



HAL
open science

Calibration sur modèle CAO pour la mesure par vision in-situ

Lorène Dubreuil, Yann Quinsat, Claire Lartigue

► **To cite this version:**

Lorène Dubreuil, Yann Quinsat, Claire Lartigue. Calibration sur modèle CAO pour la mesure par vision in-situ. 2015. hal-01139851

HAL Id: hal-01139851

<https://hal.science/hal-01139851>

Preprint submitted on 7 Apr 2015

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.

Calibration sur modèle CAO pour la mesure par vision in-situ

Lorène Dubreuil

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud
61, Avenue du Président Wilson
94230 Cachan – France
lorene.dubreuil@lurpa.ens-cachan.fr

Yann Quinsat

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud
61, Avenue du Président Wilson
94230 Cachan – France
yann.quinsat@lurpa.ens-cachan.fr

Claire Lartigue

LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud
61, Avenue du Président Wilson
94230 Cachan – France
claire.lartigue@lurpa.ens-cachan.fr

Résumé— Dans le cadre de l'amélioration de procédé de fabrication, les travaux présentés concernent une méthode de mesure in-situ par moyen optique. L'objectif est de mesurer les défauts liés au procédé de fabrication, dans un temps réduit, pour finalement proposer des actions correctives. Ainsi une grande interopérabilité entre les données FAO et la mesure est nécessaire. Elle peut être réalisée par la mise au point d'une méthode de calibration permettant de réaliser les mesures directement dans le repère utilisé pour la construction de la maquette numérique et le calcul des trajectoires d'usinage. Nous proposons de réaliser cette calibration en nous appuyant sur des entités présentes dans la maquette numérique et facilement identifiables dans l'image prise par le système de vision. Après avoir rappelé le principe de la calibration d'une caméra et les différentes méthodes usuellement utilisées pour la déterminer, nous présentons une nouvelle méthode basée sur l'association de diverses entités (droites, points) détectées dans l'image. Une application sur un exemple est ensuite proposée et permet de montrer l'efficacité de la méthode et l'importance de l'identification des éléments utilisés pour la calibration. Enfin une étude de sensibilité est donc menée en considérant des incertitudes associées aux positions et orientations des éléments extraits de l'image.

Mots-clés— calibration, mesure in-situ, surveillance d'usinage

I. INTRODUCTION

La mise au point et la surveillance des procédés de fabrication sont des étapes importantes dans la maîtrise des coûts de production et de la qualité de la pièce usinée. De plus, l'intégration des procédures de contrôle au sein du procédé de fabrication contribue grandement à l'automatisation du processus de production. Ainsi de nombreuses améliorations comme une réduction du temps de mesure, la flexibilité de l'opération de contrôle ou encore la possibilité de réaliser un contrôle à 100% peuvent être obtenues grâce à la mesure in-situ [1]. La mesure in-situ permet en particulier une prise de décision rapide vis-à-vis de la conformité du produit réalisé, grâce à une grande interopérabilité entre la fabrication et le contrôle. Néanmoins, afin de faciliter les comparaisons entre la pièce usinée en cours de fabrication et le modèle CAO les opérations de mesures et d'usinage doivent être réalisées dans un même repère de référence.

La mesure in-situ est souvent réalisée à partir d'un système de vision à base de caméras [1-3]. Ces systèmes présentent de nombreux avantages comme un coût réduit, une grande

flexibilité et une simplicité d'implantation dans un contexte de production. Une difficulté concerne la calibration du système. La calibration est une étape nécessaire pour déterminer la position d'un point 3D à partir de sa position en 2D dans le repère de l'image. Elle correspond à l'identification du positionnement relatif du repère caméra par rapport à un repère de référence 3D. Généralement, le repère de référence servant à la calibration est appelé repère monde, mais n'est pas clairement identifié dans son environnement.

Dans un contexte de mesure in-situ, la calibration doit être réalisée avant chaque opération de mesure afin de prendre en compte les diverses variations dues à l'usinage. Pour une meilleure interopérabilité entre l'usinage et le contrôle, l'un des points d'amélioration consisterait à réaliser la calibration en choisissant pour repère monde le repère CAO dans lequel les opérations d'usinage ont été définies. Ainsi, le repère de mesure coïnciderait avec le repère CAO, ce qui limiterait les opérations de recalage parfois pénalisantes en termes de temps de calcul et de qualité.

