SYSTEME DE RECONSTRUCTION 3D PAR IMAGERIE POLARIMETRIQUE

Olivier Morel

Laboratoire Le2i – UMR CNRS 5158
12, rue de la Fonderie
71200 Le Creusot
olivier.morel@u-bourgogne.fr

Résumé : Pour répondre à des problématiques de plus en plus complexes, les systèmes de vision industrielle s'orientent progressivement vers des dispositifs évolués visant à extraire les informations tridimensionnelles des objets. Ainsi, le Laboratoire Le2i - UMR-CNRS 5158 du Creusot, dont l'une des grandes thématiques de recherche est le « contrôle qualité par vision artificielle », s'est progressivement orienté vers la vision tridimensionnelle. Devant la grande difficulté à numériser des objets fortement réfléchissants, une méthode de reconstruction par imagerie polarimétrique appelée : « Shape from Polarization » a été étendue. Cet article présente la réalisation du prototype complet permettant la numérisation d'objets métalliques fortement réfléchissants. Le programme d'acquisition et de traitement d'images a été entièrement développé sous le logiciel LabVIEW.

Mots clés : Reconstruction 3D, imagerie polarimétrique, surfaces réfléchissantes

INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, de nombreuses méthodes de numérisation par vision se sont développées. La technique la plus répandue est celle reposant sur la triangulation (f*igure 1*). Dans ce cas, le système de numérisation est constitué par une caméra numérique et un projecteur de trait laser. Connaissant la distance exacte entre la caméra et le projecteur, le relief peut être retrouvé en étudiant la déformation du trait laser sur l'objet. Malheureusement, comme le montre la *figure 2*, cette technique très éprouvée n'est pas applicable sur les objets dont la surface est parfaitement réfléchissante.

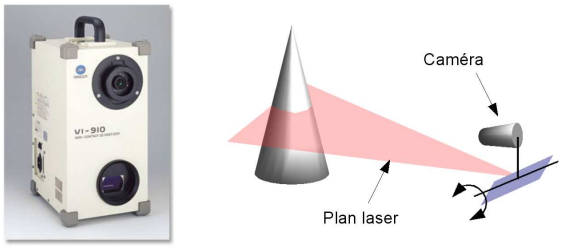

Figure 1 : Scanner 3D Minolta - pour remonter à l'information tridimensionnelle, la caméra analyse la déformation du plan laser projeté sur l'objet.

Figure 2 : La triangulation est ici possible sur la bille mate (à droite), mais elle est impossible sur la bille réfléchissante (à gauche).

De récents travaux de recherche ont montré d'autres systèmes de mesure adaptés aux surfaces réfléchissantes mais généralement limités à des objets de forme particulière : objets possédants de très faibles pentes ou objets primitifs tels que des sphères ou des cylindres. Pour déterminer la forme d'objets métalliques fortement réfléchissants plus variés, nous avons développé une méthode de reconstruction par imagerie polarimétrique reposant sur la technique de « Shape from Polarization ». Cette technique a été initialement introduite par [WB91] dans le domaine de la vision, puis reprise par [MKI04] pour la reconstruction d'objets diélectriques. Nous avons étendu cette méthode aux surfaces métalliques et avons proposé une nouvelle approche pour le calcul de la surface [MSMG06]. Le principe physique employé est le suivant : après réflexion par une surface réfléchissante, une onde lumineuse non polarisée devient partiellement linéairement polarisée. Les paramètres de polarisation étant liés à l'orientation de la surface, il devient alors possible de retrouver la forme de l'objet à partir des informations de polarisation de la lumière réfléchie. Ainsi, le processus de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique peut se décomposer selon trois étapes principales. La première étape qui concernent l'*imagerie polarimétrique* sera décrite dans la section suivante et montrera comment calculer les paramètres de polarisation de la lumière réfléchie par l'objet. La deuxième section présente la *détermination des normales à la surface* à partir des paramètres de polarisation en appliquant les lois de la physique. Enfin, la dernière section traitera de la *reconstruction de la surface* à partir du champ de normales et de l'affichage du modèle ainsi numérisé.

IMAGERIE POLARIMETRIQUE

Description du prototype

Le prototype de reconstruction tridimensionnelle par imagerie polarimétrique que nous avons développé est présenté sur la figure 4. Il est constitué de trois éléments principaux : une caméra numérique haute résolution équipée d'un objectif télécentrique, un système optique équivalent à un filtre polariseur tournant et un dôme d'éclairage diffusant qui fournit une lumière non polarisée. L'objet à numériser est placé à l'intérieur du dôme, au centre.

