

Développement d'un scanner 3D multispectral

Development of a 3D multispectral scanner

A. Mansouri, A. Lathuiliere, F.S. Marzani et Y. Voisin

Le2i, UMR CNRS 5158, Université de Bourgogne, IUT du Creusot, 12 rue de la fonderie, 71200 Le Creusot, France
franck.marzani@u-bourgogne.fr

Manuscrit reçu le 15 juin 2004

Résumé et mots clés

Dans cet article, une nouvelle technique de scanning est proposée. Elle est basée sur un système stéréoscopique composé d'un projecteur de lumière structurée et d'une caméra multispectrale. Un tel système offre la possibilité de donner l'information 3D d'un point comme pour un scanner classique mais également de fournir une information précise sur le spectre de réflectance de ce point. Avant utilisation, il est nécessaire de calibrer l'ensemble. Le calibrage se déroule en deux étapes : la première d'entre elles consiste à caractériser la réponse spectrale de l'ensemble illuminant et caméra, la seconde permet de le calibrer géométriquement.

A ce stade, l'analyse de la scène à reconstruire consiste, en premier lieu, en l'acquisition d'une unique image multispectrale de la scène sans projection de motif caractéristique. Ensuite, à l'aide d'un projecteur LCD, une ligne de lumière est projetée en balayage sur la scène. Pour chaque projection de ligne, une image en niveaux de gris est acquise. L'utilisation des paramètres de calibrage géométrique permet de remonter aux coordonnées tridimensionnelles des points illuminés de la scène. De plus, et c'est ici que réside l'apport principal du système proposé, un spectre de réflectance est associé à chacun des points reconstruits. Cette information spectrale provient d'une part, de la caractérisation spectrale préalablement effectuée et d'autre part, de la première image multispectrale acquise sans projection de lumière structurée. Si l'on compare les résultats obtenus avec un tel système et ceux issus d'un système composé d'une caméra couleur ou d'un scanner couleur, on remarque que le spectre associé aux points tridimensionnels apporte une information considérablement plus riche qu'un simple triplet de composantes chromatiques : par exemple, l'information spectrale étant indépendante de l'illuminant utilisé pendant l'acquisition, la scène 3D reconstruite peut être aisément simulée sous un illuminant quelconque. Ce genre de simulations trouve son intérêt dans des applications multimédias de type visualisation d'objets 3D pour des musées virtuels.

Caméra multispectrale, lumière structurée, reconstruction 3D, caractérisation spectrale, calibrage géométrique, spectre de réflectance, visualisation.

Abstract and key words

In this paper, a new technique of scanning is proposed. It is based on a stereoscopic set composed of a structured light projector and a multispectral camera. Such a set can give the 3D information of a point like a scanner but can add accurate information about the spectral reflectance of this point. This set must be calibrated before using it. It is done by two steps: the first one is the spectral characterization of the couple illuminant and camera; the second allows geometrically calibrating the complete set.

Afterwards, the image acquisition can begin. A first multispectral image of the scene is obtained without projection of structured light. Then, with a LCD projector, a luminous line scans the scene. For each line, a grey level image is acquired. The use of the geometrical calibration parameters allows the processing of the three-dimensional

coordinates of the lighted points on the scene. Moreover, and it is the main goal of the proposed system, a spectral reflectance can be associated to the built points. This spectral data comes, on one hand, from the already-done spectral characterization, and, on the other hand, from the first multispectral image acquired without projection of structured light. By comparing the results issued from such a system and those from a system composed of a color camera or a color scanner, we notice that the spectrum associated to the three-dimensional points brings much more informative data than only three color components: for example, since the spectral reflectance is independent of the light used during the acquisition, the 3D scene can be easily simulated under any illuminant. This kind of simulations finds a great interest in several multimedia applications such as 3D objects visualization for virtual museums.

Multispectral camera, structured light, 3D reconstruction, spectral characterization, geometrical calibration, spectral reflectance, visualization.

1. Introduction

S Dans le domaine de la reconstruction d'objets tridimensionnels et de la métrologie, les systèmes basés sur la vision deviennent de plus en plus utilisés, y compris pour des applications industrielles. En particulier, dans le cadre d'applications dont la scène a un volume important, ils semblent préférables à ceux reposant sur des techniques basées sur l'interférométrie ou le moiré, qui sont des techniques permettant principalement de mesurer des profondeurs de l'ordre du nanomètre. Les systèmes de vision peuvent être divisés en deux catégories : vision passive ou vision active. Les systèmes passifs utilisent plusieurs capteurs de type caméra pour acquérir la scène dans laquelle se trouve le ou les objets à mesurer. La méthode utilisée, pour remonter aux informations de position et de profondeur, repose sur l'appariement des points entre images afin de reconstruire par triangulation leur position en 3D. La problématique de telles méthodologies se trouve dans la détection des points caractéristiques et dans leur appariement. Ce dernier n'est pas trivial pour deux raisons : premièrement, la différence de point de vue des caméras fait qu'une même zone de la scène apparaît différemment sur les différentes images ; deuxièmement, certaines parties de la scène visibles sur une image peuvent être occultées dans l'image (ou les images) issue(s) de l'autre (ou des autres) caméra(s). De plus, des objets très peu texturés deviennent très difficiles à analyser du fait du manque de points caractéristiques apparaissant à leur surface. Les systèmes actifs consistent à remplacer l'une des caméras d'un système passif par un dispositif qui émet une lumière structurée en direction de la scène. Cette lumière crée une sorte de texture sur la surface de la scène que la (ou les) caméra(s) peuvent acquérir. Si l'on suppose que ce système est calibré géométriquement, la position et la profondeur des points de la scène, illuminés par le motif projeté, peuvent être calculées. De nombreux types de lumière structurée ont déjà été étu-

diés. Le lecteur intéressé pourra se référer à l'article de Battle *et al.* dans lequel on peut trouver un état de l'art de ces techniques [Battle]. Parmi les principaux motifs lumineux, on peut citer la projection d'un point, d'un réseau de points, d'une ligne ou encore d'une grille. Dans le cas d'un ensemble de motifs géométriquement similaires, il peut être nécessaire de les coder pour les différencier : le codage peut être temporel si le motif évolue au cours du temps ou colorimétrique si la (ou les) caméra(s) sont couleur.

Dans ce cadre et depuis quelques années, l'utilisation de systèmes composés d'une caméra et d'un projecteur vidéo a fait son apparition [Rusinkiewicz1]. Les applications de tels systèmes sont nombreuses. Leur classification peut être de diverses formes [Battle]. On peut par exemple les classer en fonction de la précision requise au niveau de la reconstruction. Il est également possible de les caractériser suivant le fait que la reconstruction porte sur une seule image ou une séquence. L'aspect « in-line » ou « off-line » peut aussi être un critère de classification. En effet, des contraintes de traitement temps réel, même avec des fréquences inférieures à vingt-cinq images par seconde, sont déterminantes pour le choix des algorithmes mis en œuvre [Wang]. On peut aussi citer le type de motif lumineux projeté pour différencier les éléments caractéristiques projetés, les plus courants semblant être les lignes. Cette énumération non exhaustive montre le potentiel de ce genre de système et l'étendue des applications regroupées sous le terme de reconstruction 3D.

Jusqu'à présent, les systèmes de type projecteur-caméra utilisent une caméra niveau de gris ou couleur [Jaeggli]. L'intérêt principal de la couleur est de pouvoir différencier des motifs géométriquement similaires par un codage couleur. Le codage couleur permet également un appariement plus facile des points au moment de la mise en correspondance. De plus, l'information couleur disponible dans l'image acquise peut permettre de connaître la couleur des points reconstruits de la surface des

objets présents dans une scène. Toutefois, cette connaissance peut être fortement biaisée à cause du nombre limité de plans colorimétriques (trois). Le concept que nous souhaitons mettre en valeur dans cet article repose sur l'utilisation d'une caméra multispectrale munie de filtres interférentiels. Dans ce cas, un spectre de réflectance peut être associé à chaque point 3D reconstruit. Une image multispectrale est une image composée de plusieurs images monobandes de la même scène prises à différentes longueurs d'onde. Cela signifie que chaque pixel contient des informations radiométriques incluant la réflectance de la surface des objets de la scène imagée. Une telle technique d'imagerie suscite de plus en plus d'intérêt en raison de son grand potentiel d'application. Elle est surtout utilisée pour la résolution de problèmes appliqués nécessitant une analyse dans le domaine spectral : citons la télédétection, l'astronomie, l'imagerie médicale, l'analyse des œuvres d'art, les produits cosmétiques, la reproduction des couleurs de haute qualité, etc. [Hardeberg1], [Hardeberg2].

