**Éclairage structuré et vision active
pour le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes**

O. Morel, R. Seulin, C. Stolz et P. Gorria

Le2i UMR CNRS 5158
IUT Le Creusot
12 rue de la Fonderie
F-71200 Le Creusot, France

Eclairage structuré et vision active pour le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes

Olivier Morel*, Ralph Seulin, Christophe Stolz, Patrick Gorria

Laboratoire Le2i - UMR CNRS 5158
IUT Le Creusot
12, rue de la Fonderie
F 71200 Le Creusot

Résumé

Dans le domaine de la vision artificielle, l'inspection de surfaces parfaitement réfléchissantes est une tâche particulièrement délicate, car elle implique de maîtriser complètement l'éclairage de la scène. Nous proposons dans ce papier, deux méthodes complémentaires permettant le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes. La première méthode est un système d'acquisition utilisant un éclairage dynamique à franges. Elle permet de révéler les défauts d'aspect sur les surfaces à faible courbure. Dans des zones locales à plus forte courbure, il devient nécessaire d'avoir accès à des informations tridimensionnelles afin de pouvoir segmenter les défauts. Nous proposons ainsi une méthode complémentaire qui est basée sur la technique de "Shape From Polarization" étendue aux surfaces métalliques. Ces deux techniques sont particulièrement bien adaptées pour le contrôle qualité d'objets métalliques très réfléchissants obtenus par estampage.

1 Introduction

Le contrôle qualité de surfaces métalliques réfléchissantes par vision artificielle, nécessite une attention toute particulière au dispositif d'éclairage. Les reflets spéculaires ont tendance à perturber l'acquisition des images, empêchant une segmentation aisée pour la détection de défauts. Il est donc indispensable de confiner l'objet à inspecter afin de pouvoir maîtriser complètement les paramètres de l'éclairage. Un système d'éclairage dynamique à franges, développé par Seulin[1, 2], permet de segmenter efficacement les défauts d'aspect sur des surfaces métalliques réfléchissantes à faible courbure. Cependant, l'inspection d'objets métalliques contenant des décors (figure 1), s'avère délicate au voisinage de ces derniers. Dans de telles zones localisées, les défauts n'apparaissent plus comme des défauts d'aspect, mais comme des défauts volumiques, constitués de manques et de déformations. Afin de remonter aux informations 3D de la surface, nous avons étendu le modèle de "Shape from Polarization" aux surfaces métalliques. Cette technique a surtout été développée par Miyazaki[3], et Rahmann[4] pour des surfaces réfléchissantes ou transparentes, mais de nature diélectrique. L'information obtenue par les images de polarisation nous permet de remonter à la forme des décors apparaissant sur la surface. La confrontation de ces données avec celles venant du modèle théorique, nous permet de classer les objets défectueux.

L'article est organisé ainsi : nous décrivons dans la partie 2, le système d'éclairage dynamique à franges, qui permet de détecter efficacement les défauts d'aspect sur des surfaces lisses. Puis, nous rappellerons le principe du "Shape from Polarization" dans la partie 3. La partie 4 montre comment nous avons étendu le procédé afin de l'appliquer aux surfaces métalliques. Dans la partie 5, nous exposerons les résultats et les limitations du système.

*o.morel@iutlecreusot.u-bourgogne.fr

Figure 1: Effets de l'éclairage structuré au voisinage des décors

2 Eclairage structuré dynamique

Les irrégularités de surface provoquent d'importantes déviations des rayons lumineux par rapport aux zones saines. Ainsi, la direction de réflexion de la lumière est fortement différente entre les zones saines et les zones de défauts. La méthode proposée s'inspire de la technique du Dark Field / Bright Field. Elle consiste à utiliser une transition entre une zone lumineuse et une zone sombre afin de mettre en évidence les défauts de la surface[5, 6, 7, 8].

La figure 2 illustre le principe de cette méthode et montre une image typique obtenue avec ce système d'éclairage. Dans le premier cas, sans défaut, la surface réfléchit une zone sombre de la source d'éclairage. Dans le second cas, le défaut dévie les rayons lumineux provenant de la zone lumineuse de la source d'éclairage et le défaut apparaît donc comme un point lumineux situé dans une zone sombre.

