordre de $3.74\mu m$.

15 En relation avec la Figure **11**, on note $\mathcal{R}_h = (O; \vec{x}_h, \vec{y}_h, \vec{z}_h)$ le repère local de l'hologramme dont l'origine est situé au centre de l'hologramme H , dont les axes définis par \vec{x}_h et \vec{y}_h coïncident avec l'axe horizontal et vertical de l'hologramme, respectivement, et dont l'axe défini par \vec{z}_h coïncide avec l'axe optique de l'hologramme. On note $\vec{x}_h = \begin{pmatrix} x_{h0} \\ x_{h1} \\ x_{h2} \end{pmatrix}$, $\vec{y}_h = \begin{pmatrix} y_{h0} \\ y_{h1} \\ y_{h2} \end{pmatrix}$ et $\vec{z}_h = \begin{pmatrix} z_{h0} \\ z_{h1} \\ z_{h2} \end{pmatrix}$.

Enfin, on note $t_h = (x_0, y_0, z_0)$ la position du centre de l'hologramme dans le repère monde. L'étape de dérivation de l'hologramme H à partir du spectre angulaire est décomposée en 2 sous-étapes :

- Sous-étape E31 : Elle consiste à construire le spectre angulaire de l'hologramme $\hat{H} = \mathcal{F}\{H\}$, à partir des spectres angulaires SA_i précalculés pour les N objets O_i de la scène.

20 Le spectre angulaire de l'hologramme est échantillonné sur une grille régulière de résolution (N_x, N_y) , avec un pas d'échantillonnage de $(N_x p)^{-1}$ et $(N_y p)^{-1}$, dans les directions horizontale et verticale, respectivement. Par conséquent, les fréquences f_{hx} , f_{hy} de l'hologramme sont comprises entre $-1/2p$ et $1/2p$.

Le spectre angulaire de l'hologramme est donné par la formule suivante :

25
$$\hat{H}(f_{h,x}, f_{h,y}) = \sum_{i=1}^N A_i \left(\frac{f_x}{\lambda F}, \frac{f_y}{\lambda F}, \frac{f_z}{\lambda F} \right) \exp \left(j2\pi \left(s_x f_{h,x} + s_y f_{h,y} + s_z \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \right) \right),$$

Où :

$$F = \max(f_x, f_y, f_z),$$

$$\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & x_{h1} & x_{h2} \\ y_{h0} & y_{h1} & y_{h2} \\ z_{h0} & z_{h1} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{pmatrix} \text{ désigne la position du centre de l'objet } i \text{ dans le repère } \mathcal{R}_h, \text{ et}$$

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & y_{h0} & z_{h0} \\ x_{h1} & y_{h1} & z_{h1} \\ x_{h2} & y_{h2} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{h,x} \\ f_{h,y} \\ \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \end{pmatrix}$$

les coordonnées fréquentielles du spectre angulaire de l'hologramme dans le repère Ri de l'objet Obi.

Comme \hat{H} est échantillonné suivant une grille régulière, le changement de coordonnées $(f_{h,x}, f_{h,y}) \rightarrow (f_x, f_y, f_z)$ (qui correspond à une rotation) a pour effet de distordre la grille d'échantillonnage. Ainsi, la valeur $A_i \left(\frac{f_x}{\lambda_M}, \frac{f_y}{\lambda_M}, \frac{f_z}{\lambda_M} \right)$ peut ne pas avoir été calculée lors de l'étape E31, et une interpolation est très souvent nécessaire. On peut utiliser une interpolation bilinéaire, mais de meilleurs résultats sont obtenus en utilisant une interpolation bicubique, ces deux techniques étant connues de l'homme de métier.

- Sous-étape E32 : Une fois le spectre angulaire de l'hologramme calculé, la dernière étape consiste à lui appliquer une transformée de Fourier inverse pour obtenir l'hologramme H, selon la formule suivante :

$$H(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\hat{H}\}(x, y)$$

Avec l'invention, il devient ainsi possible pour un observateur porteur d'un système de restitution holographique porté près de l'œil de se déplacer autour de d'une scène comprenant plusieurs objets et de visualiser en temps réel un hologramme de cette scène adapté à sa pose.

On notera que l'invention qui vient d'être décrite, peut être mise en œuvre au moyen de composants logiciels et/ou matériels. Dans cette optique, les termes « module » et « entité », utilisés dans ce document, peuvent correspondre soit à un composant logiciel, soit à un composant matériel, soit encore à un ensemble de composants matériels et/ou logiciels, aptes à mettre en œuvre la ou les fonctions décrites pour le module ou l'entité concerné(e).

En relation avec les figures **12** et **13**, on présente maintenant la structure simplifiée d'un dispositif de génération d'un hologramme numérique 100, 100' adapté pour mettre en œuvre le procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'un quelconque des modes particuliers de réalisation de l'invention qui viennent d'être décrit en relation avec les figures **4** à **11**.

Le dispositif de traitement 100, 100' est notamment configuré pour:

Par objet, calculer un spectre angulaire « omnidirectionnel » du champ lumineux émis par un objet de la scène à la surface d'un solide géométrique centré sur ledit objet, une surface dudit solide étant échantillonnée selon une grille prédéterminée, un échantillon de la grille étant associé à un vecteur de fréquences ($f = (f_x, f_y, f_z)$) et à une amplitude correspondant à une

somme de contributions au champ lumineux de points de l'objet selon une direction égale à celle du vecteur de fréquences ;

Pour la scène:

- Obtenir une pose (P_U) d'un observateur;
- 5 - Dériver un spectre angulaire de l'hologramme (SA_H) de la scène en fonction de la pose obtenue à partir des spectres angulaires « omnidirectionnels » (SA_i) calculés par objet.

Selon l'invention, lors du calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène, le dispositif 100 est en outre configuré pour :

10 Calculer un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène, pour une pluralité de directions de visualisation prédéterminées :

- par direction de visualisation (V_j) :
 - o Déterminer un sous-ensemble de points de l'objet non occultés ;
 - o Calculer un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points du sous-ensemble; et
- 15 - Sommer sur la pluralité de directions angulaires prédéterminées, les amplitudes des sous-spectres angulaires calculés, associées à un même échantillon de la grille.

20 Selon un mode particulier de réalisation de l'invention illustré par la Figure **12**, le dispositif de génération d'un hologramme numérique 100 a l'architecture classique d'un ordinateur et comprend notamment, une unité de traitement 110, équipée d'un processeur μ_1 , et pilotée par un programme d'ordinateur Pg_1 120, stocké dans une mémoire 130 et mettant en œuvre le procédé selon l'invention. A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur Pg_1 120 sont par exemple chargées dans une mémoire RAM avant d'être exécutées par le processeur de l'unité de traitement 110. Le processeur de l'unité de traitement 110 met en œuvre les étapes du procédé décrit précédemment, selon les instructions du programme d'ordinateur 120.

25 Selon un autre mode particulier de réalisation de l'invention illustré par la Figure **13**, le procédé de traitement est mis en œuvre par des modules fonctionnels. Pour cela, le dispositif 100' comprend au moins les modules fonctionnels suivants :

- Un module OBT. Sc d'obtention de données représentatives d'une scène comprenant au moins un objet ;

- un module CALC. SAI de calcul d'un spectre angulaire d'un champ lumineux émis par un dit objet, dit spectre angulaire « omni directionnel » sur la surface d'un solide géométrique à faces;
 - un module OBT. P_U d'obtention d'une pose de l'observateur ;
- 5
- un module DER. H de dérivation de l'hologramme à partir des spectres angulaires calculés par objet et de la pose P_U .

Selon un mode de réalisation de l'invention, le module de calcul d'un spectre angulaire comprend les sous-modules suivants aptes à être mis en œuvre pour une pluralité de directions de visualisation prédéterminées :

- 10
- par direction de visualisation (V_j) :
 - o Détermination d'un sous-ensemble de points de l'objet non occultés ;
 - o Calcul d'un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points du sous-ensemble; et
 - Sommation sur la pluralité de directions angulaires prédéterminées, des amplitudes des sous-
- 15
- spectres angulaires calculés, associées à un même échantillon de la grille.