La caméra numérique est une caméra monochrome avec une profondeur de codage de 12 bits (4096 niveaux de gris). Elle est reliée à une carte d'acquisition National Instrument PCI-1428 à l'aide d'un câble type Caméra Link.

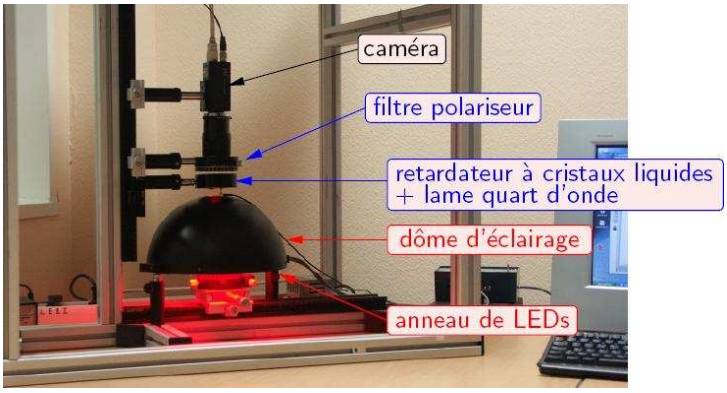

Figure 3 : Prototype de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique développé au laboratoire.

Acquisition des paramètres de polarisation

L'imagerie polarimétrique consiste à mesurer les paramètres de polarisation de la lumière reçue en chacun des pixels du capteur. Dans notre cas, nous allons être amenés à mesurer les caractéristiques d'une lumière *partiellement linéairement polarisée*. Celle-ci peut être également vue comme la somme de deux ondes lumineuses : l'une parfaitement linéairement polarisée et l'autre complètement non polarisée. Les caractéristiques d'une telle onde sont les suivantes : l'intensité lumineuse totale I, le degré de polarisation ρ (proportion de lumière effectivement polarisée) et l'angle de polarisation φ. Pour mesurer ces trois paramètres, seul un filtre polarisant tournant et une caméra sont nécessaires. Pour un pixel donné de l'image, nous obtenons une relation sinusoïdale entre l'intensité lumineuse mesurée et l'angle du filtre polariseur tournant(figure 4).

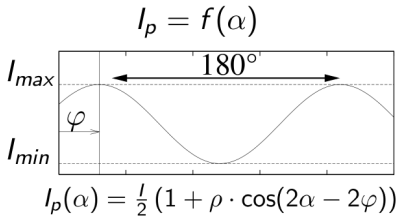

Figure 4 : Relation entre l'intensité lumineuse mesurée par un pixel et l'angle du filtre polariseur tournant.

Pour caractériser cette sinusoïde et ainsi calculer les trois paramètres de polarisation, il suffit de prendre un minimum de trois images (avec à chaque acquisition, des orientations différentes du filtre). Afin d'automatiser le calcul des paramètres de polarisation, nous avons employé un montage optique équivalent à un filtre polariseur tournant qui utilise un retardateur à cristaux liquides. En changeant la tension appliquée aux bornes de ce composant, les cristaux liquides tournent et permettent de changer l'état de polarisation de la lumière. Afin d'améliorer la précision sur la mesure des paramètres de polarisation, le système capture 18 images en tournant automatiquement l'ensemble « polariseur tournant » par pas de 10°.

Description du programme d'acquisition

L'acquisition concerne l'obtention d'une séquence de 18 images avec une consigne à chaque fois différente pour la commande du composant à cristaux liquides. Les images sont obtenues à l'aide de la bibliothèque IMAQ. La commande du composant à cristaux liquides est réalisée via un générateur commandé par la liaison série RS 232. Ainsi, pour changer l'orientation du filtre polariseur tournant, la bibliothèque VISA est utilisée par le programme. Comme le

temps de stabilisation de la cellule à cristaux liquide est relativement long (200 ms), l'approximation au sens des moindres carrés de la sinsusoïde pour chacun des pixels de l'image est réalisée pendant cette étape de stabilisation.

DÉTERMINATION DES NORMALES A LA SURFACE

L'imagerie polarimetrique permet de calculer les images de degré de polarisation et d'angle de polarisation de la lumière réfléchie par l'objet à numériser. Cette section décrit comment à partir de ces deux images, il est possible de déterminer la normale en chacun des points de la surface de l'objet.

