

Stéréo-Photométrie itérative dans le cas de sources lumineuses ponctuelles non uniformes.

Alexandre BONY, Benjamin BRINGIER, Majdi KHOUDEIR

Université de Poitiers, Laboratoire XLIM, Département SIC, CNRS 7252
Bât. SP2MI, Téléport2, Bvd Marie et Pierre Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France
`prénom.nom@univ-poitiers.fr`

Résumé – Dans le domaine de la vision par ordinateur la reconstruction tridimensionnelle par stéréo-photométrie est répandue. Sa mise en œuvre peut être effectuée à partir de matériel grand public et les résultats obtenus sont très précis pour des temps d’acquisition courts. Néanmoins la stéréo-photométrie est régie par des contraintes d’application telles que l’utilisation de sources lumineuses directionnelles et uniformes. Mais par souci de miniaturisation les sources utilisées sont généralement ponctuelles et les résultats de reconstruction sont fortement biaisés. Nous proposons une méthode rapide et robuste qui prend en compte les propriétés du système d’éclairage et la géométrie de la surface analysée pour se placer dans les conditions optimales d’utilisation de la stéréo-photométrie.

Abstract – In computer vision, the three-dimensional reconstruction by photometric stereo is common. The implementation of this method can be made from consumer equipment and the results are accurate for short acquisition time. However, the photometric stereo is regulated by application constraints such as the use of directional light sources. But the interests of miniaturization, the sources used are spotlights and the reconstruction results are biased. We propose a fast and robust method that overcomes reconstruction errors by taking into account the overall acquisition system.

1 Introduction

Le traitement d’images permet de réaliser de la métrologie sans contact et non destructive. Il est notamment possible d’acquérir en trois dimensions des surfaces ou des objets pour faciliter leur analyse par des algorithmes mathématiques. Dans ce cadre, nous proposons d’utiliser la stéréo-photométrie (SP) comme technique d’acquisition et présentons des améliorations pour une meilleure prise en compte des conditions réelles d’application. A partir d’images acquises d’un point d’observation fixe mais sous différentes directions d’éclairage, la SP permet de dissocier les constituants d’une image : géométrie et couleur d’une surface ainsi que les phénomènes d’éclairage. Cette technique a l’avantage de ne pas nécessiter d’appariement et permet d’obtenir une précision de l’ordre du millimètre ou moins pour un temps d’acquisition très court.

Tel que formulé par Woodham [1], la SP implique l’usage de sources lumineuses directionnelles placées à une distance infinie pour éviter les variations d’énergie au niveau de la surface. Cette contrainte n’est jamais respectée lors de la mise en œuvre de cette méthode, mais la plus part des auteurs émettent l’hypothèse que les sources sont situées à une distance suffisamment élevée par rapport à la taille et au relief de la surface à reconstruire pour s’en rapprocher. Ainsi tout point de la surface est considéré comme éclairé par un rayon lumineux de même intensité et de

même direction d’incidence. De plus, toutes les sources sont supposées parfaitement identiques et seule leur position géométrique par rapport à la surface diffère.

En pratique et pour un grand nombre d’applications, cette hypothèse s’avère difficile voire impossible à respecter pour des raisons d’encombrement. En effet, par souci de miniaturisation et de confinement afin d’éliminer les phénomènes d’inter-réflexion ou de lumière ambiante, les sources sont situées à une faible distance de la surface. De plus, elles sont généralement ponctuelles. L’hypothèse utilisée pour simplifier la résolution de la SP génèrent alors des erreurs de reconstruction car chaque point de la surface est éclairé avec une intensité et une direction d’incidence différente. La solution généralement proposée [2, 3] consiste à effectuer une compensation préalable des images à partir d’une calibration de la distribution de l’éclairage. Mais ces solutions ne permettent pas une correction complète et active car elles ne prennent pas en compte les modifications des directions d’incidence de l’éclairage en chaque point de la surface lors de l’inversion du modèle de réflectance. De plus, l’application des méthodes de compensation n’est pas valable lorsque les surfaces analysées ont une géométrie importante car les cartes de compensation sont acquises à partir de surfaces planes.

