

Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art

Antonin Gilles, Patrick Gioia, Rémi Cozot, Luce Morin

▶ **To cite this version:**

Antonin Gilles, Patrick Gioia, Rémi Cozot, Luce Morin. Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art. Reims Image 2014, Nov 2014, Reims, France. pp.1 - 10. hal-01093050

HAL Id: hal-01093050
https://hal.science/hal-01093050

Submitted on 31 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Génération Numérique d'Hologrammes : État de l'Art

Antonin Gilles[1] Patrick Gioia[1,2] Rémi Cozot[1,3] Luce Morin[1,4]

[1] IRT b<>com Cesson-Sévigné France
[2] Orange Labs Rennes France
[3] Université de Rennes 1 Rennes France
[4] INSA Rennes Rennes France

Résumé

Cet article présente un état de l'art de la génération numérique d'hologrammes. Les méthodes présentées permettent de générer l'hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique réel d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie conventionnelle : (1) la nécessité d'utiliser une source laser cohérente et (2) l'obligation d'avoir un système optique extrêmement stable peuvent ainsi être évitées.

This paper reviews Computer Generated Holography techniques. Using these methods, it is possible to acquire holograms of synthetic or existing scenes without physical interference between light waves. Most limitations characterizing conventional holography, namely the need for a powerful, highly coherent laser and extreme stability of the optical system are thus avoided.

Mots clés : Holographie, Génération Numérique d'Hologrammes, Vidéo 3D, Laser

1 Introduction

Avec le développement des environnements immersifs et collaboratifs, les consommateurs souhaitent toujours plus d'immersion et de sentiment de présence lors de leurs interactions à distance. Les systèmes de télé-présence incluent aujourd'hui la spatialisation du son et la visualisation des interlocuteurs en grandeur nature. Ainsi, la capacité à fournir une visualisation 3D avec une illusion du relief naturelle et réaliste est devenue l'une des caractéristiques les plus attendues afin d'étendre les capacités d'immersion de ces systèmes.

La stéréoscopie [1] est aujourd'hui la méthode la plus largement utilisée pour la capture et la diffusion de vidéos 3D. Ce procédé consiste à créer une illusion de relief en envoyant deux vues différentes d'une même scène à chacun des yeux de l'utilisateur. Grâce à sa simplicité d'implémentation et à sa compatibilité avec les systèmes de visualisation 2D existants, la stéréoscopie a très vite attiré l'attention de nombreux chercheurs et industriels. Cependant, cette technologie présente toujours un certain nombre de contraintes et de limitations, comme la nécessité de porter des lunettes pour les écrans stéréoscopiques ou la zone de visualisation limitée des écrans auto-stéréoscopiques. De plus, la stéréoscopie ne fournit pas de parallaxe de mouvement et crée un conflit entre les indices d'accommodation et de convergence, ce qui peut produire une fatigue visuelle ou des maux de tête lors d'une utilisation prolongée. En réponse à ces limitations, plusieurs technologies alternatives ont été proposées ces dernières années. Parmi celles-ci, l'holographie est souvent considérée comme la plus prometteuse, puisqu'elle fournit l'illusion du relief la plus naturelle et la plus réaliste possible.

L'hologramme enregistre les informations d'amplitude et de phase provenant de la scène. C'est à dire les informations décrivant l'onde lumineuse. L'holo-

1. Il est à noter que l'utilisation du terme *stéréoscopie* pour désigner l'attribution d'une image différente à chaque oeil est abusive, puisqu'étymologiquement le préfixe *stéréo* fait référence à la notion d'espace.

gramme dit optique ou conventionnel n'enregistre pas directement ces informations (amplitude et phase) mais l'image d'amplitude de l'interférence entre deux ondes lumineuses. Cette image d'interférence permet de reconstruire l'onde complète. Tandis qu'en imagerie classique, chaque pixel mesure l'amplitude de l'onde provenant d'un angle solide donné (grâce au dispositif optique de l'objectif), en holographie, le pixel enregistre l'amplitude et la phase de l'onde provenant de l'ensemble de la scène. L'hologramme est affiché sur un écran holographique qui restitue l'onde lumineuse capturée par l'hologramme. L'onde lumineuse sortant de l'écran holographique correspond à l'onde émise par la scène. L'holographie fournit donc tous les indices de perception de la profondeur du système visuel humain. Il n'est pas nécessaire de porter de lunettes et il n'y a pas de fatigue visuelle. L'acquisition d'un hologramme optique s'effectue à l'aide d'un processus d'interférence entre deux faisceaux lumineux issus d'un laser. Le système optique doit être extrêmement stable car une vibration de l'ordre de la longueur d'onde du laser utilisé peut modifier radicalement les franges d'interférence. Cette contrainte, ainsi que la durée d'exposition et de développement du support photosensible, empêchent l'holographie optique conventionnelle d'être utilisée pour la capture de vidéos 3D ou pour une acquisition en extérieur. En outre l'holographie optique conventionnelle suppose que la scène est éclairée par un laser (donc monochromatique), ce qui rend très difficile la génération d'hologrammes en couleur et interdit l'acquisition de scènes illuminées par un éclairage naturel.

Pour éviter ces contraintes, plusieurs méthodes ont été proposées pour remplacer le processus d'acquisition optique d'un hologramme par des calculs numériques. Grâce à ces méthodes, il est possible de générer un hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie optique conventionnelle peuvent ainsi être évitées. Cet article présente un état de l'art de ces méthodes.

La Section 2 donne quelques notions théoriques sur l'holographie conventionnelle. La Section 3 présente les différentes méthodes de calcul de l'onde objet issue de la scène. La Section 4 présente les différentes méthodes de représentation de l'onde objet complexe en hologramme à valeurs réelles et positives.

