

# Vision tridimensionnelle par lumière structurée appliquée au contrôle qualité en ligne

L.-S. Bieri, Y. L. de Meneses, J. Jacot

[louis-severin.bieri@epfl.ch](mailto:louis-severin.bieri@epfl.ch)

Laboratoire de Production Microtechnique, Institut de Production et Robotique  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse

**Mots-clés :** Contrôle qualité, vision, mesures tridimensionnelles, scanner 3D, déroulement de phases.

## 1 Introduction

La vision permet un contrôle qualité sur la totalité des pièces transitant sur une chaîne de production. Ce contrôle porte généralement sur la mesure des cotes fonctionnelles. Actuellement, ce genre de mesures consiste à prendre des images de l'objet en rétro-éclairage selon différentes directions. Il existe des appareils permettant une mesure directement tridimensionnelle d'un objet. Certains utilisent une pointe pour palper ponctuellement la surface. D'autres utilisent la vision, soit en mesurant une variation de la longueur d'onde de la lumière par la surface (time-of-flight, interférométrie), soit en structurant spatialement la lumière (balayage par ligne laser, projection de grilles). Mais la cadence de mesure de ces appareils n'est pas compatible avec celle qu'exige un contrôle en ligne de production.

Les travaux effectués au Laboratoire de Production Microtechnique (LPM) visent à combler cette lacune. Nous cherchons à concevoir un appareil de mesure 3D capable de contrôler en une seconde des cotes importantes sur une pièce d'environ un centimètre avec une précision de  $\pm 10\mu\text{m}$ . Le prix global ne devrait pas dépasser 20.000,- CHF.

## 2 Scan par lumière structurée : généralités

Parmi les techniques d'acquisition 3D existantes, celles utilisant la projection de lumière structurée en grilles nous ont semblé les plus prometteuses. Une lumière est dite structurée lorsqu'elle est spatialement modulée en intensité comme par exemple la lumière provenant d'une source lumineuse devant laquelle on a placé une grille. On peut déterminer la géométrie d'une surface grâce à ce genre d'illumination pour autant que la direction de cette dernière soit distincte de celle de l'axe optique de la caméra. Une structuration adéquate de la lumière permet de transmettre l'information qui, pour chaque pixel de la caméra CCD, détermine sans ambiguïté un plan virtuel qui intersecte la surface de l'objet en ce point (fig. 1). La hauteur est déterminée ensuite par triangulation. L'information de hauteur étant véhiculée par la lumière, les zones d'ombres portées par la pièces sont inexploitable.

## 3 La méthode de temporal phase unwrapping

Précisons tout d'abord qu'il est admis par la suite que l'objet est immobile et invariant durant la mesure. Le but est d'obtenir une image de l'objet dont chaque niveau de couleur identifie un plan distinct (courbe de niveau oblique). Pour obtenir un tel résultat, il n'est pas possible de projeter directement une rampe d'intensités puisque les intensités perçues par la caméra ont été modifiées localement par les conditions de l'objet (couleur, réflectivité ou orientation de la surface) (fig. 2).

Pour associer un code distinctif à chaque plan incident, on va projeter successivement différentes grilles de profil sinusoïdal. Beaucoup d'algorithmes différents sont issus de cette idée. On a choisi

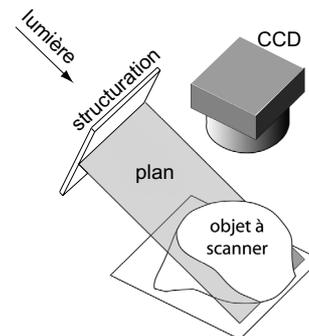


Fig. 1: Représentation du découpage de l'objet en plans (courbes de niveau obliques)

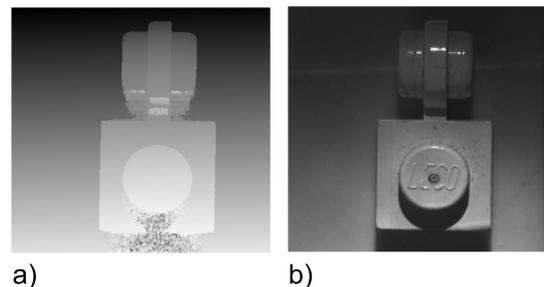


Fig. 2: a) Image souhaitée sur laquelle chaque niveau de couleur identifie un plan oblique. b) Projection d'une rampe d'intensité

d'appliquer la technique appelée "temporal phase unwrapping" [1].

