

Application du Scanning From Heating à la numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires

Alban Bajard, Olivier Aubreton, Gönen Eren, Frederic Truchetet

► **To cite this version:**

Alban Bajard, Olivier Aubreton, Gönen Eren, Frederic Truchetet. Application du Scanning From Heating à la numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires. ORASIS - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Jun 2011, Praz-sur-Arly, France. 2011. <inria-00595265>

HAL Id: inria-00595265

<https://hal.inria.fr/inria-00595265>

Submitted on 24 May 2011

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.

Application du Scanning From Heating à la numérisation 3D de surfaces métalliques spéculaires

Scanning From Heating approach applied to 3D digitization of metallic specular surfaces

A. Bajard¹ O. Aubreton¹ G. Eren^{1,2} F. Truchetet¹

¹Laboratoire LeZi, Université de Bourgogne, 12 rue de la fonderie, 71200 Le Creusot France

²Sabancı University, VPA Laboratory, Orhanlı-Tuzla, 34956, Istanbul, Turkey

alban.bajard@u-bourgogne.fr

Résumé

En raison des difficultés liées à la réflexion spéculaire de certaines surfaces, peu de méthodes répétables ont été proposées pour mesurer la forme en trois dimensions des objets métalliques. Dans cet article, nous présentons une application sur ce type de matériau par une nouvelle approche appelée « Scanning From Heating ». Cette méthode a été initialement développée pour la numérisation 3D d'objets transparents. Nous exposons dans cet article comment le principe de fonctionnement de la méthode SFH peut être adapté sur les matériaux de haute conductivité thermique et de faible absorptivité.

Mots Clef

Numérisation 3D, Surfaces spéculaires, Scanning From Heating.

Abstract

Because of the difficulty of dealing with specularity of several surfaces, few methods have been proposed to measure three-dimensional shapes of specular metallic objects. In this paper we present an application on this kind of material of an approach called "Scanning From Heating". This approach has been developed initially for 3D reconstruction of transparent objects. This article presents an application of the working principle of SFH method on material with high thermal conductivity and low absorptivity.

Keywords

3D Digitization, Specular surfaces, Scanning From Heating.

1 Introduction

La reconstruction 3D de surfaces spéculaires est complexe du fait que la lumière est réfléchi par la surface selon la loi de Snell-Descartes. Selon ce principe géométrique simple, les directions du rayon réfléchi et du rayon incident sont symétriques par rapport à la direction normale de la surface considérée. Nayar [1] apporte des éléments supplémentaires en précisant que le modèle de réflexion est une somme de trois composantes

complémentaires : le pic spéculaire, le lobe spéculaire et le lobe diffus (Figure 1). La répartition d'énergie suivant ces trois composantes dépend notamment de la rugosité de la surface. Nous nous intéresserons ici aux surfaces qui ne présentent pas de composante diffuse suffisamment intense.

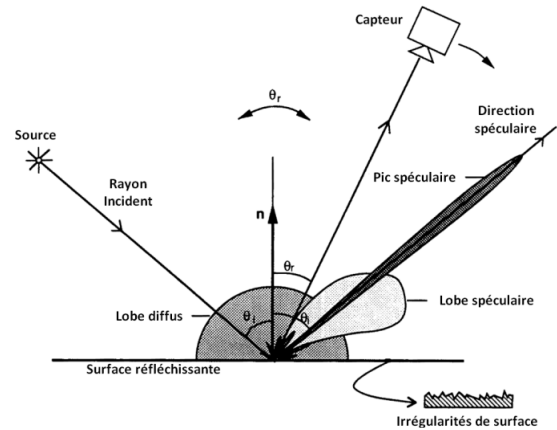


Figure 1 – Modèle de réflexion selon Nayar

A cause de la spécularité de la réflexion, l'approche classique de numérisation 3D utilisant la triangulation active ne donne pas de résultats corrects. En guise d'exemple, nous présentons sur la Figure 2 le nuage de points 3D obtenu par un scanner sans contact Minolta VI-910 avec une distance de travail de l'ordre de 1m. On note que quasiment aucun point 3D n'est mesuré sur la surface spéculaire de la surface car aucun rayon de la ligne laser n'est diffusé en direction du capteur embarqué sur le scanner.

