

# Une méthode pour le prétraitement et le calcul de matrices de crosstalk pour des images couleur issues d'une caméra tri-CCD

A. LATHUILIERE<sup>1</sup>, Y. VOISIN<sup>1</sup>, F.S. MARZANI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire LE2I, UMR 5158, Université de Bourgogne, 12, rue de la fonderie, 71200 Le Creusot

{a.lathuilier, y.voisin}@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

<sup>2</sup>Laboratoire LE2I, UMR 5158, Université de Bourgogne, UFR Sc. & Tech. – Aile Sciences de l'Ingénieur, B.P. 47870, 21078 Dijon Cedex

franck.marzani@u-bourgogne.fr

**Résumé** – Ce travail s'inscrit comme outil dans le cadre de la reconstruction 3D à l'aide d'une projection de lumière structurée couplée à une caméra 3CCD. Le principe est simple : il faut disposer une caméra 3CCD et un vidéo-projecteur comme un système de stéréovision classique, devant la scène à étudier. L'utilisation d'une lumière structurée lève beaucoup d'ambiguïtés par rapport à un système de stéréovision à deux caméras. Par contre, l'utilisation de la couleur pour coder la projection réduit le champ d'action du système aux objets blancs ou pâles. Pour pouvoir déterminer la couleur en même temps que la reconstruction 3D de l'objet, il faut avoir des images couleurs parfaitement nettoyées. Nous allons donc décrire une méthode de prétraitements des images couleurs issues de la caméra 3CCD utilisée. Les images ainsi traitées peuvent être utilisées dans le modèle couleur que nous suivrons pour remonter aux informations de couleur de l'éclairage structuré pour lever les ambiguïtés de mise en correspondance, ainsi qu'à la couleur de la scène aux points considérés.

**Abstract** – This work is as a tool within the framework of the 3D reconstruction using a structured light projection associated with a 3CCD camera. The principle is easy: it is necessary to lay out a 3CCD camera and a LCD projector like a traditional stereovision system, in front of the studied scene. The use of a structured light raises a lot of ambiguities compared to a stereovision system with two cameras. However, the use of the color to code projection reduces the use of the system to white or pale objects. To determine the color and the 3D reconstruction of the object at the same time, it is necessary to have perfectly cleaned color images. We thus will describe a method of pre-processing of the color images from the 3CCD camera used. The images thus treated can be used in the color model which we will follow to give information of color of structured light to raise ambiguities of matching, and the color of the scene at the considered points.

## 1. Introduction

Dans le cadre de la reconstruction 3D, il existe plusieurs techniques répertoriées dans [1]. Nous utilisons un système à éclairage structuré codé en couleur. Dans notre cas, le codage est utilisé à deux fins :

- différencier les motifs projetés et ainsi permettre la reconstruction d'objets 3D par triangulation ;
- déterminer la couleur de chacun des points reconstruits.

Déterminer un code couleur nécessite l'utilisation d'une caméra couleur ou multispectrale. Plusieurs types de caméra couleur sont disponibles : mono-CCD à codage Bayer par exemple, Fovéon ou tri-CCD. Nous avons testé différents types de caméra. La caméra à codage Bayer nécessite un logiciel spécifique pour le décodage de la couleur. De plus, la résolution est divisée par trois à cause du codage. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser une caméra tri-CCD. Le laboratoire possède une caméra multispectrale à filtres interférentiels. Cette dernière a permis une étude et une correction des différents signaux parasites et bruits qu'il peut y avoir lors d'une acquisition [3]. Sa manipulation étant relativement plus lourde que celle d'une caméra couleur, nous avons appliqué les corrections évoquées ci-dessus à une caméra tri-CCD. Toutes ces corrections sont faites pixel par

pixel. A la suite de quoi, nous pouvons calculer la matrice de crosstalk entre les trois canaux de la caméra tri-CCD, également pixel par pixel. Rappelons qu'une matrice de crosstalk est nécessaire pour le calibrage de la caméra afin de décrire la superposition parasite entre les trois composantes couleur en sortie du capteur. Une fois l'étape de calibrage effectuée, on peut corriger chaque image acquise pour remonter à la couleur de l'objet observé.