Dans cet article, nous proposons d’intégrer la prise en compte des sources ponctuelles situées à une distance réaliste de la surface dans la résolution de la SP sans calibra-

tion. Notre méthode se décompose en deux étapes, une première reconstruction dite «grossière» est effectuée avec la prise en compte des positions réelles des sources lumineuses en chaque point de la surface pour un relief initial nul. Puis un raffinement itératif de la reconstruction permet de prendre en compte la géométrie de la surface. Pour chaque itération la géométrie des sources par rapport à la surface est recalculée.

2 Stéréo-Photométrie

Selon le modèle d'éclairage formulé par Lambert (figure 1a) et le principe d'acquisition d'une image, l'intensité M d'un pixel correspond à la transformation f de la radiance émise par le point $\alpha = \langle x, y, z \rangle$ de la surface selon l'Albedo ρ , en réponse à l'irradiance reçue. Elle est dépendante de l'intensité I et de l'angle d'incidence θ de la source principale ainsi que l'intensité constante de la lumière ambiante Ib .

$$M_\alpha = f(X_\alpha) = f(I I_\alpha \rho_\alpha \cos \theta_\alpha) + f(I b \rho_\alpha) \quad (1)$$

La transformation f correspond à la conversion du flux lumineux reçu par le capteur en valeur numérique. Selon le processus d'acquisition [4], les valeurs numériques M approchent X à une constante multiplicative k près ($M_\alpha k \cong X_\alpha$). Sous certaines conditions [5], la transformation f peut être considérée linéaire et continue.

Woodham [1] propose de déterminer les dérivées (p, q) suivant x et y d'un point ρ de la surface en inversant le modèle Lambertien. Cette inversion nécessite au minimum trois valeurs X_α différentes d'un même point.

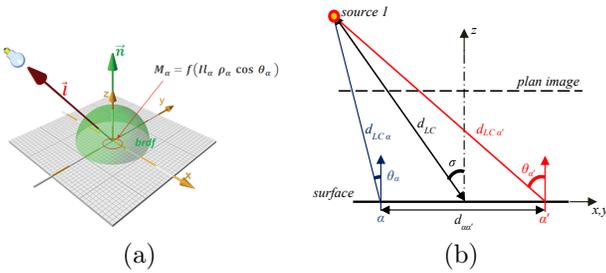


Fig. 1 – Schémas (a) modèle de Lambert, (b) coupe 2D du modèle de Lambert.

Pour satisfaire cette contrainte trois images sont acquises d'un point de vue fixe pour une lumière ambiante nulle ou constante et trois directions d'éclairage différentes. L'estimation de p et q consiste à résoudre un système linéaire composé d'un vecteur \vec{X} et d'une unique matrice d'éclairage \mathbf{L} pour chaque points de la surface, I est considérée comme constante.

$$\vec{N}_\alpha = \begin{bmatrix} p_\alpha \\ q_\alpha \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\left((\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{L}^T \cdot \vec{X}_\alpha \right)}{\left| (\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{L}^T \cdot \vec{X}_\alpha \right|} \quad (2)$$

avec \mathbf{L} la matrice d'éclairage quel que soit α correspondant aux directions des sources lumineuses suivant leurs angles azimut τ et zénith σ par rapport au centre optique.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \cos \tau_1 \sin \sigma_1 & \sin \tau_1 \sin \sigma_1 & \cos \sigma_1 \\ \cos \tau_2 \sin \sigma_2 & \sin \tau_2 \sin \sigma_2 & \cos \sigma_2 \\ \cos \tau_3 \sin \sigma_3 & \sin \tau_3 \sin \sigma_3 & \cos \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

L'estimation de la carte de relief \hat{Z} de la surface est obtenue par intégration numérique de tous les vecteurs \vec{N}_α suivant la méthode [6].

