



**HAL**  
open science

## **Stéréophotométrie microscopique sans démosaïquage**

Yvain Quéau, Matthieu Pizenberg, Daniel Cremers, Jean-Denis Durou

► **To cite this version:**

Yvain Quéau, Matthieu Pizenberg, Daniel Cremers, Jean-Denis Durou. Stéréophotométrie microscopique sans démosaïquage. 26eme Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI 2017), Sep 2017, Juan-les-Pins, France. pp. 1-4. <hal-01913980>

**HAL Id: hal-01913980**

**<https://hal.science/hal-01913980v1>**

Submitted on 6 Nov 2018

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

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



HAL Authorization



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in:  
<http://oatao.univ-toulouse.fr/19092>

**To cite this version:** Quéau, Yvain and Pizenberg, Matthieu and Cremers, Daniel and Durou, Jean-Denis *Stéréophotométrie microscopique sans démosaïquage*. (2017) In: 26eme Colloque GRETSI sur le Traitement du Signal et des Images (GRETSI 2017), 5 September 2017 - 8 September 2017 (Juan-les-Pins, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Stéréophotométrie microscopique sans démosaïquage

Yvain QUÉAU<sup>1</sup>, Matthieu PIZENBERG<sup>2</sup>, Daniel CREMERS<sup>1</sup>, Jean-Denis DUROU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TUM, Munich, Allemagne

<sup>2</sup>IRIT, UMR 5505, Toulouse, France

yvain.queau@tum.de, matthieu.pizenberg@enseeiht.fr, cremers@tum.de, durou@irit.fr

**Résumé** – Nous montrons comment estimer la couleur et les micro-structures géométriques d’une surface opaque par stéréophotométrie, à l’aide d’un instrument dédié. Afin de limiter les reflets, cet instrument est équipé d’un éclairage diffus réglable, que nous étalonnons grâce à une procédure spécifique. Nous montrons aussi qu’il est nécessaire de manipuler les images brutes, sans démosaïquage, afin d’éviter toute transformation sur les données, ce qui simplifie l’estimation de l’albédo coloré et l’estimation du relief.

**Abstract** – We present a photometric stereo-based system for retrieving the RGB albedo and the fine-scale details of an opaque surface. In order to limit specularities, the system uses a controllable diffuse illumination, which is calibrated using a dedicated procedure. In addition, we rather handle RAW, non-demosaiced RGB images, which both avoids uncontrolled operations on the sensor data and simplifies the estimation of the albedo w.r.t. each color channel, and the estimation of the normals.

## 1 Introduction

Parmi toutes les techniques de reconstruction 3D (*shape-from-X*), les techniques photométriques, à savoir le *shape-from-shading* [6] et la stéréophotométrie [13], sont les plus à même de retrouver les micro-structures géométriques d’une surface, car elles estiment la normale à la surface en chaque pixel. Dans ce travail, nous nous intéressons à la reconstruction 3D par stéréophotométrie à l’aide d’un *dermoscope*, qui est un instrument constitué d’un appareil photographique numérique et d’un ensemble de LEDs, selon l’arrangement décrit sur la figure 1. Nous détournons cet instrument de son utilisation première, à savoir l’analyse de surfaces cutanées, afin d’analyser les micro-structures de pièces manufacturées.

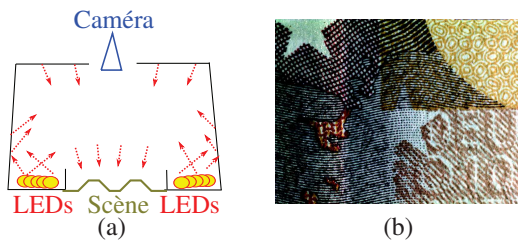


FIGURE 1 – (a) Représentation schématique de l’instrument utilisé pour la reconstruction 3D par stéréophotométrie. Les LEDs sont orientées vers les parois, afin de produire un éclairage diffus [4]. L’appareil photographique numérique prend  $m = 15$  photographies de la scène en allumant différentes combinaisons de LEDs. (b) Exemple de photographie d’un billet de 10 euros prise par cet instrument : en pleine résolution ( $3664 \text{ px} \times 2748 \text{ px}$ ), la taille de la zone imagée est d’environ  $1,6 \text{ cm} \times 1,2 \text{ cm}$ , donc celle d’un pixel d’environ  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ .