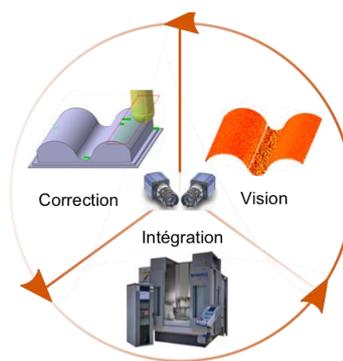


Figure 1. MESURE IN-SITU

Les travaux présentés dans cet article traitent d'une méthode de calibration orientée CAO pour la mesure in-situ. L'originalité de cette méthode est que la méthode de calibration s'appuie sur le repère CAO qui sert également de repère de référence pour la mesure. Nous proposons de construire ce repère de référence à partir d'entités présentes dans l'environnement de fabrication et capturées par le système de vision. Dans cette optique, les entités sont des éléments du montage d'usinage utilisés à la fois pour le positionnement physique de la pièce dans son environnement de fabrication et dans le modèle CAO.

II. CALIBRATION SUR ENTITES CAO

A. Méthodes de calibration classiques

La calibration d'une caméra permet d'identifier les paramètres du modèle définissant la relation entre les coordonnées 3D des points exprimés dans le repère monde R_w et les coordonnées pixels 2D des points exprimés dans le repère image R_p . Le modèle de Sténopé (Figure 2), le plus couramment utilisé, permet d'exprimer la transformation entre les 2 repères et la relation entre les coordonnées 2D/3D s'exprime par l'équation (1).

$$\text{éq. (1): } \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}_{R_p} = \underline{\underline{ADPT}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w}$$

Dans l'équation (1) A , D , P , T , correspondent aux transformations qui permettent de passer du repère image au repère monde. La transformation A , correspond à une transformation affine entre le repère «centre image» R_r et le repère image R_p . La transformation D correspond à la modélisation des distorsions de la caméra. La transformation P est une projection perspective du repère caméra R_c sur le plan image R_r . Ces deux transformations déterminent les paramètres internes à la caméra, aussi appelés *paramètres intrinsèques*, par exemple, la focale, la taille du pixel ou encore la position du centre image.

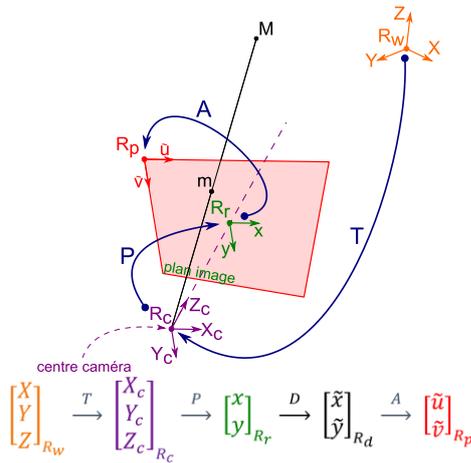


Figure 2. MODELE DE STENOPE D'UNE CAMERA

Finalement, la transformation du modèle T entre le repère monde R_w et le repère caméra R_c correspond à une transformation rigide de changement de repère caractérisée par une rotation $R_{3 \times 3}$ et une translation t . T peut donc être décrite par une matrice homogène (équation (2)), et les paramètres associés à cette transformation sont appelés *paramètres extrinsèques* de la caméra.

$$\text{éq. (2): } \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{R_c} = \underline{\underline{T}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w} = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w}$$

La calibration consiste donc à identifier les paramètres intrinsèques et extrinsèques du modèle de sténopé. De nombreuses méthodes de calibration sont proposées dans la littérature. Elles sont basées pour la plupart sur l'identification de points et de droites dans le plan image et leurs associations à un artefact connu. Une optimisation des paramètres intrinsèques et extrinsèques est nécessaire afin de minimiser l'erreur entre les éléments identifiés et la projection calculée de l'artefact. Le bilan non exhaustif des différentes méthodes de calibration proposé permet de comprendre les limites qui conduisent à l'élaboration d'une nouvelle méthode de calibration.

