

# HIGH DYNAMIC RANGE REFLECTANCE TRANSFORMATION IMAGING : UNE APPROCHE MULTI-LUMIERE ADAPTATIVE POUR L'EVALUATION DE LA QUALITE VISUELLE DES SURFACES

M. NURIT<sup>1</sup>, Y. CASTRO<sup>1</sup>, G. LE GOÏC<sup>1</sup>, H. FAVRELIERE<sup>2</sup>, A. MANSOURI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ImViA Laboratory, Université de Bourgogne Franche-comté, Dijon, France,

<sup>2</sup> Symme Laboratory (EA4144), Université Savoie Mont-Blanc (USMB), Annecy, France

<sup>1</sup> marvin\_nurit@etu.u-bourgogne.fr, gaetan.le-goic@u-bourgogne.fr, alamin.mansouri@u-bourgogne.fr,

<sup>2</sup> hugues.favreliere@univ-savoie.fr

**Résumé** – L’inspection visuelle des surfaces est un processus sensoriel complexe qui dépend de plusieurs facteurs liés à l’observateur [1]–[3] (sa connaissance, son expérience, sa fatigue ou encore le but de l’observation), l’objet observé ainsi qu’à l’environnement lumineux. Afin de réduire la subjectivité et la variabilité intrinsèque associée à ce type d’approche et d’améliorer la robustesse de l’analyse de la qualité d’apparence des surfaces inspectées, des techniques d’imagerie multi-éclairage de type RTI (Réflectance Transformation Imaging) sont de plus en plus utilisées. Cependant, et pour tirer le meilleur parti de cette technique, il est nécessaire d’en maîtriser les processus d’acquisition et de traitement, notamment pour des surfaces fortement réfléchissantes et/ou présentant des topographies particulières de surface. Ainsi nous proposons une mise en œuvre innovante basée sur la technique RTI en l’augmentant avec une acquisition et un traitement en grande dynamique (HDR), adapté et adaptatif. Ce couplage permet d’éviter la faible dynamique des caméras et assure par conséquent une estimation fidèle, pour chaque pixel, de la composante angulaire de la réflectance de la surface inspectée, en particulier dans le cas des surfaces non lambertiennes, et des surfaces hétérogènes en termes de matériau et/ou de texturation géométrique. Au-delà de la reconstruction de l’apparence, des cartographies associées à des cartes d’indicateurs géométriques (pentes locales) sont utilisées pour montrer la pertinence et la performance de la méthodologie HDR-RTI proposée.

**Abstract** - Visual inspection of surfaces is a complex sensory process that depends on several factors related to the observer (his knowledge, experience, tiredness or the purpose of observation), the object observed and the light environment. In order to reduce the subjectivity and intrinsic variability associated with this type of approach and to improve the robustness of the analysis of the appearance quality of the inspected surfaces, multi-lighting imaging techniques like RTI (Reflectance Transformation Imaging) are being used more and more. However, and to make the most of this technique, it is necessary to control the acquisition and processes, especially for highly reflective surfaces and / or having particular surface topographies. Thus, we propose an innovative implementation based on the RTI technique by increasing it with an acquisition and a processing in large dynamic (HDR), adapted and adaptive. This coupling makes it possible to avoid the low dynamic range of the cameras and therefore ensures a faithful estimate, for each pixel, of the angular component of the reflectance of the surface inspected, in particular in the case of non-Lambertian surfaces, and heterogeneous surfaces in terms of material and / or geometric texturing. Beyond appearance reconstruction, maps associated with geometric indicator maps (local slopes) are used to show the relevance and performance of the proposed HDR-RTI methodology.