Relations physiques

La normale en chacun des points de la surface peut être calculée à partir de deux angles appelés : angle zénithal et angle azimutal (figure 5). L'utilisation d'un objectif télécentrique, nous permet d'appliquer le système de projection orthographique et de calculer en chacun des pixels la normale à la surface avec la même formule. Ainsi, en plaçant l'axe optique de la caméra selon l'axe z, l'angle zénithal est égal à l'angle de réflexion. Or, les lois de l'optique (Snell-Descartes et Fresnel) montrent que le degré de polarisation de la lumière réfléchie dépend de l'indice de réfraction du matériau mais également de l'angle de réflexion (angle zénithal). Par conséquent, connaissant l'indice de réfraction du matériau, nous pouvons donc calculer l'angle zénithal. Par ailleurs, nous savons que la composante linéairement polarisée de la lumière réfléchie est orthogonale au plan d'incidence. L'angle azimutal est donc égal à l'angle de polarisation mesuré plus ou moins $\pi/2$: cette composante de la normale est donc ambiguë.

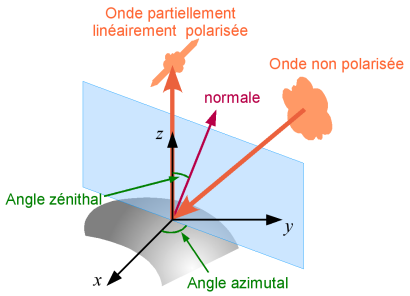

Figure 5 : La normale en tout point de la surface est caractérisée par les angles azimutal et zénithal.

Résolution de l'ambiguïté

La figure 6 représente l'image de l'angle de polarisation d'une sphère éclairée par une lumière non polarisée ainsi que l'angle théorique azimutal à déterminer. Comme nous pouvons le constater, l'angle de polarisation de la sphère est définie modulo π et ne permet pas à elle seule de calculer l'angle azimutal qui lui est défini modulo 2π.

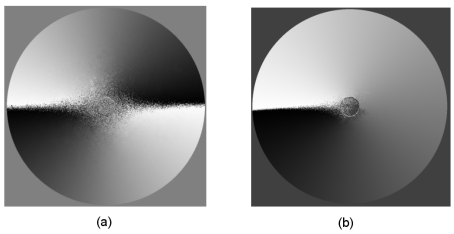

Figure 6 : (a) Image du degré de polarisation (valeurs allant de $-\pi/2$ noir à $\pi/2$ blanc). (b) Image de l'angle azimutal après levée de l'ambiguïté (valeurs allant de 0 à 2π).

Pour lever de manière robuste l'ambiguïté concernant la détermination de la normale, nous avons modifié le dôme d'éclairage (dans lequel se trouve l'objet à numériser) afin de pouvoir

le piloter par quadrants [MSSG05]. Le pilotage de chacun des quadrants est réalisé à l'aide de la liaison parallèle du PC et de la fonction « Ecrire les registres » de LabVIEW. Contrairement aux méthodes algorithmiques qui reposent sur la propagation de l'information à partir du bord de l'objet, ce système est indépendant de la forme de l'objet et insensible aux erreurs de propagation. En allumant successivement les quadrants selon les combinaisons SO/NE et NO/SE nous calculons une image de segmentation qui va nous permettre de lever l'ambiguïté automatiquement (figure 7). Une segmentation du dôme en deux parties N/S aurait été possible mais elle aurait imposé un alignement parfait entre la caméra et le système d'éclairage. La segmentation du dôme en quadrant permet ici de s'affranchir d'un positionnement précis de ces deux éléments.

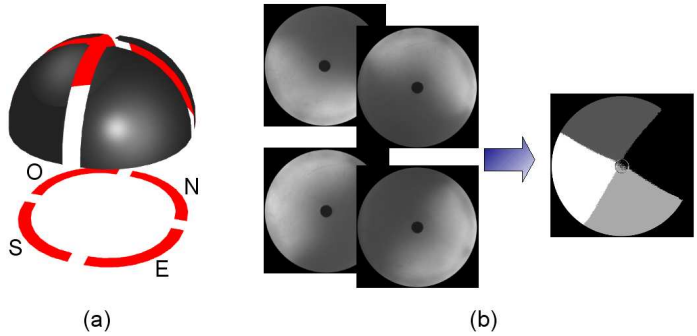

Figure 7 : (a) Vue éclatée du dôme d'éclairage segmenté selon 4 quadrants. (b) Calcul de l'image segmentée permettant de lever l'ambiguïté.

RECONSTRUCTION DE LA SURFACE

Une fois que l'ambiguïté est levée, nous obtenons un champ de normales, c'est-à-dire l'ensemble des orientations de la surface de l'objet. Pour calculer la forme finale de l'objet, il faut intégrer le champ de normales.

