



HAL
open science

Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions

Jean-José Orteu, Nicolas Cornille, Dorian Garcia, M.A. Sutton, S.R. Mcneill

► **To cite this version:**

Jean-José Orteu, Nicolas Cornille, Dorian Garcia, M.A. Sutton, S.R. Mcneill. Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions. *Photoniques*, 2005, 20. hal-01832913

HAL Id: hal-01832913

<https://hal.science/hal-01832913>

Submitted on 6 Nov 2018

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.

Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions

JEAN-JOSÉ ORTEU* — NICOLAS CORNILLE**/** — DORIAN GARCIA**/** — MICHAEL A. SUTTON** — STEPHEN R. MCNEILL**

Le calibrage d'un imageur est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Pour obtenir des mesures dimensionnelles précises, il est indispensable de prendre en compte les distorsions géométriques induites par le système optique utilisé. L'approche classique consiste à modéliser les distorsions par un modèle paramétrique. Nous montrons qu'une approche non paramétrique est mieux adaptée au cas de systèmes optiques complexes. Les méthodes classiques de calibrage utilisent une mire constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...). Nous montrons que l'utilisation d'une mire de mouchetis (motif aléatoire) couplée à la corrélation d'images permet d'obtenir une meilleure précision de calibrage et simplifie sa mise en œuvre pratique. Les nouvelles approches proposées sont illustrées à travers trois applications : le calibrage d'une caméra CCD, le calibrage d'un stéréomicroscope, et le calibrage d'un microscope électronique à balayage.

Définition

Le calibrage géométrique d'un imageur, c'est-à-dire de l'ensemble formé par le capteur et le système optique associé, consiste à déterminer la relation mathématique existant entre les coordonnées des points 3D de la scène observée et les coordonnées 2D de leur projection dans l'image (points-image) (figure 1). Cette étape de calibrage constitue le point initial pour plusieurs applications de la vision artificielle, comme, par exemple, la reconnaissance et la localisation d'objets, le contrôle dimensionnel de pièces, la reconstruction de l'environnement pour la navigation d'un robot mobile, etc.



Figure 1. Calibrer un imageur consiste à estimer sa fonction de transfert

Le calibrage d'un imageur est particulièrement important lorsque l'on doit obtenir, à partir des images acquises, des informations métriques en vue d'applications de mesures dimensionnelles. Pour obtenir des mesures dimensionnelles précises, il est indispensable de prendre en compte les distorsions géométriques induites par le système optique utilisé.

Modélisation de l'imageur

Nous décrivons d'abord le modèle sténopé classique puis les différents modèles permettant de prendre en compte les distorsions : approches paramétrique et non paramétrique.

Le modèle de projection

Le modèle sténopé classique modélise un imageur par une projection perspective.

Ce modèle transforme un point 3D de l'espace M en un point-image m (notés respectivement \tilde{M} et \tilde{m} lorsqu'ils sont exprimés en coordonnées homogènes) et peut se décomposer en trois transformations élémentaires successives \mathbf{A} , \mathbf{P} , \mathbf{T} (figure 2) dont la composition conduit à l'équation du modèle sténopé :

$$\tilde{m} \cong \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{T}\tilde{M}$$

La transformation \mathbf{AP} est définie par 5 paramètres appelés *paramètres intrinsèques* et la transformation \mathbf{T} est définie par 6 paramètres (3 pour la rotation et 3 pour la translation) appelés *paramètres extrinsèques*.

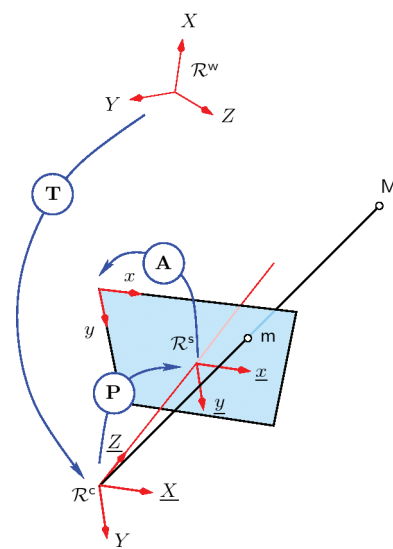


Figure 2. Les trois transformations élémentaires du modèle sténopé, et les repères associés

Prise en compte des distorsions

Le modèle sténopé modélise un imageur idéal (simple projection perspective) et ne prend pas en compte les éventuelles distorsions géométriques induites par le système optique utilisé. Plusieurs auteurs ont

* École des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard, 81013 Albi, France – {cornille,Jean-Jose.Orteu}@enstimac.fr

** University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA – {sutton,mcneill}@engr.sc.edu

*** Correlated Solutions, Inc., P.O. Box 4840, West Columbia, SC 29171, USA – dorian@CorrelatedSolutions.com

montré que pour des applications de métrologie dimensionnelle, il était indispensable de prendre en compte ces distorsions afin de pouvoir les corriger.