## 2. Prétraitement des images couleurs

Dans le cas d'une caméra multispectrale à filtres interférentiels, cette étape de pré-traitement est primordiale. En effet, l'acquisition des images à travers les différents filtres implique des paramètres d'acquisition différents entre chaque filtre (temps d'exposition, chemin optique, ...). La reconstruction du spectre de réflectance en chaque pixel nécessite un modèle d'acquisition et la connaissance parfaite des paramètres entrant en jeu. La qualité de la reconstruction est améliorée si on prend en compte les signaux parasites et les bruits systématiques de la caméra utilisée [3].

Bien que pour une caméra tri-CCD l'image obtenue puisse être utilisée directement, la prise en compte des signaux parasites et autres bruits débouche sur des images beaucoup

plus propres. En effet, les pixels ne réagissent pas de la même manière à un même illuminant : c'est une des caractéristiques intrinsèques des capteurs CCD. Nous avons utilisé une caméra Sony DXC-9100P. La scène utilisée pour calibrer est la carte couleur Macbeth ColorChecker® au format A4 avec 24 patches.

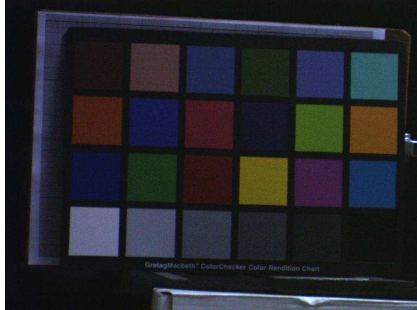


FIG. 1 : image de la mire de Macbeth

Décrivons brièvement la méthode utilisée pour définir les paramètres de pré-traitement, méthode basée sur [3].

Toutes les images décrites résultent d'une moyenne pixel à pixel appliquée sur un ensemble d'images, 6 dans notre cas. Cette étape est nécessaire afin d'éliminer les bruits aléatoires.

La première image est celle dite d'offset [O]. Les conditions d'acquisition sont les suivantes : la caméra est fermée et dans le noir, le temps d'exposition très court. Cette image sera ôtée de chaque acquisition réalisée par la suite.

L'image suivante est celle relative au bruit thermique [T]. Les conditions sont similaires mais cette fois le temps d'exposition est identique à celui utilisé pour l'acquisition. Elle sera également retranchée des acquisitions suivantes.

La dernière image est celle de Flat-Field [F] ou PLU (Plage de Lumière Uniforme). C'est l'image d'un support blanc, plat et uniforme, avec un temps d'exposition choisi si possible identique à celui de l'acquisition. Si le temps d'exposition choisi ne convient pas pour cette image, il faut acquérir également une nouvelle image de bruit thermique [T<sub>F</sub>] prenant en compte le nouveau temps d'exposition. K est la couleur moyenne de cette image, couleur qui aurait due être présente en chaque pixel.

Ainsi, les images de prétraitement étant calculées, toute image acquise [R] peut maintenant être corrigée suivant l'équation suivante afin d'obtenir le signal utile [U] :

$$[U] = \frac{[R] - [O] - [T]}{[F] - [O] - [T_F]} K \quad (1)$$

### 3. Couplage (crosstalk) entre les 3 canaux d'une caméra tri-CCD

#### 3.1 Mise en place du calcul de crosstalk (A)

Calibrer un ensemble vidéo-projecteur/caméra en vue de faire de la reconstruction 3D permet de savoir, à partir d'une image projetée par le vidéo-projecteur, ce qui est réellement projeté sur la scène et à partir de l'image issue de la caméra, le signal qui entre réellement dans la caméra.

Dans [5], un système de projection couplé à une caméra est mis en place pour avoir à l'écran toujours une image parfaite pour l'observateur même si l'écran a des défauts. Dans ce but, une méthode de calibrage radiométrique de la caméra a été créée [4]. Bien que cette méthode paraisse correspondre à notre demande, elle ne permet pas de remonter à la couleur de l'objet observé. De plus, la méthode de calibrage du système complet nécessite de savoir exactement à quel pixel de la caméra correspond un pixel de l'image projetée. Cette étape étant notre but : la reconstruction 3D, la méthode décrite ne convient pas pour notre application.