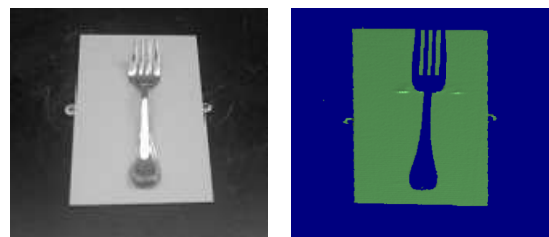


Figure 2 – Objet spéculaire (à gauche)
Reconstruction 3D par Scanner Minolta VI-910 (à droite)

Il existe cependant des solutions commerciales donnant quelques résultats intéressants sur des surfaces spéculaires. Une des hypothèses de base est de considérer que la surface n'est pas parfaitement spéculaire et qu'il est possible de faire l'acquisition de rayonnement issu des lobes diffus et/ou spéculaires (voir Figure 1). Cette faible composante diffuse du rayonnement peut être observée par le système si la distance de travail est limitée. Par exemple, Kreon [2] propose un système qui utilise la triangulation laser pour reconstruire la surface 3D. Un autre exemple est l'approche qui utilise la microscopie confocale chromatique proposée par [3]. Dans ces deux exemples, la principale limitation réside dans la distance à la surface qui doit être inférieure à 20cm. Le champ de vue résultant est alors de seulement quelques centimètres. C'est pourquoi ces systèmes sont le plus souvent montés sur des bras poly-articulés ou robotisés utilisés pour balayer la totalité de l'objet, au détriment de la qualité de la reconstruction 3D.

Etant donné que la méthode de triangulation laser n'est pas suffisante pour mesurer les points 3D d'une surface spéculaire, on trouve dans la littérature un certain nombre d'approches qui ont été développées pour la reconstruction de ce type de surface. Ihrke et al. présentent un état de l'art des techniques de reconstruction d'objets spéculaires et transparents [4] et propose une classification de ces techniques en quatre familles :

- Shape from Distortion ou Déflectométrie : le principe repose sur l'analyse de la déformation de l'image d'une mire, réfléchié par la surface miroir. A titre d'exemple, Tarini propose d'utiliser un moniteur couleur en guise de mire [5]. Le motif est composé de franges colorées de différentes fréquences et différentes orientations. L'analyse de la déformation permet de déterminer les normales de la surface. La profondeur s'obtient par intégration de ce champ de normales.
- Shape from Specularity : la technique globale consiste en l'observation directe des multiples réflexions spéculaires à la surface de l'objet. On utilise souvent un éclairage structuré dynamique dont chaque zone est allumée séquentiellement pour calculer l'orientation des normales [6].
- Shape from Polarization : cette approche utilise la mesure des propriétés polarimétriques de la lumière réfléchié sur la surface spéculaire [7]. Avec cette mesure, il est possible d'obtenir un champ dense de normales à la surface. La surface 3D est alors obtenue par intégration de ce champ.
- Direct Ray Measurements [8] : afin d'éviter l'ambiguïté sur l'extraction des normales dans le cas de l'utilisation d'un éclairage à faible distance, la mesure peut se faire directement sur l'observation des objets réfléchis par la surface. Une cible plane calibrée est positionnée selon plusieurs orientations de telle sorte que le motif déformé soit toujours observé par la

caméra. En décodant au moins deux positions dans le repère réel pour chaque pixel, le rayon réfléchi peut être mesuré.

Ces approches offrent une précision de mesure qui approche celle des systèmes conventionnels mais nécessitent généralement un environnement confiné, où toutes les sources sont parfaitement contrôlées. De plus, le domaine d'application se limitera à un seul type de surface, en l'occurrence les surfaces spéculaires, et pour certains cas, à une taille donnée. C'est pourquoi elles ne sont pas simples à mettre en œuvre, notamment pour répondre à des besoins industriels. Dans la partie suivante, nous présentons une technique récente, appelée « Scanning From Heating ». Cette méthode a été initialement développée sur des objets en verre qui sont à la fois spéculaires et transparents. Dans la section 2, le principe de fonctionnement sera exposé ainsi que ses applications aux matériaux métalliques. Quelques résultats de numérisation 3D seront également donnés dans le paragraphe 2.3. Enfin, la section 3 présente une conclusion de ces travaux ainsi que les travaux futurs.