Partant du modèle sténopé, les effets des distorsions peuvent être modélisés par une quatrième transformation D , reliant les coordonnées-image "idéales" m (qui seraient fournies par un imageur idéal exempt de distorsion obéissant au modèle sténopé) aux coordonnées-image "réelles" \tilde{m} (fournies par l'imageur).

Le modèle d'imageur avec distorsion est illustré sur la *figure 3*.

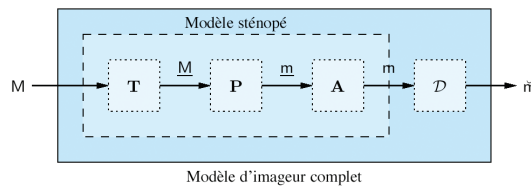


Figure 3. Modèle d'imageur avec distorsion

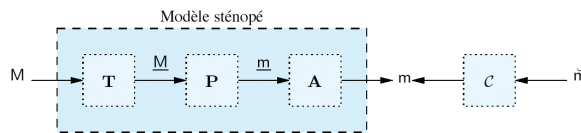


Figure 4. Modèle d'imageur avec correction de la distorsion

Approche paramétrique

Une première approche, relativement classique, consiste à modéliser la distorsion en enrichissant le modèle sténopé par des termes supplémentaires (le modèle devient alors non linéaire). Dans cette approche, le modèle s'inspire de la théorie des aberrations géométriques

des systèmes centrés en rajoutant des termes correctifs correspondants à différents types de distorsions : distorsion radiale, prismatique, de décentrage.

Approche non paramétrique

Dans le cas de systèmes optiques complexes, nous avons montré (voir la partie *Applications*) qu'il est préférable de modéliser la distorsion de façon non paramétrique en utilisant des fonctions splines. Dans ce cas, il s'agit d'une modélisation purement mathématique (approche type "boîte noire") visant à déterminer la fonction de distorsion D (*figure 3*) qui relie au mieux les coordonnées-image idéales $(x; y)$ du point m aux coordonnées-image réelles $(\tilde{x}; \tilde{y})$ du point \tilde{m} .

En pratique, pour pouvoir corriger facilement la distorsion, il est préférable d'adopter le modèle schématisé sur la *figure 4*, dans lequel on utilise la fonction réciproque C de correction de distorsion au lieu de la fonction de distorsion D .

L'estimation de la fonction de correction de distorsion C consiste à approximer les composantes horizontales (suivant l'axe x) et verticales (suivant l'axe y) du champ de correction de distorsion par deux surfaces

splines S_x et S_y . S_x approxime la surface définie par les points $(\tilde{x}_i; \tilde{y}_i; x_i)$ et S_y approxime la surface définie par les points $(\tilde{x}_i; \tilde{y}_i; y_i)$. Une fonction spline est en fait composée de $m \times n$ surfaces continûment jointives (*figure 5*). L'approximation est réalisée en divisant le domaine de définition du champ de correction de distorsion en $m \times n$ rectangles (appelés "patches").

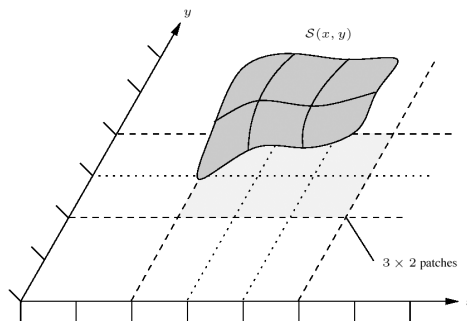


Figure 5. La surface spline d'approximation est composée de plusieurs surfaces continûment jointives définies chacune sur un patch (3×2 patches dans l'exemple)

Procédure de calibrage

Calibrer le système représenté sur la *figure 4* consiste à estimer les éléments T , P , A et C qui relient les coordonnées des points 3D M de la scène observée et les coordonnées 2D de leurs points-image \tilde{m} .

