

Sur-quantification d’images par variation de lumière pour la reconstruction 3D de surfaces rugueuses.

Alexandre BONY, Benjamin BRINGIER, Majdi KHOUDEIR,

Laboratoire XLIM-SIC

Bât. SP2MI, Téléport 2, Blvd Marie et Pierre Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

{prénom}.{nom}@univ-poitiers.fr

Résumé – *L’analyse de la macro et la micro rugosité d’une surface par traitement d’images n’est pas aisée. Nous proposons dans cet article une nouvelle méthode d’acquisition d’images sur-quantifiées adaptée à la stéréo-photométrie pour retrouver la géométrie 3D d’une surface. Elle permet d’analyser en même temps des faibles et des fortes variations d’irradiance. Pour ce faire, nous reprenons les principes des images hautes dynamiques (HDR) et utilisons un principe d’acquisition par variation d’intensité lumineuse. Nos résultats montrent que pour un temps d’acquisition relativement faible, cette méthode permet d’obtenir une grande précision d’analyse.*

Abstract – *The analysis the macro and micro roughness of a surface by image processing is not common place. In this paper, we propose a new acquisition method of images with high quantification radiance adapted to photometric stereo to recover the surface shape. It allows to analyze simultaneously the high and low surface radiance variations. Our algorithm uses the high dynamic range method and multiple acquisitions (HDR) with differently light intensity. For a relatively short time, our method provides an accurate analysis of surface shape.*

1 Introduction

Le traitement d’images permet de réaliser de la métrologie de surfaces sans contact et non destructive pour diverses applications : détection de défauts, mesure de performance, reconnaissance d’objets. . . La méthode la plus performante pour l’analyse de la macro et micro rugosité est l’acquisition laser. Cependant, cette méthode qui mesure le temps mis par le rayon laser pour parcourir le trajet source-surface-capteur est relativement longue et coûteuse. L’analyse d’image permet de développer des méthodes qui réduisent ces deux problèmes. La stéréo-vision utilise plusieurs images de points de vue différents et la triangularisation pour calculer des formes 3D. Le flou optique calcule dans une image la relation entre flou et distance entre l’objectif et la surface. Malheureusement, ces techniques ne permettent pas une bonne précision pour l’analyse macro et micro. Enfin, la stéréo-photométrie [1, 6, 8] ne nécessite pas d’appariement contrairement à la stéréo-vision et pour un temps plus court elle permet d’obtenir une précision équivalente à la mesure par temps de vol basée laser. Son application nécessite plusieurs images d’un point d’observation fixe mais sous différentes directions d’éclairage. Elle permet de dissocier les constituants d’une image : géométrie, couleurs et conditions d’éclairage.

Cependant, comme tout traitement d’image, la SP est très dépendante de la qualité des images utilisées : pas de quantification, bruit d’acquisition, sur et sous exposition. En outre la SP est sensible aux propriétés photométriques telles que la spécularité ou les ombres portées ou propres. Plusieurs travaux [2, 6, 8, 9] traitent ce problème. Les solutions évoquées

consistent à obtenir de la redondance d’information en augmentant le nombre d’images prises pour des directions différentes. Puis, les informations jugées comme erronées (spécularité, ombrages) sont éliminées. Malheureusement, les critères de sélection ne sont pas toujours fiables et entraînent des erreurs de reconstruction.

Pour pallier l’ensemble de ces problèmes, nous proposons une nouvelle méthode d’acquisition d’images sur-quantifiées basée sur les principes des images HDR [3, 4] qui consistent à utiliser la redondance et la fusion d’information pour éliminer le bruit d’acquisition et augmenter la dynamique des images. Notre méthode est un compromis entre l’augmentation de la dynamique et la réduction du pas de quantification [5] pour permettre de mieux isoler les phénomènes de spécularité et d’ombrage. De plus l’atout principale est de réduire le temps d’acquisition par rapport aux méthodes classiques d’images HDR et de le garantir constant [7].

Cet article se décomposera en trois parties. Après avoir présenté la SP, nous expliciterons notre méthode d’acquisition. Enfin, au travers d’exemples de reconstruction 3D de surfaces, nous montrerons que notre méthode permet d’augmenter significativement la qualité des résultats.