Le système que nous avons mis au point est décrit au paragraphe 2. Avant son utilisation pour analyser une scène, une phase de calibrage est nécessaire ; celle-ci est décrite dans la section 3. Sous ce terme, nous entendons, à la fois, le calibrage géométrique du système stéréoscopique et la caractérisation spectrale de la caméra. Le calibrage géométrique consiste à déterminer les paramètres intrinsèques de la caméra et du projecteur, ainsi que la position relative de l'un par rapport à l'autre. Quant à la caractérisation spectrale, elle est basée sur un modèle spectral de l'acquisition et vise à estimer la réponse spectrale de l'ensemble caméra + illuminant. Cette tâche est effectuée en présentant à la caméra un ensemble de « patchs » dont les spectres de réflectance sont parfaitement connus. Sous un illuminant donné, l'acquisition d'une image multispectrale de chacun des patchs permet d'en déduire la réponse spectrale de la caméra. Ensuite, l'analyse de scènes peut débuter. Après avoir placé un objet dans le volume de travail calibré. Sans utilisation du projecteur vidéo, une première image multispectrale est acquise. Puis, la scène est balayée par un motif lumineux de type ligne émis par le vidéo-projecteur. Pour chaque position de la ligne, une image, relative à la position sans filtres, est acquise par la caméra. Le traitement de ces images permet de reconstruire la scène, tant au niveau géométrique qu'au niveau spectral. Celui-ci est décrit dans le paragraphe 4. Il est suivi de la présentation de résultats et d'une discussion dans la section 5. Enfin, une conclusion achève cet article.

2. Description du système

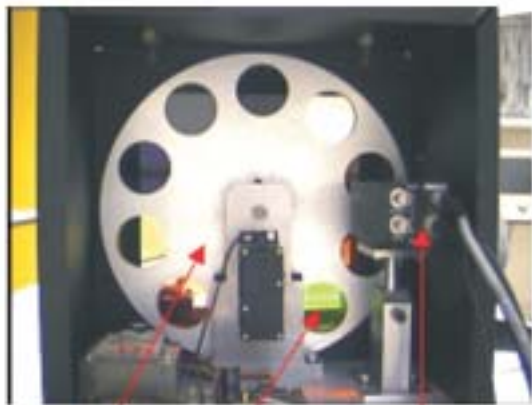
Nous avons tout d'abord développé un système d'acquisition multispectrale à bas coût [Mansouri1]. Il est conçu pour être flexible et portatif. Il se compose d'une simple caméra mono-

chromatique à capteur CCD, d'un objectif photographique standard de mise au point, d'un ensemble de sept filtres interférentiels, d'un ordinateur de type PC et d'un logiciel développé en langage C spécialement pour ce système. La longueur d'onde des filtres utilisés varie de 380 à 780 nm. Une roue motorisée en rotation est placée devant le système caméra/objectif. La roue est équipée de huit trous logeant les sept filtres (numérotés de 1 à 7) plus une position permettant de faire une acquisition sans filtre servant à la reconstitution spectrale. L'acquisition des images dans ce système est entièrement paramétrable et complètement contrôlée par ordinateur ; nous pouvons choisir le nombre de bandes spectrales (1-7), le nombre de captures pour chaque canal, le temps entre deux captures successives, le temps entre chaque ensemble de données ; le tout est synchronisé par le logiciel d'acquisition. Pour étendre la dynamique de la caméra et avoir des images suffisamment éclairées, nous commandons également le temps d'exposition en fonction de la transmittance de chaque filtre sous une ouverture fixe. Une image multispectrale typique est ainsi acquise en plaçant successivement chacun des filtres devant la caméra ; cette image se compose ainsi de sept captures. Chacune d'elles peut être considérée comme une image monobande issue d'un canal ayant une longueur d'onde égale à celle sur laquelle le filtre est centré. Une telle caméra multispectrale a le potentiel de reproduire la couleur avec plus de précision qu'une caméra RVB classique en évitant le métamérisme [Tominaga]. Elle possède surtout l'avantage de pouvoir remonter, à partir de la réponse de la caméra, à la réflectance spectrale de la surface imagée qui est une propriété physique indépendante de la perception visuelle et des conditions d'éclairage. Les figures 1a et 1b représentent ce système.

Le système scanner 3D multispectral complet que nous proposons est composé de la caméra détaillée ci-dessus, à laquelle on adjoint un vidéo-projecteur. Le dilemme classique des systèmes stéréoscopiques apparaît : plus les deux éléments composant l'ensemble stéréoscopique sont proches l'un de l'autre, plus facile est l'appariement des points caractéristiques entre les deux images. L'inconvénient d'une telle configuration est la faible précision au niveau de la reconstruction de la profondeur. Nous avons choisi un angle compris entre 35° et 40° entre l'axe de visée de la caméra et celui du projecteur, ce qui semble être le meilleur compromis [Woo]. Outre la luminosité qui est un paramètre important, la profondeur de champ du vidéo-projecteur ainsi que de faibles distorsions sont des paramètres dont il faut tenir compte pour le choix d'un appareil. Une étude que nous avons menée au sein de notre laboratoire a montré qu'un vidéo-projecteur pouvait être décrit par un modèle du type sténopé [Lathuiliere1]. En final, les résultats présentés dans cet article reposent sur une scène située à environ 2 m de la caméra multispectrale et du projecteur vidéo, avec un volume de 50 cm x 50 cm, sur une profondeur d'environ 20 cm.



(a) La caméra multispectrale vue de l'extérieur
 Largeur : 26 cm ; hauteur : 34 cm ; épaisseur : 17 cm
 poids : 4,5 kg ; vitesse : 1 image multispectrale/seconde



roue motorisée en rotation filtre caméra CCD
 (b) La caméra multispectrale vue de l'intérieur

Figure 1. Description du système multispectral utilisé.

3. Calibrage

Avant toute acquisition, une étape de calibrage, à la fois spectrale et géométrique est nécessaire. Une fois réalisée, plusieurs acquisitions et reconstructions peuvent être effectuées sans avoir à recalculer ces paramètres de calibrage. Concernant le calibrage géométrique, la seule contrainte est de ne pas modifier la configuration géométrique du couple stéréoscopique ; quant à la caractérisation spectrale, il faut conserver les paramètres d'acquisition de la caméra et ne pas modifier l'illuminant de la scène.

3.1. Caractérisation spectrale

Dans toutes les équations de cet article, nous utiliserons des lettres droites en caractères gras pour différencier, d'une part, les

vecteurs et les matrices et d'autre part les scalaires qui seront en italique.

En se basant sur un modèle spectral de la chaîne d'acquisition (voir figure 2), le signal d_k observé à la sortie de la caméra, relatif à un canal k ($k = 1...7$ puisque nous utilisons 7 filtres), est donné par l'équation suivante :

$$d_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \mathbf{I}(\lambda)\mathbf{r}(\lambda)\mathbf{c}(\lambda)\mathbf{t}_k(\lambda)\mathbf{o}(\lambda)d\lambda + \eta_k, \quad (1)$$

où $\mathbf{I}(\lambda)$ est la radiance spectrale de l'illuminant, $\mathbf{r}(\lambda)$ est la réflectance spectrale de la surface, $\mathbf{C}(\lambda)$ est la sensibilité spectrale de la caméra, $\mathbf{t}_k(\lambda)$ est la transmittance spectrale relative au filtre numéro k , $\mathbf{O}(\lambda)$ est la fonction de transfert de l'optique et η_k exprime le bruit spectral du $k^{\text{ème}}$ filtre.