2 Scanning From Heating

2.1 Principe de la méthode

Tous les matériaux émettent continuellement des radiations électromagnétiques dues à l'agitation moléculaire et atomique associée à leur énergie interne, qui est directement lié à la température. L'émissivité spécifie dans quelle proportion un objet réel peut émettre de l'énergie en comparaison à un corps idéal, appelée corps noir (le corps noir est considéré comme un émetteur et un absorbeur parfait pour chaque direction du rayonnement et à toutes les longueurs d'onde). Le principe du Scanning From Heating repose sur la génération d'une tache de chaleur localisée sur la surface. Selon la loi de Planck, cette zone localement échauffée crée une émission de rayonnement infrarouge.

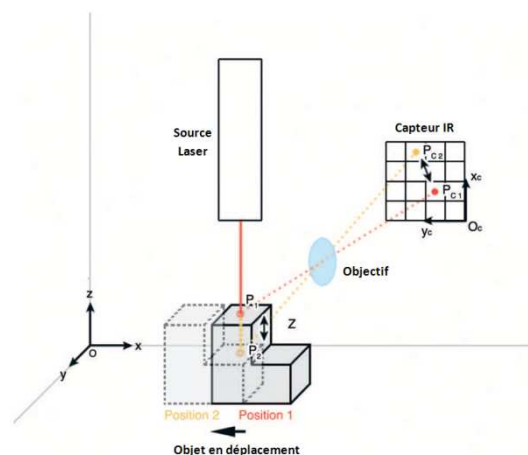


Figure 3 – Principe du Scanning from Heating

Dans le cas des matériaux diélectriques, le verre par exemple, l'émissivité est considérée comme isotrope. Le flux alors émis peut être observé par une caméra infrarouge sans différence d'intensité quelle que soit la direction de visualisation. Par cette approche, on s'affranchit du problème de la réflexion spéculaire. Le schéma expérimental est présenté en Figure 1. Une source laser est utilisée pour créer un échauffement local. Une caméra thermique réalise l'acquisition du rayonnement infrarouge émis par la scène. Les coordonnées 2D du point échauffé sont calculées dans le repère image du capteur. Connaissant les paramètres du système obtenus par une calibration préalable, les coordonnées 3D du point sont calculées en utilisant la méthode de triangulation. Des résultats ont été présentés dans [9] et [10] pour les objets en verre. Un exemple de reconstruction est reporté Figure 4. L'erreur moyenne par rapport à un modèle de référence a été estimée à 360µm pour une distance de numérisation de 50cm.



Figure 4 – Exemple de reconstruction 3D d'un objet en verre

2.2 Application aux métaux

Les résultats obtenus sur les objets en verre sont prometteurs. C'est pourquoi nous nous sommes penchés sur l'expérimentation de cette méthode sur d'autres matériaux. Nous présenterons dans cette section une application du Scanning From Heating sur les matériaux métalliques. A cause des différences de propriétés physiques entre métaux et diélectriques, notamment en termes de conductivité thermique et d'absorptivité, le dispositif utilisé pour les métaux ne peut pas être le même, en particulier en ce qui concerne la source laser.

2.2.1 Choix de la source laser

Dans le cas des verres, le domaine spectral d'absorption est situé au-delà de 6µm. En conséquence, la source d'échauffement choisie est un laser CO₂ émettant à 10.6µm. On trouve dans la littérature un grand nombre d'approximations empiriques ou de bases de donnée expérimentales [11] qui donnent une relation entre le coefficient d'absorption ou de réflexion (complémentaires dans le cas des métaux car le coefficient de transmission d'un matériau opaque est nul) et la longueur d'onde incidente. Comme présenté sur la Figure 5, le coefficient d'absorption des métaux est globalement plus grand pour des plus courtes longueurs d'onde. Par exemple, pour l'aluminium, l'énergie absorbée sera huit fois plus

importante à la longueur d'onde du YAG (1,06µm) qu'à la longueur d'onde du laser CO₂ (10,6µm). Pour cette raison, nous avons choisi une source laser qui émet dans le proche infrarouge pour la suite des expérimentations. Ce choix est important dans la mesure où il va conditionner le rendement du processus d'échauffement, et donc l'efficacité de la technique Scanning From Heating.