En pratique, le calibrage est réalisé en utilisant une ou plusieurs images d'un objet étalon qui fournit les points 3D M (dits points 3D de calibrage). Les coordonnées

2D de leurs points-image \check{m} sont déterminées par analyse d'image.

Les premières méthodes de calibrage proposées (il y a déjà plus de vingt ans) utilisaient un objet de calibrage 3D (mire de calibrage "volumique") qui avait le plus souvent la forme d'un dièdre ou d'un trièdre. Ce type d'objet permet de calibrer la caméra à partir d'une seule image mais en revanche sa précision de construction (dont dépend la précision du calibrage) est difficile à garantir et à maintenir et sa manipulation n'est pas aisée. C'est la raison pour laquelle d'autres méthodes sont apparues, basées sur le déplacement précis (avec l'aide d'une table de translation micrométrique) d'une mire plane (plus facile à réaliser précisément qu'un objet étalon 3D).

Pour s'affranchir des dispositifs de translation micrométrique, des méthodes ont été ensuite proposées pour permettre le calibrage à partir d'une mire plane déplacée librement dans le champ de vue de la caméra, sans que les positions de la mire dans l'espace aient besoin d'être connues. Ces méthodes ont permis de gagner en facilité de mise en œuvre, mais, comme elles considéraient que la géométrie de la mire était connue avec exactitude, la qualité du calibrage était tributaire principalement de la précision de la mire.

Pour pallier ce problème, une approche photogrammétrique a finalement été proposée. Elle consiste à réestimer les points 3D de calibrage M en même temps que les paramètres du modèle. La précision de calibrage n'est plus alors tributaire de la précision de la mire utilisée.

En utilisant une approche photogrammétrique, nous pouvons estimer M , T , P , A et C en minimisant la fonction objectif E suivante :

$$E(M, T, P, A, C) = \sum_i \sum_j \left\| \epsilon_i^j \right\|_2^2$$

où $\epsilon_i^j = C(\check{m}_i^j) - m_i^j$ et $\check{m}_i^j \cong \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{T}^j \check{M}_i$
 ϵ_i^j représente l'erreur de reprojection, c'est-à-dire la différence entre les coordonnées des points $N^\circ i$ extraits (par analyse d'image) dans les images $N^\circ j$, et les coordonnées calculées par le modèle de l'imageur pour chaque point correspondant de la mire.

Le problème de minimisation est résolu par une technique de relaxation. Les points-image corrigés de la distorsion ainsi que

les paramètres du modèle sténopé sont estimés en utilisant un algorithme itératif :

0) Initialisation de la fonction de correction de distorsion C en considérant la distorsion nulle au départ de l'algorithme.

1) Correction de la distorsion des points-image.

2) Calibrage du modèle sténopé par ajustement de faisceaux ("*bundle adjustment*" en anglais).

3) Estimation de la fonction spline C de correction de distorsion permettant d'approximer les données $\{\check{m}_i^j, m_i^j\}$.

4) Répéter à partir de l'étape 1) jusqu'à convergence (le critère d'arrêt choisi est relatif : l'algorithme est arrêté lorsque l'amélioration de la valeur du résidu est inférieure à 0,1 %).

À noter qu'avant la première itération, les paramètres du modèle sténopé sont estimés par une procédure de calibrage linéaire qui permet de fournir des estimées initiales à l'algorithme d'ajustement de faisceaux mis en œuvre à l'étape 2. La fonction de correction de distorsion est estimée petit à petit à chaque itération à partir des erreurs de reprojection (voir étape 3). À la fin du processus, nous disposons de la fonction de correction de distorsion (deux surfaces splines) ainsi que des paramètres du modèle sténopé qui relie les coordonnées des points 3D de la scène observée aux coordonnées 2D des points-image corrigés de la distorsion.

Mise en œuvre pratique

Comme cela a déjà été évoqué, le modèle d'imageur est généralement estimé à partir de l'analyse d'une séquence d'images d'une mire étalon (dite de calibrage) constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...). La qualité du calibrage dépend alors de la qualité d'extraction des points de calibrage (coins des damiers, nœuds de la grille, centres des ellipses, etc.).