3.1.1. Pré-traitements

Pour accéder fidèlement à l'information recherchée lors des acquisitions, à savoir la réflectance spectrale de la scène, un certain nombre de calibrages radiométriques doivent être faits. En premier lieu, le traitement du bruit spectral. En fait, ce bruit est dit spectral parce qu'il est propre à chaque canal. En effet, chaque canal du système dispose de son propre temps d'exposition en fonction de la transmittance du filtre et de ce fait le bruit apparaissant dans chaque image monobande n'est pas le même. On peut décomposer le bruit en deux types :

- D'une part, les bruits aléatoires liés à la nature quantique de la lumière (bruit de grenaille) et aux imperfections de l'électronique d'amplification et de numérisation. Ces bruits sont modélisables par des méthodes statistiques. Cependant, dans le système qu'on utilise, on a la possibilité d'acquérir plusieurs images du même canal dans des conditions identiques. En moyennant ensuite ces images on réduit significativement l'effet du bruit aléatoire dans chaque image monobande. Certes l'opération de moyennage deux images peut parfois détruire des détails dans l'image. Pour y remédier et améliorer ce procédé, on acquiert 6 images monobandes au lieu de 2 pour chaque canal. Les résultats expérimentaux nous ont montré que cette méthode réduit significativement ce bruit. En effet, le calcul du Peak-to-peak Signal to Noise Ratio (PSNR) entre l'image moyenne et une des 6 images monobandes acquises instantanément et dans les mêmes conditions donne une valeur significative de PSNR = +37.99 dB.
- D'autre part, les bruits systématiques dus aux imperfections du capteur (offset, bruit thermique, différences de gain entre les cellules du capteur CCD et non-linéarité de la réponse de la caméra). Pour y remédier, Tout au long du processus d'acquisition, on acquiert un certain nombre d'images (image du noir, Flat-Field). Ces images mesurent les imperfections du capteur et servent par la suite au pré-traitement des images de la scène. Grâce à ce protocole, on prend aussi en compte l'évolution au cours du temps du bruit systématique. Par ailleurs, l'optique, et les filtres interférentiels peuvent aussi

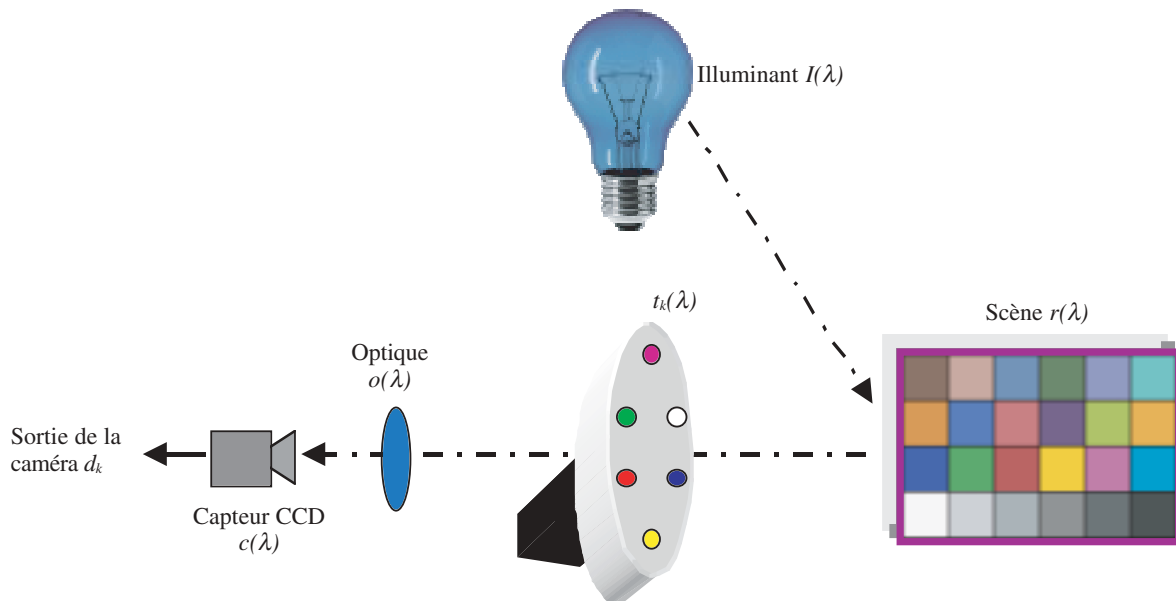


Figure 2. Modèle spectral de la chaîne d'acquisition.

présenter des imperfections (poussière, taches, etc.) et éventuellement, l'éclairage peut être non-uniforme. Le pré-traitement par l'image de Flat-Field tient compte de ces défauts et les corrige.

De plus, le chemin optique suivi par la lumière au travers des filtres est différent. En conséquence, après mise au point de la caméra sur un filtre, cela entraîne un léger flou dans les images monobandes acquises au travers des autres filtres. Après étude et modélisation de ce flou, nous avons développé un outil logiciel capable de le réduire fortement.

Le lecteur intéressé par ces différents pré-traitements pourra se référer aux articles suivants [Mansouri2] et [Mansouri3].

3.1.2. Réponse spectrale de la caméra

Les prétraitements étant réalisés et le bruit étant réduit, nous pouvons caractériser spectralement notre système, c'est-à-dire déterminer sa sensibilité spectrale pour chaque canal à partir du modèle de l'équation 1. Ce modèle spectral étant une simple multiplication de spectres contenus dans des vecteurs, longueur d'onde par longueur d'onde, on peut compacter la radiance de l'illuminant $\mathbf{I}(\lambda)$, la sensibilité du capteur $\mathbf{C}(\lambda)$, la réponse de l'optique $\mathbf{O}(\lambda)$, et la transmittance du filtre $\mathbf{t}_k(\lambda)$ dans la sensibilité spectrale du système du $k^{\text{ème}}$ canal $\mathbf{S}_k(\lambda)$. L'équation (1) devient alors :

$$d_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \mathbf{r}(\lambda) \mathbf{S}_k(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

En échantillonnant en N intervalles réguliers la gamme du spectre dans laquelle on travaille, nous pouvons réécrire l'équation (2) en notation matricielle. Dans notre cas, la gamme du spectre s'étend de $\lambda_1 = 380$ nm à $\lambda_N = 780$ nm et le pas

d'échantillonnage est de 5 nm ce qui donne à N une valeur de 80. Cet intervalle correspond également à la gamme de sensibilité du spectrophotomètre utilisé. L'équation (2) devient :

$$d_k = \mathbf{r}(\lambda)^T \mathbf{S}_k(\lambda) \quad (3)$$

où $\mathbf{S}_k(\lambda) = [s_k(\lambda_1) s_k(\lambda_2) \dots s_k(\lambda_N)]^T$ et $\mathbf{r}(\lambda) = [r(\lambda_1) r(\lambda_2) \dots r(\lambda_N)]^T$ sont respectivement les vecteurs contenant la sensibilité spectrale du système d'acquisition relatif au $k^{\text{ème}}$ canal, et les réflectances spectrales. T est l'opérateur matriciel transposé. À partir de l'équation (3), nous cherchons à déterminer les vecteurs $\mathbf{S}_k(\lambda)$ relatifs aux 7 canaux (Figure 3) qu'on mettra dans une matrice $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1(\lambda) \mathbf{S}_2(\lambda) \dots \mathbf{S}_7(\lambda)]^T$. Cette matrice \mathbf{S} est de taille $[7 \times 80]$ et représente la réponse spectrale du système complet avec ses 7 canaux. Dans le but de calculer \mathbf{S} , nous présentons à notre système les 24 « patches » de la mire de Macbeth dont les réflectances sont parfaitement connues et qu'on note $\mathbf{r}_p(\lambda)$ où $p = 1 \dots 24$. L'ensemble des réflectances $\mathbf{r}_p(\lambda)$ des patches est mis dans une matrice $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1(\lambda) \mathbf{r}_2(\lambda) \dots \mathbf{r}_{24}(\lambda)]$ de taille $[80 \times 24]$. La connaissance des réflectances $\mathbf{r}_p(\lambda)$ provient de mesures effectuées avec un spectrophotomètre (Minolta CS-1000). Ainsi, en observant les réponses à la sortie de la caméra, on peut estimer la réponse du système connaissant les réflectances d'entrée. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été développées. La plus immédiate consiste à inverser le système matriciel par une technique de pseudo-inverse. Malheureusement, les résultats obtenus sont très moyens. Cela est dû principalement au bruit présent dans les données et qui se trouve amplifié lors de l'inversion. De plus cette méthode serait parfaite en absence du bruit mais aussi en prenant un nombre de filtres au moins égal au pas d'échantillonnage des réflectances [Burns]. Dans notre cas, il faudrait 80 filtres puisque le spectre du visible est échantillonné sur 80 valeurs. Une autre approche

reposant sur les vecteurs propres principaux permet de contourner en partie ce problème [Hardeberg3]. Elle est basée sur une décomposition en valeurs singulières de la matrice de taille [80*24] contenant les réflectances de la mire de Macbeth. Avec cette méthode, la sensibilité au bruit est réduite en ne prenant en compte qu'un certain nombre t de vecteurs singuliers correspondant aux valeurs singulières les plus importantes. Cependant, cette estimation nécessite de trouver la « bonne » valeur pour t . Seule une méthode empirique permet de trouver cette valeur; pour notre cas $t = 10$ semble convenir pour la majorité des tests effectués.