[2] choisit de mesurer une seule matrice de crosstalk, nommée A, pour toute l'image. Le modèle couleur utilisé est le suivant :

$$C = A Q P(I) + C_0 \quad (2)$$

Où C est la couleur relevée dans l'image caméra, C<sub>0</sub> est la couleur relevée dans l'image caméra sous lumière ambiante et I est la couleur consigne à projeter par le vidéo-projecteur. Ce sont des vecteurs de taille 3. A est la matrice de crosstalk, c'est une matrice de taille 3x3. Q est la couleur de la scène. C'est une matrice 3x3, dont seule la diagonale est non nulle et représente les composantes R, V et B de la couleur de l'objet. P est considéré comme trois transformations non linéaires et indépendantes selon les trois canaux. Dans l'article, P est traduit par trois LUT (Look Up Table ou table de conversion). Il faut remarquer que le calcul de la LUT inverse est nécessaire et est possible car les trois transformations sont non linéaires mais monotones donc inversibles.

Par contre, la détermination de A se fait par un processus de calibrage colorimétrique à l'aide d'un spectrophotomètre. La méthode décrite est intéressante mais si l'on souhaite s'affranchir du spectrophotomètre, il faut trouver une autre solution pour déterminer la matrice de crosstalk A.

[6] utilise exactement le même formalisme que [2]. Par contre, ils considèrent que cette matrice A est composée de trois colonnes dans lesquelles ils placent les couleurs obtenues dans l'image caméra correspondante en projetant successivement une image plane rouge, puis verte, puis bleue. Cette méthode est très simple mais ne permet pas un calibrage suffisamment précis pour déterminer, par la suite, la couleur de l'objet observé.

Tous ces travaux ainsi que ceux présentés ici portent sur le calcul de la matrice de crosstalk d'une caméra tri-CCD.

Dans un premier temps, nous avons calculé une seule matrice A pour toute l'image selon le modèle couleur décrit dans [2]. Sa détermination se fait par minimisation aux valeurs propres en prenant une image de la mire de Macbeth. Les valeurs des couleurs des patches et les couleurs relevées dans l'image issue de la caméra sont connues sous la forme RVB. Nous nous sommes affranchi de l'éclairage ambiant en faisant la soustraction de C<sub>0</sub> et le vidéo-projecteur n'est pas en fonctionnement.

L'étape suivante est la détermination de A pour chaque pixel de la caméra. La méthode de détermination est très similaire à celle pour un A unique. La seule contrainte est que

pour utiliser une minimisation en chaque pixel de la caméra, il faut que chaque pixel 'voit' tous les patches de Macbeth. L'acquisition des images correspondantes est décrite à la fin du paragraphe suivant.

### 3.2 Résultats

Le tableau 1 présente les résultats obtenus en faisant l'acquisition d'une image de la mire de Macbeth avec une caméra tri-CCD. Pour pouvoir effectuer la correction des images décrites dans le paragraphe 2, il faut acquérir les images d'offset, de bruit thermique, de PLU comme décrit dans le paragraphe 2. Toutes ces images sont prises 6 fois. La moyenne des 6 images est effectuée pour chaque signal parasite. Le signal utile peut maintenant être calculé.

Tout d'abord, les résultats sont donnés pour un calcul de A unique pour toute l'image. C'est pourquoi, une seule image de la mire de Macbeth suffit pour cette première partie

d'expérience. Chaque patch est considéré et sa couleur moyenne est calculée. A partir de ces couleurs moyennes et de A unique pour toute l'image, les couleurs de la scène sont recalculées. On obtient donc une couleur recalculée moyenne par patch. Si le modèle couleur utilisé était parfait, on obtiendrait à nouveau les couleurs théoriques des patches de Macbeth.

La première colonne montre la couleur RVB théorique de chacun des patches de Macbeth. La deuxième colonne montre les couleurs moyennes recalculées en utilisant la matrice de crosstalk à partir de l'image non corrigée. La troisième colonne montre les couleurs moyennes recalculées en utilisant la matrice de crosstalk à partir de l'image corrigée. Dans les deux cas, la colonne err donne l'erreur quadratique entre les couleurs théoriques de Macbeth et celles qui viennent d'être calculées. La valeur de err permet une estimation de l'utilité de la correction des images.