Si le signal ne compte qu'une seule période et moyennant un déphasage adéquat, sa phase sera une rampe comprise entre  $-\pi$  et  $\pi$  (fig. 3). On trouve cette phase par l'équation de "phase-stepping" qui s'écrit :

$$\varphi = \arctan \left( \sqrt{3} \cdot \frac{I_2 - I_3}{2I_1 - I_2 - I_3} \right) \quad (1)$$

où  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$  sont 3 intensités sur ce sinus distantes entre elles d'un tiers de période. Il existe d'autres algorithmes de phase-stepping utilisant un nombre de pas plus élevé [2].

Le principe reliant la phase à la géométrie de l'objet est expliqué à la figure 4. On projette 3 motifs représentant les 3 signaux sinusoïdaux déphasés. Les 3 intensités correspondantes observées successivement sur un pixel de la caméra déterminent la phase (éq. 1) et donc le plan incident à la surface en chaque point. Les zones claires ou foncées de l'objet réel ont peu d'influence sur le calcul de la phase puisque l'équation 1 reste valable si l'on additionne une constante aux 3 intensités ou si on

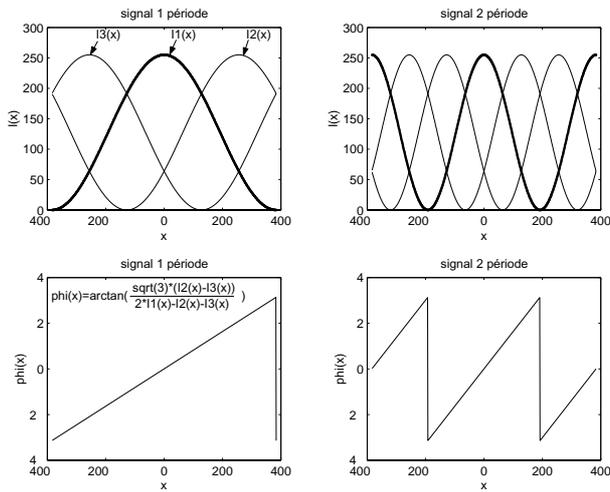


Fig. 3: Calcul de la phase de signaux sinusoïdaux de une et deux périodes d'après l'équation 1

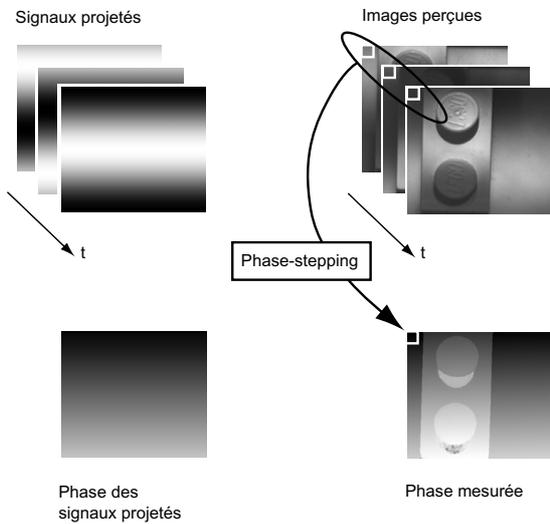


Fig. 4: Explication de la signification et du calcul de la phase pour scanner un objet

les multiplie par une constante [3]. Ce sont les variations d'intensités relatives et non pas les intensités elles-même qui sont importantes pour trouver la phase.