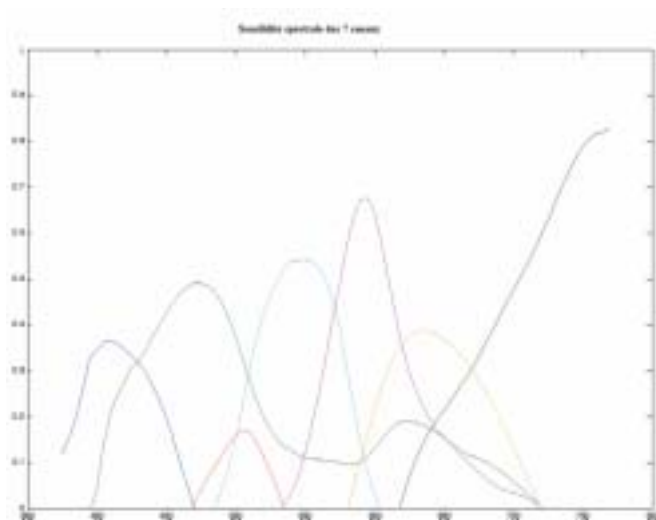


Figure 3. Réponses spectrales des 7 canaux du système; chaque réponse inclut la réponse spectrale de la caméra, la radiance de l'illuminant et la transmittance du filtre correspondant.

3.2. Calibrage géométrique

Deux approches sont envisageables. La première suppose le calibrage séparé et indépendant du projecteur et de la caméra, les paramètres obtenus étant ensuite couplés. Cette méthode est simple à mettre en œuvre mais produit des résultats sensiblement erronés dans le sens où les points 3D utilisés sont déterminés deux fois. Nous avons préféré opter pour une autre approche plus globale qui consiste à calibrer l'ensemble du système stéréoscopique. De surcroît, cette méthode de calibrage faible ne nécessite aucun objet de dimensions connues et peut donc être réalisée très facilement.

La caméra est modélisée par sténopé [Höraud], [Luong]. Si l'on suppose que le système est sans distorsion, soit $\mathbf{M} = (x \ y \ z \ 1)^T$ les coordonnées homogènes d'un point 3D dans le référentiel de la scène, soit $\mathbf{m} = (u \ v \ 1)^T$ celles de sa projection dans l'image et exprimées en pixels, alors on peut écrire :

$$\mathbf{m} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{h} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{M} \tag{4a}$$

$$\text{avec } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} du & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & dv & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4b}$$

matrice contenant les paramètres intrinsèques: $(u_0, v_0)^T$ coordonnées du centre optique et du, dv , taille du pixel suivant les deux directions. On peut regrouper ces paramètres sous le vecteur \mathbf{k} de taille 4. On a aussi \mathbf{R} et \mathbf{h} , respectivement la rotation, matrice de taille [3*3], et la translation 3D, vecteur de taille 3, entre les référentiels monde et caméra. Si l'on prend en compte les distorsions radiales qui sont les plus importantes, le point \mathbf{m} doit être corrigé. Cette correction est généralement modélisée sous la forme d'un polynôme dont le paramètre est la distance du pixel au centre de l'image. Soit \mathbf{d} le vecteur de coefficients de ce polynôme, on peut écrire :

$$\mathbf{m} = f(\mathbf{k}, \mathbf{d}, \mathbf{R}, \mathbf{h}, \mathbf{M}). \tag{5}$$

Nous avons montré qu'un projecteur pouvait également suivre ce modèle [Lathuiliere2]. Ainsi, le calibrage du système est similaire à celui d'un système stéréoscopique standard composé de deux caméras. La seule différence réside dans le fait que les points caractéristiques 3D ne sont pas physiquement sur un objet mais émis par le projecteur. Ainsi, nous avons créé une image que l'on appelle mire composée de points lumineux sur un fond sombre. Cette mire est projetée par le vidéo-projecteur sur un support de position quelconque, lui-même acquis par la caméra sans filtre. Avec la même mire, cette opération est répétée pour plusieurs positions de ce support (typiquement 3 à 5). Il suffit simplement que les taches lumineuses décrivent complètement et régulièrement le volume de travail à calibrer. Sous ces conditions, l'équation (5) devient :

$$\mathbf{m}_p = f_p(\mathbf{k}_p, \mathbf{d}_p, \mathbf{R}_p, \mathbf{h}_p, \mathbf{M}) \tag{6a}$$

$$\mathbf{m}_c = f_c(\mathbf{k}_c, \mathbf{d}_c, \mathbf{R}_c, \mathbf{h}_c, \mathbf{M}) \tag{6b}$$

si \mathbf{m}_p est le point de la mire projeté sur le support en \mathbf{M} et \mathbf{m}_c sa projection dans l'image. Les paramètres exprimés pour le projecteur (respectivement la caméra) sont indicés par ' p ' (resp. par ' c '). Si la distorsion est caractérisée par un vecteur \mathbf{d} à trois paramètres, nous avons treize paramètres de calibrage pour la caméra et le même nombre pour le vidéo-projecteur, donc 26 inconnues au total [Garcia]. Chacune des fonctions f_p et f_c correspond à deux équations. De la sorte, si la mire possède n points caractéristiques et si elle est projetée sur p positions différentes du support, on obtient $4 * n * p$ équations. Aux 26 inconnues, il faut ajouter les 3 coordonnées du point \mathbf{M} pour chaque point caractéristique. En final, le nombre d'inconnues est de $26 + 3 * n * p$. Le système peut donc être résolu si le nombre de points caractéristiques et de positions du support est suffisant pour avoir plus d'équations que d'inconnues. Dans le cas d'un nombre important de points (typiquement entre 50 et 100), le système est sur-contraint; la recherche des paramètres

de calibrage passe par la minimisation suivante

$$\| \mathbf{m}_p - f_p(\mathbf{k}_p, \mathbf{d}_p, \mathbf{R}_p, \mathbf{h}_p, \mathbf{M}) \|^2 + \| \mathbf{m}_c - f_c(\mathbf{k}_c, \mathbf{d}_c, \mathbf{R}_c, \mathbf{h}_c, \mathbf{M}) \|^2 \quad (7)$$

pour chacun des $n * p$ points. Ce problème est non linéaire et nous l'avons résolu par la méthode de Levenberg-Marquardt [Marquardt].

Afin de quantifier la précision d'étalonnage, après calcul des paramètres, nous avons calculé les coordonnées 2D de la projection des points 3D ayant servi au calibrage : pour chaque point 3D exprimé dans le référentiel monde, nous l'avons projeté à la fois dans l'image caméra (grâce aux paramètres de calibrage calculés et liés à la caméra) et dans l'image mire (grâce aux paramètres obtenus et relatifs au projecteur vidéo). Le tableau 1 présente le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart type des erreurs en pixels entre ces points image calculés et ceux ayant servi lors du calibrage. Nous pouvons noter le comportement correct du projecteur vidéo utilisé.