2 Théorie

2.1 Stéréo-photométrie

Selon le modèle Lambertien, l’irradiance X réfléchiée pour une surface éclairée par une unique source distante est le pro-

duit de l'Albedo ρ et du cosinus de l'angle d'incidence Θ entre la direction de la source lumineuse \vec{l} et la normale à la surface \vec{n} .

$$X = \rho \cos(\Theta) = \rho(\vec{l} \cdot \vec{n}) \quad (1)$$

Sans connaissances préalables de la surface, ($m \geq 3$) images sont nécessaires pour inverser ce modèle et déterminer les normales et l'Albedo en chaque point. Dans le cas de la SP, elles sont acquises d'un point de vu fixe et seules les directions d'éclairage changent [1]. Comme l'illustre le schéma du système d'acquisition figure 1.

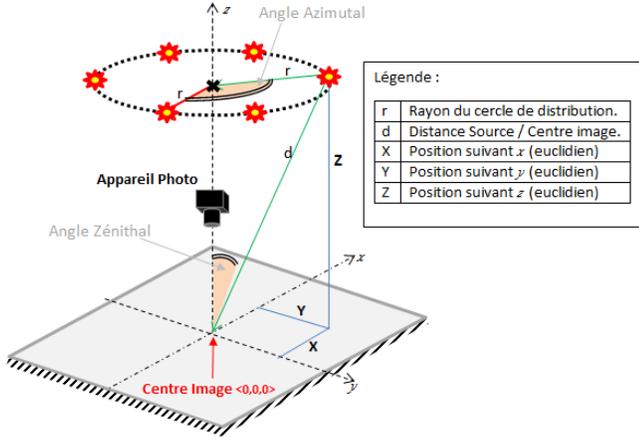


FIGURE 1 – Schéma du système d'acquisition.

Notons X_j l'irradiance associée à la position l_j d'une source lumineuse, nous obtenons le vecteur irradiance $X = [X_1, X_2, \dots, X_m]$ associé à la matrice $L = [l_1, l_2, \dots, l_m]$. La solution du système linéaire $M = \rho(L \cdot \vec{n})$ est :

$$\rho = |(L^T L)^{-1} \cdot L^T \cdot X| \quad ; \quad n = ((L^T \cdot L)^{-1} \cdot L^T \cdot X) / \rho \quad (2)$$

Si ($m > 3$), le système est surdéterminé et la redondance d'information peut permettre de réduire les erreurs [6, 8, 9]. En effet, pour le cas réel, X_j est remplacé par M_j qui représente la valeur numérique fournie par le système d'acquisition. ρ représente alors la combinaison de la reflectance de la surface, de l'intensité de la source et des propriétés intrasecs du système d'acquisition. La solution donnée par l'équation 2 peut donc être erronée par le bruit d'acquisition, la quantification de l'information et les phénomènes de sur ou sous-exposition qui sont dus à la dynamique limitée des capteurs. Les solutions proposées pour atténuer ce type de problème consistent à exclure par discrimination les valeurs numériques jugé comme phénomènes anormaux. Malheureusement le pas de quantification des images classiques s'avère dans la plus part des cas trop important pour permettre une discrimination précise.

2.2 Images sur quantifiées par variation lumineuses

Afin de pallier ces problèmes nous proposons de combiner plusieurs images quantifiées sur N Bits pour obtenir une image

quantifiée sur P Bits avec ($N \ll P$). Pour cela nous reprenons le principe des images HDR [3]. Cette méthode se décompose en deux parties et permet de déterminer les valeurs réelles d'irradiance X . Premièrement, la réponse f de l'appareil d'acquisition est déterminée. Elle lie les valeurs numériques M aux valeurs de radiance R en fonction du temps d'exposition t et de k dont la valeur dépend de d le diamètre d'ouverture, h distance focal, Φ angle du rayon principale par rapport à l'axe optique. Si k est constant lors d'une série d'acquisitions :

$$M = f(R \frac{\pi}{4} (\frac{d}{h})^2 \cos^4(\Phi) t) = f(R * k * T) = f(X * t) \quad (3)$$

La seconde partie utilise l'inverse de f pour fusionner Q images quantifiées sur N Bits obtenues par variation du temps d'exposition t :

$$X = \frac{\sum_{q=0}^Q f^{-1}(M(q)) \frac{1}{t_q} w(M(q))}{\sum_{q=0}^Q w(M(q))} \quad (4)$$

où t_q est le temps d'exposition de l'acquisition q et w une fonction de pondération permettant de limiter l'influence des pixels saturés. Cette technique est généralement employée pour augmenter la dynamique d'acquisition, c'est-à-dire avoisiner des dynamiques de l'ordre de $10^8 lux$ malgré la dynamique limitée des capteurs à $10^4 lux$. Dans notre application, nous cherchons à augmenter la quantification afin de mieux approximer les gradients tout en augmentant la dynamique pour éliminer le bruit d'acquisition et les phénomènes de sur et sous-exposition. Pour ce faire, nous réalisons une série d'acquisitions d'images à N Bits dont les plages de sensibilité sont très proches [5]. Puis, par la méthode de fusion des images HDR, nous créons de nouveaux pas de quantifications pour obtenir une images à P Bits. La figure 2 donne un exemple de résultat.