La plage de phase ainsi réalisée est comprise entre  $-\pi$  et  $\pi$ . Si l'on peut augmenter cette plage, la distinction entre deux plans incidents voisins devient plus aisée et la précision augmente. Pour augmenter la phase, il faut augmenter le nombre de périodes des signaux sinusoïdaux. Si l'on projette à présent un signal sinusoïdal de 2 périodes sur l'objet et que l'on extrait la phase par la même formule (éq. 1), on voit apparaître des sauts de phase (fig. 5), le résultat étant obligatoirement compris entre  $-\pi$  et  $\pi$  (fig. 3). Cela introduit une ambiguïté : à une même valeur de phase correspondent 2 plans incidents différents. Cette ambiguïté est levée par la prise en compte de la phase précédente (entre  $-\pi$  et  $\pi$ ) qui permet le déroulement (ajout du multiple adéquat de  $2\pi$  pour éliminer les sauts) de la nouvelle phase. Celle-ci est alors comprise entre  $-2\pi$  et  $2\pi$ . Le "temporal phase unwrapping" tire son nom du fait que la phase est déroulée non pas spatialement (dans le plan de l'image) mais temporellement par phases successives.

On peut continuer ainsi ces étapes en augmentant progressivement le nombre de périodes du signal et en déroulant la phase qui en résulte par la phase précédemment déroulée (fig. 6).

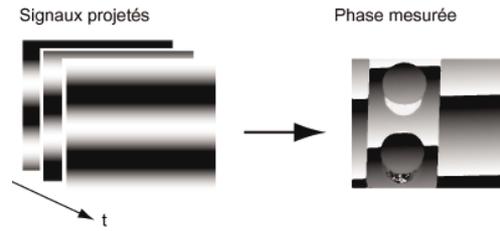


Fig. 5: La phase issue de la projection de signaux de plus d'un pas présente des sauts de phase

Les algorithmes de temporal phase unwrapping existants

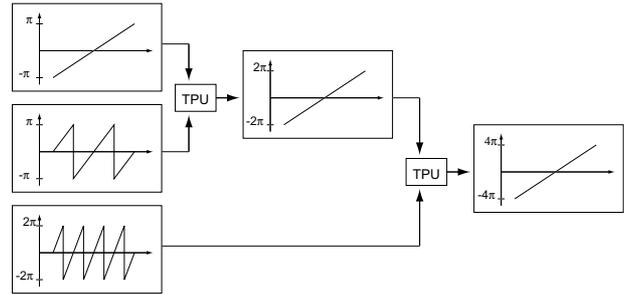


Fig. 6: Description du principe utilisé dans le temporal phase unwrapping dans le cas du déroulement d'une phase entre  $-4\pi$  et  $4\pi$

différent entre eux par la progression du nombre de périodes des signaux et par l'algorithme de déroulement adopté [4]. Nous avons choisi un algorithme utilisant une progression géométrique du nombre de périodes (1, 2, 4, 8, 16, 32). On s'est limité à un maximum de 32 périodes mais rien n'empêche d'augmenter encore ce nombre pour autant que la caméra puisse discerner les grilles projetées. Dans notre cas, la plage de phase est comprise entre  $-32\pi$  et  $32\pi$ .

## 4 Setup de laboratoire

Dans notre laboratoire, nous avons développé [5] et construit [3] un scanner 3D basé sur la projection de lumière structurée pour de petits objets de la taille du centimètre. Il s'agit uniquement d'un appareil de laboratoire qui nous permet de valider nos développements théoriques. Il sert à la compréhension des problèmes survenant dans le scan d'objets de petites dimensions, et au développement de techniques d'automatisation du scanner. Un projecteur LCD (beamer multimédia VGA) modifié permet la projection et la structuration informatique de la lumière. Son optique d'origine, conçue pour projeter à grande distance, a été remplacée par un objectif télécentrique [6]. Ce dernier a été dimensionné pour assurer une projection de petite taille ( $\sim 2 \times 2 \text{ cm}$ ) à faible distance ( $\sim 10 \text{ cm}$ ) et permet, par son principe, de rendre la projection de lumière invariante en taille selon l'axe optique du système. L'avantage réside dans le fait que, ainsi, les plans décrits plus hauts sont bien parallèles, assurant de ce fait une résolution constante sur toute l'image. L'incidence de la lumière sur le plan de pose est d'environ 45 degrés. Une caméra CCD noir / blanc placée à la verticale du plan de pose permet l'acquisition des images et un ordinateur (processeur 1.8 GHz) est utilisé pour commander la projection et l'acquisition des images ainsi que pour effectuer les calculs sur ces dernières.