2 Holographie Conventionnelle

Afin de mieux comprendre les méthodes de génération numérique d'hologrammes, cette section donne quelques notions théoriques sur l'holographie conventionnelle.

L'holographie a été inventée en 1947 par le physicien hongrois Dennis Gabor alors qu'il effectuait des recherches en microscopie électronique [1]. Toutefois, cette technique ne trouva d'application optique qu'avec le développement des premiers lasers dans les années 1960 [2]. Alors que la photographie ou la vidéo conventionnelles ne permettent de capturer que l'intensité de la lumière, l'holographie permet d'enregistrer à la fois l'amplitude et la phase de l'onde lumineuse provenant d'un objet éclairé à la lumière d'un laser. Lorsqu'il est éclairé par le laser ayant servi pour l'enregistrement, l'hologramme restitue une image en relief de l'objet initial, donnant l'illusion à l'observateur que l'objet est physiquement présent dans la scène. L'holographie fournit ainsi une illusion de relief naturelle et réaliste.

Le procédé holographique comprend généralement deux étapes : une étape d'enregistrement et une étape de restitution. Le schéma général du processus d'acquisition optique est donné Figure 1. L'onde cohérente (mono fréquentielle) issue d'un laser est séparée en deux faisceaux : le premier faisceau, appelé onde objet, est diffracté ou/et réfléchi par l'objet en direction de la plaque photosensible, tandis que le deuxième, appelé onde de référence, illumine la plaque directement. Les franges d'interférence ainsi obtenues sont enregistrées par développement chimique du support photosensible. Ce motif d'interférence est appelé hologramme. Ainsi, si $O = |O| \exp(j\phi(O))$ et $R = |R| \exp(j\phi(R))$ correspondent respectivement à l'onde objet et à l'onde de référence dans le plan de l'hologramme, l'intensité enregistrée est donnée par :

$$\begin{aligned} H &= K(O+R)(O+R)^* \\ &= K|O|^2 + K|R|^2 + KOR^* + KRO^* \end{aligned} \quad (1)$$

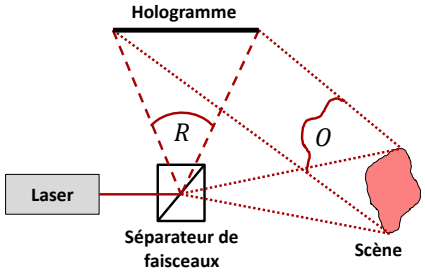


FIGURE 1 – Acquisition optique d'un hologramme : le faisceau du laser est diffracté et réfléchi par la scène donnant l'onde objet (O) qui crée des franges d'interférence sur l'Hologramme avec le faisceau de l'onde de référence (R).

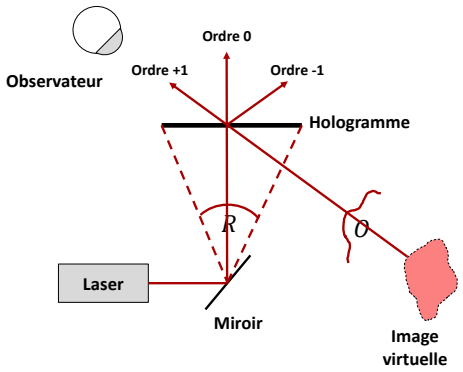


FIGURE 2 – Restitution optique d'un hologramme : l'hologramme est éclairé par l'onde de référence (R) ce qui reconstruit l'onde objet (O).

où K est une constante et C^* est le conjugué de C. L'hologramme dépend donc à la fois de l'amplitude et de la phase de l'onde objet.

Le schéma général du processus de restitution optique est donné Figure 2. L'hologramme est éclairé par l'onde de référence R utilisée lors de l'étape d'acquisition. Ainsi, la lumière transmise par l'hologramme est donnée par :

$$\begin{aligned} U &= H.R \\ &= K(|O|^2 + |R|^2)R + K|R|^2O + KR^2O^* \quad (2) \end{aligned}$$

L'onde lumineuse transmise par l'hologramme comprend trois termes. Le premier terme, appelé ordre de diffraction zéro, est proportionnel à l'onde de référence R. Il représente l'onde non diffractée passant à travers l'hologramme. Le deuxième terme, appelé "image virtuelle", est proportionnel à l'onde objet O. Il produit une image en trois dimensions de l'objet, donnant l'illusion à l'observateur que l'objet est physiquement présent dans la scène. Le troisième terme, appelé "image réelle" ou "image jumelle", est proportionnel au conjugué de l'onde objet O^*. Il produit une image pseudoscopique de l'objet avec un relief inversé. L'ordre de diffraction zéro et l'image réelle sont des artefacts qui peuvent se superposer avec l'onde objet restituée. Cependant, quand l'onde de référence et l'onde objet éclairent l'hologramme avec des angles d'incidence différents lors de l'enregistrement, les trois ondes sont transmises à des angles différents lors de la restitution, permettant à l'image 3D de l'objet d'être clairement observée [3]. Malgré ses propriétés prometteuses pour la visualisation 3D, l'holographie conventionnelle présente de nombreuses contraintes qui l'empêchent d'être utilisée pour la capture de vidéos 3D ou pour une acquisition en extérieur. En effet, le processus d'acquisition optique nécessite que la scène soit éclairée exclusivement à l'aide d'un laser et que le dispositif optique soit extrêmement stable, car la moindre vibration peut détruire les franges d'interférence. Pour éviter ces contraintes, plusieurs méthodes ont été proposées ces dernières années pour remplacer le processus d'acquisition optique d'un hologramme par des calculs numériques. Grâce à ces méthodes, il est possible de générer un hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par le processus physique réel d'interférence entre deux ondes lumineuses.