Un grand nombre de méthodes est basé sur l'appariement de points. Faugeras et Toscani [4] proposent une méthode identifiant les paramètres du modèle de sténopé sans prise en compte des distorsions. En ce limitant uniquement aux 6 points nécessaires, leur problème d'appariement aboutit à la résolution simple d'un problème linéaire. Afin d'améliorer la détermination de la transformation décrite à l'équation (1), Lavest et al. [5] résolvent un problème non-linéaire d'appariement de points par minimisation d'une erreur de reprojection. Cette méthode permet la prise en compte d'un nombre non limité de points choisis et d'une modélisation des distorsions. Cette méthode de résolution a été implémentée par Bouguet [6] et elle est disponible dans la toolbox Camera Calibrator de Matlab R2014 ©. Douilly [7] réalise aussi la calibration d'un système multi-caméra pour le suivi d'opérations d'assemblage robotisées. Basée sur la méthode de Tsai [8] utilisant un artefact composé de 2 sphères, elle nécessite un très grand nombre d'images.

Dans le cas d'identification de droites dans le plan image, Dornaika et al. [9] proposent une extension des méthodes développées par Faugeras et Toscani [4] et Lavest et al. [5] par la prise en compte des vecteurs directeurs des droites. Ils aboutissent aussi à la résolution d'un problème non linéaire minimisant la description paramétrique des droites. Ma et al. [10] réalisent une étude de calibration à partir de droites. La différence principale porte sur la modélisation des droites comme intersection de 2 plans. Pour des systèmes multi-caméra, des relations de correspondance entre une même ligne présente sur 3 images sont utilisées par Hartley [11] pour réaliser les positions et orientations relatives entre les caméras.

Ces différentes études permettent d'obtenir la calibration complète d'une caméra, mais nécessitent la prise de vue d'une mire d'étalonnage ou d'un artefact de calibration. Beaubier et al. [12] proposent une technique de calibration originale basée sur une étude de stéréo-corrélation en utilisant directement la pièce d'étude comme mire de calibration. Cette méthode permet ainsi le positionnement de la caméra par rapport à un référentiel lié à la CAO.

Dans le cadre de la mesure in-situ, une calibration utilisant des éléments présents directement dans la scène est nécessaire. De plus, l'utilisation du repère CAO de fabrication comme repère monde ($R_w=R_{CAO}$), permet de réaliser par la suite une mesure dans le même repère que la fabrication et ainsi s'affranchir d'éventuelles erreurs de recalage. Ceci permet aussi de prendre en compte d'éventuelles corrections suite à la mesure sur la fabrication. L'étude suivante porte donc sur une nouvelle méthode de calibration basée sur un montage d'usinage et son modèle CAO.

B. Principe de la calibration extrinsèque sur entités

La méthode que nous proposons s'appuie sur la mise en correspondance d'éléments d'un montage d'usinage, définis dans le modèle CAO d'une part et extraits d'une image d'autre part. Ainsi, le repère monde R_w correspond au repère CAO du montage d'usinage (Figure 3). Dans cette étude, nous considérons que les paramètres intrinsèques ont été déterminés au préalable et nous ne nous intéressons qu'à la calibration des paramètres extrinsèques. Ainsi, la transformation $M = A.D.P$ du repère image R_p au repère caméra R_c est connue, et l'étude porte sur l'identification des composantes de la transformation entre R_{CAO} et R_c , c'est-à-dire l'identification des paramètres de rotation R_{3*3} et de translation t .

La mise en correspondances des éléments 3D issus du modèle CAO avec ces mêmes éléments extraits de l'image permet d'obtenir la relation complète entre le repère R_{CAO} et le repère image R_p (Figure 3). La calibration intrinsèque étant réalisée, la transformation M est connue et la transformation T est simplement déduite de l'équation (1).