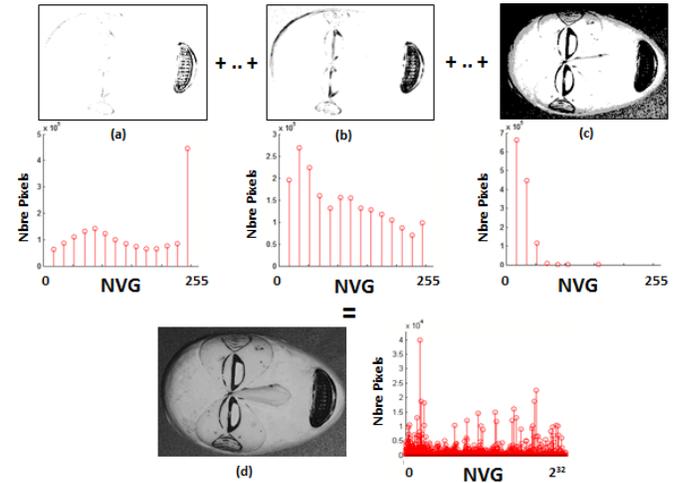


FIGURE 2 – a-c : images quantifiées sur N Bits. d : fusion des images a-c pour obtenir une quantification sur P Bits.

Le problème majeur de cette méthode est le temps nécessaire pour obtenir les Q images. En effet, le temps d'exposition t_q doit varier pour chaque image. Le temps globale est long (plusieurs secondes) et variable en fonction de la scène. Nous proposons donc de fixer le temps d'exposition pour chaque image

et faisons varier l'intensité des sources lumineuses [7]. Pour ce faire, nous fixons $t_q = T$ et faisons varier $r = \alpha R$ à chaque acquisition dans l'équation 3. L'équation 4 devient :

$$X = \frac{\sum_{q=0}^Q f(M(q)) \frac{1}{r_q T} w(M(q))}{\sum_{q=0}^Q w(M(q))} \quad (5)$$

Nous obtenons ainsi un temps d'acquisition des Q images rapide et fixe quelque soit la scène à analyser. La figure 3 illustre le principe des deux méthodes.

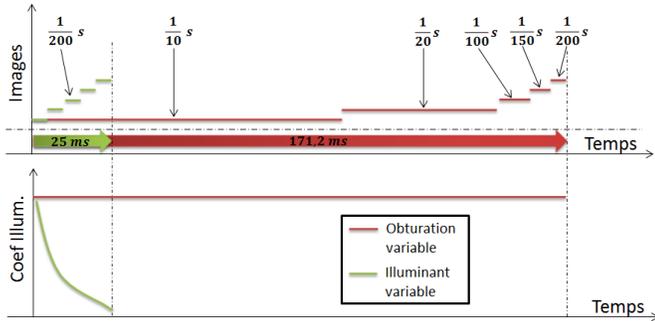


FIGURE 3 – Illustration des différences au niveau du temps d'acquisition et du coefficient d'illumination entre la méthode classique d'image HDR et notre méthode.

3 Résultats

Notre système d'acquisition est composé d'un appareil photo de type reflex (Nikon D300S) et d'un objectif 105mm. La résolution des images obtenues est de 1868×4320 pixels pour des surfaces d'environ 5×12 cm. Le système d'éclairage est composé de six lampes placées sur un plan parallèle à la surface analysée et distribuées tous les 60° suivant un cercle dont le centre est l'appareil photo (figure 1). Leur puissance est variable et d'un ratio de 1/100. Pour chaque position d'éclairage, nous réalisons jusqu'à 15 acquisitions quantifiées sur 12 Bits pour produire nos images sur-quantifiées 32 Bits. Deux surfaces sont utilisées pour présenter les résultats de notre méthode (figure 4). Pour la première, le masque possède une macro géométrie facile à analyser visuellement ainsi qu'une micro rugosité très fine. Pour la seconde une partie de mur médiéval est composée de différentes variations microscopiques. Ces deux surfaces permettent d'étudier l'adéquation entre notre méthode d'acquisition et la stéréo-photométrie.