Les méthodes de génération numérique d'hologrammes comprennent généralement deux étapes : (1) une étape de calcul de l'onde objet, et (2) une étape de représentation de cette onde complexe en hologramme. L'étape de calcul de l'onde objet correspond au calcul de la propagation de la lumière provenant de la scène jusqu'au plan hologramme. Durant l'étape de représentation, l'onde objet complexe doit être transformée en valeurs positives et réelles pour former un hologramme.

3 Calcul de l'onde objet

La première étape des méthodes de génération numérique d'hologrammes est de calculer la propagation de la lumière provenant de la scène jusqu'au plan hologramme pour former l'onde objet. Pour cela, il est possible d'utiliser un modèle 3D de la scène. Ce modèle 3D peut être décomposé en un nuage de points ou en un maillage de polygones.

3.1 A partir d'un nuage de points

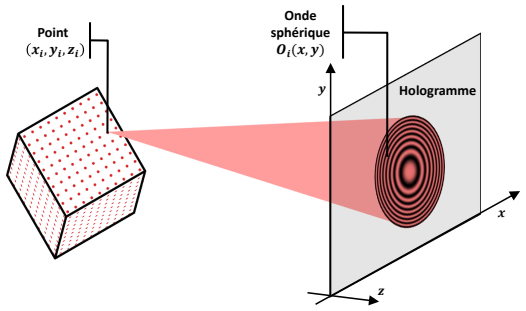


FIGURE 3 – Calcul de l'onde objet à partir d'un nuage de points : l'hologramme est calculé comme la somme des ondes sphériques issues des points arrivant sur le plan hologramme.

Dans les premiers travaux sur la génération numérique d'hologrammes [4], les scènes 3D étaient représentées sous forme d'un nuage de points non maillés, chaque point correspondant à une source lumineuse sphérique (figure 3). L'onde sphérique émise par un point i de coordonnées (x_i, y_i, z_i) et échantillonnée dans le plan de l'hologramme aux coordonnées $(x, y, 0)$ est donnée par :

$$O_i(x,y) \quad = \quad \frac{a_i}{r_i} \exp[j(kr_i + \phi_i)] \qquad (3)$$

où a_i et ϕ_i sont respectivement l'amplitude et la phase initiale de la source (le point i). Le nombre d'onde k est donné par $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, avec λ la longueur d'onde de la lumière. La distance oblique r_i entre le point de la scène (x_i, y_i, z_i) et l'échantillon $(x, y, 0)$ dans le plan hologramme est donnée par :

$$r_i \quad = \quad \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z_i^2} \qquad (4)$$

Il est important de noter que le terme de dépendance temporelle $\exp(j\omega t)$ n'apparait pas dans l'équation (3) car les calculs peuvent se faire à temps fixé sans perte de généralité. Ainsi, l'onde objet complexe dans le plan de l'hologramme peut être calculée comme la superposition de toutes les ondes sphériques émises par tous les points de la scène :

$$O(x,y) \quad = \quad \sum_{i=0}^{N-1} \frac{a_i}{r_i} \exp[j(kr_i + \phi_i)] \qquad (5)$$

avec N le nombre de points de la scène.
Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre et est potentiellement la plus flexible pour générer l'hologramme d'une scène 3D. Cependant, la méthode originale proposée par Brown [4] ne prend pas en compte les occultations ni l'illumination de la scène, réduisant fortement le réalisme de l'image restituée. En effet, la gestion des occultations et la prise en compte de l'illumination de la scène 3D sont nécessaires pour que les objets plus proches occultent correctement les objets plus lointains et pour que chaque objet présente une réponse visuelle correcte à l'illumination de la scène. Dans [5], l'auteur propose une méthode pour prendre en compte les occultations et l'illumination de la scène lors du calcul de l'onde objet. La méthode proposée prend en compte les occultations en effectuant une analyse géométrique de la scène : l'algorithme consiste à calculer la région de contribution de chacun des points lumineux de la scène dans le plan de l'hologramme en fonction des éventuelles surfaces occultantes entre ce point et le plan de l'hologramme. L'illumination de la scène est prise en compte en utilisant un nuage de points très dense avec une phase initiale aléatoire et une amplitude correspondant à la somme d'une composante d'ambiance, d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire. Une autre méthode proposée pour prendre en compte les occultations et l'illumination de la scène lors du calcul de l'onde objet consiste en l'utilisation du lancer de rayons [6–8]. Des rayons distribués uniformément dans la direction horizontale et verticale sont lancés depuis chaque pixel de

l'hologramme. L'intersection de ces rayons avec la scène produit un nuage de points qui sont considérés comme des sources lumineuses sphériques. L'onde provenant de ces points est alors calculée pour chacun des pixels de l'hologramme en utilisant la formule (5). La technique du lancer de rayons prend en compte naturellement les occultations et l'illumination de la scène.
Une autre limitation de la méthode originale proposée par Brown [4] est sa grande complexité algorithmique puisqu'elle nécessite un calcul par point de la scène et par pixel de l'hologramme. Plusieurs méthodes ont été proposées pour réduire la complexité du calcul de l'onde objet.