Avantageusement, le dispositif 100' comprend en outre un module M1 de stockage des spectres angulaires SAI des objets O_{bi} de la scène.

Ces unités sont pilotées par le processeur $\mu 1$ de l'unité de traitement 110.

- L'unité de traitement 110 coopère avec les différents modules fonctionnels décrits ci-dessus et la
- 20
- mémoire MEM1 afin de mettre en œuvre les étapes du procédé de génération selon l'invention. Les différents modules fonctionnels décrits ci-dessus peuvent être sous forme matérielle et/ou logicielle. Sous une forme logicielle, un tel module fonctionnel peut comprendre un processeur, une mémoire et des instructions de code de programme pour mettre en œuvre la fonction correspondante au module lorsque les instructions de code sont exécutées par le processeur. Sous une forme matérielle,
- 25
- un tel module fonctionnel peut mis en œuvre par tout type de circuits d'encodage adaptés, tels que par exemple et de manière non limitative des microprocesseurs, des processeurs de traitement du signal (DSP pour Digital Signal Processor en anglais), des circuits intégrés spécifiques à des applications (ASICs pour « Application Specific Integrated Circuit » en anglais), des circuits FPGA (pour « Field Programmable Gate Arrays » en anglais), un câblage d'unités logiques.

De façon avantageuse, un tel dispositif 100, 100' peut être intégré à un système de restitution holographique SRH, par exemple un système porté près de l'œil, tel qu'un visiocasque. Le dispositif 100, 100' est alors agencé pour coopérer au moins avec les modules suivants du système :

- 5 - un module E/R d'émission/réception de données, par l'intermédiaire duquel il reçoit des informations de la description de la scène ;
- un module de suivi positionnel POS de l'observateur dans le référentiel Monde R_m ;
- un écran holographique SLM apte à restituer l'hologramme ; et
- une mémoire MS apte à stocker les spectres angulaires pré-calculés de chaque objet (Obi) de la scène (Sc).

10 Le domaine d'application de l'invention est celui de la réalité augmentée. Toutes les déclinaisons sont envisageables, comme l'aide à la navigation, l'enrichissement de contenus, les applications militaires, la visioconférence, le travail collaboratif, la télé-médecine...

Parmi ces exemples, une application concrète est l'affichage d'un ensemble d'objets virtuels dans l'environnement direct de l'observateur à l'aide d'un visiocasque équipé d'une application de réalité
15 augmentée. Le visiocasque est intégré à un système de restitution holographique selon l'invention.

Dans un exemple d'usage non représenté, le système holographique comprend un serveur apte à se transmettre des données au visiocasque par une liaison sans fil, qui pré-calculé le spectre angulaire omnidirectionnel de chaque objet virtuel avant le démarrage de l'application. Au démarrage de l'application, les données de chaque spectre sont copiées dans la mémoire locale MS du visiocasque.
20 Puis, lorsque l'utilisateur se déplace au sein du contenu virtuel, le visiocasque dérive l'hologramme correspondant au point de vue de l'utilisateur, en temps réel, à partir des données pré-calculées.

Par exemple, les objets de la scène sont les correspondants de l'observateur au cours d'une visioconférence. Un avantage est que l'hologramme est dérivé localement des spectres pré-calculés, ce qui permet d'offrir une latence minimale.

25 De façon alternative, les spectres angulaires pourraient être stockés dans une mémoire locale du serveur. Sur réception d'une pose de l'observateur U en provenance du module de suivi, le visiocasque la transmet au serveur qui calcule l'hologramme adapté à la pose reçue et la retransmet au visiocasque. Un avantage est de réaliser un visiocasque plus léger et moins coûteux.

Il va de soi que les modes de réalisation qui ont été décrits ci-dessus ont été donnés à titre purement indicatif et nullement limitatif, et que de nombreuses modifications peuvent être facilement apportées par l'homme de l'art sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

REVENDECATIONS

- 1-** Procédé de génération d'un hologramme numérique représentatif d'une scène 3D, ladite scène comprenant au moins un objet (Ob_i), un objet étant défini par un ensemble de points et leur intensité associée, ledit procédé comprenant :
- 5 Par objet (Ob_i), une étape préalable (E1) de calcul d'un spectre angulaire « omnidirectionnel » (SA_i) du champ lumineux émis par l'objet à la surface d'un solide géométrique centré sur ledit objet, une surface dudit solide étant échantillonnée selon une grille prédéterminée, un échantillon (x,y,z) de la grille étant associé à un vecteur de fréquences ($f = (f_x, f_y, f_z)$) et à une amplitude (A_i) correspondant à une somme de contributions au champ lumineux de points de
- 10 l'objet selon une direction égale à celle du vecteur de fréquences ;
- Pour la scène, les étapes suivantes :
- Obtention (E2) d'une pose (P_U) d'un observateur (U);
 - Dérivation (E3) de l'hologramme (H) de la scène en fonction de la pose obtenue à partir des spectres angulaires « omnidirectionnels » (SA_i) calculés par objet;
- 15 **caractérisé en ce que** l'étape (E1) de calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène comprend, pour une pluralité de directions de visualisation prédéterminées, les sous-étapes suivantes :
- par direction de visualisation (V_j) :
 - o Une détermination (E11) d'un sous-ensemble de points de l'objet, comprenant les
 - 20 points non occultés ;
 - o Un calcul (E12) d'un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points du sous-ensemble déterminé; et
 - Une sommation (E13) sur la pluralité de directions angulaires prédéterminées des amplitudes des sous-spectres angulaires calculés, associées à un même échantillon de la grille.
- 25 **2-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon la revendication **1**, caractérisé en ce que l'étape de détermination du sous-ensemble de points non occultés comprend les sous-étapes suivantes :
- Un rendu (E111) 2D+Z de l'objet par projection des points de l'objet selon la direction de visualisation (V_j) et formation d'une image d'intensités et d'une carte de profondeurs des
 - 30 points projetés ; et

- La projection inverse (E112) des points de l'image d'intensité formée en des points de l'objet dans un repère de l'objet et calcul de leurs coordonnées en fonction de la carte de profondeur.

5 **3-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'une des revendications **1** ou **2**, caractérisé en ce que l'étape de calcul du sous-spectre angulaire (E12) comprend une sous-étape (E121) de détermination d'une zone de validité des occultations associées à une direction de visualisation sur la surface du solide géométrique et en ce que le calcul (E122) des amplitudes des échantillons est effectué pour les échantillons compris dans ladite zone.

10 **4-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon la revendication **3**, caractérisé en ce que les échantillons compris dans la zone de validité vérifient la condition suivante :

$$V_{j,x}x + V_{j,y}y + V_{j,z}z > 0$$

Où (x,y,z) désigne la position de l'échantillon et (V_x, V_y, V_z) la direction de visualisation dans un repère (R_i) de l'objet (O_i) .

15 **5-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'une des revendications **1** à **4**, caractérisé en ce que le solide géométrique comprend une pluralité de faces planes et en ce que la grille prédéterminée est découpée en une pluralité de sous-grilles formant un quadrillage régulier, une sous-grille étant associée à une face du solide.

20 **6-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon la revendication **5**, caractérisé en ce que l'amplitude associée à un échantillon de la sous-grille d'une face du solide, pour le calcul du sous-spectre angulaire selon une dite direction de visualisation, est définie par la formule suivante :

$$A_{i,j}(x, y, z) = \sum_{k=1}^{M_x M_y} \sqrt{I_{i,j}(u_k, v_k)} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (f_x x_k + f_y y_k + f_z z_k)\right),$$

25 Avec M_x, M_y les dimensions des images d'intensité et de profondeur, λ la longueur d'onde utilisée, et $\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ les fréquences associées à l'échantillon (x,y,z) .

7- Procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'une des revendications **5** ou **6**, caractérisé en ce que le solide géométrique est un cube.

30 **8-** Procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'une des revendications **5** à **7**, caractérisé en ce que la pluralité de directions de visualisation comprend autant de directions que le solide compte de faces.

9- Procédé de génération d'un hologramme numérique selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape de dérivation d'un spectre angulaire de l'hologramme de la scène comprend une dérivation d'un spectre angulaire d'un sous-hologramme par objet de la scène à partir du spectre angulaire dudit objet, une sommation des spectres angulaires des sous-hologrammes dérivés et l'application (E32) d'une transformée de Fourier inverse au spectre angulaire dérivé pour obtenir l'hologramme (H).

10- Procédé de génération d'un hologramme numérique selon la revendication **9**, caractérisé en ce que, le spectre angulaire de l'hologramme est dérivé à partir des spectres angulaires « multidirectionnels » (SA_i) calculés par objet (Ob_i) selon la formule suivante :

$$10 \quad \hat{H}(f_{h,x}, f_{h,y}) = \sum_{i=1}^N SA_i \left(\frac{f_x}{\lambda F}, \frac{f_y}{\lambda F}, \frac{f_z}{\lambda F} \right) \exp \left(j2\pi \left(s_x f_{h,x} + s_y f_{h,y} + s_z \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \right) \right),$$

Où :

$\mathcal{R}_h = (O; \vec{x}_h, \vec{y}_h, \vec{z}_h)$ désigne un repère local de l'hologramme dont l'origine est situé au centre de l'hologramme H, dont les axes définis par \vec{x}_h et \vec{y}_h coïncident avec l'axe horizontal et vertical de l'hologramme, respectivement, et dont l'axe défini par \vec{z}_h coïncide avec l'axe optique de l'hologramme. On note $\vec{x}_h = \begin{pmatrix} x_{h0} \\ x_{h1} \\ x_{h2} \end{pmatrix}$, $\vec{y}_h = \begin{pmatrix} y_{h0} \\ y_{h1} \\ y_{h2} \end{pmatrix}$ et $\vec{z}_h = \begin{pmatrix} z_{h0} \\ z_{h1} \\ z_{h2} \end{pmatrix}$.

$F = \max(f_x, f_y, f_z)$,
 $\begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & x_{h1} & x_{h2} \\ y_{h0} & y_{h1} & y_{h2} \\ z_{h0} & z_{h1} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{pmatrix}$ désigne la position du centre de l'objet Ob_i dans le repère \mathcal{R}_h , et
 $\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{h0} & y_{h0} & z_{h0} \\ x_{h1} & y_{h1} & z_{h1} \\ x_{h2} & y_{h2} & z_{h2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{h,x} \\ f_{h,y} \\ \sqrt{\lambda^{-2} - f_{h,x}^2 - f_{h,y}^2} \end{pmatrix}$ désignent les coordonnées fréquentielles du spectre angulaire de l'hologramme dans le repère (R_i) de l'objet Ob_i .

11- Dispositif (100, 100') de génération d'un hologramme numérique (H) représentatif d'une scène 3D comprenant au moins un objet (Ob_i), ledit dispositif est configuré pour :

Par objet, calculer un spectre angulaire « omnidirectionnel » du champ lumineux émis par un objet de la scène à la surface d'un solide géométrique centré sur ledit objet, une surface dudit solide étant échantillonnée selon une grille prédéterminée, un échantillon de la grille étant associé à un vecteur de fréquences ($f = (f_x, f_y, f_z)$) et à une amplitude correspondant à une somme de contributions au champ lumineux de points de l'objet selon une direction égale à celle du vecteur de fréquences ;

Pour la scène:

- Obtenir une pose (P_U) d'un observateur (U);
- Dériver l'hologramme (H) de la scène en fonction de la pose obtenue à partir des spectres angulaires « omnidirectionnels » (SA_i) calculés par objet ;

caractérisé en ce qu'il est en outre configuré pour, lors du calcul d'un spectre angulaire du champ lumineux par objet de la scène, pour une pluralité de directions de visualisation prédéterminées :

5

- par direction de visualisation (V_j) :
 - o Déterminer un sous-ensemble de points de l'objet non occultés ;
 - o Calculer un sous-spectre angulaire du champ lumineux émis par les points du sous-ensemble; et

10

- Sommer sur la pluralité de directions angulaires prédéterminées, les amplitudes des sous-spectres angulaires calculés, associées à un même échantillon de la grille.

12- Système de restitution holographique (SRH , SRH') comprenant un module d'obtention d'une scène tridimensionnelle comprenant au moins un objet, un module d'obtention d'une pose d'un observateur, et un écran holographique (SLM) apte à restituer un hologramme, caractérisé en ce que le système comprend en outre un dispositif (100 , $100'$) de génération de l'hologramme selon la revendication **11**.

15

13- Système de restitution holographique (SRH , SRH') selon la revendication **12**, caractérisé en ce qu'il comprend un visiocasque destiné à être porté près des yeux de l'observateur (U), ledit visiocasque comprenant un module de stockage ($M1$) adapté au stockage du spectre angulaire omnidirectionnel pré-calculé pour le au moins un objet de la scène.

20

14- Programme d'ordinateur ($Pg1$) comportant des instructions pour la mise en œuvre du procédé de calcul d'un hologramme numérique selon l'une quelconque des revendications **1** à **10**, lorsque ledit programme est exécuté par un processeur.

25

15- Support d'enregistrement lisible par un ordinateur, sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions de code de programme pour l'exécution des étapes du procédé selon l'une des revendications **1** à **10**.