## 1 Introduction

La Réflectance Transformation Imaging (RTI) appelée aussi imagerie multi-éclairage est une technique d’imagerie de plus en plus utilisée pour l’inspection visuelle des surfaces. Son principe consiste à acquérir des images par une caméra généralement positionnée orthogonalement à la surface inspectée, et de faire varier la direction de la source d’éclairage. La source d’éclairage est toujours située à une distance constante de la surface inspectée : elle parcourt une demi-sphère dont le sommet est le système de prise de vue. Le principe de l’acquisition consiste à faire varier la direction de la source d’éclairage et à prendre une image de la scène pour chacune de ses positions d’éclairage. Ainsi, en chaque point (pixel), une évaluation discrète de la réflectance angulaire locale est obtenue. Certaines

méthodes d’approximation comme la méthode Polynomial Texture Mapping (PTM) [4], la méthode Hemispherical Harmonics (HSH) [5] ou plus récemment une méthode basée sur une décomposition dans une base modale (Discrete Modal Decomposition - DMD) [6] peuvent être alors mises en œuvre pour obtenir un modèle continu à partir de la réflectance locale (Figure 1), permettant notamment la reconstruction de l’apparence de la surface inspectée dans une direction arbitrairement choisie. Ces données sont précieuses pour évaluer et décrire la qualité visuelle d’une surface, notamment dans le cas de surfaces de produits manufacturés [7].

Une limite de cette approche est liée à la dynamique (plage de valeurs possible) réduite de mesure de la réponse lumineuse de la surface inspectée. En effet, conventionnellement, une image Low Dynamic Range (LDR) est prise pour chaque direction d’éclairage, ce qui

est généralement très insuffisant pour couvrir la dynamique de la réponse mesurée, et génère donc de très

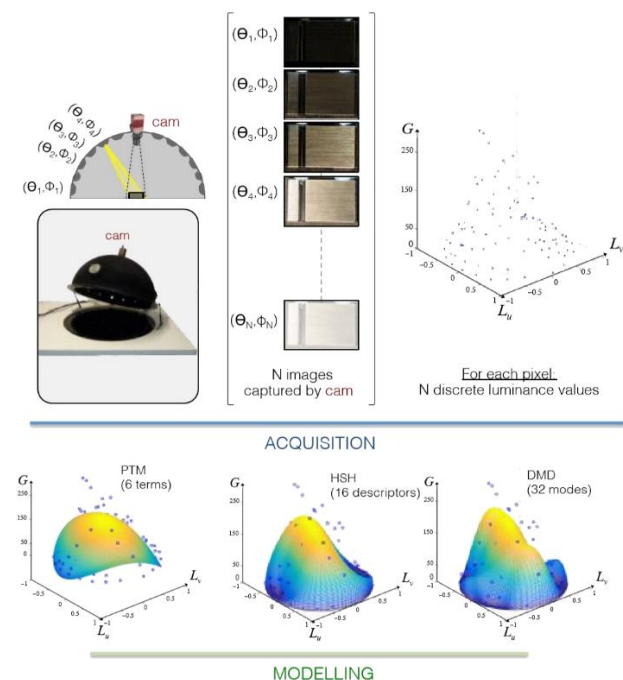


Figure 1 : Schéma de l'acquisition automatique de N images pour la collecte et le traitement RTI [6]

nombreuses zones saturées lorsque les surfaces sont non-lambertiennes.

Ainsi, dans le cas de surfaces présentant un comportement local complexe et / ou hétérogène, les informations LDR sont largement insuffisantes pour décrire correctement la réponse physique réelle de chaque point de la surface inspectée. Cette limitation dynamique rend également difficile la corrélation des données RTI avec les résultats de la perception humaine [8]. C'est donc un problème majeur pour l'évaluation de la qualité visuelle des surfaces observées, et plus globalement pour l'inspection industrielle.