La procédure expérimentale que nous proposons consiste à acquérir plusieurs images d'une mire de mouchetis quasi plane déplacée librement (rotations et translations) devant le champ de vue de l'imageur à calibrer. La mise en correspondance des différentes vues est obtenue par corrélation d'images.

On notera que le fait que la mire soit quasi plane permet de fournir facilement à la procédure d'ajustement de faisceaux une estimée initiale des coordonnées ($X; Y; Z$) des points M de calibrage. La méthode pourrait fonctionner avec n'importe quel objet de calibrage dont on connaîtrait un modèle 3D approximatif. Par exemple, nous avons appliqué notre méthode au calibrage de l'imageur d'un microscope électronique à balayage (MEB). Plutôt que d'utiliser une mire spécifique, le calibrage a été réalisé avec succès à partir de plusieurs images d'une pièce de monnaie (surface quasi plane) placée sur le porte-échantillon orientable du MEB (voir la partie *Applications*).

L'utilisation d'une mire de mouchetis couplée à l'appariement d'images par corrélation présente plusieurs avantages :

- facilité de réalisation de la mire. Par exemple, par pulvérisation de peinture sur n'importe quel support quasi plan ou par impression d'une image de mouchetis synthétique qui permet de bien maîtriser la qualité/corrélabilité du mouchetis ;
- meilleure précision de calibrage car la précision de mise en correspondance des points-image par corrélation (cas d'une mire de mouchetis) est meilleure que 0,01 pixel alors que la précision d'extraction des centres des ellipses (cas d'une

mire de cercles) est de l'ordre de 0,02 pixel ;

- le nombre de points-image utilisés peut être très élevé (à la limite l'ensemble des pixels de l'image) alors que dans le cas d'une mire constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...) ce nombre est généralement réduit (une centaine de points maximum).

Pour atteindre la précision de mise en correspondance de 0,01 pixel, nous utilisons un algorithme de corrélation fine qui adapte localement la forme des fenêtres de corrélation. La mire étant vue sous différentes orientations, les motifs à corrélérer sont déformés par projection perspective et il est nécessaire de déformer également la fenêtre de corrélation pour pouvoir appairer les images, qui plus est avec une bonne précision.

L'évolution historique des procédures de calibrage présentée en introduction de cette partie peut être complétée de la façon suivante : mires volumiques, mires planes précises déplacées avec précision, mires planes précises déplacées librement, mires planes imprécises déplacées librement et enfin mires planes de mouchetis déplacées librement.

La procédure de calibrage proposée peut se représenter schématiquement comme indiqué sur la *figure 6*.

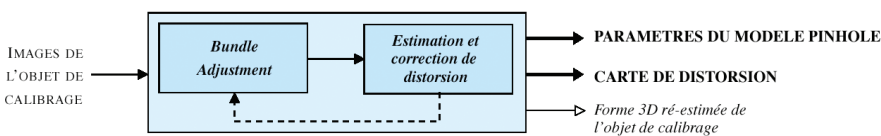


Figure 6. Représentation schématique de la procédure de calibrage

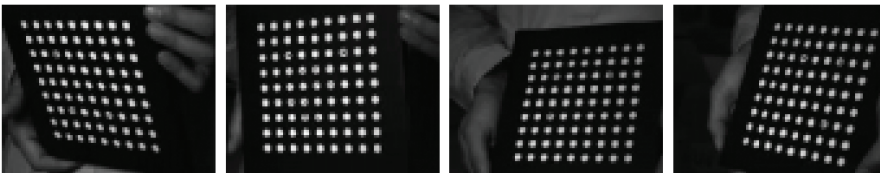


Figure 7. Mire de calibration classique (cercles)

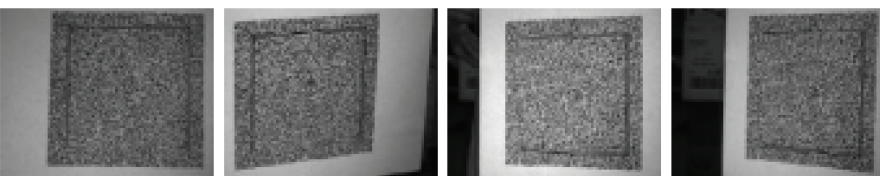


Figure 8. Mire de mouchetis (motif aléatoire)

Applications

Dans cette partie, nous présentons les résultats de calibrage obtenus avec la méthode présentée ci-dessus, dans différentes configurations. La méthode a été utilisée avec succès pour calibrer non seulement une caméra CCD, mais aussi un stéréomicroscope et un microscope électronique à balayage, qui sont des systèmes d'imagerie bien connus pour présenter des distorsions géométriques complexes.