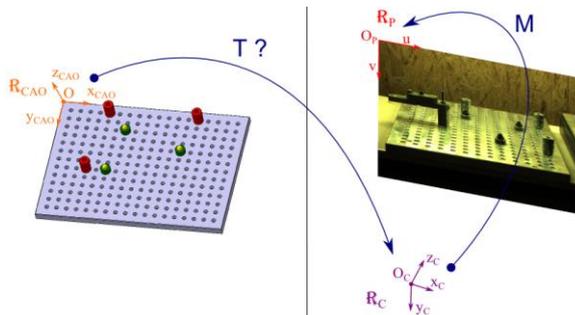


Figure 3. PRINCIPE GENERAL DE LA CALIBRATION

Afin de réaliser la mise en correspondance, les éléments 3D doivent être facilement identifiables dans l'image. Ainsi, nous avons retenu pour la calibration les éléments listés dans le Tableau 1. Ce tableau met en avant les éléments géométriques 3D du modèle CAO, les éléments 2D correspondants détectés sur l'image et enfin les éléments 2D extraits et utilisés pour la calibration.

La transformation T est caractérisée par 6 paramètres : 3 angles pour la rotation R_{3*3} et 3 distances pour la translation t . Un ensemble d'éléments conduisant à un minimum de 6 équations indépendantes doit donc être choisi pour définir complètement la transformation T . Il est important de souligner que nous faisons ici l'hypothèse que le modèle CAO du montage d'usinage représente parfaitement le montage réel.

Élément 3D (modèle CAO)	Élément 2D (détecté sur image)	Élément 2D extrait
Cylindre	2 génératrices du cylindre	Axe (bissectrice)
Sphère	Cercle	Point (centre)
Intersection plan/plan	Axe	Axe
Cercle	Ellipse	Point (centre)

Tableau 1. ELEMENT PRESENTS SUR UN MONTAGE D'USINAGE ET IDENTIFIABLE SUR IMAGE

C. Résolution du problème

À partir d'une solution initiale des paramètres extrinsèques, les éléments 3D du modèle CAO sont projetés sur l'image (dans R_p) grâce aux transformations T_{init} et M (Figure 4.a). Considérons le cas d'un point 3D C défini dans le repère CAO. C est projeté en C' dans R_p grâce à l'équation 1. Parallèlement, son équivalent 2D est extrait de l'image mesurée en D (Figure 4.b). De la même façon, la droite d_{CAO} est projetée dans le repère image en d_{image} et son équivalent 2D, d_{detect} , est extrait de l'image (R_p). Les éléments sont extraits par des techniques classiques de traitement d'image.

Ainsi pour chacun des éléments extraits de l'image R_p , il est possible d'associer une erreur de projection entre cet élément et la projection issue du modèle CAO (Figure 4.c). L'erreur associée à l'élément de type point est définie comme la distance (équation (3)) en pixels entre le point extrait de l'image (Figure 4.b) et le point équivalent 3D projeté dans le plan caméra (Figure 4.a). Concernant, les éléments de type droite, deux erreurs sont calculées correspondent aux distances des extrémités du segment projeté à la droite extraite de l'image (équation (4)). L'opérateur d représente la distance point-droite dans le cas de la droite et la distance point-point dans le cas du point.

$$\text{éq. (3): } e_{point} = d(C', D)$$

$$\text{éq. (4): } \begin{cases} e_{axe}^1 = d(A', d_{detect}) \\ e_{axe}^2 = d(B', d_{detect}) \end{cases}$$

Pour un ensemble de n points et m droites, il est possible de construire un vecteur erreur $E(\Phi)$ de dimension $2*m+n$ où $\Phi = \{\phi, \theta, \psi, t_x, t_y, t_z\}$ représente les inconnues du problème (paramètres extrinsèques). Le problème de calibration revient donc à la minimisation de la fonction $F = E^T E$. Les équations (5) à (9) mettent en avant la méthode classiquement utilisée. Un développement au premier ordre de la fonction erreur autour de la solution initiale Φ_0 est effectué :

$$\text{éq. (5): } E(\Phi) = E(\Phi_0) + \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right]_{\Phi_0} . d\Phi$$

Notons $A = \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right]_{\Phi_0}$ la Jacobienne de E .