Dans cette étude nous proposons de répondre à cette limitation par une implémentation auto-adaptative du traitement HDR pour les images de données RTI. A notre connaissance, c'est la première fois qu'un tel traitement est proposé et implémenté de façon adaptatif sur des données issues de l'imagerie RTI. Le principe consiste à adapter automatiquement le nombre d'images acquises ainsi que les valeurs de temps d'exposition permettant la reconstruction de l'image HDR pour chacune des directions d'acquisition, c'est-à-dire pour chacune des directions d'éclairage. Notre proposition se base et adapte la méthode de Martinez et al [9] inspiré par les travaux de Grossberg et Nayar [10] et ceux de Debevec et Malik [11]. Elle est basée sur l'estimation de la Camera Response Function (CRF) et des histogrammes cumulés des images LDR issues d'une acquisition. La méthodologie proposée est donc généraliste en terme de capteur (elle fonctionne pour la plupart des caméras) et de scènes inspectées, et nécessite pas de connaître au préalable la type de réponse de la surface inspectée.

Notre méthodologie est présentée dans la section 2.

## 2 HDR adaptatif pour les images RTI

### 2.1 Estimation de la CRF

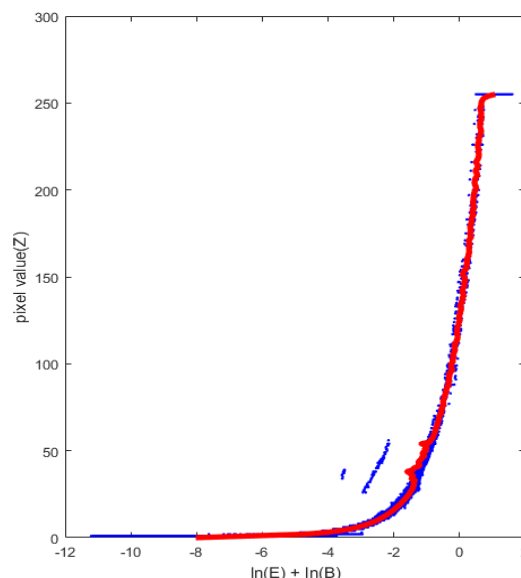
L'estimation de la CRF d'une caméra ne nécessite pas d'être renouvelée pour chaque processus d'acquisition HDR-RTI : tant que l'on utilise la même caméra, on pourra réutiliser la CRF préalablement calculée (hors réétalonnage du système).

Pour initialiser le calcul, nous devons déterminer le nombre des pixels que nous allons observer dans la scène (généralement de 100 à 5000 pixels répartis uniformément sur l'image). Il faut choisir un compromis entre le temps de calcul (grand nombre de pixels) et l'influence du bruit (petit nombre de pixels). Plusieurs images sont acquises avec différents temps d'expositions pour accéder à la totalité de la réponse lumineuse de la surface, notamment brillante et/ou pour les directions d'éclairage normales à la surface. Parmi les pixels observés, certains doivent être contenus dans la plage de travail de la caméra lors de l'acquisition des images. Enfin, la CRF correspond à la solution de l'équation suivante :

$$0 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P w(Z_{ij}) [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln B_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}+1} [w(z)g''(z)]^2 \quad (1)$$

$g(Z_{ij})$  correspond à la CRF à déterminer.  $Z_{ij}$  la valeur du pixel  $i$  avec le temps d'exposition  $j$ .  $B$  est le vecteur des temps d'exposition utilisé pour l'acquisition des images dont  $B_j$  le temps d'exposition  $j$  et  $E_i$  l'irradiance inconnue du pixel  $i$  pixel.  $w$  est une fonction de pondération (Figure 2).

Figure 2 : The camera response function of our camera (Manta



G-507B). En rouge la courbe de la CRF. En bleu la valeur des pixels après minimisation de l'équation 1

## 2.2 Temps d'exposition adaptative des images LDR

À chaque position angulaire de l'acquisition, les temps d'exposition pour les acquisitions LDR sont déterminés de manière adaptative.

Trois paramètres, fixés au préalable, sont utilisés : le niveau de bruit (NOI) et le niveau de saturation (SAT) du CRF (Figure 3), ainsi qu'un seuil de pixel (pourcentage de pixels saturés considéré comme acceptable).