Tableau 1. Valeurs minimale, maximale, moyenne et écart type des erreurs de calibrage exprimées en pixel ; les indices 'c' et 'p' indiquent respectivement les erreurs liées à la caméra et au projecteur vidéo.

	erreur _c	erreur _p
minimum	0,06	0,01
maximum	1,86	0,81
moyenne	0,57	0,27
écart type	0,32	0,14

4. Reconstruction

4.1. Acquisition

Les deux étapes de calibrage précédentes (spectrale et géométrique) étant réalisées, il est maintenant possible d'acquérir autant de scènes que l'on souhaite tant que la configuration d'acquisition reste inchangée. Il suffit de placer l'objet à reconstruire dans le volume de travail calibré. Puis, une image multispectrale de la scène est acquise sans projection de lumière par le projecteur. Cette image permettra par la suite, lors de la reconstruction spectrale détaillée dans le paragraphe 4.3., d'attribuer un spectre de réflectance à chacun des points tridimensionnels reconstruits de la scène. Ensuite, une série d'images monobandes est acquise en orientant la roue porte-filtres de sorte à ce qu'aucun filtre ne soit interposé entre la scène et la caméra. Pour chacune d'entre elles, le vidéo-projec-

teur émet une ligne lumineuse suffisamment intense afin qu'elle apparaisse sur la surface de la scène et ainsi sur les images. Le paragraphe suivant fait une description des traitements afin de reconstruire en 3D la surface des objets présents dans la scène.

4.2. Reconstruction géométrique

Le vidéo-projecteur subissant des distorsions très faibles, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les distorsions calculées pour son modèle. Ainsi, une droite 2D dans le plan image du vidéo-projecteur décrit, dans l'espace, un plan 3D passant par le centre optique du vidéo-projecteur. La caméra et le projecteur étant placés à la même hauteur et environ à la même distance de la scène, la projection d'une ligne verticale est une configuration qui permet une reconstruction 3D précise. On peut calculer l'équation du plan de vue à partir de cette ligne et du centre optique du projecteur. Le calcul de l'équation du plan 3D se fait en résolvant l'équation suivante en prenant trois points appartenant au plan : par exemple, le centre optique du vidéo-projecteur, le premier et le dernier point de la ligne projetée, tous trois exprimés dans le référentiel monde.

$$a * X + b * Y + c * Z = 1. \quad (8)$$

Notons que l'origine de ce référentiel est située au niveau du plan le plus profond du volume de travail, en haut à droite de la scène.

Nous avons choisi d'acquérir les images dans le noir pour obtenir une ligne suffisamment lumineuse. Celle-ci se déforme selon le relief de l'objet. La figure 4 en est un exemple. Le graphique de droite montre le profil de la ligne horizontale dans l'image. La déformation de la ligne n'étant pas très importante, nous pouvons exploiter ces images ligne par ligne. Le profil de chacune des lignes de l'image considérée est relevé. D'après cette information, le point le plus lumineux est retenu. Par exemple, dans le cas précédent, seul le pic le plus haut est conservé. Pour scanner l'objet nous projetons successivement des lignes verticales pixel par pixel. En balayant toute la hauteur de l'image et en répétant l'opération sur toutes les images, nous pouvons relever tous les points de la scène. Leurs coordonnées en pixels sont ainsi obtenues et transformées suivant les distorsions calculées, ce qui donne un point $(u_c, v_c)^T$. Grâce aux paramètres intrinsèques, cela donne

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \frac{u_c - u_0}{-du} & \frac{v_c - v_0}{dv} & \mathbf{z} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

dans le repère caméra, repère métrique.

On fixe $z = 1$ comme facteur d'échelle qui reste non calculé par la méthode de calibrage. Puis, du repère caméra, il faut faire le changement de repère vers le repère monde, avec $\mathbf{X} = (X \ Y \ Z)^T$:

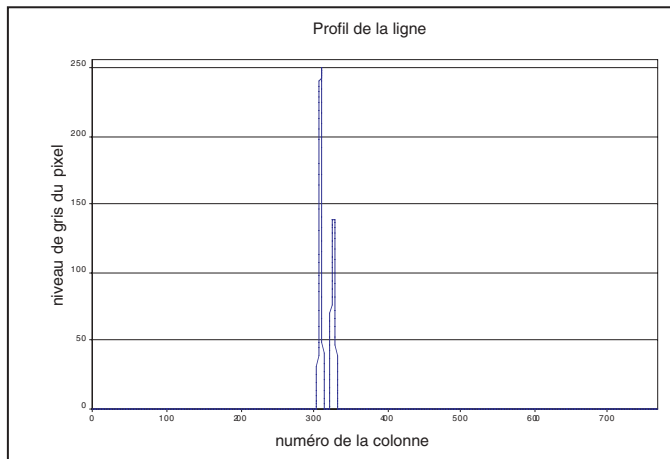
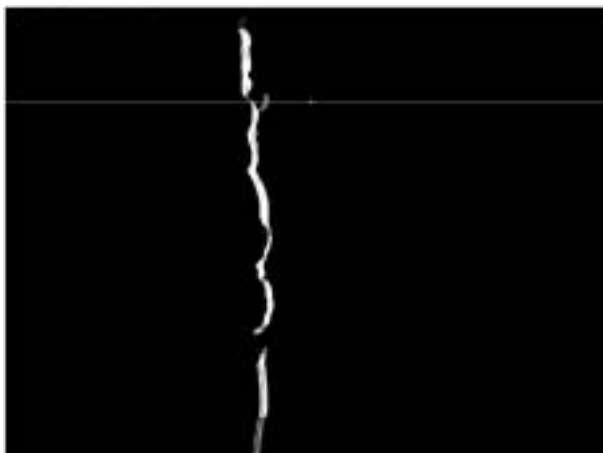


Figure 4. Image de la ligne déformée par l'objet et profil de la ligne horizontale.

$$\mathbf{X} = [\mathbf{R}]^{-1} * (\mathbf{x} - \mathbf{h}). \tag{10}$$

Une fois ces transformations effectuées, nous pouvons calculer le vecteur directeur \mathbf{vd}_c de chacune des droites de vue passant par chacun des points détectés. Chaque droite de vue est exprimée par un vecteur directeur et un point d'application. Dans ce cas, le point d'application est le même pour chaque droite : le centre optique de la caméra, \mathbf{O}_c .

On peut enfin calculer l'intersection du plan lumineux et des droites de vue en résolvant le système suivant :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{1} - (\mathbf{O}_c * \mathbf{cp})}{\mathbf{vd}_c * \mathbf{cp}} \tag{11}$$

avec \mathbf{cp} , vecteur colonne des trois coefficients de l'équation du plan. On obtient :

$$\mathbf{P} = \mathbf{O}_c + \mathbf{a} * \mathbf{vd}_c \tag{12}$$

4.3. Reconstruction spectrale

Les caractéristiques spectrales \mathbf{S} du système d'acquisition d'images multispectrales (avec ses 7 filtres et pour un illuminant donné) sont dorénavant connues. L'estimation d'un spectre de réflectance $\tilde{\mathbf{r}}$ en chaque pixel d'une scène acquise avec ce système est donc possible.

Le vecteur $\mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_7]^T$ contenant les réponses pour les 7 filtres est donné par l'équation 3. On peut formuler ce problème d'estimation de spectre de réflectance $\tilde{\mathbf{r}}$ à partir des réponses de la caméra en cherchant un opérateur \mathbf{Q} qui minimise une distance euclidienne entre un spectre reconstruit et un spectre original. De la sorte que :

$$\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}\mathbf{d}. \tag{13}$$

Plusieurs méthodes existent pour résoudre ce problème d'estimation : on peut citer la méthode basée sur une analyse en composante principale [Tzeng], ou encore par transformation en sinus discret modifiée [Day], et récemment une méthode basée sur des réseaux de densité mixte [Ribés].

Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode mise en place par Hardeberg [Hardeberg3]. Elle prend en compte les connaissances que l'on a *a priori* des spectres à reconstruire. Ainsi chaque spectre reconstruit doit être une combinaison linéaire d'autres spectres (*i.e.*, de spectres mesurés dans notre cas).

En appelant $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \dots \ \mathbf{r}_p]$ où $p = 24$ la matrice contenant les réflectances connues, pour toute réflectance \mathbf{r} , on a :

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}\mathbf{a} \tag{14}$$

avec \mathbf{a} un vecteur de coefficients.