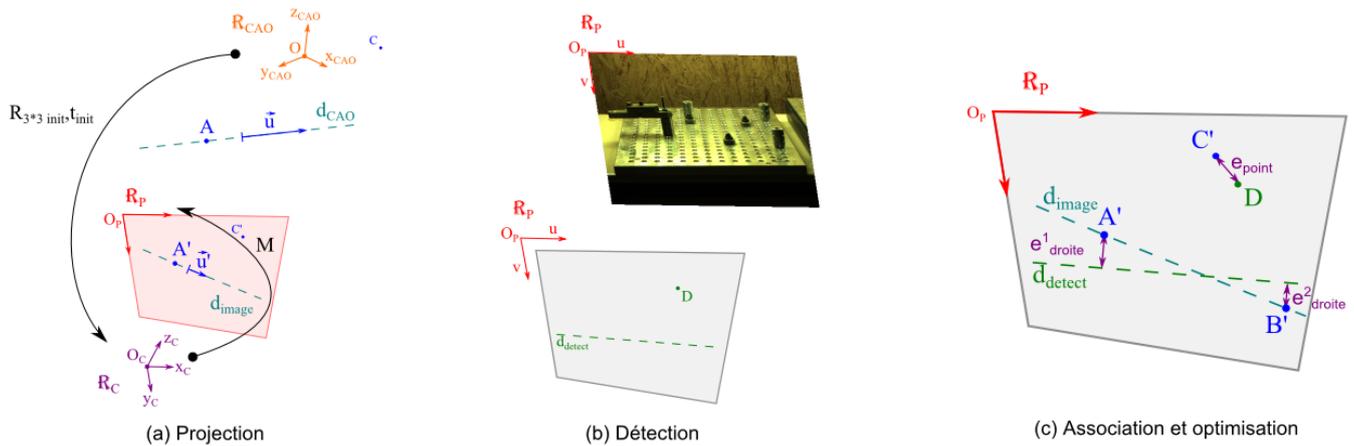


Figure 4. PRINCIPE DE LA CALIBRATION EXTRINSEQUE SUR ENTITES (A) PROJECTION DES ENTITES CAO SUR L'IMAGE (B) DETECTION DES ENTITES SUR L'IMAGE (C) ERREUR DE PROJECTION DANS LE CAS DE LA DROITE ET DU POINT

L'objectif étant de trouver Φ minimisant F , cela donne :

$$\text{éq. (6): } \frac{\partial F}{\partial \Phi} = 2 \cdot E^T \cdot \frac{\partial E}{\partial \Phi} = 0$$

En considérant la Jacobienne de E , on obtient :

$$\text{éq. (7): } A^T \cdot E = 0$$

Or

$$\begin{aligned} \text{éq. (8): } A^T \cdot E &= A^T \cdot (E(\Phi_0) + A \cdot d\Phi) \\ &= A^T \cdot E(\Phi_0) + A^T \cdot A \cdot d\Phi = 0 \end{aligned}$$

Finalement

$$\text{éq. (9): } d\Phi = -(A^T \cdot A)^{-1} \cdot (A^T \cdot E(\Phi_0))$$

III. APPLICATION DE LA METHODE

La méthode de calibration sur entités est appliquée sur le montage présenté sur la Figure 3. À partir de la sélection manuelle sur l'image de 6 points identifiés dans le modèle CAO, une solution initiale des paramètres extrinsèques peut être calculée conduisant à définir (T_{init}). Parallèlement, les entités participant à la calibration (droites et/ou points) sont extraites de l'image. Cette extraction est réalisée à partir d'éléments (Tableau 1) présents sur le montage d'usinage et identifiables dans l'image. Dans notre application, ils sont principalement composés de génératrices de cylindres. Ces cylindres servant à la réalisation d'appuis ponctuel et linéique dans notre application. Les intersections du plan de référence et des plans latéraux de la plaque de base du montage sont aussi utilisées. Le positionnement relatif de toutes ces entités est obtenu avec une incertitude inférieure à 0.02 mm pour la plupart des fournisseurs d'éléments modulaires.

Actuellement ces éléments sont choisis de façon à disposer de suffisamment d'information pour réaliser la calibration. Ils doivent permettre d'identifier les 6 degrés de liberté positionnant le repère caméra par rapport au repère CAO. Pour cela l'ensemble des éléments extraits doit correspondre à au moins trois droites non coplanaires et non parallèles ou trois points dans le modèle CAO [13]. Cependant, leur nombre et leur position dans le plan image ne sont pas optimisés.