3 Méthode proposée

A partir d'une coupe 2D du modèle de Lambert (figure 1b), il est facile de constater qu'une source ponctuelle positionnée à une distance d_{LC} relativement faible du centre d'une surface ne produit pas les mêmes conditions d'éclairage en tout point. Pour étudier l'influence de ces variations, nous analysons la différence Δ de l'angle d'incidence θ , de l'intensité I et la radiance X en fonction du rapport de distances $d_{LC}/d_{\alpha\alpha'}$ pour deux points distincts α et α' positionnés à équidistance du centre de la surface.

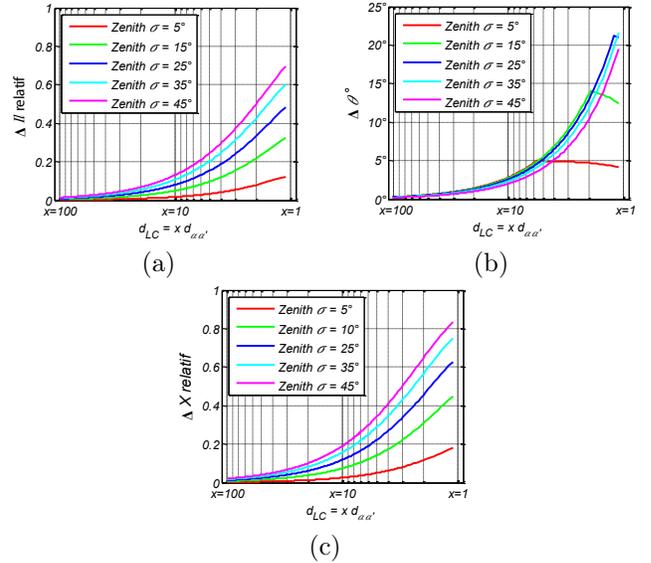


Fig. 2 – Evolution de (a) l'intensité I , (b) l'angle θ et (c) la radiance X en fonction du rapport de distance $d_{LC}/d_{\alpha\alpha'}$ et l'angle zénith σ de la source lumineuse.

Ces différences (figure 2) dépendent de l'angle zénithal σ et se répercutent sur les valeurs X_α et $X_{\alpha'}$, proportionnellement au rapport entre la distance d_{LC} et $d_{\alpha\alpha'}$. Les champs de gradients et l'estimation de la carte de relief (\hat{Z}) sont biaisés, les surfaces planes sont reconstruites sous forme de dôme (figure 3a) dont le sommet correspond au point qui bénéficie du maximum d'éclairage des trois sources lumineuses. Les surfaces plus complexes (figure 4a et 5a) présentent des déformations de la macro et micro

géométrie. Pour éliminer ces problèmes, notre méthode inverse le modèle Lambertien pour des sources ponctuelles. L'estimation des champs de gradients est effectuée à partir d'une matrice \mathbf{L}_α calculée en chaque points de la surface par rapport aux positions $\langle x_L, y_L, z_L \rangle$ des sources. De plus, les valeurs de radiance \vec{X}_α sont pondérées par les distances $d_{LCs\alpha}$ car les intensités incidentes I_s des sources $s = 1 \dots 3$ en un point α de la surface décroient proportionnellement avec les carrés des distances entre les points d'émission (sources) et le point éclairé (surface) :