	% d'absorption	
	YAG=1,06 µm	CO ₂ =10.6 µm
Alu	25	3
Cu	9	2
Fe	35	6
Mo	41	5
Ni	28	3
Si	72	72
W	31	4
Zn	50	2
Papier	25	95
Verre	5	94

Figure 5 – Pourcentage d'absorption de plusieurs matériaux

2.2.2 Estimation de la puissance laser

La simulation d'un problème de transfert de chaleur par conduction se base sur la résolution de l'équation de la chaleur ou loi de Fourier :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Elle donne la relation entre le gradient temporel de la température et le Laplacien spatial de la température. Le coefficient D est la diffusivité thermique, directement proportionnelle à la conductivité thermique. L'intégration de cette équation dans le cas continu est complexe car elle nécessite de connaître parfaitement les conditions initiales. Dans la suite de ce paragraphe, les résultats présentés sont issus d'un logiciel de calcul par éléments finis.

La conductivité thermique représente la seconde grande différence entre le verre et les matériaux métalliques. Par exemple, la conductivité d'un verre est de 1,2 W.m⁻¹.K⁻¹ alors que la valeur théorique pour un aluminium est de 160 W.m⁻¹.K⁻¹.

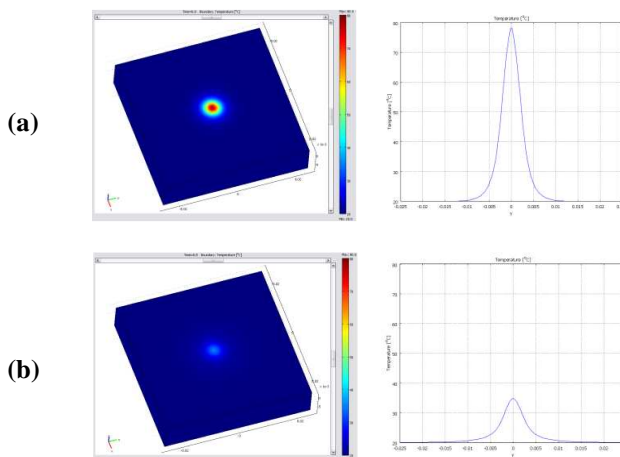


Figure 6 – Simulation d'un tir laser sur un matériau peu conducteur (a) et un matériau très conducteur (b)

Afin d'illustrer l'influence de la différence de conductivité thermique entre matériaux, des résultats de simulation sont présentés en Figure 6. Ces résultats ont été calculés pour une puissance incidente de 100W avec une distribution d'énergie gaussienne irradiant la surface d'absorptivité 0,5 pendant 800ms. La Figure 6(a) montre que l'élévation de température d'un acier (norme AISI4340) de conductivité $44,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est de 60°C . Pour les mêmes conditions expérimentales, l'échauffement d'un matériau de conductivité thermique $200 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ provoque une élévation de température de seulement 14°C . Lorsque la conductivité augmente, la variation maximale de température diminue de façon significative. Ces résultats permettent de mettre en évidence que l'application du Scanning From Heating nécessitera l'utilisation d'une source laser de plus haute densité d'énergie que celle utilisée pour le verre, afin d'obtenir une tache thermique suffisamment contrastée dans l'image.

2.2.3 Choix de la caméra infrarouge

Selon la loi de Planck, une caméra sensible aux grandes longueurs d'onde recevra plus de flux qu'une caméra sensible aux ondes « moyennes » pour des températures basses (inférieures à 300°C). Par ailleurs, la bande de mesure de température sera plus large avec ce type de caméra, c'est pour ces raisons que dans le cas du Scanning From Heating sur les verres, la caméra thermique choisie est une caméra « Long-Wave », sensible à la bande spectrale $[8-13] \mu\text{m}$. La longueur d'onde du laser utilisé étant incluse dans cette bande, une réflexion directe sur le capteur peut conduire à son endommagement ou perturber les mesures. C'est pourquoi l'observation de l'émission se fait après échauffement de la surface. La tache reste suffisamment intense du fait de la faible diffusivité thermique du verre. La haute conductivité thermique des matériaux métalliques influence aussi l'évolution temporelle de la tache de chaleur créée par le laser sur la surface. Sur la Figure 7, nous présentons cette évolution sur une plaque d'aluminium avec un laser à diode ($\lambda=808\text{nm}$) à une puissance de 100W pendant 10s. A l'instant $t=0\text{s}$, le tir laser est déclenché et la tache thermique apparaît. La taille de cette zone est croissante dans le temps. A cause de la haute diffusivité thermique de l'aluminium, nous observons sur la dernière image de la séquence que la tache se diffuse très rapidement lorsque le laser s'arrête. A la différence du procédé utilisé pour le verre, il est donc nécessaire d'observer la tache thermique pendant le tir laser. En conséquence, la plage de sensibilité de la caméra ne doit pas inclure la longueur d'onde du laser afin d'éviter toute réflexion directe sur le capteur. Une caméra « Long-Wave » pourrait convenir mais la variation de température observée sur les surfaces métalliques sera plus faible que sur les objets en verre (cf. Figure 6) et une caméra « Middle-Wave » offrira une meilleure détectivité thermique. De plus, le bruit environnant pourrait