Pour réduire la complexité du calcul de l'onde objet, une méthode simple consiste à réduire la région de contribution de chaque source lumineuse sphérique dans le plan d'échantillonnage de l'hologramme. Pour cela, il est possible d'échantillonner l'onde objet dans un plan intermédiaire situé entre la scène et l'hologramme [9–12]. L'algorithme de simulation de la propagation des ondes comprend alors deux étapes. La première étape consiste à échantillonner l'onde objet issue du nuage de points lumineux dans le plan intermédiaire en utilisant la formule (5). Comme le plan est très proche de la scène, la région de contribution de chacun des points de la scène est très petite, et la charge de calcul est donc réduite. La deuxième étape consiste à propager l'onde objet depuis le plan intermédiaire jusqu'au plan de l'hologramme en utilisant la formule de propagation du spectre angulaire [13], qui nécessite deux transformées de Fourier. La complexité algorithmique de cette deuxième étape n'est dépendante que du nombre d'échantillons (pixels) dans le plan intermédiaire et le plan de l'hologramme.
Une autre manière de réduire le temps de calcul de l'onde objet est de réduire la complexité du calcul de la distance oblique donnée par l'équation (4). En effet, une grande partie du temps de calcul est utilisée pour calculer cette distance. Pour réduire la complexité du calcul de la distance oblique, il est possible de tirer parti du fait que la distance d'un point de la scène change peu d'un échantillon de l'hologramme à un autre, et d'utiliser une relation de récurrence pour la calculer, diminuant les temps de calcul de manière significative [14, 15]. Dans [16], les auteurs proposent de pré-calculer la distance oblique (4) et de la stocker dans une table de correspondance indexée suivant x_i, y_i et z_i. Cette table de correspondance est alors simplement adressée lors du calcul de l'onde objet. Pour réduire la taille mémoire occupée par la table de correspondance, la scène doit être placée proche du plan hologramme.
Il est aussi possible de réduire la complexité du calcul de l'onde objet en utilisant une table de correspondance indexée suivant z_i pour stocker l'onde sphérique émise par un ensemble de sources lumineuses s_i de coordonnées $(0, 0, z_i)$ [17–19]. Ainsi, l'onde objet émise par la scène peut être simplement calculée en adressant la table de correspondance pour chacun des points de la scène et en ajoutant leurs contributions dans le plan de l'hologramme. Cette méthode permet de réduire considérablement le temps de calcul de l'onde objet. Dans [20], les auteurs proposent une méthode pour calculer l'onde objet à partir d'une carte de profondeur et d'une carte d'intensité. Cette méthode tire parti des redondances spatiales qui existent au sein des cartes de profondeur et d'intensité d'une scène 3D afin de réduire la complexité du calcul de l'onde objet. La méthode proposée comprend trois étapes. La première étape consiste à analyser les redondances spatiales dans les cartes de profondeur et d'intensité en utilisant une méthode de codage par plages. La méthode de codage par plages réduit les redondances spatiales en regroupant les points adjacents de la scène ayant la même profondeur et la même intensité. Ces groupements de points sont ensuite classés en fonction du nombre de points N qui les composent. La seconde étape consiste à utiliser une table de correspondance indexée par z_i et N pour stocker l'onde lumineuse issue des groupements de N points en ajoutant les ondes sphériques émises par chacun des points du groupement. La troisième étape consiste à adresser cette table de correspondance pour calculer l'onde issue de tous les groupements de points. En utilisant cette approche, le nombre de points de la scène peut ainsi être fortement diminué, et par conséquent le temps de calcul de l'onde objet est réduit. Dans [21], les auteurs proposent de réduire l'occupation mémoire de la table de correspondance en exploitant la symétrie circulaire

d'une onde sphérique échantillonnée dans un plan. La méthode proposée consiste à ne stocker dans la table de correspondance qu'une ligne de l'onde sphérique échantillonnée dans la direction radiale. Pour chaque plan de la scène situé à la distance z_i du plan de l'hologramme, l'onde sphérique complète est générée à partir de la ligne pré-calculée et stockée dans une table de correspondance temporaire. L'onde sphérique issue de chacun des points du plan est alors générée en adressant cette table de correspondance temporaire.

Enfin, il est possible de réduire la complexité du calcul de l'onde objet en tirant parti des redondances temporelles entre deux images consécutives d'une vidéo 3D [22–26]. En effet, il n'y a que peu de changements entre deux images d'une vidéo, et il n'est pas nécessaire de recalculer toute l'onde objet pour chaque image. Le principe est de détecter les changements dans la scène, de calculer l'onde lumineuse des points qui ont changé et d'ajouter cette onde à l'onde objet de l'image précédente.
Bien que de nombreuses méthodes aient été proposées pour réduire le temps de calcul de l'onde objet à partir d'un nuage de points, cette approche présente toujours une grande complexité. En effet, pour que l'image 3D de l'objet apparaisse solide et continue, la scène doit être composée d'une grande densité de points, rendant le calcul de l'onde objet beaucoup trop long pour être utilisé dans un système temps réel.

3.2 A partir d'un maillage de polygones

Pour contourner les limites des méthodes basées sur une représentation de la scène sous forme d'un nuage de points, une méthode basée sur un maillage de la scène en polygones a été proposée [27]. Suivant cette approche, la scène est représentée sous la forme d'un maillage de polygones en 3D (Figure 4). Chacun des polygones constituant la scène est considéré comme une source de lumière surfacique.

Les systèmes de coordonnées utilisés dans cette approche sont représentés figure 4. Le système de coordonnées global est défini par (x, y, z) tel que l'hologramme est situé dans le plan de coordonnées

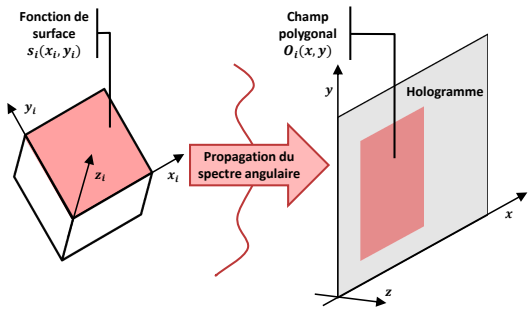


FIGURE 4 – Calcul de l'onde objet à partir d'un maillage de polygones : chaque polygone propage une onde jusqu'au plan hologramme.