En utilisant les équations 3, 13 et 14, on obtient la réflectance reconstruite $\tilde{\mathbf{r}}$

$$\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}\mathbf{d} = \mathbf{Q}\mathbf{S}^T\mathbf{r} = \mathbf{R}\mathbf{a} \tag{15}$$

avec idéalement $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}$, on aboutit à :

$$\mathbf{Q}\mathbf{S}^T\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{R}\mathbf{a}. \tag{16}$$

En simplifiant cette dernière équation, on obtient :

$$\mathbf{Q}\mathbf{S}^T\mathbf{R} = \mathbf{R}. \tag{17}$$

Finalement, en utilisant une approche par pseudo-inverse, on obtient l'opérateur \mathbf{Q} tel que :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}\mathbf{R}^T\mathbf{S}(\mathbf{S}^T\mathbf{R}\mathbf{R}^T\mathbf{S})^{-1} \tag{18}$$

L'opérateur \mathbf{Q} nous permet de reconstruire un spectre de réflectance en chaque pixel d'une scène acquise : à partir de 7 valeurs issues de l'image multispectrale on reconstruit un spectre de 80

points. Cet opérateur, en décomposant tous les spectres de la scène sur une base \mathbf{R} , profite d'une information *a priori* de la scène à acquérir.

Le choix de \mathbf{R} doit être représentatif des spectres que l'on désire obtenir : par exemple on utilise les spectres de pigments purs pour les tableaux d'un musée. Dans notre cas plus général, le choix s'est porté sur la mire de Macbeth, celle-ci étant représentative des couleurs naturelles ; il nous permettra de reconstruire une large gamme spectrale de différentes scènes. En effet, on considère que n'importe quel spectre qui existe dans les scènes à reconstruire est une combinaison linéaire des spectres primaires de la mire de Macbeth. Les spectres de la mire sont obtenus en scannant à l'aide d'un spectrophotomètre (Minolta CS-1000) chacun des patchs avec une résolution spectrale de 5 nm.

5. Résultats et discussion

Pour étudier l'erreur de reconstruction 3D, nous avons confronté le résultat de notre méthode de scanning avec le résultat d'un scanner, de type Minolta VIVID 910 (Figure 5c). Pour visualiser la reconstruction 3D (Figure 5a), et de manière générale, manipuler les données 3D, nous avons utilisé un logiciel de visualisation 3D. Notre reconstruction géométrique donne un nombre de points faibles. Les algorithmes de triangulation contenus dans le logiciel ne sont pas prévus pour ce cas (Figure 5b). C'est pourquoi, l'aspect de la surface reconstruite est granuleux sur cette figure.

Le logiciel utilisé nous permet de comparer un nuage de points avec une surface scannée. Tout d'abord, il faut recalculer le nuage de points par rapport à la surface scannée. Pour cela, nous avons utilisé une méthode de mise en correspondance basée sur l'al-

gorithme ICP (Iterative Closest Point) [Prieto] [Rusinkiewicz2], puis nous avons calculé la carte des distances entre le nuage de points recalculé et la surface scannée. Le résultat est présenté figure 6. Nous pouvons observer que la distribution des valeurs est très concentrée. La moyenne de l'écart est de $-0,2$ mm, et 80 % des valeurs sont comprises entre $-0,7$ et $0,8$ mm. Sur la figure, on voit très clairement que les fortes erreurs sont sur les bords de l'objet et au niveau des fortes courbures. La méthode de scanning que nous avons utilisée entraîne de telles erreurs parce que nous n'avons qu'une seule caméra et donc une faible précision en profondeur dès que l'on quitte l'axe de la caméra.

D'un autre côté, l'utilisation de la caméra multispectrale nous permet de remonter à la réflectance spectrale des surfaces de la scène. Cette information est pertinente parce qu'elle représente une propriété physique qui ne dépend ni des conditions d'acquisition ni de la perception de la vision humaine. Pour valider la reconstruction du spectre de réflectance par la méthode proposée, nous avons fait une comparaison, pour une vingtaine de pixels, entre le spectre mesuré à l'aide du spectrophotomètre et celui reconstruit à partir de la réponse de la caméra multispectrale. Comme métrique pour mesurer la différence entre les deux spectres, nous avons utilisé le critère Goodness-of-Fit Coefficient (GFC) [Imai] donné par la formule suivante :

$$GFC = \frac{\left| \sum_j R_m(\lambda_j) R_r(\lambda_j) \right|}{\left(\left| \sum_j [R_m(\lambda_j)]^2 \right| \right)^{1/2} \left(\sum_j [R_r(\lambda_j)]^2 \right)^{1/2}}, \quad (19)$$

où $R_m(\lambda_j)$ est la valeur du spectre mesuré avec le spectrophotomètre à la longueur d'onde λ_j , et $R_r(\lambda_j)$ représente celle relative au spectre reconstruit à la longueur d'onde λ_j .

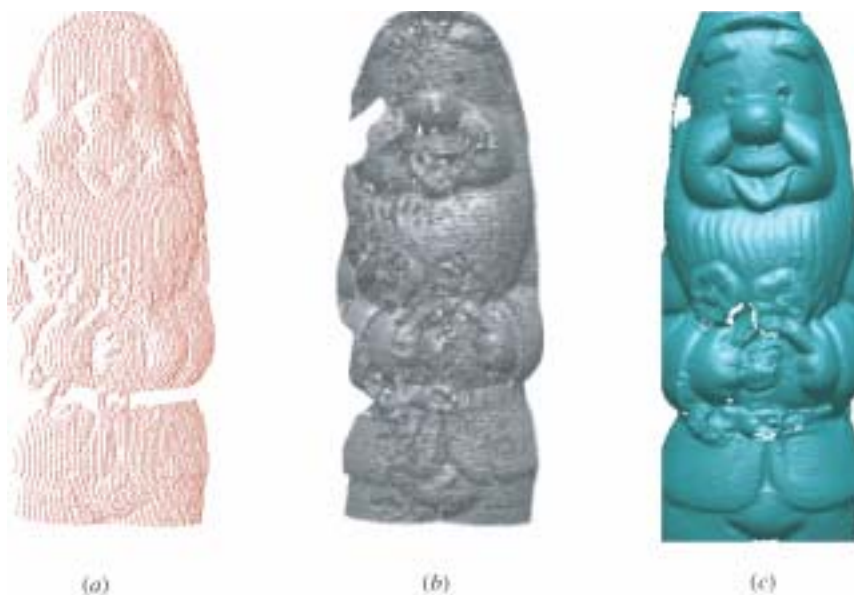


Figure 5. a. Nuage de points obtenu par reconstruction 3D, b. Surface triangulée, c. Surface obtenue avec le nuage du scanner.

Au sens de ce critère, les résultats sont très satisfaisants. Le spectre reconstruit présente peu d'erreurs par rapport à celui obtenu par le spectrophotomètre. On note une erreur moyenne du GFC égale à 2,8% pour un écart-type de 1,3%. La figure 7 permet de comparer visuellement un spectre reconstruit et un spectre théorique. On signale que le spectrophotomètre livre des valeurs jusqu'à 780nm, alors que le capteur de caméra se limite à 720nm. C'est pourquoi nous ne tenons pas compte de la partie du spectre au-delà de 720nm.

Une fois que l'on dispose de la scène 3D reconstruite, chaque point 3D se voit ainsi associé un spectre de réflectance. De cette manière, on dispose d'une scène 3D spectrale. Pour la visualiser, on utilise un illuminant donné et un triplet chromatique RVB est affecté à chaque point. On constate que l'on est en mesure de simuler et visualiser la scène telle qu'elle sera sous un illuminant quelconque. Afin de mettre en valeur ce point, la figure 8 présente deux images multispectrales reconstruites,

visualisées sous deux illuminants différents et enfin projetées dans l'espace RVB. Dans cette figure, on montre que pour un point donné, le triplet RVB, résultat de la visualisation de la scène, change complètement quand on modifie l'illuminant, alors que le spectre de réflectance reste inchangé. Ce genre de manipulation peut être intéressant pour des objets d'art tridimensionnels dans le cadre d'applications multimédias de type musée virtuel.

Pour valider ce concept de scanner 3D multispectral, nous avons utilisé une méthode de scanning très simple. A savoir, nous avons utilisé le vidéo-projecteur comme un projecteur LASER, en lui faisant projeter l'image d'une ligne verticale qui balaye la scène par pas de 1 pixel. Après un calcul simple, nous avons déduit la limite de résolution du vidéo-projecteur. En effet, une image de 1024x768 pixels projetée à 2,80 mètres, donne, d'après la notice technique, une projection de 1361x1021 mm. Donc, la projection d'un pixel se fait sur 1,33 mm sur la scène.