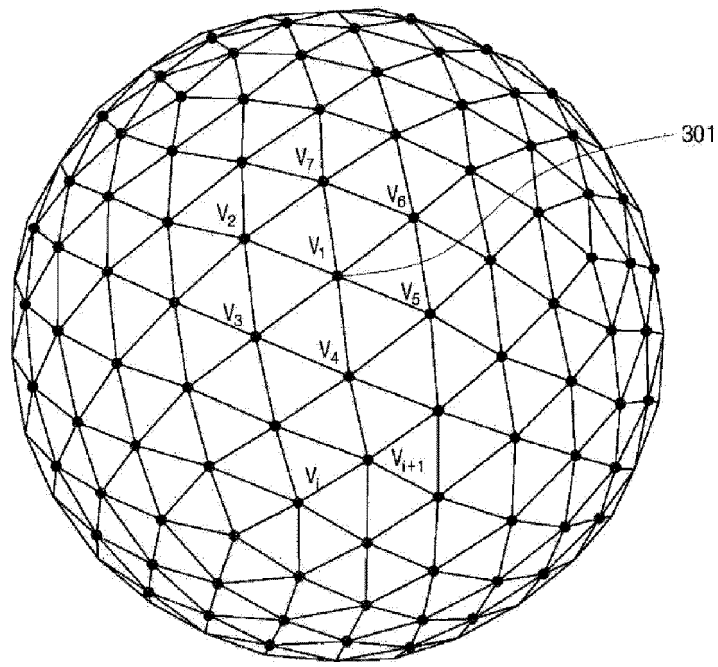


FIG. 1

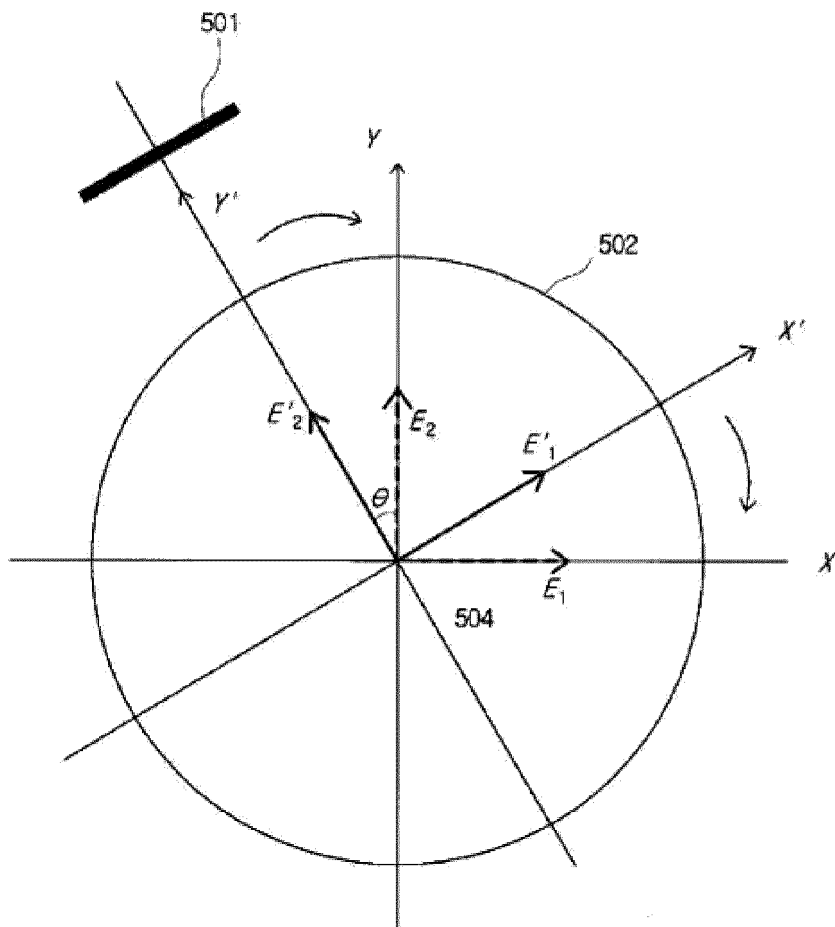


FIG. 2

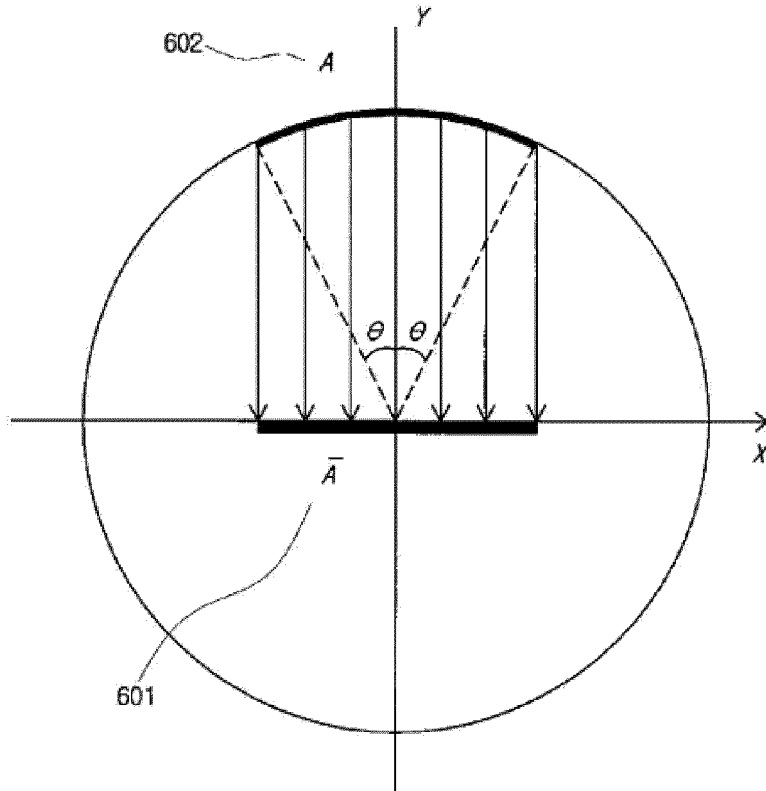


FIG. 3

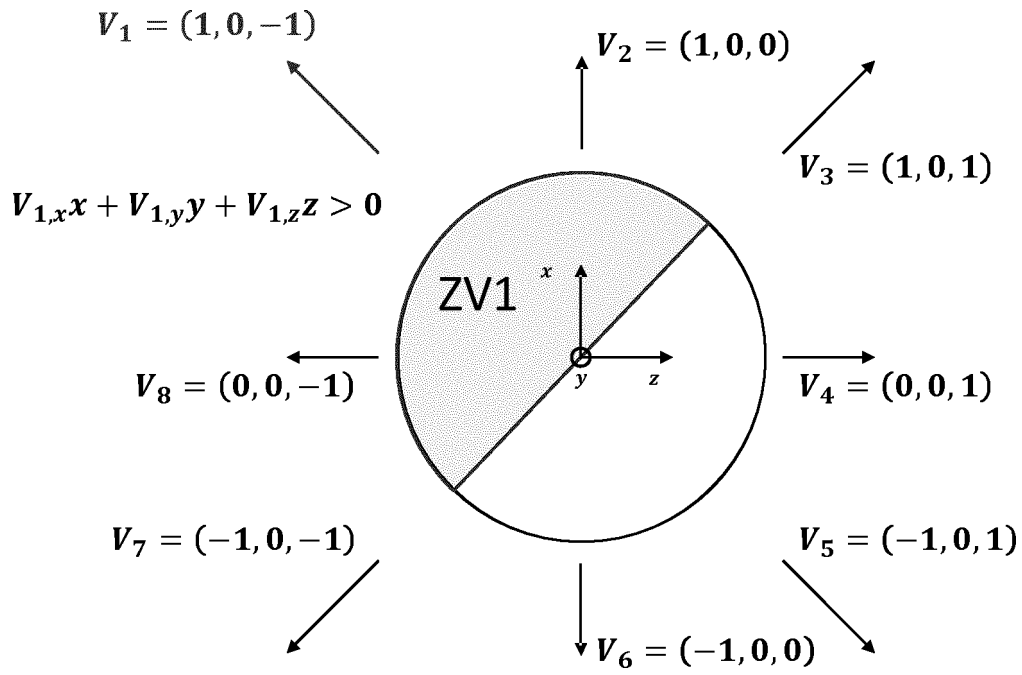


FIG. 5A

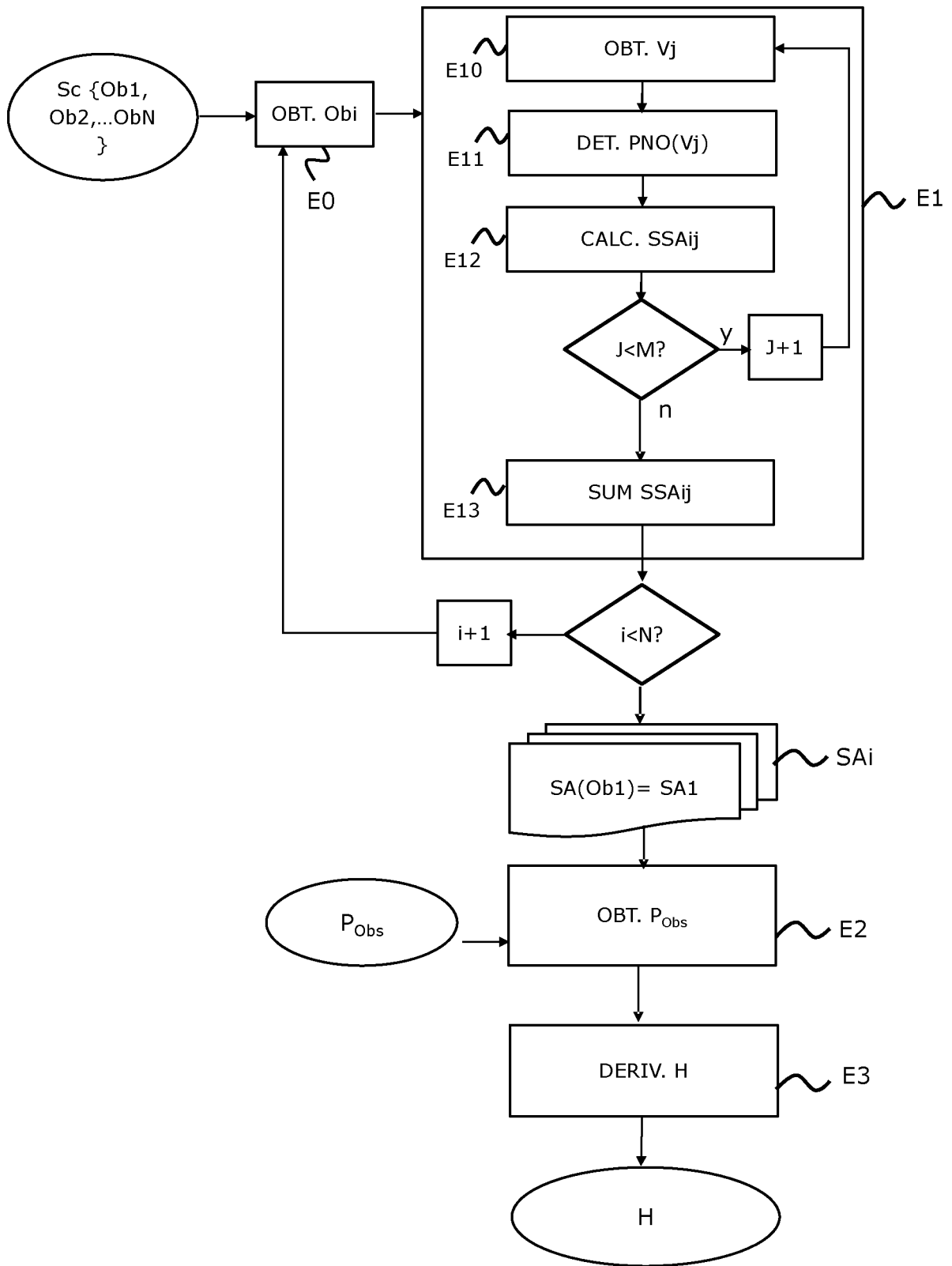


FIG. 4

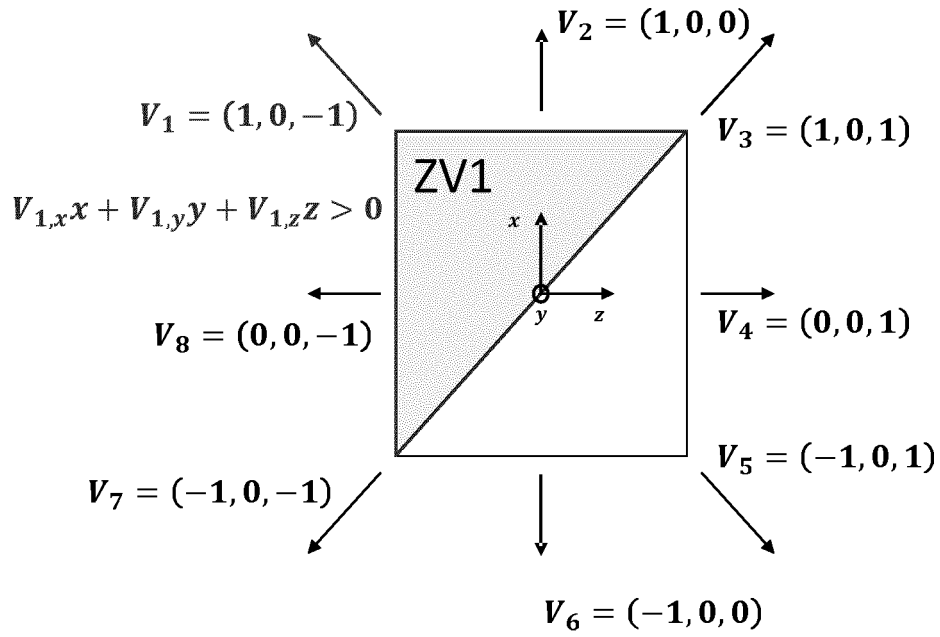


FIG. 5B

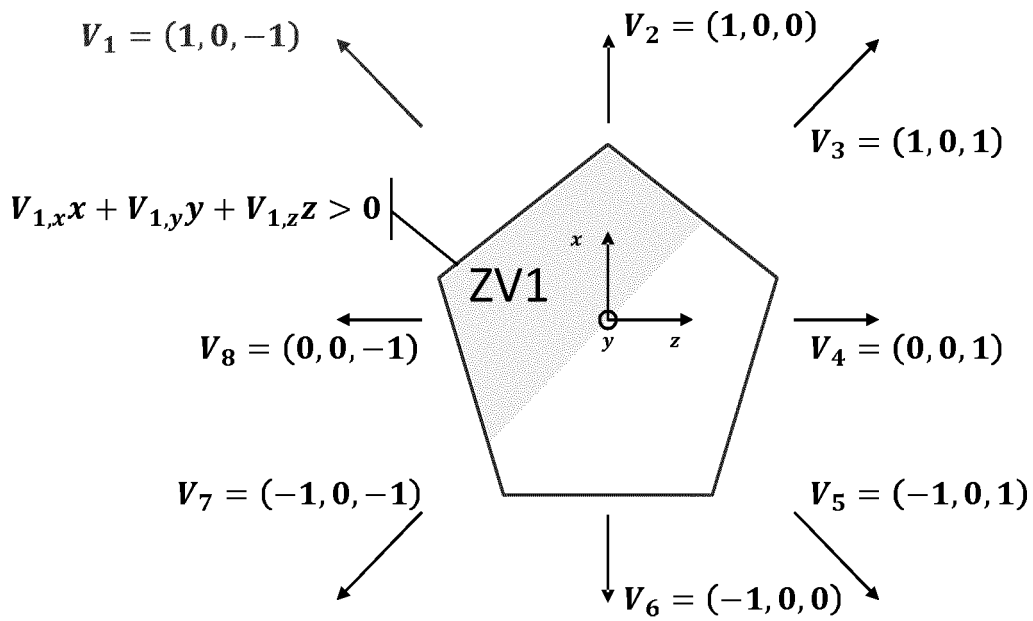


FIG. 5C

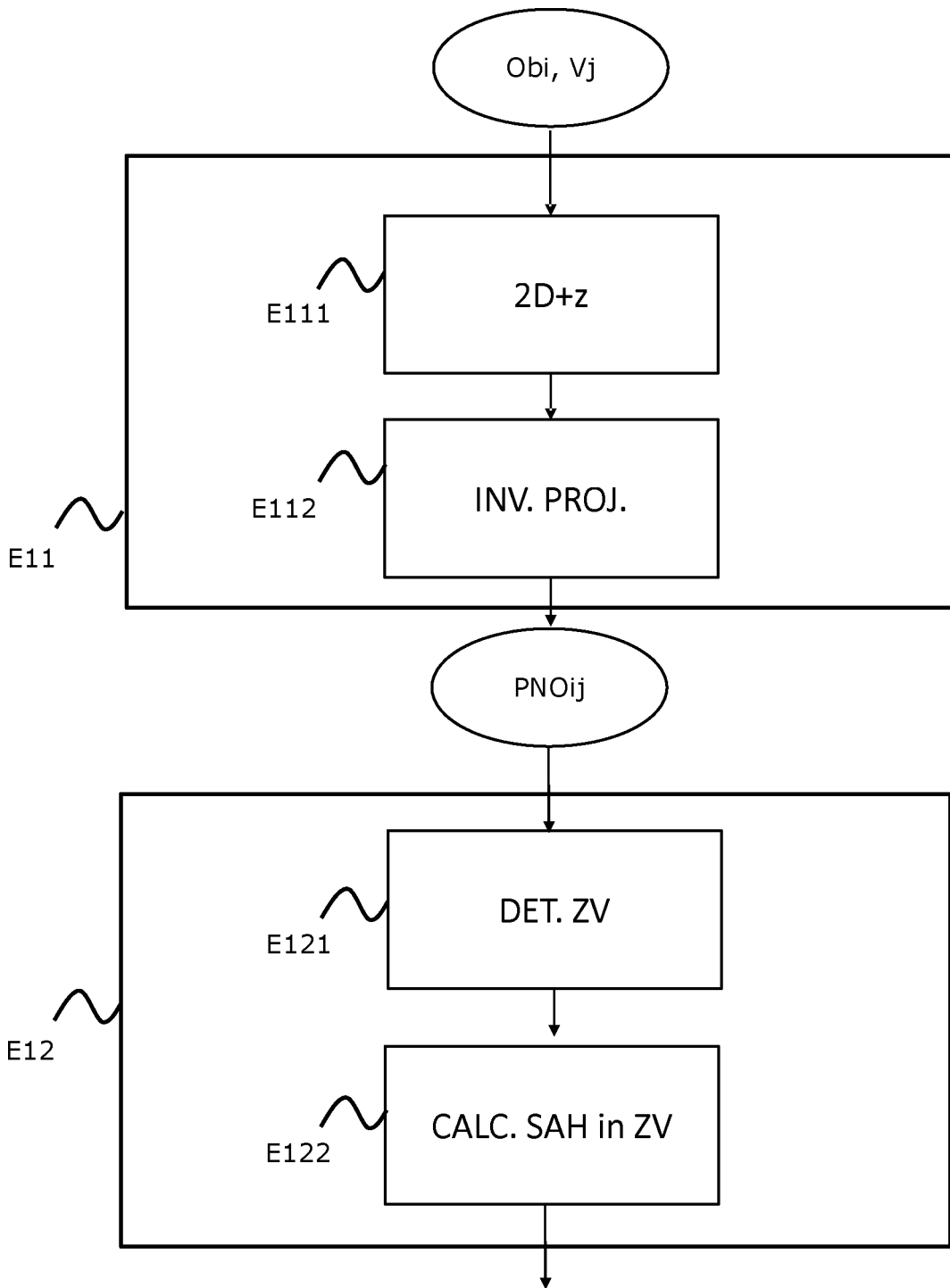


FIG. 6

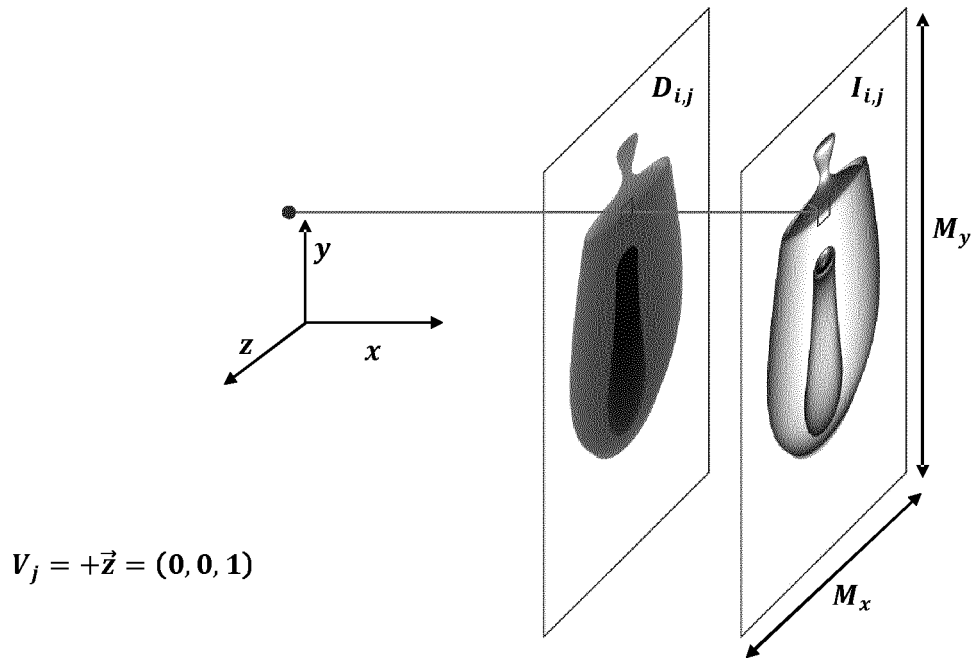