$$\vec{N}_\alpha = \begin{bmatrix} p_\alpha \\ q_\alpha \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\left((\mathbf{L}_\alpha^T \mathbf{L}_\alpha)^{-1} \cdot \mathbf{L}_\alpha^T \cdot \vec{E}_\alpha \right)}{\left| (\mathbf{L}_\alpha^T \mathbf{L}_\alpha)^{-1} \cdot \mathbf{L}_\alpha^T \cdot \vec{E}_\alpha \right|} \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_\alpha = \begin{bmatrix} \vec{L}_{1\alpha} \\ \vec{L}_{2\alpha} \\ \vec{L}_{3\alpha} \end{bmatrix} \text{ avec : } \vec{L}_{1\alpha} = \begin{bmatrix} x_{L1} - x_\alpha \\ y_{L1} - y_\alpha \\ z_{L1} - z_\alpha \end{bmatrix} / \left| \vec{L}_{1\alpha} \right|$$

$$\vec{E}_\alpha = \begin{bmatrix} X_{1\alpha}/d_{LC1\alpha}^2 \\ X_{2\alpha}/d_{LC2\alpha}^2 \\ X_{3\alpha}/d_{LC3\alpha}^2 \end{bmatrix} \text{ avec :}$$

$$d_{LC1\alpha}^2 = (x_{L1} - x_\alpha)^2 + (y_{L1} - y_\alpha)^2 + (z_{L1} - z_\alpha)^2$$

Lors de la première itération, l'élévation des points de la surface est nulle $z_{v\alpha} = 0$. Pour les itérations suivantes, les élévations sont les valeurs (\hat{Z}) précédemment estimées. Chaque itération converge vers une estimation (\hat{Z}) plus proche de la réalité (tableau 1). Le critère d'arrêt de la boucle est fonction de la différence entre deux itérations successives :

$$SNR_{dB}(\hat{Z}^n, \hat{Z}^{n+1}) \geq Seuil \quad (5)$$

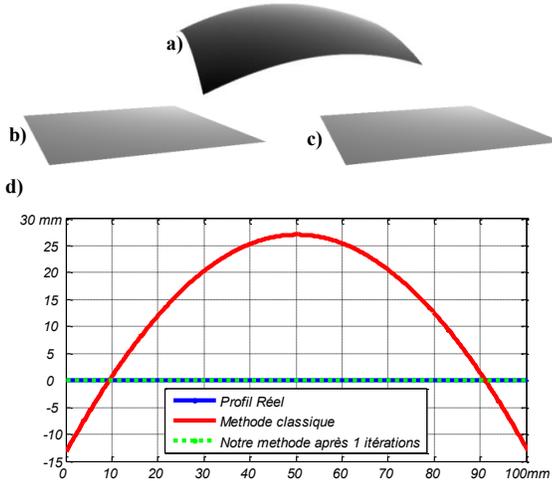


Fig. 3 – Résultats sur une surface plane, a) \hat{Z} estimés selon la méthode classique, b) \hat{Z} estimés selon notre méthode après 1 itération, c) Z réel, d) coupes de profil.

La valeur *Seuil* est fixée arbitrairement en fonction de la qualité de reconstruction désirée. Par exemple un *Seuil*

de $110dB$ implique une évolution très faible entre deux reconstructions successives et le raffinement n'apporte pas d'améliorations significatives.

Tab. 1 – Evolution du SNR entre la vérité terrain et la reconstruction en fonction des itérations.

| Itération | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Classic |
|--|------|------|-------|-------|-------------|-------------|---------|
| Cas simulé : hémisphère rugueuse | | | | | | | |
| $SNR \hat{Z}/Z$ | 53.7 | 79.3 | 80.5 | 80.6 | 82.6 | 82.7 | -2.19 |
| $SNR \hat{Z}^n/\hat{Z}^{n+1}$ | 23.7 | 51.7 | 78.3 | 94.9 | 114.1 | | |
| Cas réel : masque archéologique africain | | | | | | | |
| $SNR \hat{Z}/Z$ | 27.7 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.6 | 31.6 | 3.51 |
| $SNR \hat{Z}^n/\hat{Z}^{n+1}$ | 37.7 | 70.9 | 106.6 | 139.4 | 186.7 | | |