$(x, y, 0)$. Des coordonnées locales sont définies pour chaque polygone i par (x_i, y_i, z_i), telles que le polygone est situé dans le plan $(x_i, y_i, 0)$. Pour chaque polygone, une fonction surfacique complexe $s_i(x_i, y_i)$ est définie pour donner au polygone sa forme, sa luminance et sa texture. Le champ lumineux complexe O_i émis par le polygone dans le plan hologramme est appelé champ polygonal. Le champ polygonal $O_i(x, y)$ ne peut pas être calculé à l'aide des formules de propagation classiques telles que la propagation du spectre angulaire car ces formules ne peuvent s'appliquer que dans le cas de la propagation entre deux plans parallèles [13]. Dans [28–32], les auteurs proposent une méthode pour calculer la propagation d'une onde lumineuse entre deux plans non parallèles basée sur une rotation de coordonnées dans le domaine de Fourier. Cette méthode peut être implémentée en utilisant deux transformées de Fourier rapide et une interpolation du spectre de Fourier. Le temps de calcul de cette propagation est comparable à celui des formules de propagation classiques entre deux plans parallèles. L'onde objet peut ainsi être calculée comme la somme des champs polygonaux $O_i(x, y)$ dans le plan de l'hologramme :

$$O(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} O_i(x, y) \quad (6)$$

Dans la mesure où cette méthode nécessite deux transformées de Fourier et une interpolation du

spectre de Fourier, le calcul d'un champ polygonal est plus lent que celui d'une onde sphérique émise par un point. Cependant, le nombre de polygones nécessaire pour former la surface d'un objet est très inférieur au nombre de points. Ainsi, le calcul total de l'onde objet dans le cas d'une approche par maillage polygonal peut être moins long que dans le cas d'une approche par nuage de points. Malgré ses nombreux atouts, la méthode originale proposée par Leseberg [27] ne prend pas en compte les occultations, ni l'illumination de la scène, réduisant fortement le réalisme de l'image restituée. Dans [30], les auteurs proposent un modèle numérique d'illumination pour améliorer l'aspect visuel de l'objet. Dans [33, 34], les auteurs proposent une méthode pour prendre en compte les occultations lors du calcul de l'onde objet. Cette méthode utilise la formule de propagation entre deux plans non parallèles présentée dans [28] pour calculer l'occultation d'une onde lumineuse par une surface polygonale. Le principal inconvénient des méthodes basées sur un maillage polygonal de la scène est la grande quantité de mémoire nécessaire au calcul de la propagation de tous les champs polygonaux. Dans [35], les auteurs proposent une méthode pour réduire l'utilisation de la mémoire principale durant le calcul de l'onde objet en divisant l'onde objet en segments. Seuls quelques segments de l'onde sont stockés et traités simultanément. Cette méthode permet de calculer la propagation d'un grand champ lumineux, même dans le cas où il ne peut pas être stocké entièrement dans la mémoire principale. Dans [36], les auteurs proposent une méthode pour calculer de manière analytique l'onde objet d'une scène composée de facettes polygonales directement dans le domaine fréquentiel. L'algorithme permet de calculer directement le spectre de Fourier d'un champ polygonal dans le plan hologramme analytiquement, en évitant ainsi de devoir faire une transformée de Fourier par polygone. Une fois le spectre de Fourier de l'onde objet calculé, il faut effectuer une transformée de Fourier inverse pour obtenir l'onde objet dans le plan hologramme. Dans [37], les auteurs proposent une méthode pour calculer l'onde objet à partir d'un champ polygonal pré-calculé correspondant à un polygone de taille et de forme connues. La méthode consiste à pré-calculer et à stocker dans une table de correspondance le champ polygonal émis dans le plan de l'hologramme par un polygone de taille et de forme connues. Ensuite, pour chaque polygone de la scène, le champ pré-calculé est transformé en fonction de la translation et de la rotation du polygone à traiter pour générer le champ polygonal associé. Enfin, l'onde objet est calculée par superposition de tous les champs polygonaux de la scène.

4 Représentation de l'onde objet

Une fois l'onde objet calculée dans le plan de l'hologramme, il faut adopter une représentation de celle-ci qui puisse être encodée en hologramme, c'est-à-dire en valeurs réelles et positives. Une fois l'hologramme obtenu, celui-ci peut être imprimé sur une diapositive transparente ou affiché sur un *Spatial Light Modulator* (SLM). Tandis qu'un hologramme acquis optiquement ne peut moduler que l'amplitude de l'onde de référence incidente, un hologramme généré numériquement et affiché sur un SLM peut moduler l'amplitude ou la phase de l'onde incidente [13]. De plus, des méthodes ont été proposées pour générer des hologrammes qui modulent à la fois l'amplitude et la phase de l'onde incidente.

Un hologramme qui module uniquement l'amplitude de l'onde de référence incidente est appelé hologramme d'amplitude. Un hologramme d'amplitude peut facilement être généré en simulant l'interférence entre l'onde objet préalablement calculée et l'onde de référence. Ainsi, si $O = |O| \exp(j\phi(O))$ et $R = |R| \exp(j\phi(R))$ représentent respectivement l'onde objet et l'onde de référence dans le plan de l'hologramme, l'intensité calculée est donnée par :

$$\begin{aligned} I_{total} &= (O+R)(O+R)^* \\ &= |O|^2 + |R|^2 + 2\Re\{OR^*\} \end{aligned} \quad (7)$$

où $\Re\{C\}$ correspond à la partie réelle du nombre complexe C. Dans l'équation (7), les premier et second termes sont respectivement l'intensité de l'onde objet et l'intensité de l'onde de référence. Lors de la restitution, ces termes sont inutiles et produisent l'ordre de diffraction zéro, un artefact indésirable. Le troisième

terme est le motif d'interférence entre l'onde objet et l'onde de référence. Ce motif d'interférence contient toute l'information holographique nécessaire et suffisante pour la restitution de l'onde objet. Comme toute l'information holographique est contenue dans le troisième terme de l'équation (7), les deux premiers termes n'ont pas besoin d'être calculés, et l'équation (7) devient :