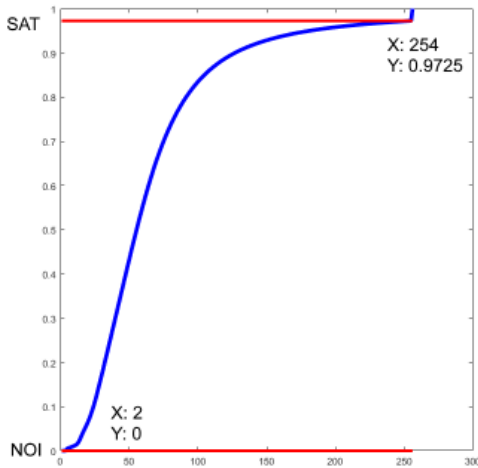


Figure 3 : Histogramme cumulé d'une image LDR avec les niveaux de NOI et SAT

Une première image est acquise avec un temps d'exposition arbitraire (choix de l'utilisateur). Ensuite, et de manière récursive, une deuxième image est acquise avec un temps d'exposition plus long et/ou plus court, déterminé automatiquement à l'aide de l'équation suivante [9] :

$$\Delta_{shorter} = \frac{CRF^{-1}(NOI)}{CRF^{-1}(SAT)} \quad (2)$$

$$\Delta_{longer} = \frac{CRF^{-1}(SAT)}{CRF^{-1}(NOI)} \quad (3)$$

L'algorithme s'arrête lorsque le rapport de pixels correctement exposés (non saturés) de l'histogramme cumulé de l'image est satisfaisant, sinon si tous les temps d'exposition disponible sont utilisés. On peut aussi définir un nombre maximal ou minimal d'images à acquérir si besoin.

Les paramètres NOI et SAT, influencent le SNR Signal-To-Noise, en chaque pixel, défini comme :

$$SNR_{xy} = 20 * \log_{10} \left( \frac{E_{xy}}{\sigma_{xy}} \right) \quad (4)$$

Avec  $E_{xy}$  la moyenne de la valeur HDR et  $\sigma_{xy}$  l'écart type, en un pixel sur plusieurs image HDR de la même scène. Plus le NOI et le SAT sont proches, plus le SNR de l'image HDR sera meilleur. Cependant, plus un grand nombre de photographies seront nécessaires, plus, bien évidemment, le temps de l'acquisition sera plus long [9].

## 3 Construction de l'image HDR

Nous avons, pour chaque position d'éclairage  $i$  (appelée aussi direction d'acquisition), un vecteur d'images  $I$  avec l'élément  $j$  acquis avec le temps d'exposition  $j$  dans le vecteur  $B$ . Avec l'ensemble des images, nous appliquons un prédicat pour calculer une matrice de pondération  $M$ . Les images HDR peuvent ainsi être calculées pour chaque position angulaire :

$$M_i(x, y) = \sum_{j=1}^{|B_i|} \begin{cases} \text{si } NOI < I_{i,j}(x, y) < SAT, 1 \\ \text{sinon } 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$H_i(x, y) = \sum_{j=1}^{|B_i|} \frac{I_{i,j}(x, y) * B_{i,j}}{B_{i,j}} * \begin{cases} \text{si } M_i(x, y) > 0, \frac{1}{M_i(x, y)} \\ \text{sinon } 1 \end{cases} \quad (6)$$

## 4 Résultats et conclusion

La comparaison entre les résultats obtenus à partir de la technique RTI conventionnelle et notre proposition que nous nommons HDR-RTI montre des différences très significatives. La méthode HDR-RTI proposée fournit une description complète de la réflectance locale en termes de dynamique. Ainsi, le couplage de RTI avec l'imagerie HDR permet une meilleure estimation de la réflectance locale pour l'éclairage rasant et normal, car elle diminue fortement le nombre d'informations saturées (faibles ou élevées) en adaptant l'exposition au cours du processus d'acquisition. En outre, d'autres modalités RTI, dérivées de l'estimation de réflectance locale, seront également affectées.