Les techniques photométriques de reconstruction 3D visent à inverser le modèle décrivant l’interaction entre la lumière et la surface. La stéréophotométrie utilise généralement  $m \geq 3$  photographies en niveaux de gris, notées  $I^i$ ,  $i \in [1, m]$ , prises par un appareil photographique fixe, mais sous  $m$  éclairages différents (cf. figure 1). Si la surface est opaque et lambertienne (parfaitement diffusante), et si les ombres sont négligées, le niveau de gris au pixel  $(u, v)$  de la  $i^{\text{ème}}$  image s’écrit :

$$I_{u,v}^i = \rho_{u,v} \mathbf{n}_{u,v} \cdot \mathbf{s}^i, \quad i \in [1, m] \quad (1)$$

où  $\rho_{u,v} > 0$  désigne l’albédo,  $\mathbf{n}_{u,v}$  la normale unitaire sortante, et le vecteur  $\mathbf{s}^i$  est dirigé vers la source lumineuse, de norme proportionnelle à la densité du flux lumineux.

L’albédo  $\rho_{u,v}$  et la normale  $\mathbf{n}_{u,v}$  peuvent être estimés en chaque pixel  $(u, v)$ , en introduisant l’inconnue  $\mathbf{m}_{u,v} = \rho_{u,v} \mathbf{n}_{u,v}$  et en résolvant le système (1) en moindres carrés. L’albédo se déduit de cette estimation par  $\rho_{u,v} = \|\mathbf{m}_{u,v}\|$ , et la normale par  $\mathbf{n}_{u,v} = \mathbf{m}_{u,v} / \|\mathbf{m}_{u,v}\|$ . Finalement, la profondeur s’obtient par intégration des normales [3]. La figure 2 montre l’albédo, les normales et la profondeur estimés à partir de  $m = 15$  images d’un billet de 10 euros, telles que celle de la figure 1-b.

Les données utilisées en stéréophotométrie sont généralement des images en niveaux de gris, alors que la plupart des images sont aujourd’hui en couleur et que leur conversion en niveaux de gris constitue une perte d’information. En outre, chaque éclairage est supposé parallèle et uniforme. Vu que l’instrument utilisé est conçu pour favoriser un éclairage diffus, cette hypothèse est loin d’être vérifiée. Notre principale contribution est de montrer que l’utilisation d’images RVB brutes, sans démosaïquage, simplifie l’estimation de l’albédo coloré et du relief (cf. paragraphe 3), pour peu que les différents éclairages aient été préalablement estimés (cf. paragraphe 4).

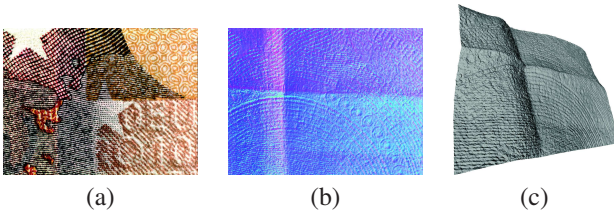


FIGURE 2 – À partir de  $m = 15$  images RVB telles que celle de la figure 1-b, notre approche permet d’obtenir : (a) l’albédo coloré ; (b) le champ de normales mettant en évidence des micro-structures géométriques difficilement visibles à l’œil nu ; (c) la reconstruction 3D de la surface.

## 2 État de l’art

Une procédure permettant de retrouver les micro-structures du relief est décrite dans [8]. Cette technique est intrusive, car elle nécessite d’appliquer un gel sur la surface afin de la rendre lambertienne, et ne permet pas d’estimer la couleur. Notre approche évite ces deux travers : elle utilise un ensemble de LEDs arrangées de telle sorte que l’éclairage produit soit diffus, ce qui limite les reflets et permet aussi d’estimer la couleur.

Plusieurs travaux ont cherché à adapter la stéréophotométrie aux images RVB, afin par exemple d’effectuer la reconstruction 3D en temps réel d’une surface déformable blanche éclairée par trois sources colorées en rouge, vert et bleu [5]. La séparation des trois canaux de l’image RVB donne l’équivalent de trois images en niveaux de gris. Cette idée ingénieuse, suggérée à l’origine par Woodham [13], ne permet toutefois pas d’estimer l’albédo, puisque la surface doit être peinte en blanc.