4 Résultats

Notre méthode est comparée à la méthode classique de SP sur des images de synthèse et sur cas réel. Les images de synthèse sont obtenues à partir d'un lancer de rayon (POV-Ray), la résolution est $800 \times 800 \text{ pixels}$ pour une surface de $100 \times 100 \text{ mm}$ représentant une hémisphère à laquelle nous ajoutons une rugosité sinusoïdale de période 16 pixels . Le système d'éclairage est composé de trois lampes identiques placées à 400 mm sur un plan parallèle à la surface analysée et distribuées tous les 60° suivant un cercle de rayon 150 mm dont le centre est l'appareil photo. Le système d'acquisition réel possède la même configuration d'éclairage, il est composé d'un appareil photo de type reflex Nikon D300S et d'un objectif Nikon AF-S VR 105 $\text{mm } f/2.8G$. La résolution des images obtenues est $1434 \times 2160 \text{ pixels}$ pour des surfaces de taille $60 \times 103 \text{ mm}$.

Comme toute méthode de SP, notre méthode nécessite une connaissance préalable des positions précises de chaque source lumineuse. Dans notre cas, nous avons mis en œuvre une variante de l'algorithme proposée par Powell [7]. Nous utilisons cinq hémisphères miroirs pour effectuer une triangulation par détection des points spéculaires. L'erreur de mesure des angles est inférieure à 0.2° . Pour l'estimation des distances d_{LC} l'erreur est trop importante pour être utilisée, nous lui préférons la mesure manuelle. La position $\langle x_\alpha, y_\alpha \rangle$ de chaque point de la surface est calculée à partir des paramètres de la caméra ainsi que la distance d_c qui la sépare du plan origine :

$$\begin{aligned} x_\alpha &= (u - u_0)d_x(d_c/d_f) \\ y_\alpha &= (v - v_0)d_y(d_c/d_f) \end{aligned} \quad (6)$$

où u, v sont les indices des pixels dans l'image, u_0, v_0 le centre de l'image, d_x et d_y les dimensions relatives d'un pixel élémentaire et d_f la distance focale. L'application de la SP nécessite un modèle de projection orthographique ou du moins à faible perspective. Si toutefois la projection est perspective, notre méthode peut être couplée à la résolution de la SP dans le cas d'une projection perspective proposée par Durou dans [8].

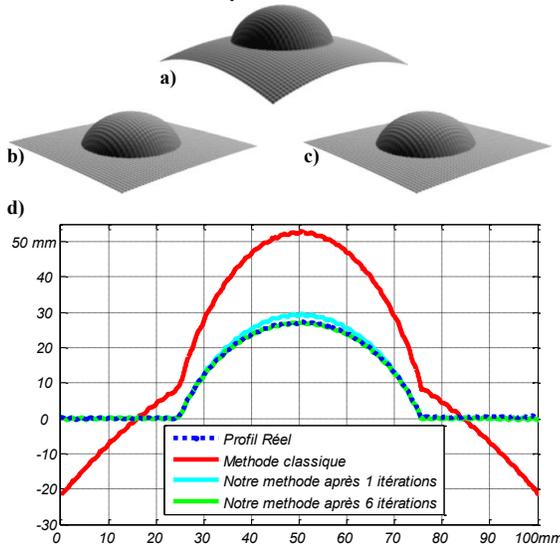


Fig. 4 – Résultats sur une surface de synthèse, a) \hat{Z} estimés selon la méthode classique, b) \hat{Z} estimés selon notre méthode après 6 itérations, c) Z réel, d) coupes de profil.