Calibrage d'une caméra CCD

Nous avons calibré une caméra de type QImaging Retiga 1300 équipée d'un objectif de 25 mm en utilisant deux méthodes distinctes :

- 1) à partir d'une série de 20 images d'une mire de calibrage standard constituée de 9 x 9 cercles (vus comme des ellipses dans les images) (*figure 7*) ;
- 2) à partir d'une série de 15 images d'une mire de mouchetis (*figure 8*).

En utilisant la première série d'images (mire de cercles), nous avons calibré la caméra en utilisant un modèle paramétrique radial d'ordre 3. Nous avons obtenu un écart type de 0,04 pixel avec une erreur systématique de 0,03 pixel. L'erreur systématique correspond à un biais de mesure et est égale à l'espérance des erreurs de reprojection. Nous approximations ce paramètre statistique par la moyenne arithmétique de ces erreurs.

Avec un modèle sténopé classique (qui néglige la distorsion), nous avons obtenu un écart type de 0,1 pixel avec une erreur systématique de 0,1 pixel. En utilisant la procédure de calibrage décrite ci-dessus (modèle sténopé + spline bicubique avec algorithme de relaxation), nous avons obtenu un écart type de 0,03 pixel avec une erreur systématique de 0,03 pixel. À noter que la mire de cercles se prête mal à l'estimation de la distorsion par fonction spline car elle fournit seulement 81 points de calibrage, ce qui est insuffisant pour pouvoir estimer correctement la spline (seulement 9 points par patch en moyenne si on découpe la zone de l'image analysée en 3 x 3 patches).

Nous avons ensuite calibré la caméra en utilisant la deuxième série d'images (mire

de mouchetis) et la procédure de calibrage décrite ci-dessus. Nous avons utilisé 6 500 points par image et des splines bicubiques avec 8 x 8 patches pour modéliser la distorsion. Nous avons obtenu un écart type de 0,01 pixel avec une erreur systématique de 0,02 pixel. Sans prendre en compte la distorsion, l'écart type est de 0,04 pixel avec une erreur systématique de 0,08 pixel, et avec un modèle paramétrique radial d'ordre 3 l'écart type est de 0,02 pixel. Même en présence d'une distorsion faible (figure 9), la prise en compte de la distorsion dans le modèle améliore la précision de calibrage d'un facteur 2 (cas du modèle radial d'ordre 3) ou d'un facteur 4 (cas du modèle non paramétrique). L'ensemble des résultats est synthétisé sur le tableau 1.

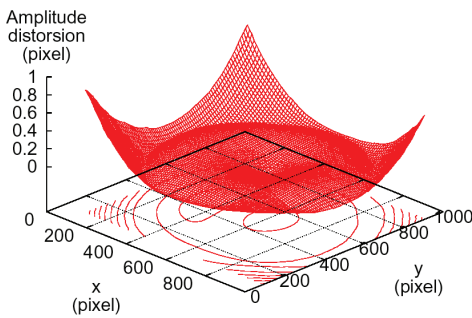


Figure 9. Champ de distorsion obtenu en calibrant la caméra : l'amplitude de la distorsion est de l'ordre de 1 pixel aux coins de l'image

Modèle	Mire classique	Mire de mouchetis
Sténopé	0,1	0,04
Sténopé + Radial ordre 3	0,04	0,02
Sténopé + Spline	0,03	0,01

Tableau 1. Calibrage de la caméra : résumé des résultats obtenus (écart type en pixel)

Il est à noter que quel que soit le modèle de distorsion utilisé, le calibrage à partir d'une mire de mouchetis conduit à de meilleurs résultats qu'avec une mire de cercles. Cela est dû à la fois au nombre de points pris en compte (6 500 points dans le cas de la mire de mouchetis contre 81 pour la mire de cercles) et à la précision d'extraction des points (comme cela a déjà été mentionné, la précision de mise en correspondance des points par corrélation dans le cas de la mire de mouchetis est meilleure que 0,01 pixel alors que la précision d'extraction des centres des ellipses est de l'ordre de 0,02 pixel).