Un autre travail notable est celui de Barsky et Petrou [1], qui utilisent quatre images RVB pour estimer l’albédo coloré et les normales. Pour ce faire, le modèle (1) est utilisé dans chaque canal, en faisant l’hypothèse que l’éclairage est blanc :

$$I_{u,v}^{i,\star} = \rho_{u,v}^{\star} \mathbf{n}_{u,v} \cdot \mathbf{s}^i, \quad i \in [1, m], \quad \star \in \{R, V, B\} \quad (2)$$

où l’albédo  $\rho_{u,v}^{\star}$  dépend du canal  $\star$  considéré. La stéréophotométrie pourrait être appliquée indépendamment à chaque canal, ce qui fournirait l’albédo dans chaque canal, mais les trois estimations du champ de normales seraient vraisemblablement incohérentes. Barsky et Petrou montrent comment surmonter cette difficulté en effectuant une ACP. Dans [7], Ikeda et Duan commencent par estimer l’albédo coloré, puis estiment le relief en résolvant une EDP non linéaire. Il a également été montré récemment, dans [9], que l’utilisation de quotients entre niveaux de couleur dans le même canal fournissait un système d’EDPs linéaires dans lequel l’albédo n’apparaît plus.

Néanmoins, tous ces travaux supposent que les trois niveaux de couleur RVB correspondent à un même point de la surface, ce qui n’est pas le cas avec les appareils photographiques usuels. En effet, un réseau de filtres colorés est placé devant le récepteur photosensible, selon un motif appelé *filtre de Bayer* : chaque cellule du récepteur ne capte donc d’information que dans un seul canal. Les valeurs RVB d’un pixel étant obtenues par interpolation, cela ne peut que biaiser les estimations.

L’hypothèse d’un éclairage parallèle et uniforme a souvent été remise en question dans le contexte de la stéréophotométrie. L’éclairage produit par de nombreuses sources lumineuses, ponctuelles ou étendues, peut être approché par un modèle paramétrique. Le modèle de source ponctuelle est fréquemment utilisé, car l’utilisation de LEDs dans des applications réelles de stéréophotométrie est aisée. En outre, ce modèle est particulièrement bien adapté aux LEDs. L’estimation des paramètres d’une LED (position, orientation et intensité) est un problème relativement bien maîtrisé [14], de même que la résolution numérique de la stéréophotométrie en présence de telles sources lumineuses [9].

L’utilisation d’un modèle paramétrique n’est cependant pas adaptée au cas de figure de la figure 1 : bien que les rebonds successifs de la lumière puissent être pris en compte par des techniques de rendu, l’inversion de l’équation du rendu est quasiment impossible en pratique. Nous préférons utiliser une approximation du flux lumineux atteignant effectivement la surface. Une première solution consiste à échantillonner l’intensité de l’éclairage sur le plan moyen de la surface à reconstruire, puis de diviser chaque acquisition par cette image [12]. Si cette technique permet effectivement de compenser un éclairage d’intensité non uniforme, elle n’est pas adaptée à un éclairage non parallèle. Une autre solution serait de décomposer l’éclairage sur la base des harmoniques sphériques [2] et d’estimer les premiers coefficients de cette décomposition, mais il est difficile de prédire le nombre de coefficients à utiliser pour garantir que le modèle soit suffisamment précis. Nous montrerons dans le paragraphe 4 comment échantillonner à la fois l’intensité et la direction de chaque éclairage, afin de disposer d’une description précise des flux lumineux éclairant la surface.

## 3 Stéréophotométrie colorée sans démosaïquage

Le modèle de stéréophotométrie colorée que nous utilisons suppose que les images en entrée sont brutes, donc en particulier sans démosaïquage. Comme nous le verrons, cela facilite beaucoup l’estimation de l’albédo coloré et des normales, au regard des approches existantes.