Les résultats (figure 4a et 5a) illustrent les déformations géométriques générées par la méthode SP classique lors de l’usage de sources ponctuelles. Les reconstructions 3D souffrent d’une déformation globale sous forme de dôme. Cette déformation visible sur les courbes de profil (figure 4d et 5c) affecte la macro ainsi que la micro géométrie. Elle est liée aux variations de distance et d’angles d’incidence en chaque point de la surface. Nous pouvons remarquer que notre méthode (figure 4b et 5b) permet de corriger l’ensemble de ces défauts. Dès la première itération, la macro géométrie est corrigée. Les itérations suivantes permettent un raffinement pour obtenir la micro géométrie avec précision. Le nombre d’itérations dépend de la complexité de la surface pour un seuil fixé arbitrairement à 110dB, au-delà l’amélioration apportée par le raffinement n’est pas significative. La surface de synthèse nécessite donc 6 itérations et le cas réel 5 itérations (tableau 1).

5 Conclusion

Comparé aux méthodes de compensation, nos résultats offrent une nette amélioration des reconstructions 3D par SP. Effectivement, la compensation ne permet pas une correction complète et active. Contrairement à notre méthode, elles omettent le changement d’angle d’incidence en chaque point lors de l’inversion du modèle Lambertien. De plus, l’application de la compensation n’est pas viable lorsque les surfaces analysées ont une macro géométrie importante car les cartes de compensation sont faussées par la révolution en Z qui n’est pas prise en compte.

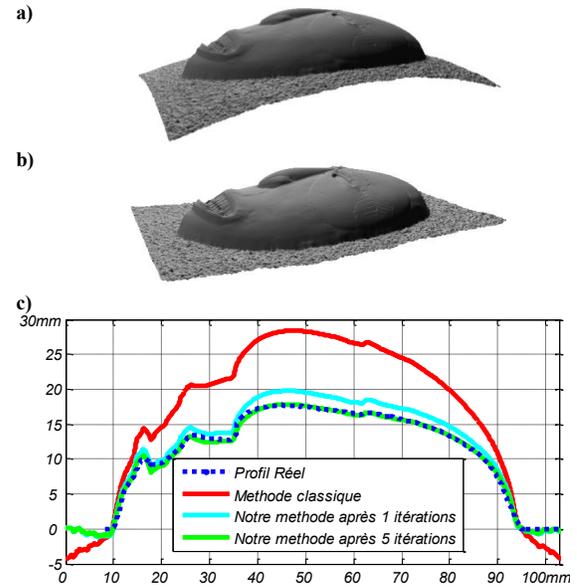


Fig. 5 – Résultats sur une surface réelle, a) \hat{Z} estimés selon la méthode classique, b) \hat{Z} estimés selon notre méthode après 5 itérations, c) coupes de profil

Références

- [1] R. J. Woodham, “Photometric method for determining surface orientation from multiple images,” *Optical engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 139–144, 1980.
- [2] J. A. Paterson, D. Claus, and A. W. Fitzgibbon, “Brdf and geometry capture from extended inhomogeneous samples using flash photography,” in *Computer Graphics Forum*, vol. 24, pp. 383–391, Wiley Online Library, 2005.
- [3] J. Sun, M. Smith, L. Smith, and A. Farooq, “Compensation of illumination radiance in photometric stereo,” *ICMV 2011*, pp. 40–44, 2010.
- [4] B. K. P. Horn, *Robot vision*. the MIT Press, 1986.
- [5] A. Bony, B. Bringier, and M. Khoudair, “Accurate image quantization adapted to multisource photometric reconstruction for rough textured surface analysis,” *JOSA A*, vol. 30, no. 3, pp. 518–526, 2013.
- [6] R. T. Frankot and R. Chellappa, “A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 4, pp. 439–451, 1988.
- [7] M. W. Powell, S. Sarkar, and D. Goldgof, “A simple strategy for calibrating the geometry of light sources,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 9, pp. 1022–1027, 2001.
- [8] J.-D. Durou, F. Courteille, *et al.*, “Integration of a normal field without boundary condition,” in *Proceedings of the First International Workshop on Photometric Analysis For Computer Vision-PACV 2007*, 2007.