Calibrage d'un stéréomicroscope

Nous avons calibré un stéréomicroscope Nikon SMZ-U SOM (figure 10) à partir de 20 images de mouchetis (figure 11). Nous avons utilisé 3 000 points par image et des splines bicubiques avec 8 x 8 patches pour modéliser la distorsion. La figure 12 montre le champ de correction de distorsion obtenu.

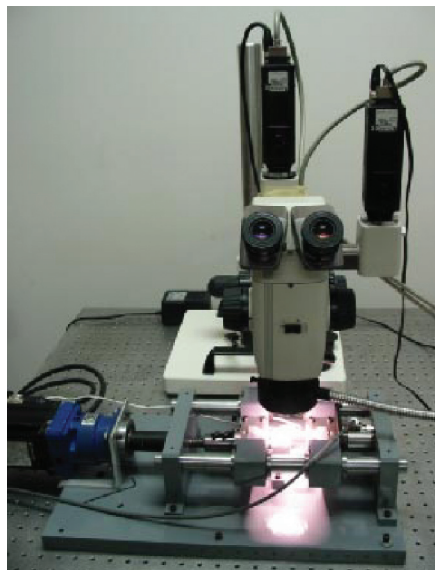


Figure 10. Le stéréomicroscope

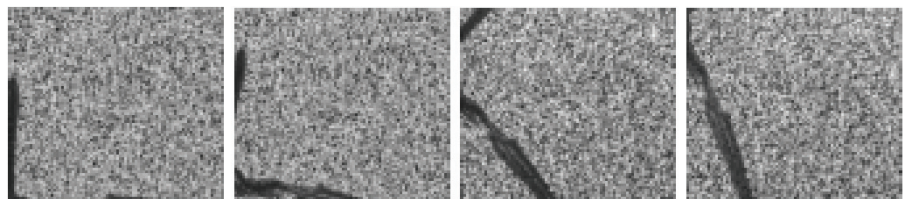


Figure 11. Quatre images extraites de la série de vingt images d'une mire de mouchetis utilisées pour calibrer le stéréomicroscope

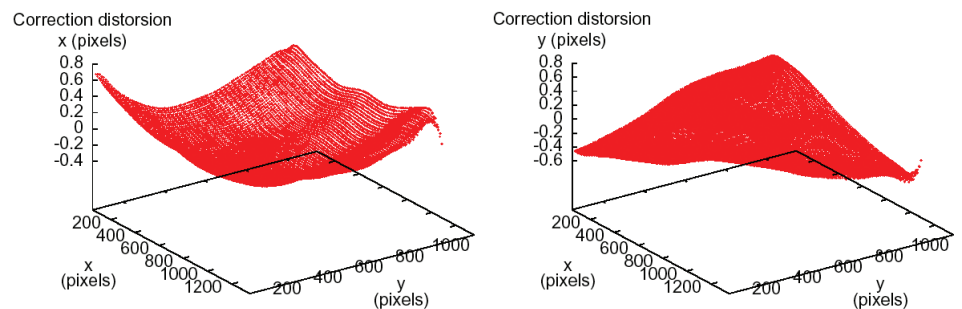


Figure 12. Le champ de correction de distorsion obtenu en calibrant le stéréomicroscope

Nous avons obtenu un écart type de 0,005 pixel avec une erreur systématique de 0,01 pixel. En comparaison, l'écart type des erreurs sans prendre en compte la distorsion est de 0,08 pixel et il est de 0,04 pixel pour un modèle paramétrique avec distorsion radiale à l'ordre 3 (tableau 2).

Modèle	écart type (pixel)
Sténopé	0,08
Sténopé + Radial ordre 3	0,04
Sténopé + Spline	0,005

Tableau 2. Calibrage du stéréomicroscope : résumé des résultats obtenus

Calibrage de l'imageur d'un microscope électronique à balayage

Nous avons calibré l'imageur d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type FEI ESEM Quanta 200. Nous avons utilisé pour cela 24 images d'une mire de mouchetis (figure 13) acquises avec un grandissement de 200x. La mire a été placée sur le porte échantillon orientable du MEB et déplacée devant le champ de l'imageur (rotations et translations). Nous avons utilisé 5 000 points par image et des splines bicubiques avec des patches de 8 x 8 pour modéliser la distorsion.