FIG. 2 – Principe de l'éclairage binaire

Afin d'augmenter le contraste entre les défauts et les zones saines, l'acquisition d'images saturées est utilisée. Un éclairage important ainsi que la saturation de la caméra permettent d'obtenir des images où les défauts apparaissent toujours sous forme de pixels à luminance élevée situés dans des zones à luminance faible.

La mise en oeuvre de la méthode proposée est réalisée par l'utilisation d'un éclairage structuré dynamique composé d'une succession de franges lumineuses et sombres. Un balayage par des translations successives de la structure d'éclairage assure ainsi une révélation par portion de la totalité des défauts de surface. Pour chaque position de l'éclairage, une image est capturée par la caméra. L'inspection de la surface conduit donc à la génération d'une séquence d'images (figure 3).

FIG. 3 – Extrait d'une séquence d'images

En assurant un recouvrement des signatures partielles des défauts présentes dans les images, les zones défectueuses sont les seules portions de surface apparaissant toujours sous forme de pixels à luminance élevée. Les zones saines apparaissent soit avec une luminance élevée lorsqu'une zone lumineuse est projetée par l'éclairage, soit avec une luminance faible lorsqu'une zone sombre est projetée. En calculant l'image correspondant à la moyenne des images de la séquence, on obtient une image synthétique où les défauts apparaissent sous forme de taches à luminance élevée alors que les zones saines apparaissent avec une luminance moyenne. Cette image synthétique est nommée "image d'aspect". Le calcul de l'image d'aspect I_{Aspect} est effectué selon l'équation suivante :

$$I_{Aspect} = \frac{1}{N_r} \sum_{n=1}^{N_r} I(n). \quad (1)$$

La figure ci-dessous correspond à l'image d'aspect calculée à partir de la séquence présentée à la figure 3.

FIG. 4 – Image d'aspect

Les traitements de segmentation sont fortement simplifiés par l'utilisation d'un éclairage adapté. L'éclairage mis en oeuvre assure la quasi-totalité de la segmentation. Une fois la phase de segmentation réalisée, les défauts sont caractérisés par applications de traitements sur l'image segmentée. Une mesure d'attributs sur les défauts est alors effectuée.

La figure 5 présente la segmentation des défauts de l'image d'aspect présentée à la figure 4.

FIG. 5 – Défauts segmentés

La méthode de détection des défauts d'aspect est résumée sous la forme d'un organigramme présenté sur la figure 6.

FIG. 6 – Organigramme de la détection des défauts d’aspect

Cette méthode est très efficace pour les surfaces à faible gradient de courbure mais elle ne permet pas la détection de défauts dans des zones où le relief varie beaucoup. Pour détecter des défauts dans ces zones, il est nécessaire d’avoir recours aux informations 3D afin de pouvoir distinguer les défauts des reliefs dus aux décors. C’est dans cette optique, que nous avons appliqué les images de polarisation pour la reconstruction 3D.

3 Images de polarisation

Les images de polarisation permettent d’étudier l’état de polarisation d’une onde lumineuse. Cette technique est employée en vision industrielle, pour effectuer de la segmentation entre matériaux diélectriques et métalliques[9], ainsi que pour détecter des surfaces transparentes[10]. Elle permet également de reconstruire la forme 3D d’objets simples grâce à l’étude de la réflexion d’une lumière non-polarisée sur une surface. Nous rappelons brièvement dans cette partie, le système d’acquisition des images de polarisation, ainsi que le principe du “Shape from Polarization” appliqué aux surfaces diélectriques.

3.1 État de polarisation d'une onde lumineuse

Pour étudier la nature d'une onde lumineuse, Wolff [11] définit cette dernière comme étant une onde partiellement linéairement polarisée. L'onde lumineuse se décompose alors selon deux grandeurs : une partie complètement non-polarisée et une partie complètement polarisée linéairement. Dans ce cas, un capteur simple de polarisation, devra être capable de déterminer l'intensité lumineuse I , la proportion de lumière linéairement polarisée ρ , ainsi que l'orientation de l'onde polarisée linéairement ϕ . Une manière naturelle de mettre en oeuvre ce capteur est d'utiliser un filtre polariseur en amont d'une caméra.