FIG. 7

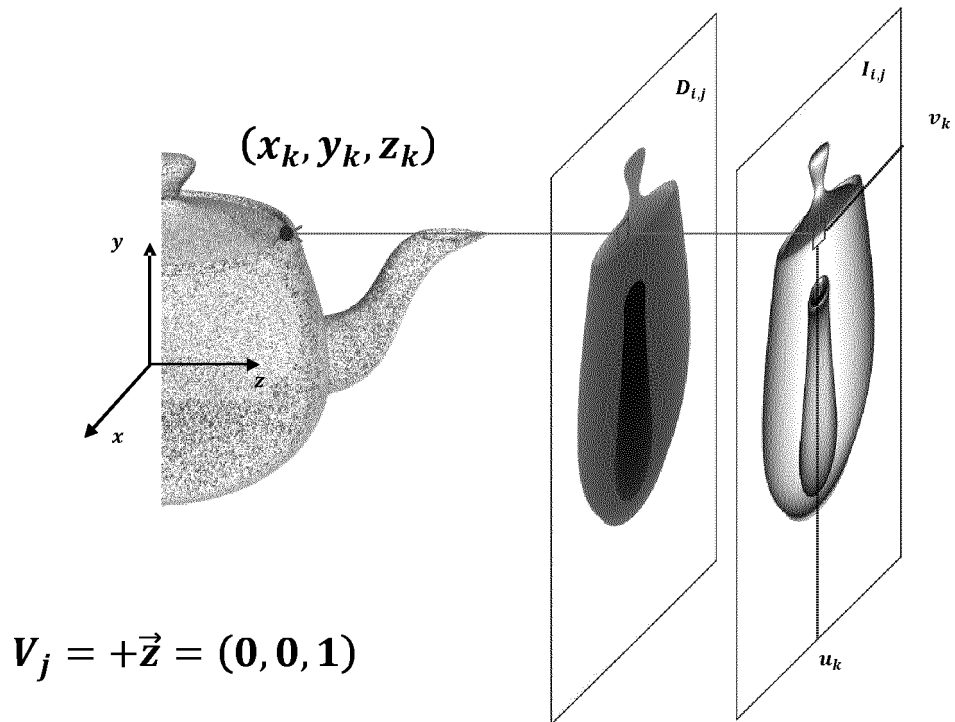


FIG. 8

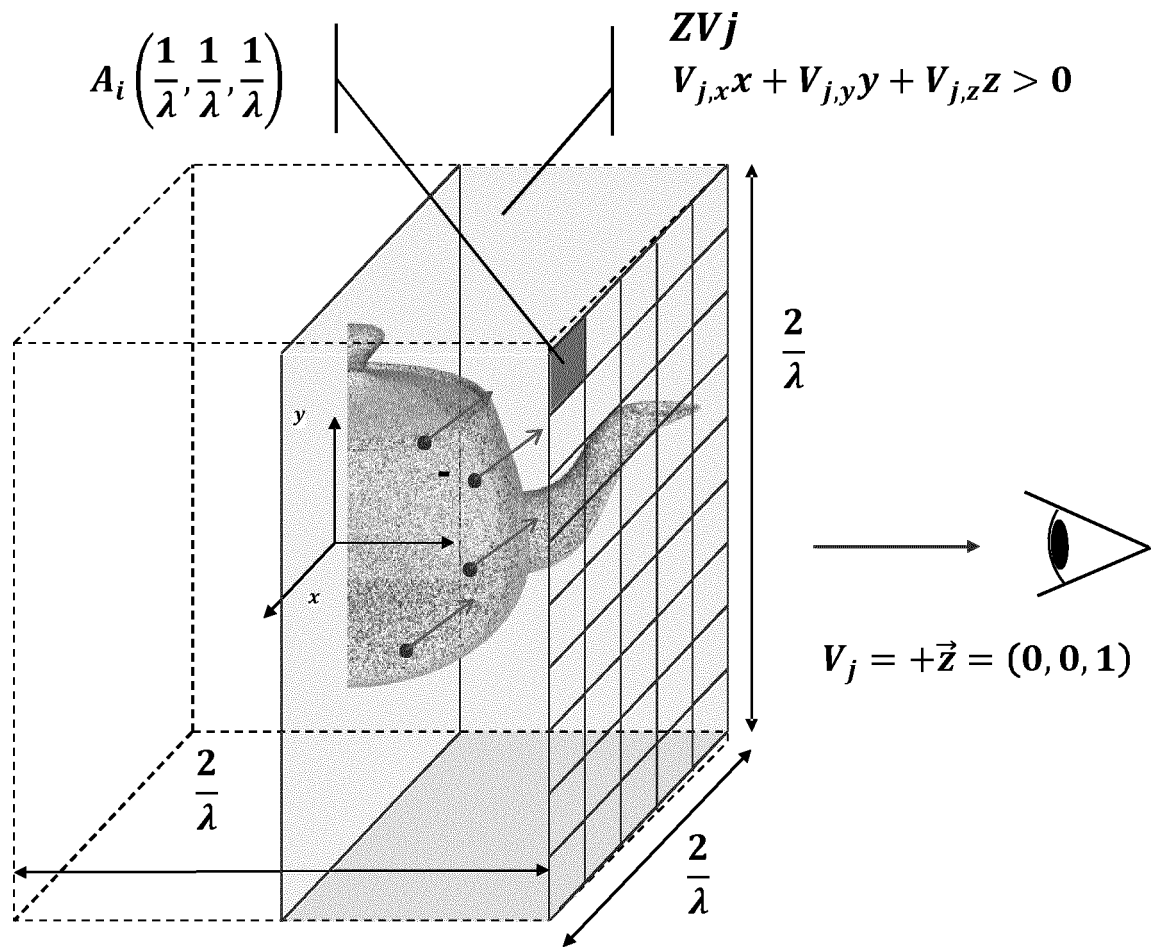


FIG. 9

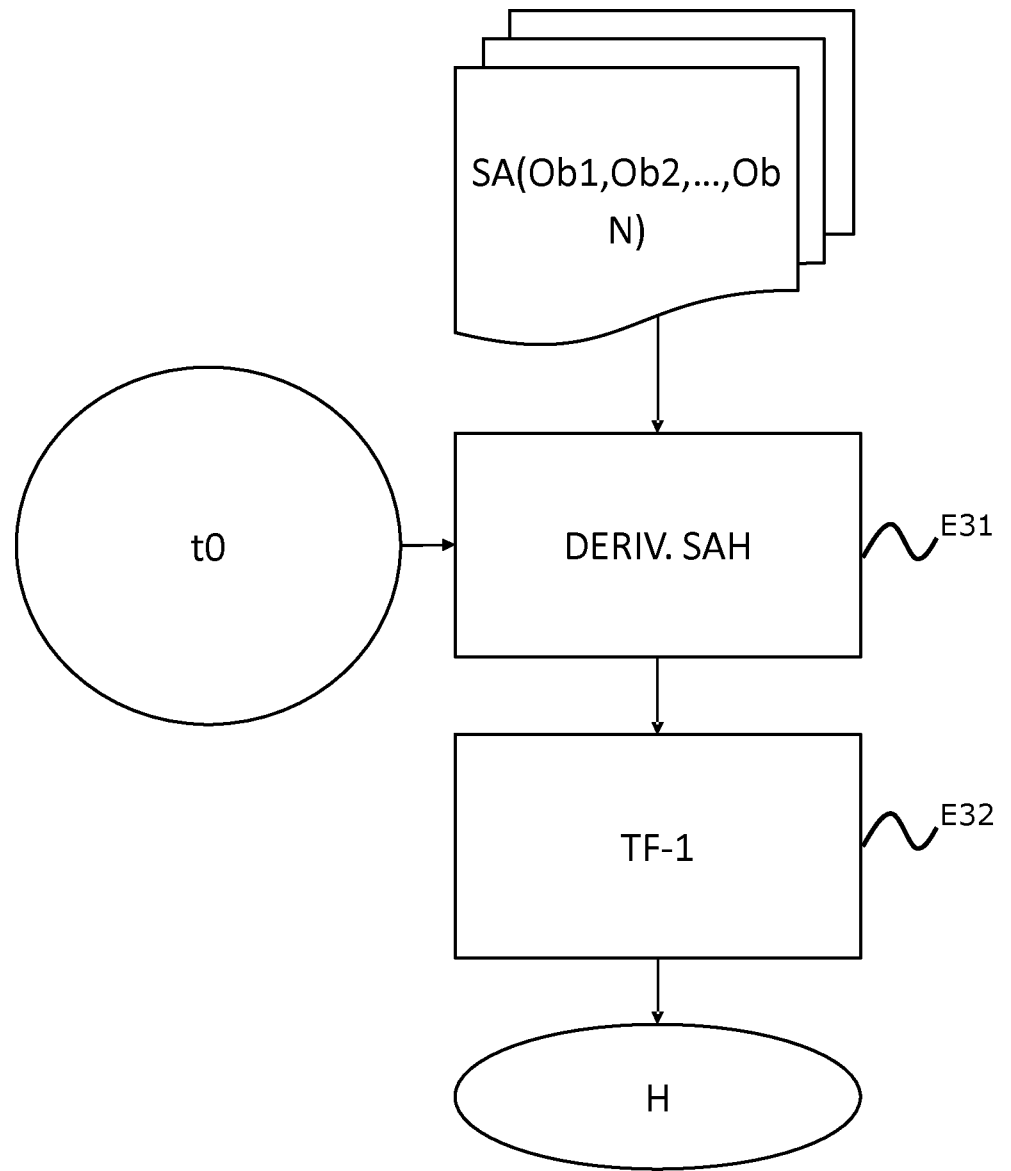


FIG. 10

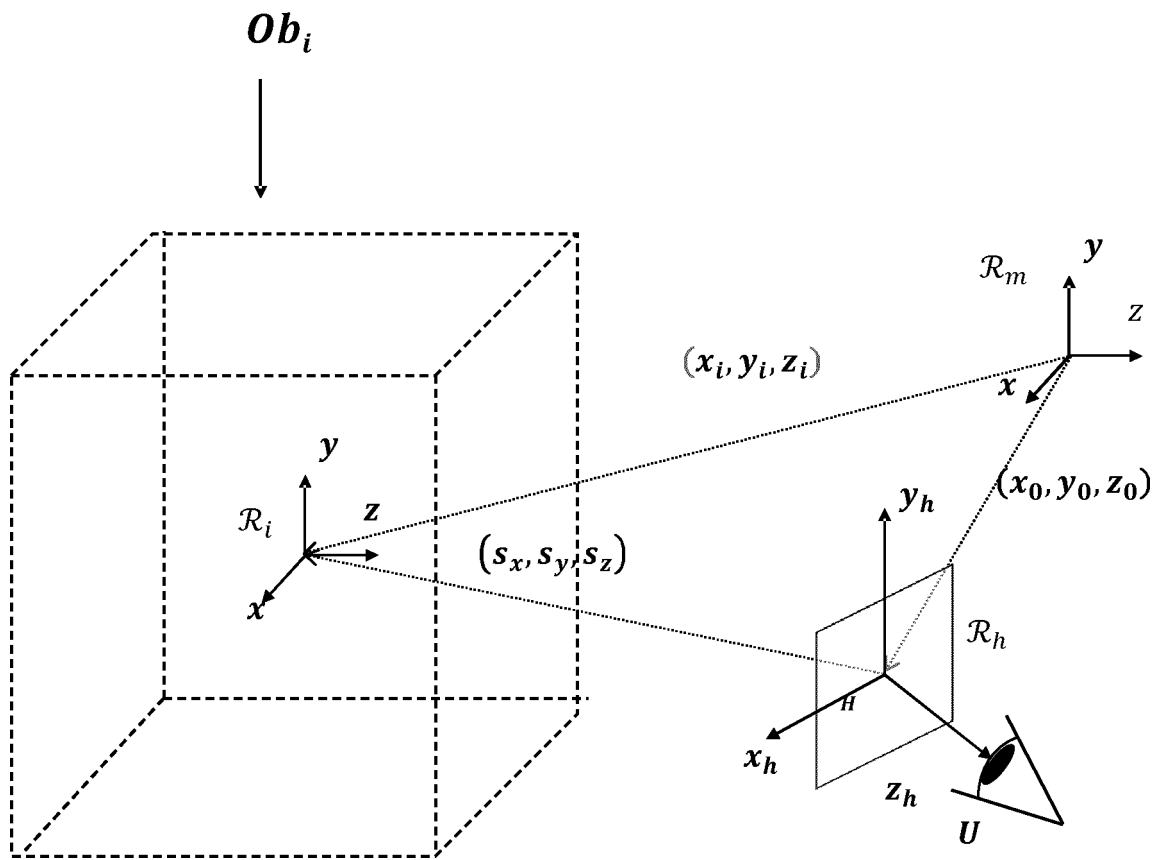


FIG. 11

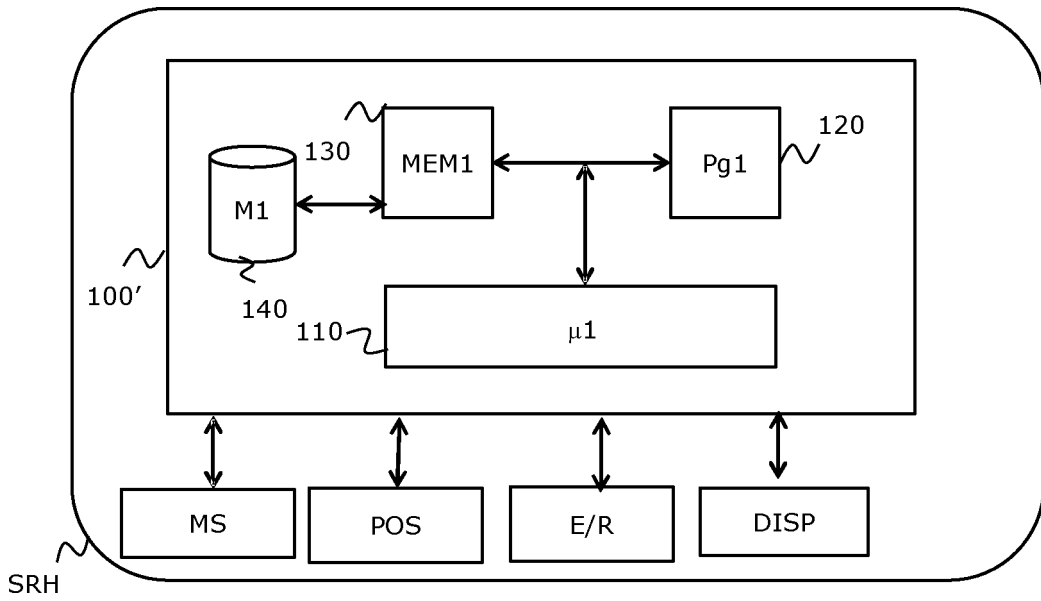


FIG. 12

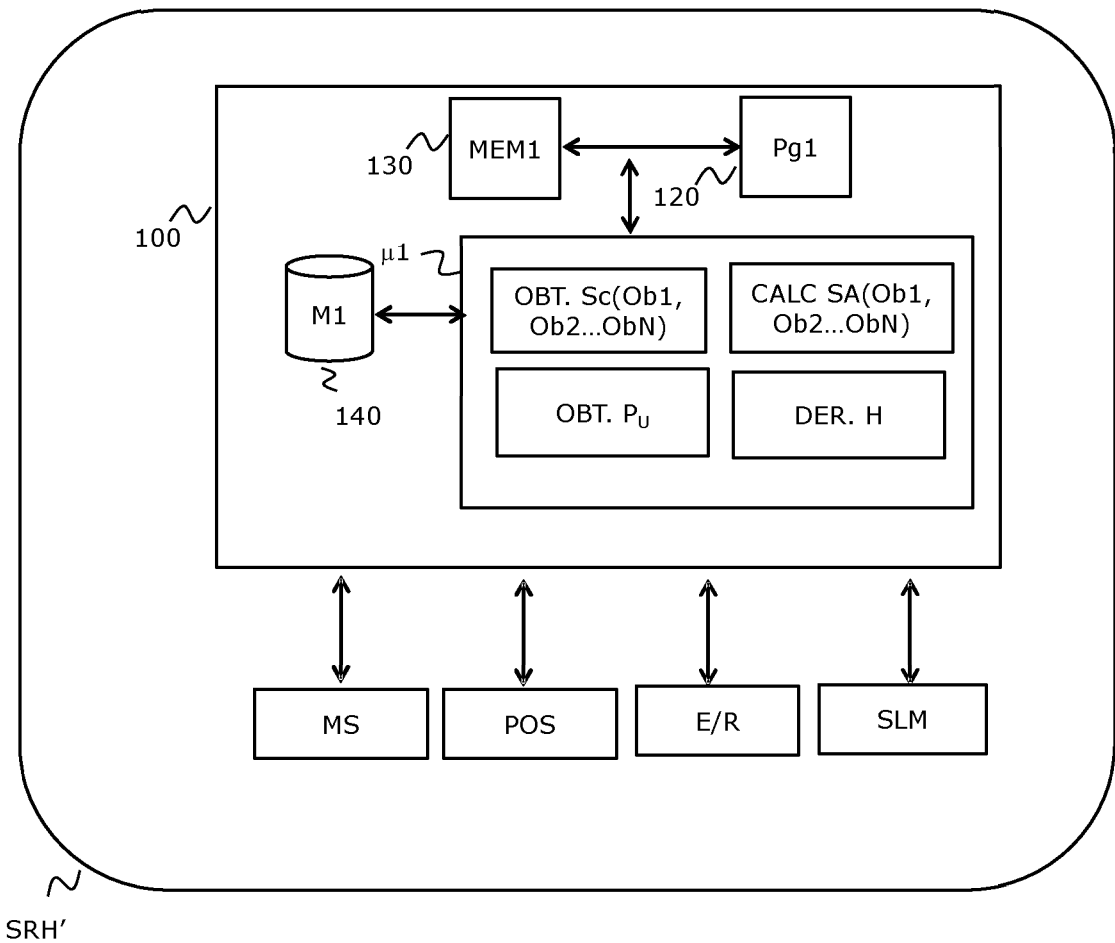


FIG. 13



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement national

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

FA 856846
FR 1855901

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	YUSUKE SANDO ET AL: "Hidden surface removal of computer-generated holograms for arbitrary diffraction directions", APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC; US, vol. 52, no. 20, 1 juillet 2013 (2013-07-01), pages 4871-4876, XP001583479, ISSN: 0003-6935, DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.1364/A0.52.004871 * le document en entier *	1-15	G03H1/04
A,D	US 2016/231706 A1 (OH SEUNG TAIK [KR]) 11 août 2016 (2016-08-11) * alinéas [0048] - [0092]; figures 1,2,4 *	1-15	
A	ANTONIN GILLES ET AL: "Hybrid approach for fast occlusion processing in computer-generated hologram calculation", APPLIED OPTICS, vol. 55, no. 20, 10 juillet 2016 (2016-07-10), page 5459, XP055543661, WASHINGTON, DC; US ISSN: 0003-6935, DOI: 10.1364/A0.55.005459 * abrégé *	1-15	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			G03H
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 janvier 2019		Noirard, Pierre	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1855901 FA 856846**

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 **21-01-2019**

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 au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016231706 A1	11-08-2016	KR 20160097855 A	18-08-2016
		US 2016231706 A1	11-08-2016