Figure 6. Carte des distances entre le nuage reconstruit et celui du scanner.

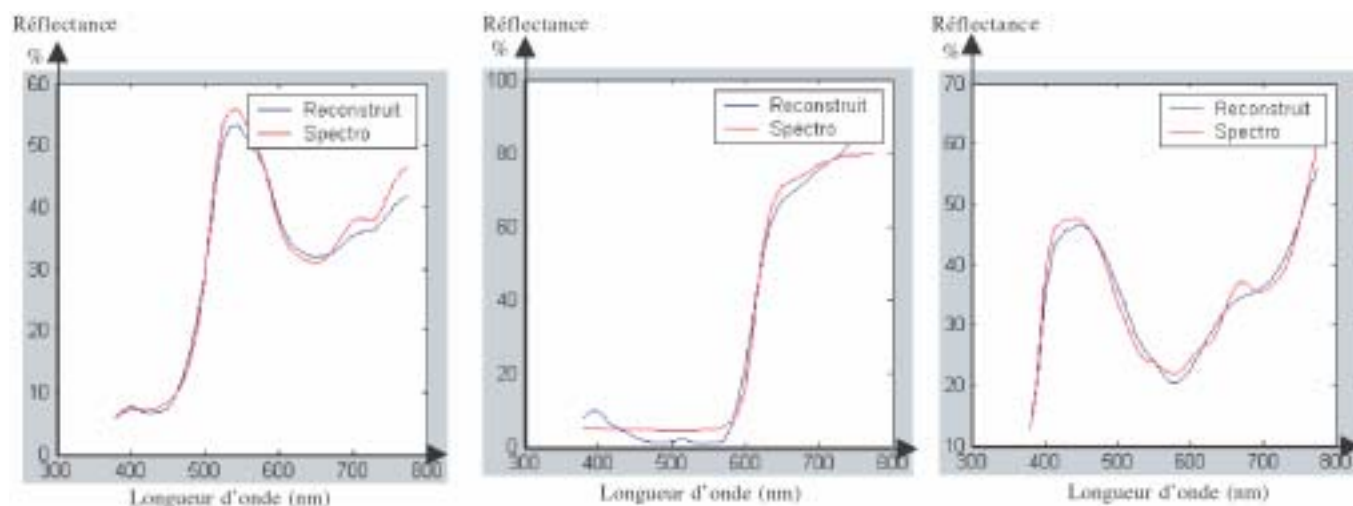


Figure 7. Comparaison de spectres mesurés et spectres reconstruits.

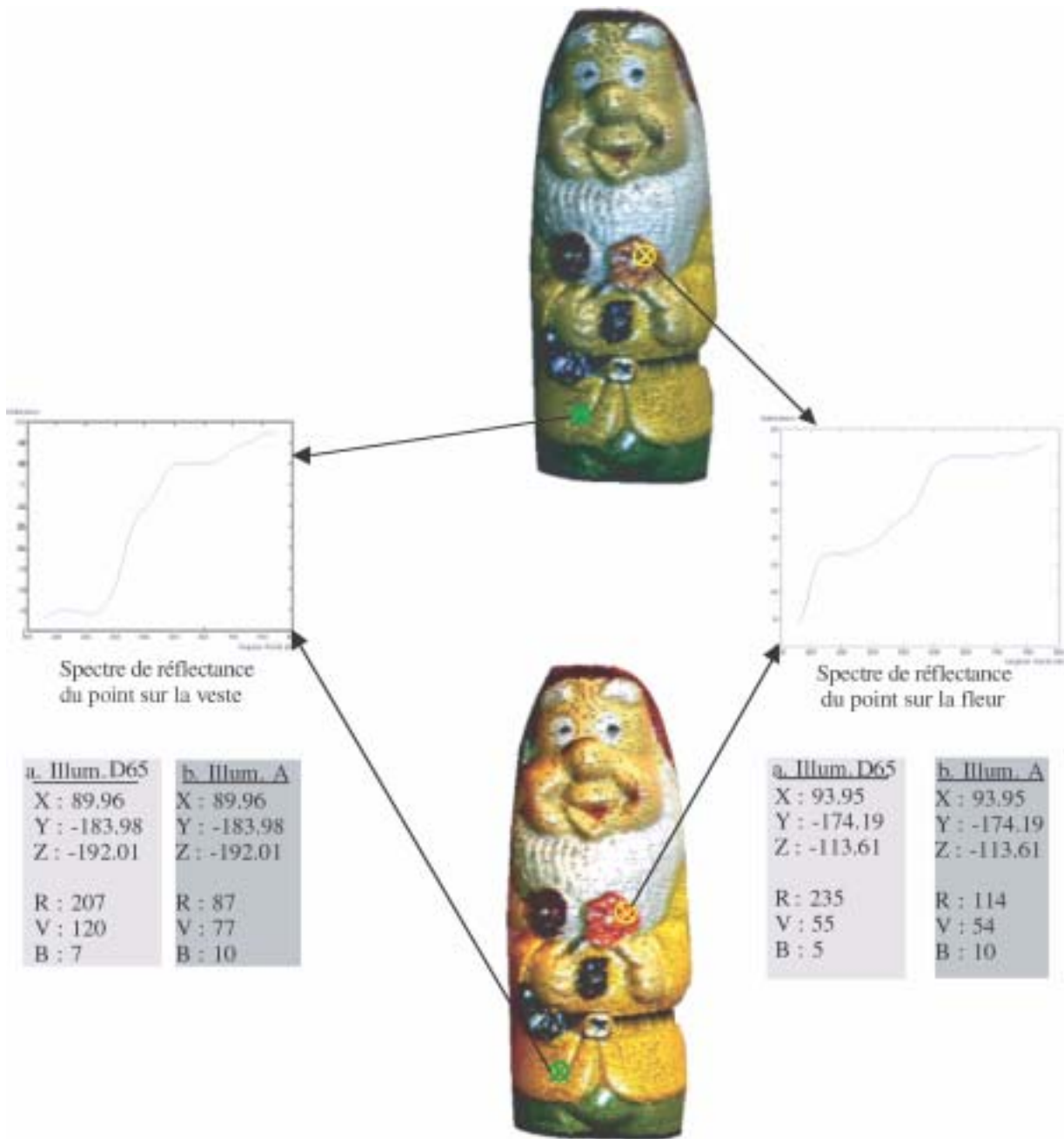


Figure 8. Simulation de changement d'illuminant et association d'une position spatiale (x, y, z) et d'un spectre de réflectance en chaque pixel de la scène. a) (haut) la scène telle qu'elle sera sous l'illuminant D65, projetée dans l'espace couleur RVB, b) (bas) la scène telle qu'elle sera sous l'illuminant A du CIE, projetée dans l'espace couleur RVB.

Evidemment, la précision géométrique n'est pas très importante mais l'intérêt de ce dispositif réside dans l'utilisation d'une caméra multispectrale. En effet, l'utilisation d'une telle caméra donne des informations plus complètes qu'une caméra couleur tri-CCD classique. D'autre part, ce système est bas coût par rapport à un scanner classique, couleur ou non. La visualisation reste granuleuse à cause du nombre de points inférieurs à un scanner classique. Mais rappelons que l'objectif de cet article est de montrer la faisabilité d'une méthodologie qui vise le développement d'un scanner 3D multispectral.

6. Conclusion

Nous venons de présenter un système de stéréovision active basé sur un projecteur et une caméra. La particularité de cette dernière est d'être multispectrale. Ainsi, une acquisition produit un ensemble d'images monobandes. Tout comme les systèmes utilisant des caméras en niveaux de gris ou couleur, la reconstruction de la surface de la scène est réalisable par triangulation. Il suffit d'apparier les motifs lumineux émis par le projecteur

vidéo avec leur détection dans les images acquises. Cela nécessite toutefois un calibrage du système au préalable. L'apport principal du concept multispectral revient à la possibilité de reconstruire et d'associer un spectre de réflectance pour chacun des points 3D. Il produit une information beaucoup plus pertinente sur la couleur des points de la scène que lors de l'utilisation d'une caméra couleur. Les résultats présentés dans cet article ont démontré la faisabilité d'un tel système que l'on pourrait nommer de scanner 3D multispectral ; les erreurs mesurées, aussi bien au niveau géométrique que colorimétrique, restant relativement faibles. Notre travail actuel consiste à générer et à émettre plusieurs motifs lumineux simultanément vers la scène. L'intérêt est de diminuer le nombre d'acquisitions tout en conservant une reconstruction aussi dense de la scène.