TAB. 1 : première colonne : couleurs des patches de Macbeth. Deuxième colonne : l'image issue de la caméra est non corrigée, la matrice A est calculée sur toute l'image et inversée pour recalculer les couleurs réellement vues par la caméra. Troisième colonne : même chose mais en corrigeant l'image. Quatrième colonne : les calculs ont été fait sur les pixels de (340 225) à (394 287), une matrice A est calculée en chaque pixel à partir des images corrigées

| Macbeth |     |     |         | Image non corrigée (1A) |     |     |       | Image corrigée (1A) |     |     |       | Images corrigées (A/pixel) |     |     |       |
|---------|-----|-----|---------|-------------------------|-----|-----|-------|---------------------|-----|-----|-------|----------------------------|-----|-----|-------|
| R       | V   | B   | couleur | mR                      | mV  | mB  | err   | mR                  | mV  | mB  | err   | mR                         | mV  | mB  | err   |
| 94      | 28  | 13  |         | 82                      | 39  | 32  | 25.02 | 75                  | 20  | 15  | 20.71 | 75                         | 20  | 12  | 20.64 |
| 241     | 149 | 108 |         | 255                     | 134 | 119 | 23.28 | 251                 | 129 | 111 | 22.56 | 245                        | 129 | 110 | 20.49 |
| 97      | 119 | 171 |         | 79                      | 103 | 187 | 28.91 | 86                  | 108 | 190 | 24.56 | 86                         | 108 | 182 | 19.05 |
| 90      | 103 | 39  |         | 61                      | 108 | 41  | 29.50 | 61                  | 101 | 39  | 29.07 | 61                         | 102 | 38  | 29.03 |
| 164     | 131 | 196 |         | 137                     | 130 | 242 | 53.35 | 133                 | 123 | 237 | 52.02 | 131                        | 122 | 221 | 42.37 |
| 140     | 253 | 153 |         | 113                     | 252 | 230 | 81.60 | 109                 | 255 | 225 | 78.42 | 108                        | 254 | 201 | 57.70 |
| 255     | 116 | 21  |         | 239                     | 43  | 0   | 77.63 | 242                 | 51  | 0   | 69.53 | 240                        | 53  | 0   | 68.08 |
| 7       | 47  | 122 |         | 49                      | 54  | 179 | 71.15 | 35                  | 42  | 170 | 55.79 | 31                         | 40  | 140 | 30.81 |
| 222     | 29  | 42  |         | 237                     | 23  | 59  | 23.45 | 234                 | 20  | 59  | 22.67 | 231                        | 19  | 57  | 20.15 |
| 69      | 0   | 68  |         | 24                      | 7   | 69  | 45.55 | 51                  | 35  | 86  | 43.28 | 49                         | 22  | 85  | 34.25 |
| 187     | 255 | 19  |         | 146                     | 255 | 27  | 41.77 | 157                 | 255 | 33  | 33.11 | 156                        | 255 | 29  | 32.57 |
| 255     | 142 | 0   |         | 255                     | 154 | 15  | 19.21 | 255                 | 149 | 11  | 13.04 | 255                        | 148 | 9   | 10.82 |
| 0       | 0   | 142 |         | 28                      | 28  | 126 | 42.71 | 16                  | 8   | 110 | 36.66 | 12                         | 5   | 109 | 35.47 |
| 64      | 173 | 38  |         | 45                      | 153 | 36  | 27.66 | 44                  | 155 | 33  | 27.37 | 42                         | 155 | 34  | 28.71 |
| 203     | 0   | 0   |         | 145                     | 0   | 6   | 58.31 | 165                 | 5   | 16  | 41.53 | 162                        | 1   | 5   | 41.32 |
| 255     | 217 | 0   |         | 255                     | 255 | 0   | 38.00 | 255                 | 254 | 0   | 37.00 | 255                        | 253 | 0   | 36.00 |
| 207     | 3   | 124 |         | 200                     | 33  | 143 | 36.19 | 201                 | 32  | 142 | 34.66 | 200                        | 28  | 135 | 28.20 |
| 0       | 148 | 189 |         | 36                      | 126 | 198 | 43.14 | 20                  | 113 | 189 | 40.31 | 17                         | 112 | 188 | 39.82 |
| 255     | 255 | 255 |         | 253                     | 255 | 222 | 33.06 | 254                 | 252 | 223 | 32.16 | 253                        | 251 | 223 | 32.31 |
| 249     | 249 | 249 |         | 254                     | 249 | 226 | 23.54 | 250                 | 247 | 226 | 23.11 | 249                        | 246 | 227 | 22.20 |
| 180     | 180 | 180 |         | 149                     | 149 | 144 | 56.73 | 152                 | 150 | 145 | 53.94 | 151                        | 153 | 144 | 53.54 |
| 117     | 117 | 117 |         | 69                      | 71  | 71  | 80.85 | 88                  | 91  | 84  | 51.05 | 87                         | 90  | 83  | 52.77 |
| 53      | 53  | 53  |         | 46                      | 48  | 45  | 11.75 | 48                  | 47  | 45  | 11.18 | 47                         | 47  | 44  | 12.37 |
| 0       | 0   | 0   |         | 23                      | 23  | 19  | 37.67 | 0                   | 0   | 0   | 0.00  | 0                          | 0   | 0   | 0.00  |