La relation entre l'amplitude de l'onde partiellement linéairement polarisée I_p vue au travers d'un polariseur, et entre l'angle de rotation du polariseur α , est alors donnée par une sinusoïde comme le montre la figure 7.

FIG. 7 – Variation de l'intensité lumineuse en fonction de l'angle du polariseur

Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$I_p(\alpha) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cos(2\alpha - 2\phi) + \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \quad (2)$$

où $I_{\min}$ et $I_{\max}$ représentent, respectivement, les intensités minimum et maximum vues à travers le filtre polariseur. L'amplitude de l'onde lumineuse I , et la proportion de lumière polarisée ρ , peuvent être déduites de l'équation (2) selon :

$$I = I_{\max} + I_{\min}, \quad \rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3)$$

Le troisième paramètre de l'onde partiellement linéairement polarisée est l'angle de la composante linéairement polarisée ϕ qui est simplement donnée par le déphasage de la sinusoïde. Le but des images de polarisation est de calculer les trois paramètres : I , ϕ , et ρ , en interpolant la formule (2).

En raison, des faibles valeurs du degré de polarisation que nous allons obtenir, et pour diminuer le bruit de mesure, nous allons appliquer l'interpolation par la méthode des moindres carrés linéaires. Cette dernière est applicable en prenant un pas constant de rotation du filtre polariseur. Les paramètres sont calculés à l'aide de 36 images prises avec une orientation du filtre polariseur comprise entre 0° et 180° , par pas de 5° .

3.2 Principe de la technique de “Shape from Polarization”

Wolff[12] a démontré comment déterminer des contraintes aux normales à la surface en appliquant le modèle de réflexion de Fresnel. Cette méthode est applicable aux surfaces très réfléchissantes.

La figure 8 montre la réflexion d'une onde lumineuse sur une surface réfléchissante.

FIG. 8 – Réflexion d'une onde lumineuse sur une surface réfléchissante

Les coefficients de réflexion de Fresnel $F_{\perp}$ et $F_{\parallel}$, pour les polarisations respectivement dans le plan orthogonal et dans le plan parallèle au plan d'incidence sont donnés par :

$$\left. \begin{aligned} F_{\perp} &= \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)}, \\ F_{\parallel} &= \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

où θ_i et θ_t sont respectivement les angles d'incidence et de réfraction de l'onde.

3.2.1 Relation entre l'angle de polarisation ϕ et l'orientation du plan d'incidence ϕ

Les coefficients de Fresnel (4) montrent que la composante orthogonale $F_{\perp}$ est plus grande que la composante parallèle $F_{\parallel}$, ce qui explique que la lumière initialement non-polarisée, devient partiellement polarisée selon la direction perpendiculaire au plan d'incidence. Ainsi, si on parvient à déterminer l'angle de polarisation ϕ , on peut remonter à l'orientation du plan de réflexion : $\phi = \frac{\pi}{2} - \phi$.

3.2.2 Relation entre le degré de polarisation ρ et l'angle d'incidence θ_i

La disparité entre les coefficients $F_{\perp}$ et $F_{\parallel}$ permet également de déterminer le degré de polarisation de l'onde réfléchi. En notant I_{min} et I_{max} , les intensités minimum et maximum de l'onde vue au travers d'un filtre polariseur, on a :

$$\left. \begin{aligned} I_{max} &= \frac{F_{\perp} + F_{\parallel}}{2} I, \\ I_{min} &= \frac{|F_{\perp} - F_{\parallel}|}{2} I. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Ainsi, le degré de polarisation défini dans l'équation (3) peut s'écrire sous la forme :

$$\rho = \frac{F_{\perp} - F_{\parallel}}{F_{\perp} + F_{\parallel}}. \quad (6)$$

En supposant que l'onde lumineuse se réfléchisse dans l'air et que l'indice du matériau qu'elle rencontre est n , la loi de réfraction de Snell-Descartes donne :

$$\sin \theta_i = n \sin \theta_t, \quad (7)$$

où n est l'indice de réfraction de l'objet. D'après les équations (4) et (6), et la loi de Snell-Descartes, en écrivant $\theta = \theta_i$, le degré de polarisation ρ peut s'exprimer sous la forme :

$$\rho(\theta) = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - 2 \sin^2 \theta + \tan^2 \theta}. \quad (8)$$

Cette équation donne une relation entre l'angle d'incidence θ et le degré de polarisation ρ , pour des surfaces diélectriques.