introduire des erreurs sur la détection de la tache si l'élévation de température est moins importante (un objet à température ambiante émet un maximum de rayonnement infrarouge à environ $10\mu\text{m}$). Nous avons donc choisi de réaliser nos premières expérimentations avec une caméra sensible à la bande spectrale $[3-5,5] \mu\text{m}$.

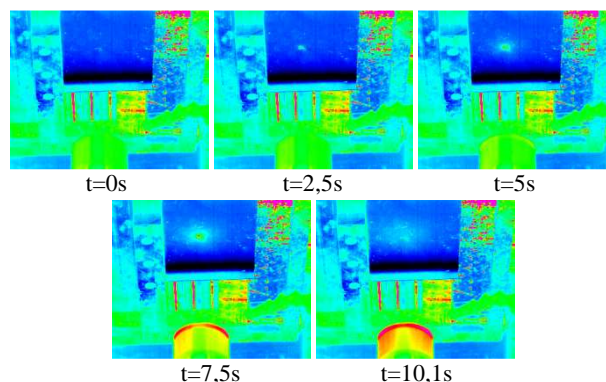


Figure 7 – Evolution temporelle de l'image thermique

Le profil thermique de la tache de chaleur observée par la caméra pendant l'échauffement est présenté en Figure 8 et est similaire aux résultats obtenus par le logiciel de simulation (Figure 6).

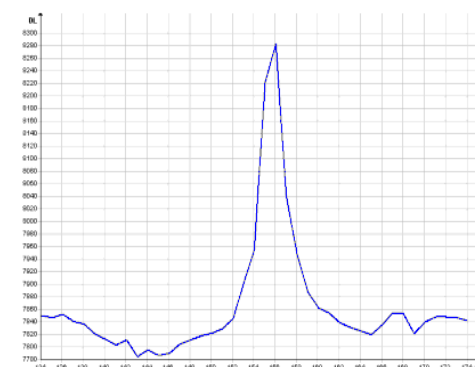


Figure 8 – Profil de température le long de la tache

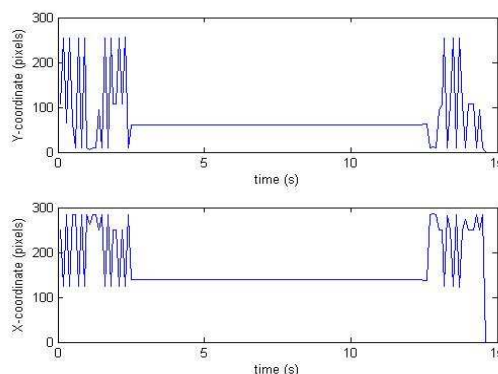


Figure 9 – Evolution des coordonnées du maximum de température dans l'image thermique (x et y)

Le point d'impact du laser correspond au maximum de température mesuré par la caméra. Ce maximum est détecté dans les images thermiques préalablement traitées par convolution avec un filtre gaussien. L'évolution des coordonnées calculées dans l'image est donnée sur la Figure 9. La détection des coordonnées du point d'impact laser ne paraît pas être influencée par la taille de la tache. Les images obtenues par ce type de caméra donnent donc des résultats satisfaisants en vue de calculer des coordonnées 3D.

2.3 Résultats de numérisation 3D

Le dispositif expérimental présenté sur la photo en Figure 10 a été utilisé pour réaliser des tests de numérisation 3D sur plusieurs objets. Le système comprend une diode laser émettant à 808nm, une caméra thermique sensible aux moyennes longueurs d'onde ($[3-5,5] \mu\text{m}$). La caméra et le laser sont solidaires d'une table de déplacement en X et Y dont la précision est $10\mu\text{m}$. L'angle entre la direction de l'axe optique de la caméra et la direction du faisceau laser est de 35° . La distance focale étant de 50mm, la résolution spatiale obtenue est de $0,345\text{mm}$ par pixel.