La figure 14 montre la distribution de l'amplitude des erreurs de reprojection suivant l'axe y . La figure de gauche (figure 14 a) montre qu'en appliquant notre méthode de calibrage nous obtenons une distribution des erreurs proche d'une distribution normale, sans erreur systématique, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on calibre avec un modèle sténopé (qui néglige la distorsion) ou avec un modèle radial d'ordre 3 (figure 14 b).

Le champ de correction de distorsion est illustré sur la figure 15. Dans les coins des images, où la distorsion est maximale, l'amplitude de la distorsion atteint 4 pixels.

En utilisant la méthode de calibrage décrite ci-dessus, nous avons obtenu un écart type sur l'amplitude de l'erreur de reprojection de 0,02 pixel et une erreur systématique de 0,03 pixel. Avec les mêmes données et un modèle paramétrique radial d'ordre 3 nous

avons obtenu un écart type de 0,14 pixel et une erreur systématique de 0,24 pixel. Avec un modèle sténopé (qui néglige la distorsion) nous avons obtenu un écart type de 0,43 pixel et une erreur systématique de 0,79 pixel (tableau 3).

Comme nous l'avons déjà évoqué, le calibrage du MEB a également été réalisé avec succès à partir de plusieurs images d'une pièce de monnaie (surface quasi plane) placée sur le porte-échantillon orientable du MEB. La méthode de calibrage utilisée étant de type photogrammétrique, elle nous a fourni au final la forme 3D de la pièce.

Modèle	écart type (pixel)
Sténopé	0,43
Sténopé + Radial ordre 3	0,14
Sténopé + Spline	0,02

Tableau 3. Calibrage du MEB : résumé des résultats obtenus

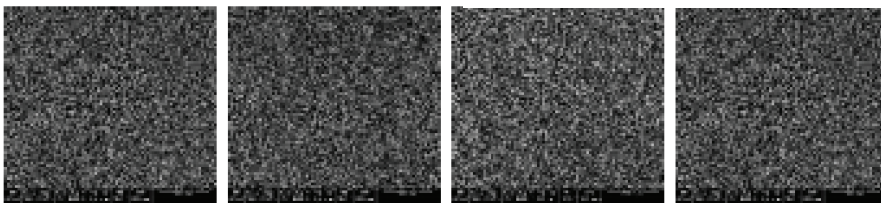


Figure 13. Quatre images extraites de la série de vingt-quatre images d'une mire de mouchetis utilisées pour calibrer le MEB

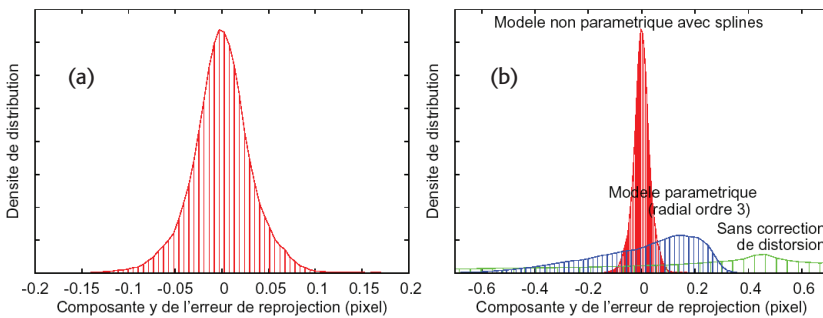


Figure 14. Lorsque nous appliquons notre méthode de calibrage nous obtenons une distribution des erreurs proche d'une distribution normale (a), contrairement à ce qui se passe lorsqu'on calibre avec un modèle radial d'ordre 3 ou sans tenir compte de la distorsion (b)

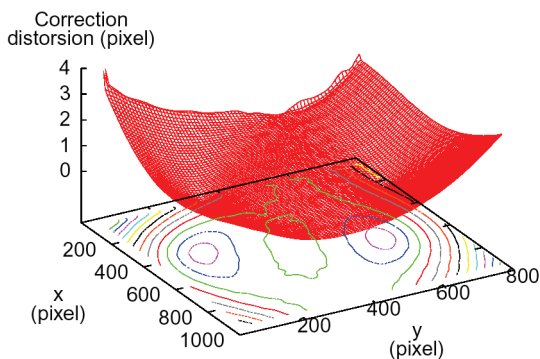


Figure 15. Champ de correction de distorsion obtenu en calibrant le MEB : l'amplitude de la distorsion est de l'ordre de 4 pixels aux coins de l'image