## 5 Automatisation du scanner 3D

Dans le contexte d'un contrôle qualité en ligne, l'obtention et l'analyse des données fournies par le scanner 3D ne doit pas

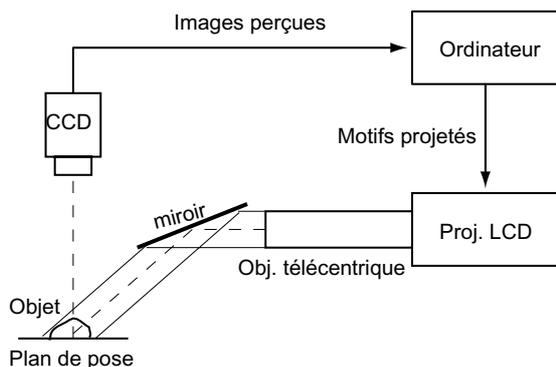


Fig. 7: Schéma des éléments constituant notre scanner 3D

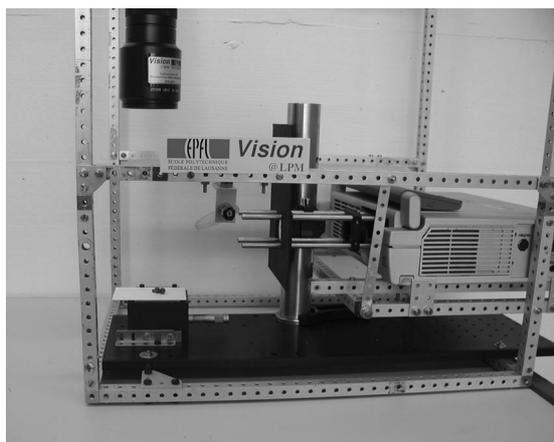


Fig. 8: Notre appareil de laboratoire. On distingue le beamer à droite, l'objectif télécentrique monté sur des rails optiques, le miroir oblique, le plan de pose (en clair) au dessus duquel est placée la caméra.

nécessiter la présence d'un opérateur humain. De plus un tel scanner doit permettre de s'adapter rapidement à un changement de pièce sur la ligne.

### 5.1 Masque

A priori, le système ne sait pas distinguer entre les pixels exploitables et ceux qui ne le sont pas (zones d'ombres). Sur ces derniers, la phase fournit une information de hauteur qui n'a aucun sens comme on peut le voir sur le bas de la pièce au figures 4 et 5. Il est donc important d'isoler les zones exploitables dans l'image. En outre, cela réduit par la suite le temps de calcul (obtention et déroulement de la phase) puisque ceux-ci ne sont effectués que sur ces seules zones. Nous proposons une solution permettant de construire automatiquement un tel masque.

Si, préalablement au scan proprement dit, on éclaire progressivement l'objet avec plusieurs champs d'intensités constantes mais croissantes avec le temps, les pixels de la caméra qui correspondent à une zone éclairée présentent un accroissement de leur intensité. Au contraire, dans les zones d'ombres, les intensités perçues ne sont que peu ou pas modifiées par les changements de luminosité (fig. 9). On construit ainsi un masque qui contient les pixels sur lesquels on a détecté une réponse à l'augmentation de l'illumination.