4 Extension aux surfaces métalliques

4.1 Utilisation de l'indice complexe

Pour les matériaux métalliques, l'expression de la relation entre le degré de polarisation et l'angle d'incidence ne s'écrit pas de la même manière puisque l'indice est complexe. L'indice complexe $\hat{n}$ des matériaux métalliques s'écrit généralement sous la forme $\hat{n} = n(1 + i\kappa)$ où κ est le coefficient d'extinction.

Dans ce cas, l'équation de Snell-Descartes (7) implique que l'angle de réfraction θ_r est complexe. Les coefficients de Fresnel ont alors pour expression :

$$\left. \begin{aligned} F_{\perp} &= \left| \frac{\sin(\theta_i - \theta_r)}{\sin(\theta_i + \theta_r)} \right|^2, \\ F_{\parallel} &= \left| \frac{\tan(\theta_i - \theta_r)}{\tan(\theta_i + \theta_r)} \right|^2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Afin de simplifier les expressions, nous appliquons l'approximation généralement utilisée pour déterminer les coefficients d'indices complexes [13] :

$$|\hat{n}|^2 = n^2(1 + \kappa^2) \gg 1. \quad (10)$$

En appliquant le même raisonnement que pour les surfaces diélectriques on trouve une relation inversible :

$$\rho = \frac{2n \tan \theta \sin \theta}{\tan^2 \theta \sin^2 \theta + |\hat{n}|^2}. \quad (11)$$

La courbe calculée à partir de l'approximation diffère principalement de la courbe théorique pour de grandes valeurs de l'angle d'incidence θ (figure 9).

FIG. 9 – Comparaison entre le degré de polarisation ρ approximé et le degré de polarisation réel .

La courbe montre que l'ambiguïté concernant la détermination de l'angle θ en fonction du degré de polarisation ρ , n'a pas lieu d'être traitée pour des surfaces dont la pente est inférieure à 75° , ce qui est le cas pour les pièces étudiées.

4.2 Reconstruction de la surface

Nous faisons l'hypothèse d'une surface cartésienne définie par $z = f(x, y)$. La normale en chaque point est donnée par :

$$\vec{n} = \begin{vmatrix} -\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ -\frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Cette expression nous permet d'établir le lien entre la normale et la dérivée en tout point de la surface. Connaissant les valeurs des angles θ et ϕ , il s'agit de déterminer par intégration $z = f(x,y)$. Afin de préserver la continuité suivant les lignes et les colonnes de l'image, nous avons employé un algorithme d'intégration itératif basé sur les approximations de Taylor :

$$f_{n+1}(x,y) = \frac{1}{4}H(x,y) * f_n(x,y) + \frac{\varepsilon}{4} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} \right), \quad (13)$$

où $*$ désigne le produit de convolution entre la surface et un filtre moyennneur $H(x,y)$, et ε représente le pas entre chaque pixel.

L'algorithme est par exemple initialisé à partir de la surface extraite d'un modèle CAO dans lequel n'apparaissent pas les décors.

5 Application et résultats

5.1 Mise en oeuvre

Le système d'acquisition est constitué d'une caméra et d'un filtre polariseur tournant ainsi que d'un dôme d'éclairage diffus homogène. Comme le degré de polarisation est plus faible dans le cas des surfaces métalliques, nous avons utilisé une caméra sensible permettant d'acquérir des images avec 1024 niveaux de gris.

La chaîne de traitements d'image est rappelée sur le schéma de la figure 10.

FIG. 10 – Récapitulatif de la chaîne de traitement d'image

Les images des paramètres de polarisation sont présentées sur la figure 11. En raison de l'orifice du dôme d'éclairage permettant les prises de vue par la caméra, on s'aperçoit sur l'image d'intensité que certaines zones ne sont pas convenablement éclairées. Elles correspondent à des zones où la normale est orientée selon la direction de la caméra. Ces dernières sont facilement segmentables grâce à l'image d'intensité.