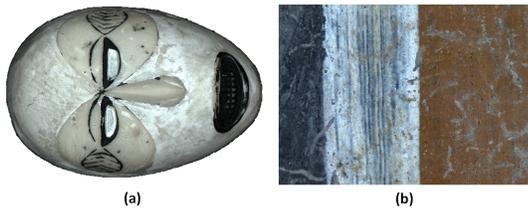


FIGURE 4 – Surfaces étudiées : a) Masque b) Peinture murale.

Premièrement, nous analysons l'information contenue dans les images pour les différentes techniques d'acquisition. Pour chaque surface, nous réalisons deux séries équivalentes de 15 images quantifiées sur 12 Bits, l'une par variation du temps d'obturation et l'autre par variation de l'intensité lumineuse. La figure 5 présente les résultats obtenus pour la surface masque. Toutes ces images comportent des sur ou sous expositions car la dynamique du capteur n'est pas suffisante lorsque les variations de radiance sont importantes. A partir de ces séries d'images,

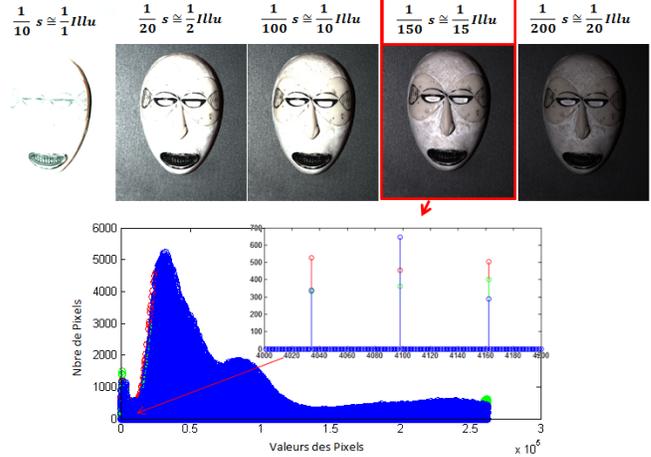


FIGURE 5 – Images 12 Bits.

nous calculons pour chaque technique d'acquisition une version sur-quantifiée sur 32 Bits et utilisons un algorithme de Tone Mapping pour pouvoir les présenter dans cet article (figure 6). Nous pouvons remarquer que ces deux images sont très proches et qu'elles ne comportent pas de sur ou sous exposition. De plus, un zoom sur l'histogramme des différentes images permet d'illustrer la sur-quantification de l'information entre une version 12 Bits et une version 32 Bits. Notre méthode d'acquisition permet donc d'obtenir des images sur-quantifiées et réduit par 10 le temps d'acquisition par rapport aux techniques d'images HDR classiques.

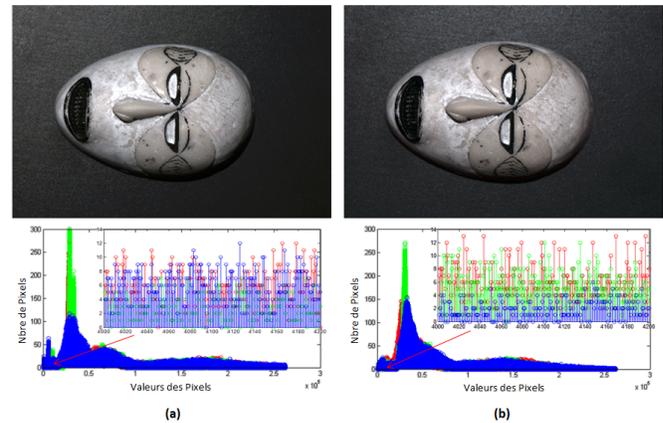


FIGURE 6 – Images HDR sur-quantifiées 32 Bits a) par variation du temps d'obturation, b) par variation lumineuse.

Puis, nous utilisons les images sur-quantifiées par variations d'intensité lumineuse et le meilleur compromis des images 12 Bits en terme de sur et sous expositions dans un algorithme de stéréo-photométrie [8]. Les figures 7 et 8 présentent les résultats obtenus pour les champs de gradients et les surfaces en 3D. Le manque d'informations dans les zones sur ou sous exposées des images 12 Bits entraîne des erreurs de reconstruction importantes des formes macros. Elles sont dues à des inversions concave/convexe et provoquent des pics verticaux visible sur la figure 7b. Les images HDR permettent de corriger ces erreurs.