### 5.2 Adaptation des intensités projetées

Dans le phase-stepping, l'obtention de la phase par 3 intensités fait l'hypothèse qu'elles sont issues d'un signal sinusoïdal. Or une intensité projetée sur l'objet, si elle est trop importante,

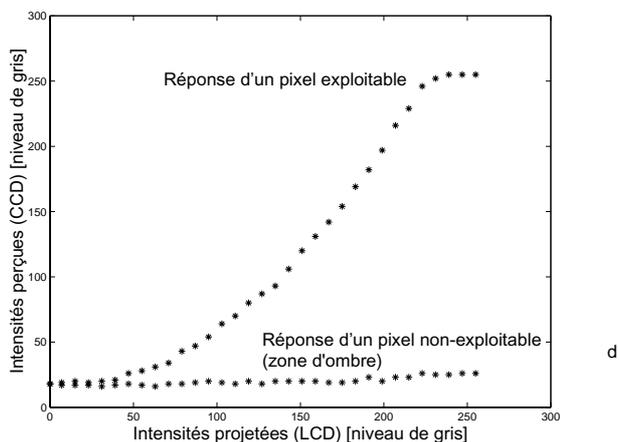


Fig. 9: Réponses de 2 pixels de la CCD aux illuminations par le LCD. Un des pixels n'est pas éclairé par le projecteur et présente donc une intensité relativement constante

peut produire une saturation des pixels de la CCD (fig. 9). De même, la projection d'une intensité très faible sur l'objet peut ne pas être perçue par la CCD, notamment si la surface observée est sombre. Cet écrêtage du sinus a pour conséquence l'apparition d'ondulations dans la phase qui altèrent la précision de mesure.

Une autre de nos contribution est le développement d'une calibration automatique du scanner en asservissant les intensités projetées aux intensités perçues par la caméra [7]. Le principe est le même que pour la construction du masque, à savoir la projection d'intensités croissantes avec le temps. Cependant on utilise ici d'avantage d'intensités afin de connaître au mieux l'allure de la courbe de réponse. Sur la figure 9, on observe bien que la réponse est relativement linéaire pour une certaine plage d'intensités projetées (~100 - 220). Il faut donc s'assurer que les intensités des sinus projetés sont comprises dans cette plage pour obtenir la meilleure phase possible. Comme on trouve des plages légèrement différentes pour tous les pixels du masque, on cherche une plage de projection qui produise au mieux une réponse linéaire de tous les pixels.

## 6 Résultats

Les résultats suivant ont été obtenus sur notre setup en scannant une surface plane (céramique) déplacée en hauteur à l'aide d'une table micrométrique. Le tableau 1 montre les résultats obtenus dans le cas d'une surface blanche. On constate une

plage de phase (=2.5mm)	précision en hauteur [ $\mu m$ ]	
	sans adaptation de la projection	avec adaptation de la projection
$[-\pi; \pi]$	$\pm 340$	$\pm 220$
$[-2\pi; 2\pi]$	$\pm 310$	$\pm 165$
$[-4\pi; 4\pi]$	$\pm 265$	$\pm 130$
$[-8\pi; 8\pi]$	$\pm 200$	$\pm 100$
$[-16\pi; 16\pi]$	$\pm 110$	$\pm 60$
$[-32\pi; 32\pi]$	$\pm 35$	$\pm 30$

Tab. 1: Précisions de mesure pour le scan d'une surface blanche

amélioration de la précision grâce à l'adaptation de la projection. Cette amélioration est toutefois moins marquée pour la phase déroulée entre  $-32\pi$  et  $32\pi$ . Cette adaptation de la projection étant encore au stade de développement, elle n'a pas encore pu être appliqué au scan d'une surface noire. Le scan de surfaces noires sans adaptation de la projection donne les résultats du tableau 2. La précision est moins bonne que celle obtenue en scannant la surface blanche.

plage de phase (=2.5mm)	précision en hauteur [ $\mu\text{m}$ ]
$[-\pi; \pi]$	$\pm 1270$
$[-2\pi; 2\pi]$	$\pm 710$
$[-4\pi; 4\pi]$	$\pm 400$
$[-8\pi; 8\pi]$	$\pm 260$
$[-16\pi; 16\pi]$	$\pm 175$
$[-32\pi; 32\pi]$	$\pm 100$