La première étape consiste à appliquer un filtre de Canny au niveau des zones de l'image à analyser, par exemple sur la Figure 5.a où les contours d'un cylindre sont observés. Rappelons que dans le cas de cette entité, ce sont les deux génératrices qui sont détectées afin d'identifier l'axe du cylindre défini comme la bissectrice des deux génératrices. Ainsi, la seconde étape consiste à analyser les contours obtenus afin de déterminer les génératrices du cylindre grâce à la transformée de Hough (droites vertes sur la Figure 5.b). Finalement, la bissectrice du cylindre peut être construite (droite jaune sur la Figure 5.b) puis utilisée comme élément de calibration.

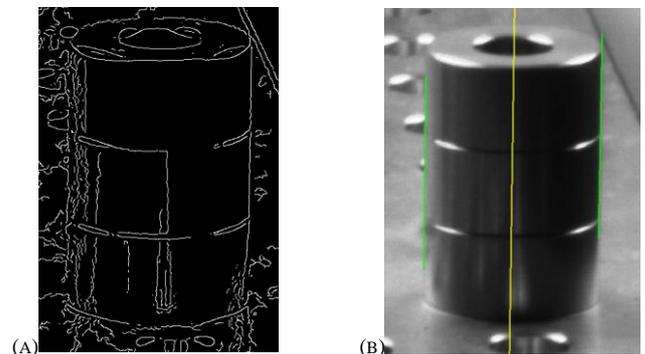


Figure 5. DETECTION ET EXTRACTION DES ELEMENTS POUR LA CALIBRATION (A) FILTRE DE CANNY (B) TRANSFORMEE DE HOUGH ET CONSTRUCTION DE LA BISSECTRICE