Le processus complet (déclenchement du tir laser, acquisition d'image, déplacement du système) est synchronisé par un automate industriel programmable. Préalablement au balayage, plusieurs points sont acquis à des profondeurs différentes afin de calibrer le système. Ensuite, le processus de scanning peut commencer : pour chaque position du système, une image thermique est acquise, le maximum de température du point chaud est localisé dans le repère du capteur et les coordonnées 3D sont déduites.

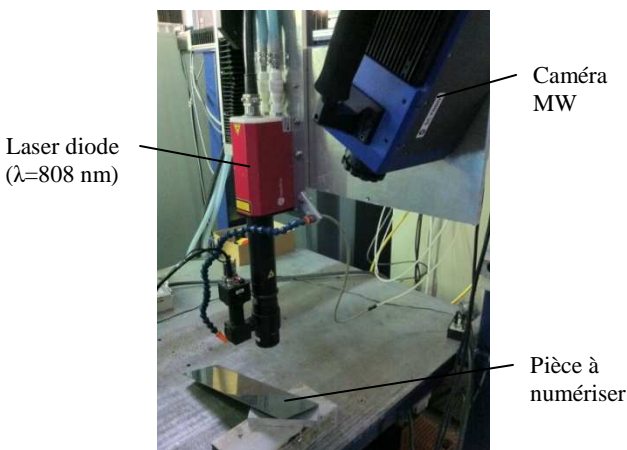


Figure 10 – Système expérimental

Le plan présenté sous le système sur la photo est une tôle en acier poli. Du fait du polissage, la rugosité de la surface est faible, et il apparaît clairement que les rayons réfléchis du visible suivent la direction spéculaire. Le plan est incliné de telle sorte que la mesure de profondeur soit assez significative. Du fait de la bonne absorption de l'acier, la puissance incidente choisie est de 15W. Le

procédé de scanning suit une grille carrée de 500 points avec un pas de 3mm.

L'erreur calculée entre chaque point du nuage acquis par notre système et un plan parfait est illustrée en Figure 11. Le graphe sur la partie droite représente l'histogramme des erreurs absolues entre 0 et 1mm ainsi que le code couleur associé. La déviation moyenne obtenue est de $94\mu\text{m}$. Notons qu'il s'agit de l'écart moyen des valeurs absolues, la distribution des erreurs signées a cependant une allure quasiment gaussienne, centrée sur $22\mu\text{m}$. Afin d'améliorer la résolution spatiale du système, une méthode subpixelique a été employée pour la détection du maximum. Elle consiste à calculer le barycentre de la tache de chaleur obtenue par croissance de régions autour du maximum de température. La précision de la mesure est très correcte puisqu'elle permet par ailleurs de mettre en évidence un défaut de surface d'une profondeur d'environ $500\mu\text{m}$, ce qui explique que l'erreur relative n'est pas parfaitement centrée sur zéro.

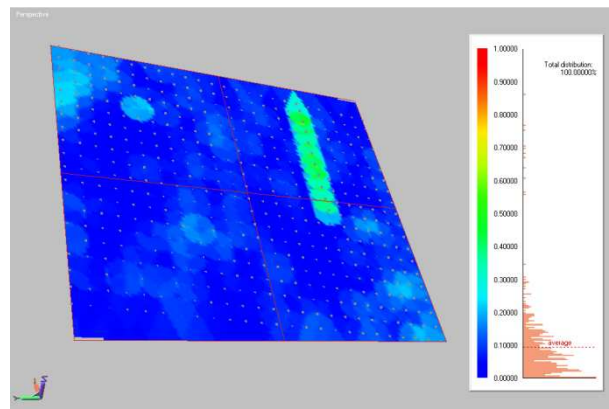


Figure 11 – Déviation entre le nuage de points mesuré sur un plan en acier et un plan parfait

D'autres résultats de numérisation ont été obtenus sur des matériaux et des formes différentes. Dans un premier temps, il a été choisi de scanner un cylindre en acier électrozingué. Il s'agit d'un cylindre de diamètre 46mm. Le traitement de galvanisation introduisant une couche de zinc de conductivité thermique plus importante que l'acier, la puissance incidente du laser choisie pour ce test est de 20W. La résolution du balayage est de 2,5mm et le nuage de points obtenu contient 400 points. La déviation entre ces résultats expérimentaux et un cylindre idéal est reporté en Figure 12. La moyenne des erreurs absolues est de $143\mu\text{m}$.