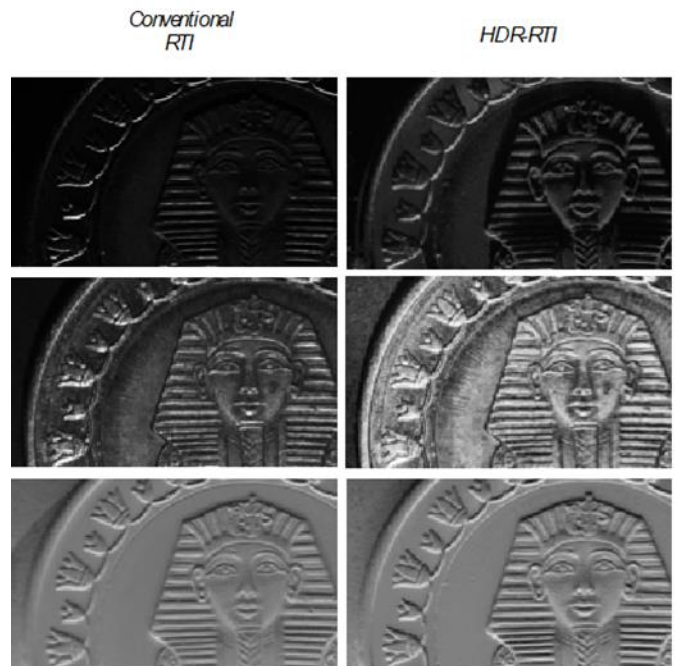


Figure 4 : Comparaison entre la méthode RTI et HDR-RTI. De haut en bas, Reconstruction d'image pour une lumière incidente rasante, Reconstruction d'image pour une lumière incidente à 65°, Cartes des pentes.

## 5 References

- [1] N. Baudet, M. Pillet, and J. L. Maire, "Visual inspection of products: a comparison of the methods used to evaluate surface anomalies," *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–38, 2011.
- [2] A. S. Guerra, "Métrologie sensorielle dans le cadre du contrôle qualité visuel," 2008.
- [3] T. Debrosse, M. Pillet, J. L. Maire, and N. Baudet, "Sensory perception of surfaces quality - Industrial practices and prospects," *Proc. Kansei Eng. Emot. Res.*, p. 252, 2010.
- [4] T. Malzbender, D. Gelb, and H. Wolters, "Polynomial texture maps," pp. 519–528, 2005.
- [5] P. Gautron and J. Krivanek, "A novel hemispherical basis for accurate and efficient rendering," *Proceeding EGSR'04 Proc. Fifteenth Eurographics Conf. Render. Tech.*, pp. 321–330, 2004.
- [6] G. Le Goïc, H. Favrelière, M. Pillet, S.-F. Desage, S. Samper, and G. Pitard, "Discrete Modal Decomposition for surface appearance modelling and rendering," *Opt. Meas. Syst. Ind. Insp. IX*, vol. 9525, no. Figure 1, p. 952523, 2015.
- [7] G. Le Goïc and S. Samper, "Système de détection d' anomalies d' aspect par la technique PTM To cite this version : HAL Id : hal-00740313 Syst`eme de d' etection d' anomalies d' aspect par la technique PTM," 2012.
- [8] S. K. Nayar and T. Mitsunaga, "High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 1, pp. 472–479, 2000.
- [9] M. A. Martínez, E. M. Valero, and J. Hernández-Andrés, "Adaptive exposure estimation for high dynamic range imaging applied to natural scenes and daylight skies," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 4, p. B241, 2015.
- [10] M. D. Grossberg and S. K. Nayar, "What Can Be Known about the Radiometric Response from Images?," pp. 189–205, 2007.
- [11] P. E. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," 2005.