Pour que le modèle photométrique (1) soit satisfait par des images réelles, il faut que la réponse du récepteur photosensible soit aussi linéaire que possible. Cela nécessite de désactiver toutes les corrections automatiques telles que la « balance des blancs » ou la « correction gamma ». La conversion des images brutes au format JPEG doit également être évitée, car les images brutes ont généralement une meilleure « profondeur » (dans notre cas, ces images sont codées sur 12 bits). En outre, nous préconisons de ne pas appliquer de démosaïquage, car cela revient à modifier les valeurs effectivement enregistrées par le capteur. Bien qu’il existe des méthodes de démosaïquage élaborées, nous pensons qu’il est plus raisonnable d’utiliser les valeurs fournies par le capteur telles quelles, sans aucune modification, afin de garantir leur fiabilité.

Au lieu de trois valeurs RVB, nous disposons donc en chaque pixel  $(u, v)$  d'un seul niveau de couleur dans un canal correspondant à la matrice de Bayer (cf. figure 3). L'intensité d'un vecteur d'éclairage n'est donc pertinente que dans un seul canal. Sachant par ailleurs que sa direction n'est pas uniforme, étant donné que l'éclairage est diffus, nous devons munir chaque vecteur  $\mathbf{s}^i$  d'une dépendance spatiale. Nous obtenons finalement le modèle suivant :

$$I_{u,v}^i = \rho_{u,v} \mathbf{n}_{u,v} \cdot \mathbf{s}_{u,v}^i, \quad i \in [1, m] \quad (3)$$

Ce modèle de stéréophotométrie évite tout risque d'incompatibilité entre les normales estimées : si les champs de vecteurs d'éclairage  $\mathbf{s}_{u,v}^i$  sont connus (cf. paragraphe 4), il est possible d'appliquer la stéréophotométrie standard pour estimer l'albédo et la normale en chaque pixel. La procédure sera donc beaucoup plus simple, en comparaison des méthodes existantes qui soit dissocient l'albédo du relief [1], soit calculent des quotients entre niveaux de couleur [9].

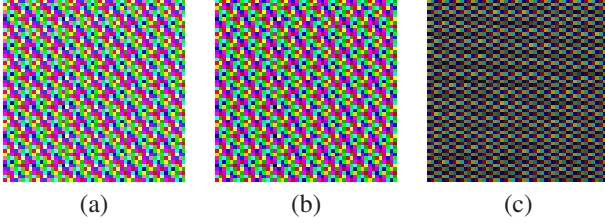


FIGURE 3 – Stéréophotométrie sans démosaïquage. (a) Zoom d'une des images brutes (affichée en RVB pour une meilleure visualisation) sur une zone carrée de 50 pixels de côté. Nous préconisons d'utiliser de telles images sans démosaïquage pour obtenir : (b) une estimation de l'albédo coloré selon le motif de Bayer (cette estimation pourra être interpolée a posteriori) ; (c) une estimation de la normale en chaque pixel. La désactivation du démosaïquage permet d'éviter tout risque de transformation des données, et donc de retrouver les micro-structures géométriques de la surface (cf. paragraphe 5).

Pour disposer d'une description RVB complète de l'albédo, il nous suffirait d'appliquer un algorithme de démosaïquage, puisque l'estimation initiale de  $\rho$  est conforme au motif de Bayer. Mais notre principale préoccupation étant d'estimer le relief, nous appliquons à l'albédo une simple interpolation linéaire. Il est notable, en revanche, que l'estimation de la normale ne requiert pas de démosaïquage : son estimation à partir des images brutes suffit à obtenir un champ de normales dense.

Il nous reste enfin à intégrer ce champ de normales pour obtenir un relief. À cette fin, nous appliquons la méthode d'intégration par DCT (transformée en cosinus discrète) de Sincchony et al. [11] au gradient de profondeur, lequel est calculé à partir des normales estimées par la procédure décrite dans [3]. L'intégration fournit le relief à une constante d'échelle près, qu'il est possible de déterminer si nous disposons de la distance moyenne à la surface, ce qui est le cas grâce à l'étalonnage géométrique de l'appareil photographique.

## 4 Échantillonnage des éclairages

Nous décrivons ici une procédure d'échantillonnage des intensités et des directions des éclairages, c'est-à-dire des  $m$  vecteurs  $\mathbf{s}_{u,v}^i$  du modèle (3). Pour ce faire, il est nécessaire d'inverser (3) vis-à-vis de  $\mathbf{s}_{u,v}^i$ , en chaque pixel  $(u, v)$ , pour chaque éclairage  $i$ . Cela peut être effectué en utilisant une mire lambertienne d'albédo  $\rho_{u,v}$  connu et de normales  $\mathbf{n}_{u,v}$  connues, et en procédant éclairage par éclairage, mais le problème (3) n'est pas suffisamment contraint, car une seule normale est disponible en chaque pixel. Or, l'utilisation de plusieurs mires lambertiennes rendrait cette procédure relativement fastidieuse.