Intégration du champ de normales

L'intégration du champ de normales implique que la surface de l'objet soit continue. Nous utilisons ici une méthode d'intégration reposant sur la transformée de Fourier qui permet d'avoir un bon compromis entre la sensibilité au bruit et la vitesse d'intégration. Le calcul final de l'image de profondeur de l'objet est calculée avec les bibliothèques de traitement d'images IMAQ. Le processus complet de la numérisation des objets est représenté sur la figure 8.

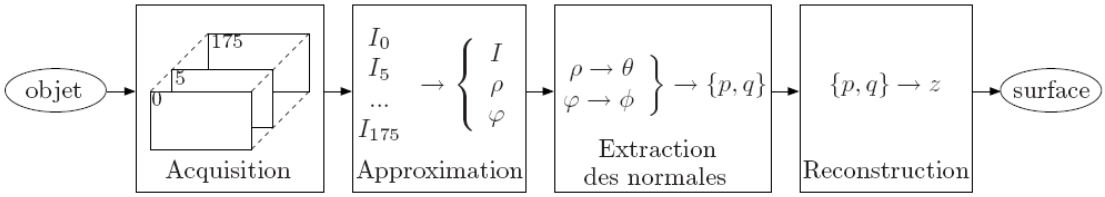

Figure 8 : Schéma représentant les différentes étapes du processus de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique (durée totale environ 8 secondes).

Rendu 3D

Une fois l'image de profondeur calculée (image sur laquelle à chaque niveau de gris correspond une certaine distance à l'objet), nous pouvons afficher le modèle 3D de l'objet connaissant la distance entre les pixels et les caractéristiques de l'objectif. Cette étape de rendu 3D, réalisée avec la bibliothèque « Contrôle d'image 3D » de LabVIEW, est facultative et permet simplement d'afficher de manière conviviale la forme tridimensionnelle de l'objet (figure 9).

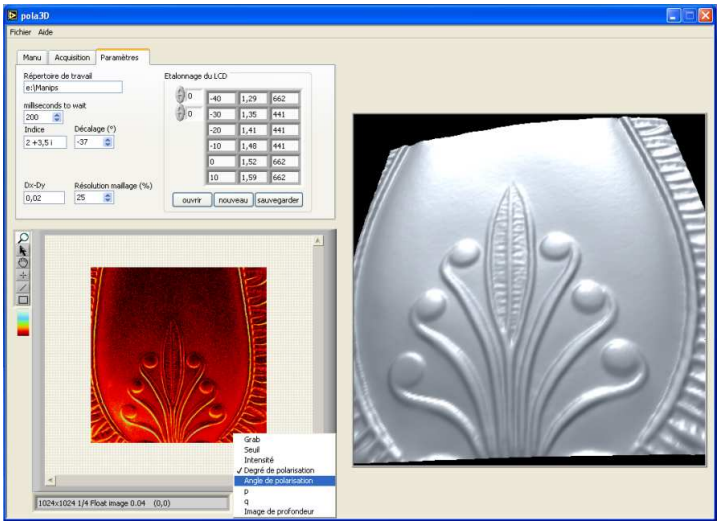

Figure 9 : Exemple de rendu 3D obtenu par la technique de reconstruction 3D par imagerie polarimétrique : décors d'un couvert de table.

CONCLUSION

Cette article présente un prototype de reconstruction tridimensionnelle par imagerie polarimétrique permettant de numériser des objets fortement réfléchissants. Cette technique est particulièrement bien adapté à l'inspection d'objets métalliques obtenus par estampage puis polissage. Par ailleurs, contrairement aux techniques classiques de reconstruction tridimensionnelle par triangulation laser, la numérisation est directe puisqu'aucune couche opaque ne doit être appliquée au préalable sur l'objet. Le prototype développé est entièrement automatisé : la caméra, le composant à cristaux liquides et le dôme d'éclairage sont pilotés par un même ordinateur à l'aide d'un logiciel entièrement développé sous LabVIEW

BIBLIOGRAPHIE

[WB91] L.B. Wolff, T.E. Boult, « Constraining Object Features Using a Polarization Reflectance Model », IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13(7), p. 635-657, 1991.

[MKI04] D. Miyazaki, M. Kagesawa, K. Ikeuchi, « Transparent Surface Modeling from a Pair of Polarization Images », IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(1), p. 73-82, 2004.

[MSMG06] O. Morel, C. Stolz, F. Meriaudeau, P. Gorria, « Active Lighting Applied to 3D Reconstruction of Specular Metallic Surfaces by Polarization Imaging », Applied Optics, 45(17), p. 4062-4068.

[MSSG05] O. Morel, C. Stolz, R. Seulin, P. Gorria, « Eclairage sectorisé pour la reconstruction tridimensionnelle par imagerie polarimétrique », Université de Bourgogne, Brevet n° 05.11674, 2005.