$$I = 2\Re\{OR^*\} \quad (8)$$

Cette technique a été introduite pour la première fois par Burch [38], puis proposée à nouveau par Lucente [17]. Lucente la désigne "intensité bipolaire" car l'intensité calculée contient à la fois des valeurs positives et négatives. Cette intensité est numériquement plus simple à calculer que I_{total} et présente l'avantage de ne pas produire l'ordre de diffraction zéro lors de la restitution. Une fois que cette intensité bipolaire a été calculée, elle doit être normalisée afin d'avoir des valeurs positives pour pouvoir être imprimée sur une diapositive ou affichée sur un SLM. L'étape de normalisation ne modifie pas les capacités de restitution de l'hologramme. Un hologramme qui module la phase de l'onde de référence incidente est appelé hologramme de phase. Comme il ne module pas l'amplitude de l'onde incidente, un hologramme de phase a une meilleure efficacité de diffraction qu'un hologramme d'amplitude. Cependant, la génération d'un hologramme de phase à partir de l'onde objet complexe est un problème non-linéaire pour lequel on ne peut pas trouver de solution analytique. En effet, plusieurs hologrammes de phase différents peuvent restituer la même onde objet. Par conséquent, la génération d'un hologramme de phase ne peut être effectuée qu'en utilisant un algorithme itératif. La famille d'algorithmes itératifs la plus connue est la famille des Transformée de Fourier Itératives (IFTA). Le premier algorithme IFTA a été proposé par Hirsch et al. en 1971 [39], puis adapté pour la génération d'hologrammes de phase par Gerchberg et Saxton [40]. Cet algorithme est ainsi souvent référencé comme algorithme de Gerchberg-Saxton dans la littérature. La Figure 5 présente un schéma bloc de cet algorithme.

Cet algorithme commence avec un hologramme initial, qui peut être défini comme l'onde objet complexe

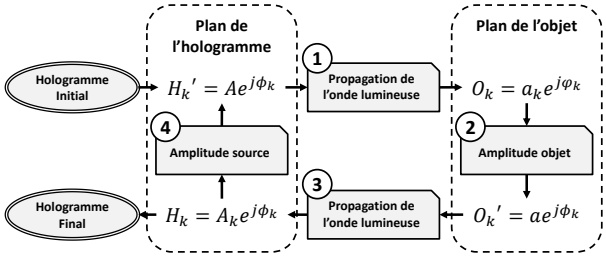


FIGURE 5 – Schéma bloc de l'algorithme de Gerchberg-Saxton

dans le plan de l'hologramme. A chaque itération k, l'algorithme suit ces étapes :

1. Le champ lumineux dans le plan hologramme est propagé jusqu'au plan objet, formant le champ objet $O_k = a_k \exp(j\varphi_k)$
2. L'amplitude a_k du champ O_k est remplacée par l'amplitude cible de la scène a, produisant un nouveau champ objet $O'_k = a \exp(j\varphi_k)$
3. Ce nouveau champ objet est propagé jusqu'au plan de l'hologramme, produisant le champ lumineux $H_k = A_k \exp(j\phi_k)$
4. L'amplitude A_k du champ H_k est remplacée par l'amplitude A de l'onde de référence utilisée pour la restitution, produisant un nouvel hologramme $H'_k = A \exp(j\phi_k)$

Ce processus est réitéré jusqu'à ce qu'un hologramme de phase qui reproduit l'onde objet soit atteint à une certaine erreur près. Fienup a démontré que cet algorithme permet de diminuer l'erreur de l'onde objet restituée à chaque pas d'itération [41]. Un hologramme qui module à la fois l'amplitude et la phase de l'onde de référence est appelé hologramme complexe. En modulant à la fois l'amplitude et la phase de l'onde incidente, la restitution de l'onde objet par l'hologramme ne présente aucun artefact, permettant à l'objet d'être observé clairement. Malheureusement, les SLMs actuels peuvent moduler soit la phase, soit l'amplitude d'une onde lumineuse, mais pas les deux. Ainsi, l'affichage d'un hologramme complexe ne peut se faire qu'à l'aide de deux SLMs, l'un permettant de moduler l'amplitude de l'onde de référence, l'autre permettant d'en moduler la phase [42–44].

Une autre méthode est d'utiliser un séparateur de faisceaux pour combiner les ondes lumineuses diffractées par deux SLMs, l'un affichant la partie réelle et l'autre affichant la partie imaginaire de l'hologramme complexe [45–47]. Enfin, d'autres méthodes ont été proposées pour afficher un hologramme complexe à l'aide d'un seul SLM en utilisant plusieurs pixels pour chaque valeur complexe de l'hologramme [48–50] au prix d'une perte de résolution ; de plus l'hologramme doit être recalculé pour convenir aux spécificités de l'affichage.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un état de l'art des méthodes de génération numérique d'hologrammes. Nous avons vu que le processus de génération numérique d'un hologramme se fait généralement en deux étapes : (1) une étape de calcul de l'onde lumineuse issue de la scène, et (2) une étape de représentation de cette onde complexe en hologramme à valeurs réelles et positives. Nous avons présenté deux approches différentes pour le calcul de l'onde objet : une approche basée sur une représentation de la scène sous forme d'un nuage de points et une approche basée sur un maillage polygonal de la scène. Une fois calculée, l'onde objet doit être représentée sous la forme d'un hologramme à valeurs réelles et positives qui peut moduler l'amplitude et/ou la phase de l'onde lumineuse cohérente issue d'un laser pour restituer une image en trois dimensions de la scène. Grâce à ces méthodes, il est possible de générer un hologramme d'une scène synthétique ou réelle sans passer par un processus d'interférence entre deux ondes lumineuses. Les principales limitations liées à l'holographie conventionnelle telles que la nécessité d'utiliser une source laser cohérente ainsi que d'avoir un système optique extrêmement stable peuvent ainsi être évitées. Les scènes réelles peuvent être capturées à la lumière naturelle à l'aide d'une caméra de profondeur, permettant à l'holographie d'être utilisée en extérieur et ouvrant son champ d'application à la vidéo 3D. Ainsi, de nombreuses applications pratiques telles que les systèmes de téléprésence ou la télé-médecine pourront bénéficier des nombreux atouts de l'holographie pour l'acquisition et la visualisation 3D.