On s'aperçoit que les résultats, présentés dans le tableau 1, sont entachés d'une erreur importante. La matrice A trouvée supporte mal l'inversion à cause du mauvais conditionnement du système.

L'idée de cet article est de corriger les images puis de calculer A pour chaque pixel de la caméra. Par contre, pour

utiliser à nouveau une minimisation, il faut que chacun des pixels de la caméra 'voient' les 24 patches de Macbeth. Les résultats de la reconstruction des couleurs sont meilleurs.

Pour que chaque pixel physique de la caméra 'voit' tous les patches de Macbeth, nous avons pris 24 images de la mire de Macbeth. Les calculs de A pour chacun des pixels d'une

image nécessitent un temps de calcul important. Nous nous sommes donc limités à une étude sur les pixels de (340 225) à (394 287). Ce choix a été fait pour la position centrale : les 24 images ont été prises en déplaçant successivement la mire devant la caméra. Dans chacune des 24 images, les pixels considérés 'voient' respectivement un patch. Chaque pixel possède une couleur et une matrice A. La couleur peut donc être recalculée. La quatrième colonne du tableau 1 montre la moyenne des couleurs recalculées par patch.

En utilisant simplement une carte Macbeth, cette méthode permet de déterminer la couleur de la scène en chaque point de mesure.

#### 4. Conclusion

La méthode utilisée pour corriger les images multispectrales peut parfaitement s'appliquer à des images couleur RVB. Le but de cette manipulation a été de démontrer que si les images issues d'une caméra tri-CCD sont prétraitées, le calcul du crosstalk est plus fiable. De plus, si les corrections sont faites au niveau de chacun des pixels, le crosstalk devient plus représentatif et permet de faire une mesure de la couleur de la scène vue par la caméra en chacun des pixels de la caméra.

L'étape suivante du système dans lequel s'inscrit ce travail, est la mise en correspondance de l'éclairage structuré et des points colorés retrouvés dans l'image caméra correspondante. Ces prétraitements permettent de déterminer avec plus de précision de quelle couleur projetée était un point lumineux dans l'image caméra. La mise en correspondance est donc plus aisée.

Notre système doit être capable de déterminer en une seule fois la mise en correspondance et la couleur de la surface observée. Nous utilisons un codage de De Bruijn pour lever l'ambiguïté de la mise en correspondance. Par contre, avec une seule projection, la détermination de la mise en correspondance n'est pas possible. Il faut donc projeter au minimum trois couleurs différentes en un point de la scène.

Par l'intermédiaire d'une optimisation selon les différentes projections, il est possible de déterminer en même temps la mise en correspondance et la couleur de l'objet. Par contre, il faut que le calibrage couleur de la caméra tri-CCD utilisée soit optimal, pour avoir l'information couleur, contenue dans les images caméra, la plus précise possible.

#### Références

- [1] J. Battle, E. Mouaddib and J. Salvi. *A Survey: Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem*. Pattern Recognition 31(7), pp 963-982, July 1998.
- [2] D. Caspi, N. Kiryati and J. Shamir. *Range imaging with adaptive color structured ligh*. IEEE PAMI, vol. 20, no. 5, may 1998.
- [3] 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, pp. 640-644, September 2004.
- [4] T. Mitsunaga, S.K. Nayar. *Radiometric Self Calibration*. Proc. Of Computer Vision and Pattern Recognition '99, vol. 1, pp. 374-380, June 1999.
- [5] K. Nayar, H. Peri, M. Grossberg, P.N. Belhumeur. *A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections*. International Workshop on Projector Camera Systems, ICCV2003.
- [6] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz. *Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-pass Dynamic Programming*. In Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT), Padova, Italy, June 19-21, 2002, pp. 24-36.