La caractéristique notable de cette distribution d'erreur est l'écart-type qui atteint $245\mu\text{m}$. En effet, on obtient quelques points aberrants pour lesquels l'erreur est proche de 1mm. Ces erreurs sont obtenues lorsque le rayon incident approche la direction tangente à la surface du cylindre. Plusieurs facteurs peuvent être mis en cause : la qualité du faisceau laser qui se dégrade lorsqu'on s'éloigne du plan focal, la variation d'émissivité de la

surface suivant la direction, le manque de précision dans la détection du maximum sur une tache trop elliptique... Cependant, 80% de la distribution possède une erreur inférieure à la valeur moyenne. Un moyen simple de combler ce type d'erreur serait de prendre plusieurs points de vue afin de proposer une reconstruction complète de l'objet.

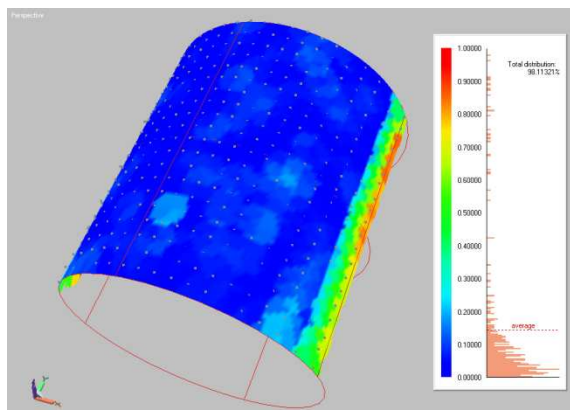


Figure 12 – Déviation entre le nuage de points mesuré sur un cylindre en acier électrozingué et un cylindre parfait

Une portion de sphère en aluminium (pièce industrielle correspondant à un pommeau de levier de vitesse, Figure 13(a)) a également été numérisée par notre système expérimental. La puissance incidente a été augmentée à 65W pour tenir compte de la différence de conductivité ainsi que d'absorptivité. De cette façon, 576 points ont été acquis par pas de 3mm. Pour ce résultat, la carte de déviation est calculée entre le nuage acquis par SFH et les points mesurés par une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT, mesure avec contact par palpeur). La comparaison est théoriquement plus juste que si on utilise une forme géométrique idéale qui ne correspond pas à la pièce réelle. Nous obtenons une déviation moyenne du même ordre de grandeur que le résultat précédent sur le cylindre : 144µm. La distribution de l'erreur semble plus uniforme, Figure 13(b).

Enfin, d'autres expériences ont été réalisées sur des objets plus complexes et plus spéculaires comme une cuillère en acier inoxydable (Figure 14(a)). 900 points ont été acquis avec un pas de 2,5mm. Le nuage de points brut obtenu par notre système de mesure est reporté en Figure 14(b).

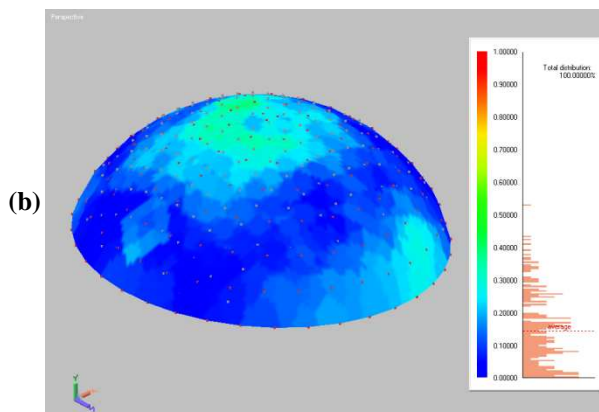


Figure 13 – Sphère en aluminium (a) Erreur de mesure entre le nuage de points obtenu par SFH et par MMT (b)

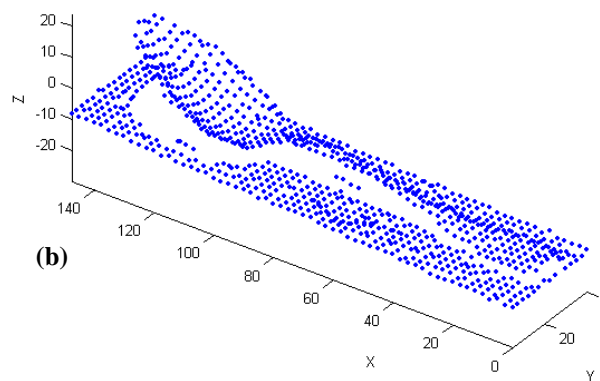


Figure 14 – Cuillère en inox (a) et nuage de points brut obtenu par Scanning From Heating (b)