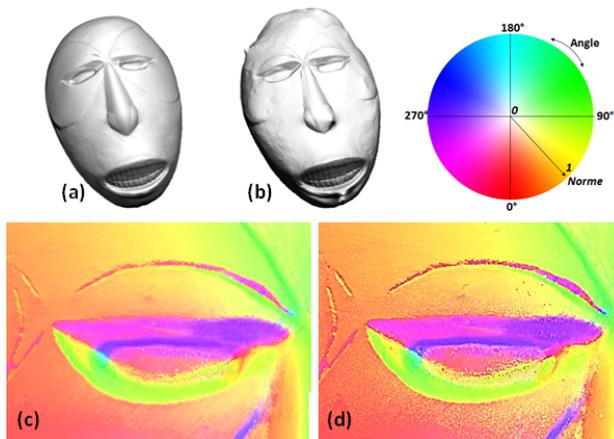


FIGURE 7 – a) Reconstruction 3D avec images 32 Bits. b) Reconstruction 3D avec images 12 Bits. c) Champs de gradients pour images 32 Bits. d) Champs de gradients pour la meilleure exposition 12 Bits.

L'analyse des champs de gradients permet de mesurer l'importance de la sur-quantification des images 32 Bits. Un zoom sur chaque surface est effectué pour montrer ces différences. Dans les zones de micro rugosité, les version 12 Bits présentent des variations brutales qui traduisent un manque d'informations entre les différentes positions d'éclairages utilisées en stéréo-photométrie. A l'inverse, les versions 32 Bits conservent des variations plus douces et homogènes. Elles correspondent à la réalité des surfaces. La sur-quantification de l'information lors de l'acquisition est donc importante pour reconstruire la micro rugosité.

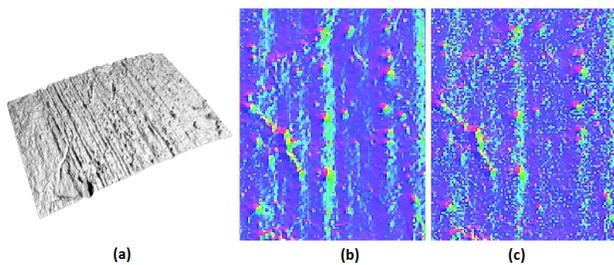


FIGURE 8 – a) Reconstruction 3D avec images 32 Bits. b) Champs de gradients pour images 32 Bits. c) Champs de gradients pour la meilleure exposition 12 Bits.

4 Conclusion / Perspectives

Nous présentons dans cet article une nouvelle méthode d'acquisition d'images sur-quantifiées par variation d'intensité lumineuse adaptée à la stéréo-photométrie. Elle permet de s'affranchir des limites de dynamique fixées par les appareils d'acquisitions. Le temps global d'acquisition de notre méthode ne dépasse pas le temps d'appariement nécessaire pour obtenir des images 12 Bits correctement exposées. De plus, l'utilisation de sources de lumière variables permet de réduire significativement les temps d'acquisition pouvant aller de plusieurs secondes pour une images HDR classique à moins d'une seconde pour notre méthode. En outre ce temps est garanti constant pour chaque image et pourrait permettre l'analyse de surface mobile.

Références

- [1] Woodham, R.J. *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*. Optical engineering v19-1 p139-144, 1980.
- [2] Ikeuchi, K. *Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on v6 p661-669, 1981.
- [3] Debevec, P.E. and Malik, J. *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 97), p369-378, 1997.
- [4] Mitsunaga, T. and Nayar, S.K. *Radiometric self calibration*. CVRP p374, Published by the IEEE Computer Society, 1999.
- [5] Grossberg, M.D. and Nayar, S.K. *High dynamic range from multiple images : Which exposures to combine ?*. ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision (CPMCV) v16, 2003.
- [6] Barsky, S. and Petrou, M. *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 p1239-1252, 2003.
- [7] Agrawal, A. and Raskar, R. and Nayar, S.K. and Li, Y. *Removing photography artifacts using gradient projection and flash-exposure sampling*. ACM SIGGRAPH 2005 Papers p828-835, 2005.
- [8] Sun, J. and Smith, M. and Smith, L. and Midha, S. and Bamber, J. *Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-Lambertian surfaces subject to shadows and specularities*. Image and Vision Computing v25-7 p1050-1057, 2007.
- [9] Argyriou, V. and Petrou, M. and Barsky, S. *Photometric stereo with an arbitrary number of illuminants*. Computer Vision and Image Understanding v114-8 p887-900, 2010.