FIG. 11 – Images des paramètres de polarisation

5.2 Résultats

Afin de comparer la surface calculée à une surface de référence, nous avons appliqué une couche opaque sur l'objet pour le numériser à l'aide d'un scanner 3D. Ce dernier prélève un nuage de points réguliers par

pas de avec une précision de selon l'axe z . La déviation moyenne entre les deux nuages de points est de l'ordre de , ce qui est suffisant pour distinguer les défauts de forme au niveau des décors. Sur le dessin du décor, la surface reconstruite permet de faire davantage ressortir les nervures de la feuille (figure).

FIG. 12 – Zoom au niveau des nervures de la feuille

Le profil au niveau de la jonction de la feuille à la tige présenté sur la figure 13, met en évidence l'intérêt de l'utilisation d'un tel système.

FIG. 13 – Comparaison de profils (échelles données en mm)

6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce papier, les techniques complémentaires permettant d'effectuer l'inspection de surfaces métalliques très réfléchissantes. Le premier système est un éclairage dynamique à franges, permettant d'isoler de manière efficace les défauts d'aspect sur des surfaces lisses. Le second système, basé sur les images de polarisation, fournit une information 3D nécessaire pour distinguer les défauts dans des zones où la courbure est plus importante. Pour mettre en place ce dernier procédé, nous avons étendu le principe de "Shape from Polarization" aux surfaces métalliques. Contrairement à l'utilisation d'un scanner 3D classique, la résolution de la reconstruction 3D de la surface, nous permet de discerner plus facilement la présence de tous les éléments du décors. Les perspectives de notre travail sont d'une part, d'automatiser le capteur de polarisation en utilisant des composants actifs de type LCD, et d'autre part de fusionner ces deux systèmes afin de créer une machine d'inspection complète.

Références

- [1] R. Seulin, F. Merienne, and P. Gorria, "Simulation of specular surface imaging based on computer graphics : application on a vision inspection system," *Journal of Applied Signal Processing - Special issue on Applied Visual Inspection, EURASIP*, vol. 7, pp. 649–658, July 2002.

- [2] R. Seulin, "Conception et optimisation par simulation d'un système de vision artificielle pour l'inspection de surfaces parfaitement spéculaires," Ph.D. dissertation, Université de Bourgogne, April 2002.
- [3] D. Miyazaki, M. Kagesawa, and K. Ikeuchi, "Determining shapes of transparent objects from two polarization images," in *Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002)*, December 2002, pp. 26–31.
- [4] S. Rahmann and N. Canterakis, "Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), volume I, Kauai, USA*, December 2001, pp. 149–155.
- [5] D. Aluze, "Système de détection et de caractérisation de défauts d'aspect sur des surfaces parfaitement spéculaires et non planes : application au contrôle qualité de produits destinés à l'emballage cosmétique," Ph.D. dissertation, Université de Bourgogne, November 1998.
- [6] G. Delcroix, "Etude et réalisation d'un dispositif de contrôle d'aspect temps réel par vision artificielle de pièces métallisées en défilement," Ph.D. dissertation, Université de Bourgogne, October 2000.
- [7] P. Gorria, D. Aluze, G. Delcroix, F. Merienne, B. Lamalle, and C. Dumont, "Dispositif de détection de défauts de surface sur des pièces réfléchissantes, brevet n 98 14417 - déposé au nom de reexam beauté métallisation," 1998.
- [8] J.-G. Postaïre, "Chapitre 10. vision industrielle et contrôle qualité. dans les systèmes de vision (traité ic2, série traitement du signal et de l'image) de jolion jean-michel. paris : Hermès france," 2000.
- [9] L. B. Wolff, "Polarization-based material classification from specular reflection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 11, pp. 1059–1071, November 1990.
- [10] P. Terrier, V. Devlaminck, F. Goudail, F. Galland, Y. Takakura, and L. Bigué, "D'étection d'objets avec un polarimètre de stokes à cristaux liquides," in *GDR, Imagerie polarimétrique*, March 2004.
- [11] L. B. Wolff and A. Andreou, "Polarization camera sensors," *Image and Vision Computing*, vol. 13, no. 6, August 1995.
- [12] L. B. Wolff and T. E. Boulton, "Constraining object features using a polarization reflectance model," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13(7), pp. 635–657, July 1991.
- [13] M. Born and E. Wolf, *Principles Of Optics*, 7th ed. Cambridge, 1999.