3 Conclusion et travaux futurs

Un grand nombre d'approches expérimentales ont été proposées pour la reconstruction 3D de surfaces métalliques poli-miroir. Du fait de l'aspect spéculaire de la réflexion, l'approche classique de numérisation 3D par triangulation active ne peut pas être facilement appliquée. Dans cet article, nous avons présenté les premiers résultats de numérisation obtenus sur ce type de surface en utilisant la technique du Scanning From Heating, développée initialement pour les surfaces en verre. En raison de propriétés physiques différentes pour les objets métalliques, notamment l'absorptivité et la conductivité thermique, la technique a été adaptée en s'appuyant sur des travaux de simulation par éléments finis. Ensuite, des tests de reconstruction 3D ont été réalisés sur des surfaces spéculaires simples. L'erreur moyenne obtenue sur un cylindre est de 143 μ m pour une distance de mesure de 60cm. Les résultats obtenus paraissent prometteurs et sont déjà similaires à ceux obtenus auparavant sur les verres.

Les travaux futurs porteront sur plusieurs axes :

- Amélioration du dispositif expérimental : la résolution spatiale du système sera optimisée en modifiant certains éléments physiques du système (optique, capteur). La qualité du faisceau laser pourra être sensiblement améliorée en augmentant par exemple la profondeur de champ.
- Etude de l'influence de la rugosité de la surface : à la différence des systèmes de numérisation conventionnels, il pourra être démontré que les résultats de numérisation 3D sont similaires pour des surfaces de rugosité variables.
- La perspective majeure de ce travail portera sur la projection de lumière structurée (ligne, motif 2D) afin d'améliorer le processus de triangulation active. La reconstruction 3D depuis une ligne par exemple permettrait d'améliorer à la fois la vitesse de balayage et la densité de points du nuage obtenu.

Bibliographie

- [1] S. K. Nayar, E. Ikeuchi, and T. Kanade, "Surface Reflection : Physical and Geometrical Perspectives," Robotics Institute, Pittsburgh, PA, CMU-RI-TR-89-07, 1989.
- [2] Kreon. The complete 3D Scanning Solutions. [Online]. www.kreon.fr/francais/scanners/
- [3] STIL. [Online]. www.stilsa.com
- [4] I. Ihrke, K. N. Kutulakos, H. P. A. Lensch, M. Magnor, and W. Heidrich, "Transparent and Specular Object Reconstruction," *Computer Graphics Forum*, vol. 00, no. 0, pp. 1-27, 2010.
- [5] M. Tarini, H. P.A. Lensch, M. Goesele, and H.-P. Seidel, "3D Acquisition of mirroring objects," Max-Planck-Institut für Informatik, Saarbrücken, Research Report MPI-I-2003-4-001, 2003.
- [6] A. Sanderson, L. Weiss, and S. Nayar, "Structured

highlight inspection of specular surfaces," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, pp. 44-55, 1988.

- [7] O. Morel, C. Stolz, and P. Gorria, "Polarization imaging for 3d inspection of highly reflective metallic objects," *Optics and Spectroscopy*, no. 101, pp. 15-21, 2006.
- [8] K. N. Kutulakos and E. Steger, "A Theory of Refractive and Specular 3D Shape by Light-Path Triangulation," *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, vol. 76, no. 1, pp. 13-29.
- [9] G. Eren, O. Aubreton, F. Meriaudeau, L.A. Sanchez Secades, D. Fofi, F. Truchetet and A. Erçil, "Scanning From Heating : 3D shape estimation of transparent objects from local surface heating," *Optics Express*, vol. 17, no. 14, pp. 11457-11468, 2009.
- [10] F. Meriaudeau, L.A. Sanchez Secades, G. Eren, A. Erçil, F. Truchetet, O. Aubreton and D. Fofi, "3D Scanning of Non-Opaque Objects by means of Imaging Emitted Structured Infrared Patterns," *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, vol. 11, no. 59, pp. 2898-2906, Nov. 2010.
- [11] Edward D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*. Boston: Academic Press, 1985.