Nous préférons utiliser une seule mire constituée d'un réseau régulier de structures hexagonales usinées dans un matériau diffusant blanc. Nous supposons que ce « blanc » correspond à la valeur 1 de l'albédo dans chaque canal, c'est-à-dire que  $\rho_{u,v} \equiv \rho = 1$ . Cela signifie que chaque couleur estimée le sera relativement à cette couleur « blanche » de référence.

Nous divisons la surface de la mire en trente zones  $\Omega^j$ ,  $j \in [1, 30]$ . Chaque zone est de taille approximative  $600 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ , et comporte sept orientations, qui correspondent à la face hexagonale de la mire faisant face à l'appareil photographique, et aux six faces inclinées possédant une arête commune avec celle-ci. Or, ces zones sont suffisamment petites pour que nous puissions supposer l'éclairage localement parallèle et uniforme, dans chaque canal. Nous estimons donc le vecteur d'éclairage  $\mathbf{s}_{u_0^j, v_0^j}^{i,*}$ , au pixel central  $(u_0^j, v_0^j)$  de  $\Omega^j$ , en résolvant le système linéaire suivant en moindres carrés :

$$\mathbf{n}_{u,v} \cdot \mathbf{s}_{u_0^j, v_0^j}^{i,*} = I_{u,v}^i, \quad (u, v) \in \Omega^{j,*} \quad (4)$$

où  $\Omega^{j,*}$  désigne l'ensemble des pixels de  $\Omega^j$  en lesquels une information est disponible dans le canal  $\star$ .

L'interpolation/extrapolation par *splines* des données ainsi obtenues fournit, pour chaque éclairage  $i \in [1, m]$ , trois champs de vecteurs  $\mathbf{s}_{u,v}^{i,R}$ ,  $\mathbf{s}_{u,v}^{i,V}$  et  $\mathbf{s}_{u,v}^{i,B}$ , qui sont finalement combinés en un seul champ  $\mathbf{s}_{u,v}^i$ , en prenant modèle sur le motif de Bayer. En répétant cette procédure pour les différents éclairages, nous pouvons effectivement estimer les  $m$  champs vectoriels  $\mathbf{s}_{u,v}^i$  du modèle (3), ce qui nous permet d'appliquer la méthode de reconstruction 3D décrite dans le paragraphe 3.

Notons qu'une idée similaire a été proposée dans [8] pour estimer un modèle d'éclairage par harmoniques sphériques, et que notre approche peut être vue comme une extension de celle de [12], à ceci près que nous échantillonnons non seulement les intensités des éclairages, mais également leurs directions.

## 5 Évaluation empirique

En guise de premier résultat, la détection des micro-structures géométriques du billet de 10 euros de la figure 2-c montre l'intérêt potentiel de la stéréophotométrie pour l'inspection de surfaces, en l'occurrence ici pour certifier l'authenticité du billet.

La figure 4 montre l'albédo et le relief estimés de deux pièces de monnaie. Bien que les surfaces métalliques ne soient proba-

blement pas lambertiennes, l'albédo semble correctement estimé, à l'exception des zones fortement concaves où il est très sur-estimé, à cause des réflexions multiples de la lumière. Quant au relief, il révèle les micro-reliefs de la surface, qui peuvent être dus à l'usure, par exemple entre les lettres *n* et *t* à gauche du portrait de Cervantès, ou bien faire partie de la gravure originale, comme la cicatrice sur la joue de ce même personnage.

Pour valider quantitativement la précision des reconstructions 3D, nous avons réalisé un test sur une surface usinée. Ces résultats sont présentés dans [10]. Par recalage avec le modèle 3D, que nous connaissons, nous pouvons mesurer la distance entre chaque point reconstruit et le point le plus proche sur le modèle recalé. Les résultats montrent que 99% des points sont reconstruits avec une erreur inférieure à  $100\ \mu\text{m}$ , et que la médiane des erreurs est de l'ordre de  $20\ \mu\text{m}$  (rappelons qu'un pixel correspond à un rectangle d'environ  $5\ \mu\text{m}$  sur la surface). La répartition spatiale des erreurs montre que les valeurs les plus élevées sont localisées près des arêtes : cela provient probablement des réflexions multiples de la lumière, et de l'intégration [11] en moindres carrés, qui tend à lisser le relief [3], mais cela peut également provenir d'un usinage imprécis. L'erreur est donc probablement légèrement sur-estimée.