La figure 16 montre de façon qualitative la forme 3D reconstruite, ce qui montre que l'estimation de la distorsion et des paramètres de calibrage ne se fait pas au détriment d'autres paramètres. Pour que cette forme 3D constitue une réelle validation, il faudrait disposer de la forme exacte de la pièce (vérité terrain), ce que nous n'avons pas dans cette expérience. Par contre, le calibrage du MEB étant pour nous une étape préalable à son utilisation comme instrument de mesure de formes ou de déformations 3D à l'échelle micro/nano, Nicolas Cornille a montré dans sa thèse la qualité des formes 3D obtenues et l'influence de la qualité du calibrage et de la prise en compte des distorsions (complexes en l'occurrence).

et en quelques secondes à peine les paramètres de calibrage recherchés. À notre connaissance, il n'existe pas de logiciel commercial spécifiquement dédié au calibrage d'une caméra : à noter néanmoins que certains systèmes commerciaux de mesure 3D par stéréovision proposent une étape préliminaire de calibrage des caméras qui est à la pointe de l'état de l'art en matière de performance et de simplicité de mise en œuvre.

De nombreux laboratoires de recherche ont développé leur propre outil pour leur usage interne. Certains laboratoires offrent un accès gratuit à leur outil via Internet (versions disponibles sous Matlab par exemple).

Mise en œuvre pratique

Le calibrage d'une caméra a longtemps été considéré comme une opération longue et délicate à mettre en œuvre. En réalité, les méthodes proposées aujourd'hui sont simples et rapides : il suffit de prendre une douzaine d'images d'une mire déplacée librement dans le champ de vue de la caméra, et de fournir ces images au logiciel de calibrage qui calcule automatiquement

Bibliographie

Cornille N, Garcia D, Sutton MA, McNeill SR, Orteu J-J. Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions. *Instrumentation, Mesure, Métrologie (IM)* 2004;4(3-4):105-124 Hermès-Lavoisier, Septembre 2005.

Cornille N. Accurate 3D Shape and Displacement Measurement using a Scanning Electron Microscope (chapitre 2). PhD University of South Carolina (USA)/Thèse de l'INSA Toulouse. École des Mines d'Albi, 20 juin 2005.

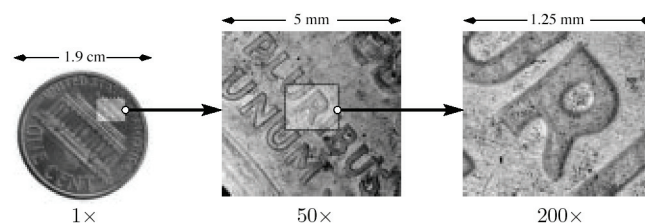
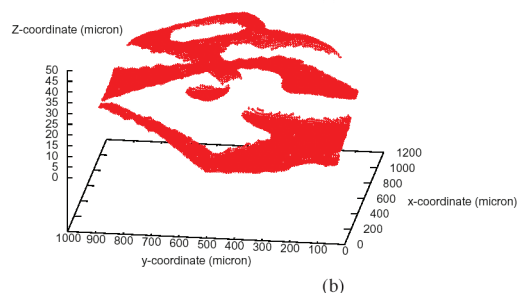
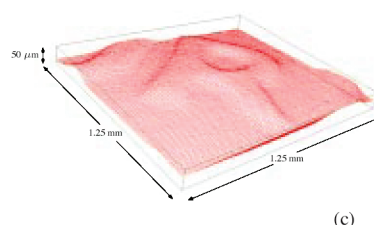


Figure 16. Pièce de monnaie (penny américain) observée au MEB :

(a) zone mesurée (la lettre "R" présente dans la phrase "E PLURIBUS UNUM", grandissement 200x)



(b) forme de la lettre "R" réestimée par la procédure de calibrage photogrammétrique (seules les zones quasi planes de la pièce ont été utilisées pour le calibrage)



(c) lettre "R" reconstruite en 3D par vidéogrammétrie à partir de plusieurs images de la pièce acquises sous différentes orientations après calibrage de l'imageur du MEB (à gauche, reconstruction 3D maillée et, à droite, reconstruction 3D avec texture plaquée)