7. Références

- [Battle] J. BATTLE, J. MOUADDIB, J. SALVI, «Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem: a Survey», *Pattern recognition*, Vol. 31, #7, 1998, p. 963-982.
- [Burns] P.D. BURNS, «Analysis of image noise in Multispectral color acquisition», *Ph. D. Thesis, Center for Imaging Science*, Rochester Institute of technology, 1997.
- [Day] E. A. DAY, F. H. IMAI, L. A. TAPLIN. «Comparison of the accuracy of various transformations from multi-band images to reflectance spectra», *Technical report*, Spectral color imaging laboratory group, munsell color science laboratory, Chester F. Carlson center for imaging science, Rochester institute of technology, 2002.
- [Garcia] D. GARCIA, J.J. ORTEU, M. DEVY, «Accurate Calibration of a Stereovision Sensor: Comparison of Different Approaches», *5th Workshop on Vision Modeling and Visualization*, Saarbrücken, Deutschland, 22-24 November 2000, p. 25-32.
- [Hardeberg1] J.Y. HARDEBERG, F. SCHMITT, H. BRETTEL, J. P. CRETTEZ, H. MAITRE, «Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes», *Colour Imaging: Vision and Technology*, MacDonald and Luo ed. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1999, p. 145-164.
- [Hardeberg2] J.Y. HARDEBERG, «Acquisition and reproduction of color images: colorimetric and multispectral approaches», *dissertation.com*, Parkland, Florida, USA, 2001.
- [Hardeberg3] J.Y. HARDEBERG, F. SCHMITT, H. BRETTEL, «Multispectral color image capture using liquid crystal tunable filter», *Optical engineering*, Vol. 41, #10, 2002, p. 2532-2548.
- [Horaud] R. HORAUD, O. MONGA, «Vision par ordinateur: outils fondamentaux», *Ed. Hermès, 2^{ème} édition*, chapitre 5, 1995, p. 139-186.
- [Imai] F. H. IMAI, M. R. ROSEN, R.S. BERNES, «Comparative study of metrics for spectral match quality», in *Proc. of the First European Conference on Color in Graphics, CGIV'2002*, Imaging and Vision, IS&T, Springfield, VA, 2002, p. 492-496.
- [Jaeggli] T. JAEGLI, T.P. KONINCKX, L. VAN GOOL, «Online 3D Acquisition and Model Integration», *IEEE international workshop on projector-camera systems (in conjunction with ICCV 2003)*, Nice, France, October 2003.
- [Lathuliere1] A. LATHULIERE, F.S. MARZANI, Y. VOISIN, «Modélisation d'un projecteur vidéo suivant le modèle du sténopé dans le cadre d'un système de stéréovision active», *4^{ème} colloque francophone, Contrôles et Mesures Optique pour l'Industrie*, Belfort, 17-21 novembre 2003, p. 27-32.
- [Lathuliere2] A. LATHULIERE, F.S. MARZANI, Y. VOISIN, «Calibration of a LCD-Projector with Pinhole Model in Active Stereovision Applications», *SPIE Photonics Technologies for Robotics, Automation and Manufacturing*, Providence, Rhode Island, USA, 28-30 October 2003, p. 199-204.
- [Luong] Q.T. LUONG, O.D. FAUGERAS, «Camera Calibration, Scene Motion and Structure Recovery from Point Correspondances and Fundamental Matrices», *IJCV*, Vol. 22, #3, 1997, p. 261-289.
- [Mansouri1] A. MANSOURI, F.S. MARZANI, J.Y. HARDEBERG, P. GOUTON, «Calibrage Optique et Restauration des Images Monobandes d'un Système Multispectral», *MajecStic*, Marseille, France, 29-31 octobre 2003, CD-Rom Proceedings.
- [Mansouri2] A. MANSOURI, F. S. MARZANI, P. GOUTON, «Systematic noise characterization of a CCD camera: application to a multispectral imaging system», *Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications (CSIMTA), Special Session on Color Image Processing and Analysis for Machine Vision*, Cherbourg, France, September 2004, p. 640-644.
- [Mansouri3] A. MANSOURI, J.Y. HARDEBERG, F.S. MARZANI, P. GOUTON, «Optical calibration by deblurring channel-images of a multispectral system», *IASTED Conference, Visualization, Imaging, and Image Processing*, Benalmadena, Espagne, Vol. 1, 8-10 septembre 2003, p. 210-215.
- [Marquardt] D.W. MARQUARDT, «An algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear parameters», *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, Vol. 11, #2, 1963, p. 431-441.
- [Prieto] F. PRIETO, «Métrologie assistée par ordinateur: Apport des capteurs 3D sans contact», *Thèse de doctorat*, Montréal, Canada, janvier 2000.
- [Ribés] A. RIBES, F. SCHMITT, «A fully automatic method for the reconstruction of spectral reflectance curves by using mixture density networks», *Pattern recognition letters*, Vol. 24, #11, 2003, p. 1691- 1701.
- [Rusinkiewicz1] S. RUSINKIEWICZ, O. HALL-HOLT, M. LEVOY, «Real-Time 3D Model Acquisition», *ACM Trans. On Graphics*, Siggraph 2002.
- [Rusinkiewicz2] S. RUSINKIEWICZ, M. LEVOY, «Efficient Variants of the ICP Algorithm», *3rd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001.
- [Tominaga] S. TOMINAGA, «Spectral imaging by multichannel camera», *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 8, #4, October 1999.
- [Tzeng] Di-Y. TZENG, F.H. IMAI, R.S. BERNES, «A comparative analysis of spectral reflectance estimated in various spaces using a trichromatic camera system», *Journal of imaging science and technology*, vol. 44, 2000, p. 280-287.
- [Wang] G. WANG, Z. HU, F. WU, H.T. TSUI, «Projector-Camera Based System for Fast Object Modeling», *IEEE international workshop on projector-camera systems (in conjunction with ICCV 2003)*, Nice, France, October 2003.
- [Woo] S. WOO, A. DIPANDA, F. MARZANI, Y. VOISIN, «Determination of an optimal configuration for a direct correspondance in an active stereovision system», *Proc. On 2nd IASTED INT. Conf. VIIP*, Malaga, Espagne, September 2002, p. 596-601.



Alamin **Mansouri**

Alamin Mansouri est doctorant au Le2i, Laboratoire Electronique Informatique et Image, UMR CNRS 5158, de l'Université de Bourgogne, France. Il a obtenu le DEA III (spécialisé en traitement d'images) à Dijon, France en 2002. Son domaine de recherche concerne le développement de systèmes d'imagerie multispectrale et le traitement d'images, avec des approches couleur et multispectrale.



Alexandra **Lathuilière**

Alexandra Lathuilière a été diplômée en électronique-optique de l'ISTASE à l'Université de Saint Etienne en 2003. Elle a obtenu le DEA Images en 2003 en parallèle. Elle a intégré le Laboratoire d'Electronique, Informatique et Image (Le2i) pour préparer sa thèse sur l'adaptation automatique de mires pour la reconstruction de scènes 3D pour un système stéréoscopique de vision active, ceci depuis décembre 2003 avec un financement BDI CNRS/région Bourgogne.



Franck **Marzani**

Franck Marzani a obtenu sa thèse à l'Université de Bourgogne à Dijon, France en 1998. Il est Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne et membre du Laboratoire Le2i, Laboratoire Electronique Informatique et Image, UMR CNRS 5158. Il s'intéresse à la fois aux systèmes de reconstruction par projection de lumières structurées et à l'imagerie multispectrale.



Yvon **Voisin**

Yvon Voisin a obtenu sa thèse de doctorat en 1993 à l'université de Franche Comté et son habilitation à diriger des recherches en 2003. Depuis 1993, il occupe un poste de Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne. Il est membre de l'équipe traitement d'images de laboratoire Le2i (Laboratoire d'Electronique Informatique et Image). Il s'intéresse aux applications de la vision artificielle et travaille essentiellement sur le développement d'outils pour la reconstruction 3D.