Références

[1] Denis Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161(4098) :777, 1948. 03149.

[2] Emmet N. Leith and Juris Upatnieks. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory. *Journal of the Optical Society of America*, 52(10) :1123–1128, October 1962. 01366.

[3] Emmet N. Leith and Juris Upatnieks. Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects. *Journal of the Optical Society of America*, 54(11) :1295–1301, November 1964. 00902.

[4] B. R. Brown and A. W. Lohmann. Complex Spatial Filtering with Binary Masks. *Applied Optics*, 5(6) :967–969, June 1966. 00641.

[5] John S. Underkoffler. Occlusion processing and smooth surface shading for fully computed synthetic holography. In *Practical Holography XI and Holographic Materials III*, volume Proc. SPIE 3011, pages 19–30, April 1997. 00048.

[6] Rick H-Y Chen and Timothy D Wilkinson. Computer generated hologram with geometric occlusion using GPU-accelerated depth buffer rasterization for three-dimensional display. *Applied optics*, 48(21) :4246–4255, July 2009.

[7] Hao Zhang, Neil Collings, Jing Chen, Bill Crossland, Daping Chu, and Jinghui Xie. Full parallax three-dimensional display with occlusion effect using computer generated hologram. *Optical Engineering*, 50(7) :074003–074003–5, 2011. 00014.

[8] Hao Zhang, Qiaofeng Tan, and Guofan Jin. Full parallax three-dimensional computer generated hologram with occlusion effect using ray casting technique. *Journal of Physics : Conference Series*, 415(1) :012048, February 2013. 00000.

[9] Tomoyoshi Shimobaba, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with

wavefront recording plane. *Optics Letters*, 34(20) :3133–3135, October 2009.

[10] Tomoyoshi Shimobaba, Hirotaka Nakayama, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Rapid calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display. *Optics Express*, 18(19) :19504–19509, September 2010. 00065.

[11] Peter Tsang, W.-K. Cheung, T.-C. Poon, and C. Zhou. Holographic video at 40 frames per second for 4-million object points. *Optics Express*, 19(16) :15205–15211, August 2011.

[12] Jiantong Weng, Tomoyoshi Shimobaba, Naohisa Okada, Hirotaka Nakayama, Minoru Oikawa, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Generation of real-time large computer generated hologram using wavefront recording method. *Optics Express*, 20(4) :4018–4023, February 2012. 00038.

[13] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Roberts and Company Publishers, Englewood, Colo, 3rd edition, 2005.

[14] Kyoji Matsushima and Masahiro Takai. Recurrence Formulas for Fast Creation of Synthetic Three-Dimensional Holograms. *Applied Optics*, 39(35) :6587–6594, December 2000. 00075.

[15] Hiroshi Yoshikawa, Susumu Iwase, and Tadashi Oneda. Fast computation of Fresnel holograms employing difference. In *Practical Holography XIV and Holographic Materials VI*, volume Proc. SPIE 3956, pages 48–55, May 2000. 00066.

[16] Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi, and Ryo Kitayama. Real-Time Generation of Full Color Image Hologram with Compact Distance Look-up Table. In *Advances in Imaging*, OSA Technical Digest (CD), page DWC4. Optical Society of America, April 2009. 00033.

[17] Mark E. Lucente. Interactive computation of holograms using a look-up table. *Journal of Electronic Imaging*, 2(1) :28–34, January 1993. 00355.

[18] Seung-Cheol Kim, Jong-Kil Lee, and Eun-Soo Kim. Fast Generation of Computer Generated Hologram with Reduced Look-up Table. In *Adaptive Optics : Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, OSA Technical Digest (CD), page DTuB7. Optical Society of America, June 2007. 00002.

[19] Seung-Cheol Kim and Eun-Soo Kim. Effective generation of digital holograms of three-dimensional objects using a novel look-up table method. *Applied Optics*, 47(19) :D55–D62, July 2008.

[20] Seung-Cheol Kim and Eun-Soo Kim. Fast computation of hologram patterns of a 3d object using run-length encoding and novel look-up table methods. *Applied Optics*, 48(6) :1030–1041, February 2009. 00073.

[21] Takashi Nishitsuji, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Nobuyuki Masuda, and Tomoyoshi Ito. Fast calculation of computer-generated hologram using the circular symmetry of zone plates. *Optics Express*, 20(25) :27496–27502, December 2012. 00008.

[22] Wendy Plesniak. Incremental update of computer-generated holograms. *Applied Optics*, 42(6) :1560–1571, June 2003. 00020.

[23] Seung-Cheol Kim, Jung-Hoon Yoon, and Eun-Soo Kim. Fast generation of three-dimensional video holograms by combined use of data compression and lookup table techniques. *Applied Optics*, 47(32) :5986–5995, November 2008. 00049.

[24] Seung-Cheol Kim, Xiao-Bin Dong, Min-Woo Kwon, and Eun-Soo Kim. Fast generation of video holograms of three-dimensional moving objects using a motion compensation-based novel look-up table. *Optics Express*, 21(9) :11568–11584, May 2013. 00011.

[25] Xiao-Bin Dong, Seung-Cheol Kim, and Eun-Soo Kim. MPEG-based novel look-up table

for rapid generation of video holograms of fast-moving three-dimensional objects. *Optics Express*, 22(7) :8047, April 2014. 00003.