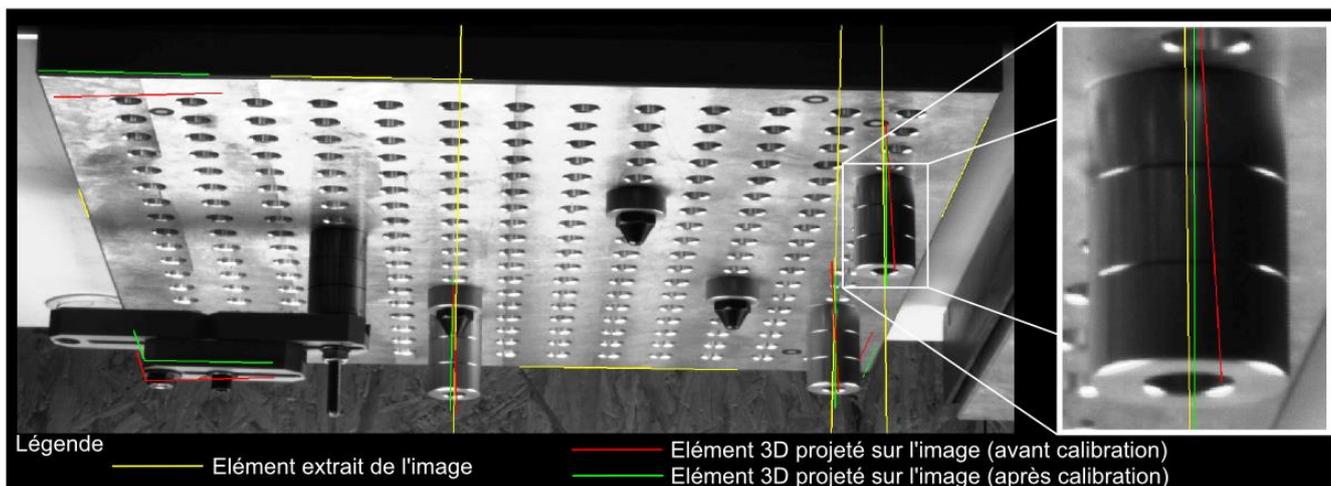


Figure 6. RESULTATS DE LA CALIBRATION EXTRINSEQUE SUR ENTITES

Après appariement des entités 2D extraites de l'image avec les entités 3D projetées dans le plan image par la transformation initiale T_{init} , le problème d'optimisation est résolu grâce à la méthode des moindres carrés décrite précédemment. Les résultats de calibration obtenus sont présentés sur la Figure 6. Sur cette figure, les éléments jaunes représentent les entités, utilisées pour la calibration, extraites de l'image (Figure 5.b), les éléments rouges représentent les entités 3D projetées dans le repère image R_p par la transformation initiale T_{init} (résultats de calibration avant optimisation). Finalement, les éléments verts représentent les entités 3D projetées dans l'image après optimisation.

La méthode employée permet de diminuer l'erreur maximale de reprojection (exprimée en pixels) de 80% avant et après optimisation. Ceci montre bien la pertinence de la méthode présentée pour l'optimisation de la transformation du repère CAO R_{CAO} au repère Caméra R_c , T . néanmoins un décalage subsiste toujours entre les éléments de la CAO projetés et les éléments extraits.

Cette erreur dans la détermination de la transformation provient de deux facteurs prépondérants : l'écart entre le modèle CAO du montage et le montage réel et l'erreur réalisée sur l'extraction des entités présentes dans l'image. En effet malgré la grande qualité des pièces servant à la réalisation du montage,

les dimensions et les positions des composants du montage ne sont pas dans une configuration identique au modèle CAO. De plus l'extraction dépend de la qualité de l'image réalisée, mais aussi de la méthode employée (valeur des filtres, type de filtre, etc.). Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à évaluer l'influence de la méthode d'extraction d'entités sur l'incertitude associée à la méthode de calibration extrinsèque sur entités.

Une étude de sensibilité est donc menée en considérant des incertitudes associées aux positions et orientations des éléments extraits de l'image (Figure 7). Considérons le cas d'une droite extraite de l'image correspondant à l'axe d'un cylindre (Figure 5). Le modèle associé dans le repère image R_p est $y=a.x+b$, dans lequel a représente la pente et b l'ordonnée à l'origine de la droite extraite. Une incertitude, modélisée par une distribution Gaussienne caractérisée par son écart-type σ , est associée à chacun des paramètres a et b . La valeur de l'écart type σ est déterminée par des itérations de l'analyse d'image (Filtre de Canny et transformée de Hough) qui conduit à la détermination des paramètres de la droite extraite. Finalement, l'incertitude de la méthode de calibration est obtenue par une simulation Monte-Carlo de 1000 tirages.