Tab. 2: Précisions de mesure pour le scan d'une surface noire

Les temps de calcul qui suivent ont été mesurés sur des images de  $576 \times 768$  pixels. Hormis le temps de calcul du masque, tous les autres temps sont directement fonction du nombre de pixels sur lesquels les calculs sont effectués. Pour cette raison, nous mentionnons également le temps de calcul par pixel. A ces temps, il convient d'ajouter le temps d'acquisition

	Temps de calcul global [s]	Temps de calcul par pixel [ $\mu\text{s}$ ]
Masque (par 4 images)	1.3	
Obtention d'une phase	0.1	0.2
Déroulement d'une phase	0.4	0.8
Obtention d'une phase déroulée entre $-32\pi$ et $32\pi$	3	7
Détermination de la zone linéaire (par 30 images)	10.2	23

Tab. 3: Description des temps de calcul

des images. Puisque 3 images sont nécessaires pour le calcul d'une phase, il faut 18 images pour obtenir une phase déroulée entre  $-32\pi$  et  $32\pi$ . En ajoutant 3 ou 4 images nécessaires à la construction du masque, le temps d'acquisition est de l'ordre de la seconde à cadence vidéo et pour autant que la synchronisation entre les projections et les acquisitions soit optimisée. Le nombre d'images plus élevé ( $\sim 30$ ) nécessaire à la calibration n'est pas pris en compte, étant donné que cette opération ne devrait être effectuée que ponctuellement, par exemple afin d'adapter le scanner à une nouvelle sorte de pièce à mesurer.

## 7 Conclusion

Un appareil du genre de celui que nous avons développé peut certainement compléter voir remplacer des systèmes de vision traditionnels sur une ligne de production. Notre appareil de laboratoire permet actuellement de scanner des objets de la taille du centimètre avec une précision d'approximativement  $\pm 30\mu\text{m}$  dans le cas de surfaces claires et de  $\pm 100\mu\text{m}$  pour les surfaces sombres. Cette dernière valeur devrait prochainement diminuer grâce à l'utilisation prochaine de l'adaptation automatique des intensités projetées. Le temps d'acquisition des images est d'environ 1 seconde à cadence vidéo. Le temps de traitement est fonction du nombre de pixels sur lesquels il est effectué. Il dure près de 3 secondes si on l'effectue sur la totalité de l'image ( $576 \times 768$  pixels).

Nous avons développé une méthode éliminant automatiquement les zones de l'image sans information de hauteur et réduisant le temps de calcul par la suite. La construction de ce masque est d'environ 1 seconde.

Enfin, notre adaptation automatique de la plage de projection tend à rendre le scanner plus flexible vis-à-vis des différentes natures de surfaces à scanner. Elle nécessite actuellement près de 10 secondes. Le but n'est pas d'effectuer cette calibration à chaque scan mais plutôt lors d'un changement de série en fonction des nouvelles caractéristiques de la pièce à scanner.

## Références

- [1] H. O. Saldner and J. M. Huntley, "Temporal phase unwrapping : application to surface profiling of discontinuous objects," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 13, pp. 2770–2775, 1997.
- [2] P. Rastogi, *Photomechanics*. Springer, 1999.
- [3] L.-S. Bieri, "Réalisation d'un scanner 3d pour pièces microtechniques," rapport de projet de diplôme, EPFL, STI-IPR-LPM, 2002.
- [4] J. M. Huntley and H. O. Saldner, "Shape measurement by temporal phase unwrapping : comparaison of unwrapping algorithms," *Meas. Sci. Technol.*, no. 8, pp. 986–922, 1997.
- [5] L.-S. Bieri, "Scanner 3d pour pièces microtechniques," rapport de projet de semestre, EPFL, STI-IPR-LPM, 2001.
- [6] S. Troller, "Optimisation et caractérisation d'un scanner 3d pour pièces microtechniques," rapport de projet de semestre, EPFL, STI-IPR-LPM, 2003.
- [7] M. Ingold, "Adaptation d'un scanner 3d au contrôle qualité en ligne de production," rapport de projet de semestre, EPFL, STI-IPR-LPM, 2003.