[26] Xiao-Bin Dong, Seung-Cheol Kim, and Eun-Soo Kim. Three-directional motion compensation-based novel-look-up-table for video hologram generation of three-dimensional objects freely maneuvering in space. *Optics Express*, 22(14) :16925, July 2014. 00001.

[27] Detlef Leseberg and Christian Frère. Computer-generated holograms of 3-D objects composed of tilted planar segments. *Applied Optics*, 27(14) :3020–3024, July 1988. 00133.

[28] Kyoji Matsushima, Hagen Schimmel, and Frank Wyrowski. New creation algorithm for digitally synthesized holograms in surface model by diffraction from tilted planes. In *Practical Holography XVI and Holographic Materials VIII*, volume Proc. SPIE 4659, pages 53–60, June 2002. 00012.

[29] Kyoji Matsushima, Hagen Schimmel, and Frank Wyrowski. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves. *Journal of the Optical Society of America A*, 20(9) :1755–1762, September 2003. 00194.

[30] Kyoji Matsushima and Akinobu Kondoh. Wave optical algorithm for creating digitally synthetic holograms of three-dimensional surface objects. In *Practical Holography XVII and Holographic Materials IX*, volume Proc. SPIE 5005, pages 190–197, May 2003. 00023.

[31] Kyoji Matsushima. Rotational Transformation for Reconstruction of Digital Holography and CGH Creation. In *Adaptive Optics : Analysis and Methods/Computational Optical Sensing and Imaging/Information Photonics/Signal Recovery and Synthesis Topical Meetings on CD-ROM*, OSA Technical Digest (CD), page DWB4. Optical Society of America, June 2007. 00000.

[32] Kyoji Matsushima. Formulation of the rotational transformation of wave fields and their application to digital holography. *Applied Optics*, 47(19) :D110–D116, July 2008.

[33] Kyoji Matsushima and Akinobu Kondoh. A wave-optical algorithm for hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms for three-dimensional objects. In *Practical Holography XVIII : Materials and Applications*, volume Proc. SPIE 5290, pages 90–97, June 2004. 00028.

[34] Kyoji Matsushima. Exact hidden-surface removal in digitally synthetic full-parallax holograms. In *Practical Holography XIX : Materials and Applications*, volume Proc. SPIE 5742, pages 25–32, May 2005.

[35] Kyoji Matsushima and Sumio Nakahara. Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method. *Applied Optics*, 48(34) :H54–H63, December 2009.

[36] Lukas Ahrenberg, Philip Benzie, Marcus Magnor, and John Watson. Computer generated holograms from three dimensional meshes using an analytic light transport model. *Applied Optics*, 47(10) :1567–1574, April 2008.

[37] Hironobu Sakata and Yuji Sakamoto. Fast computation method for a Fresnel hologram using three-dimensional affine transformations in real space. *Applied Optics*, 48(34) :H212–H221, December 2009. 00041.

[38] J.J. Burch. A computer algorithm for the synthesis of spatial frequency filters. *Proceedings of the IEEE*, 55(4) :599–601, April 1967. 00120.

[39] P. M. Hirsch, J. A. Jordan, and B. J. Lesem. Method of making an object independent diffuser, 1971. 00000.

[40] RW Gerchberg and Owen Saxton. A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35 :237–246, 1972. 03267.

[41] J. R. Fienup. Iterative Method Applied To Image Reconstruction And To Computer-Generated Holograms. *Optical Engineering*, 19(3) :193297–193297–, 1980. 00434.

[42] Luiz Gonçalves Neto, Danny Roberge, and Yunlong Sheng. Full-range, continuous, complex mo-

dulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions. *Applied Optics*, 35(23) :4567–4576, August 1996. 00121.

[43] R. Tudela, I. Labastida, E. Martin-Badosa, S. Vallmitjana, I. Juvells, and A. Carnicer. A simple method for displaying Fresnel holograms on liquid crystal panels. *Optics Communications*, 214(1–6) :107–114, December 2002.

[44] Mei-Li Hsieh, Mao-Ling Chen, and Chau-Jern Cheng. Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique. *Optical Engineering*, 46(7) :070501–070501–3, 2007. 00018.

[45] Raul Tudela, Estela Martin-Badosa, Ignasi Juan I. Labastida, Encarnacion Pleguezuelos, Santiago Vallmitjana, Ignacio P. Juvells, and Arturo Carnicer. Full complex Fresnel holograms displayed on liquid crystal devices. In *19th Congress of the International Commission for Optics : Optics for the Quality of Life*, volume Proc. SPIE 4829, pages 458–459, November 2003. 00049.

[46] Raul Tudela, Estela Martin-Badosa, Ignasi Labastida, Santiago Vallmitjana, and Artur Carnicer. Wavefront reconstruction by adding modulation capabilities of two liquid crystal devices. *Optical Engineering*, 43(11) :2650–2657, 2004. 00000.

[47] Soo-Gil Kim, Byoungho Lee, and Eun-Soo Kim. Removal of bias and the conjugate image in incoherent on-axis triangular holography and real-time reconstruction of the complex hologram. *Applied Optics*, 36(20) :4784–4791, July 1997. 00057.

[48] Philip Birch, Rupert Young, Chris Chatwin, Maria Farsari, David Budgett, and John Richardson. Fully complex optical modulation with an analogue ferroelectric liquid crystal spatial light modulator. *Optics Communications*, 175(4-6) :347–352, March 2000.

[49] Victor Arrizón. Complex modulation with a twisted-nematic liquid-crystal spatial light modulator : double-pixel approach. *Optics Letters*, 28(15) :1359–1361, August 2003. 00027.

[50] Victor Arrizón, Guadalupe Méndez, and David Sánchez-de La-Llave. Accurate encoding of arbitrary complex fields with amplitude-only liquid crystal spatial light modulators. *Optics Express*, 13(20) :7913–7927, October 2005. 00030.