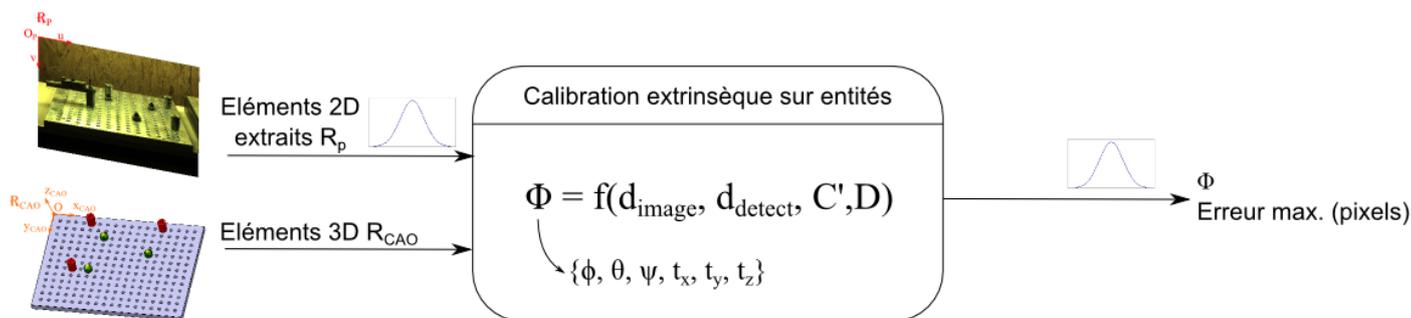


Figure 7. DETERMINATION DE LA SENSIBILITE DE LA METHODE DE CALIBRATION PAR SIMULATION MONTE-CARLO

Les résultats mettent en avant un écart-type de l'erreur maximale de calibration de 0.0341 pixels. Cette erreur, relativement faible, montre que la méthode de calibration est peu sensible aux erreurs associées à l'extraction des entités. L'erreur résiduelle de la calibration est donc principalement due aux défauts du montage d'usinage. En effet, les dimensions et positions relatives entre les différents éléments du montage réel ne sont pas exactement identiques à celles de son modèle CAO. L'hypothèse faite précédemment, que le modèle CAO représente parfaitement le montage réel, n'est donc pas vérifiée. Pour ce faire, il est nécessaire de construire le modèle CAO à partir de la mesure des éléments du montage réel.

IV. CONCLUSION

Dans cette étude, une nouvelle méthode de calibration de caméra basée sur le modèle CAO d'un montage d'usinage est présentée. Cette technique permet de travailler directement dans le repère lié au modèle CAO du montage d'usinage, et est donc adaptée pour réaliser une mesure de pièce in-situ par vision. En effet, le repère de mesure est ainsi confondu avec celui de fabrication ; des éventuelles corrections sur le procédé pourront donc être prises en compte directement après la mesure. De plus, les opérations de recalage entre les données mesurées et les données nominales peuvent être supprimées, car les repères seront confondus.

L'appariement d'entités CAO aux entités extraites de l'image est la clé de la résolution du problème de calibration. Les premiers résultats obtenus montrent la pertinence de cette nouvelle méthode. Ils montrent également que la méthode est peu sensible aux erreurs d'extraction des entités en 2D. Les travaux futurs porteront sur l'étude de la sensibilité de la méthode relativement au choix des entités utilisées, pour finalement proposer un montage d'usinage adapté à la calibration, à la fabrication et à la mesure in-situ.

V. REFERENCES

[1] F. Chen, C. Su. Vision-based automated inspection system in computer integrated manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer-Verlag, 11, 1996, 206-213.

[2] B. Karabagli. Vérification automatique des montages d'usinage par vision : application à la sécurisation de l'usinage. Université de Toulouse Le Mirail (France), 6 novembre 2013

[3] R. Ahmad, S. Tichadou, J.-Y. Hascoet. Integration of vision based image processing for multi-axis CNC machine tool safe and efficient trajectory generation and collision avoidance, *Journal of Machine engineering*, 2011.

[4] O. Faugeras, G. Toscani. Camera calibration for 3D computer vision, *International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, 1987, pages 240-247.

[5] J.-M. Lavest, M. Viala, M. Dhome. Do we really need an accurate calibration pattern to achieve a reliable camera

calibration? *Computer Vision ECCV'98*, Vol. 1406, 1998, pages 158-174.

[6] J.-Y. Bouguet. Camera calibration toolbox for matlab, 2010.

[7] M. Douilly. Contribution à l'amélioration de la qualité géométrique de positionnement d'un robot anthropomorphe dans le cas d'assemblage de structures aéronautiques. Ecole Normale Supérieure de Cachan, 24 mars 2009

[8] R. Y. Tsai. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, 1986, pp. 364-374.

[9] F. Dornaika, C. Garcia. Robust camera calibration using 2D to 3D feature correspondences, In *Proceedings of the International Symposium SPIE Optical Science Engineering and Instrumentation, Videometrics V*, Vol. 3174, 1997, pp. 123-133.

[10] S. Ma, G. Wei, J. Huang. Segment based camera calibration. *Journal of Computer Science and Technology*, 1993, 8(1):11-16.

[11] R. I. Hartley. Camera calibration using line correspondences. In *Proc. DARPA Image Understanding Workshop*, 1993, pages 361-366.

[12] B. Beaubier, J.-E. Dufour, F. Hild, S. Roux, S. Lavernhe, K. Lavernhe-Taillard. CAD-based calibration and shape measurement with stereodic, *Experimental Mechanics*, 2013, pages 1-13.

[13] R. M. Haralick, C.-H. Lee, K. Ottenberg, M. Nölle. Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem, *International Journal of Computer*, 13, 3, 1994, 331-356.