FIGURE 4 – Première ligne : pièce de 1 euro italienne. Deuxième ligne : pièce de 50 centimes espagnole. De gauche à droite : une des  $m = 15$  images, albédo estimé et relief estimé.

## 6 Conclusion et perspectives

Nous montrons dans cet article que la stéréophotométrie permet de révéler les micro-structures géométriques d'une surface, selon une procédure non intrusive et facile à mettre en œuvre. Cela est possible grâce à un instrument produisant un éclairage diffus modulable, et en appliquant la stéréophotométrie aux images brutes, sans mosaïquage. Cette astuce simplifie l'estimation de l'albédo coloré, pour peu qu'une estimation dense du flux lumineux incident ait été effectuée. Pour répondre à ce besoin, nous décrivons également une procédure d'étalonnage visant à échantillonner les intensités et les directions des éclairages sur le plan moyen d'acquisition.

L'approche décrite ici reste cependant limitée aux surfaces ne comportant que de faibles pentes. Sinon, des effets tels que les réflexions multiples ou les ombres nécessiteront soit d'utiliser des estimateurs robustes, soit d'alterner l'estimation du relief avec celles des éclairages.

## Références

- [1] S. BARSKY et M. PETROU : The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(10):1239–1252, 2003.
- [2] R. BASRI, D. W. JACOBS et I. KEMELMACHER : Photometric Stereo with General, Unknown Lighting. *International Journal of Computer Vision*, 72(3):239–257, 2007.
- [3] J.-D. DUROU, J.-F. AUJOL et F. COURTEILLE : Integrating the Normal Field of a Surface in the Presence of Discontinuities. *In Proceedings of EMMCVPR*, Bonn, Allemagne, 2009.
- [4] J. GEORGE et A. DELALLEAU : Visual observation device, especially for a dermatological application, 2016. EP Patent App. EP20,140,800,095.
- [5] C. HERNÁNDEZ, G. VOGIATZIS, G. J. BROSTOW, B. STENGER et R. CIPOLLA : Non-rigid Photometric Stereo with Colored Lights. *In Proceedings of ICCV*, Rio de Janeiro, Brésil, 2007.
- [6] B. K. P. HORN : *Shape from Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View*. PhD Thesis, MIT, Cambridge, États-Unis, 1970.
- [7] O. IKEDA et Y. DUAN : Color Photometric Stereo for Albedo and Shape Reconstruction. *In Proceedings of WACV*, Copper Mountain, États-Unis, 2008.
- [8] M. K. JOHNSON, F. COLE, A. RAJ et E. H. ADELSON : Microgeometry capture using an elastomeric sensor. *ACM Transactions on Graphics*, 30(4):1, 2011.
- [9] Y. QUÉAU, R. MECCA et J.-D. DUROU : Unbiased photometric stereo for colored surfaces: A variational approach. *In Proceedings of CVPR*, Las Vegas, États-Unis, 2016.
- [10] Y. QUÉAU, M. PIZENBERG, J.-D. DUROU et D. CREMERS : Microgeometry capture and RGB albedo estimation by photometric stereo without demosaicing. *In Proceedings of QCAV*, Tokyo, Japon, 2017.
- [11] T. SIMCHONY, R. CHELLAPPA et M. SHAO : Direct analytical methods for solving Poisson equations in computer vision problems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(5):435–446, 1990.
- [12] J. SUN, M. SMITH, L. SMITH et A. FAROOQ : Sampling Light Field for Photometric Stereo. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 5(1):14–18, 2013.
- [13] R. J. WOODHAM : Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*, 19(1):134–144, 1980.
- [14] L. XIE, Z. SONG, G. JIAO, X. HUANG et K. JIA : A practical means for calibrating an LED-based photometric stereo system. *Optics and Lasers in Engineering*, 64:42–50, 2015.