

FORME OPTIMALE DE MIRE POUR LE CALIBRAGE DE CAMERAS VIDEO

Vincent FRISTOT, Pierre Yves COULON

Laboratoire de Traitement d'Images et de Reconnaissance des Formes - INPG
46, Avenue Félix Viallet
38031 Grenoble Cedex.

RÉSUMÉ

Pour obtenir un système de mesure à l'aide de caméras vidéo ayant une précision maximale, il est nécessaire d'étudier la mire de calibration dans le contexte de la chaîne d'acquisition. Des algorithmes spécialisés dans le repérage des points de référence, sont choisis en liaison avec le motif qui compose la mire.

En pratique, les motifs en *carré* ou en *disque* donnent des résultats semblables, principalement à cause de leur grande dimension. Nous détaillons les mesures réalisées avec ces mires.

L'optimisation de la localisation des points de référence sur l'image peut être envisagée avec un motif en *damier*, par un repérage local, au voisinage du coin. Un algorithme de détection « subpixel » est proposé dans ce cas.

ABSTRACT

To obtain the highest precision on a measurement system with video cameras, it is necessary to study a calibration pattern in the acquisition sequence context.

Specialized algorithms are chosen according to the pattern in order to locate reference marks.

Practically, the use of a square or a disc pattern, gives the same results, especially because of their large dimension. Measurements are detailed using these patterns.

Optimal localization of marks on the digitalized image can be made with a draught board pattern, and a localization near the corner. A subpixel detection algorithm is proposed in this case.

I. Introduction

Les systèmes de mesure à base de caméras vidéo nécessitent un calibrage des capteurs. Cette procédure utilise généralement les images d'une mire dont on connaît précisément les caractéristiques spatiales.

La modélisation du système d'acquisition des images met en évidence les paramètres de la transformation objet-image.

Le calibrage permet alors de déterminer la valeur de ces paramètres en écrivant les équations qui lient les coordonnées des points de référence (de calibrage) sur la mire et les coordonnées de leurs images.

La figure 1 représente les images d'une mire de calibration.

Lorsqu'on recherche une précision maximale, il faut prendre le plus grand soin à l'acquisition de l'image (pour une mesure 2D) ou du couple d'images (pour une mesure 3D), utiliser une méthode de localisation dont la précision est inférieure à la taille d'un pixel, dite "subpixel" ainsi qu'une forme adaptée des motifs qui composent la mire. Pour des applications en stéréovision, nous soulignons l'importance de la localisation sur le couple d'images pour une bonne reconstruction en dimension z.

Nous allons exposer le cadre de ce travail en précisant le principe du calibrage des caméras vidéo pour un système de mesure de haute précision. L'étude des résultats obtenus à l'aide de formes classiques de mire permet d'appréhender leurs principales limitations. Nous proposons en conséquence un motif adapté à une détection optimale.

1.1. Limitations de la précision de mesure

L'ensemble de la chaîne d'acquisition conditionne la précision du système [1]. Examinons successivement les différentes limitations à la précision :

Avant la projection sur la cible photosensible, l'éclairage de la scène, la précision du tracé de la mire et les défauts inhérents à l'objectif de la caméra vidéo constituent les premiers éléments.

L'image est ensuite convertie en charges électriques avec une certaine non-linéarité et un bruit propre à la technologie CCD. Le signal vidéo, de luminance, est perturbé par les horloges rapides au niveau de la caméra. Le convertisseur analogique-numérique sur la carte d'acquisition introduit aussi un bruit de digitalisation. Nous avons mesuré sur l'image numérique un rapport signal sur bruit global de 30 dB.

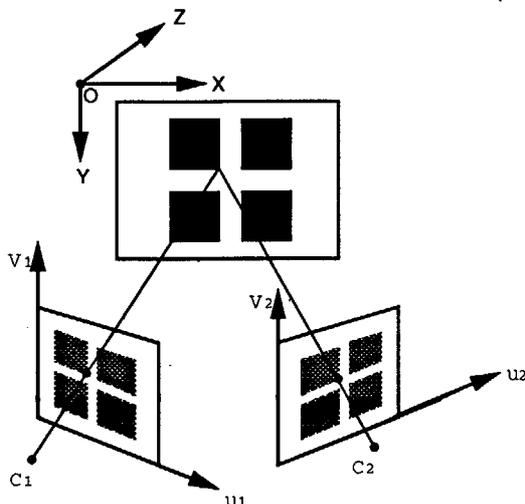


Fig 1. Mire de calibration pour un système stéréoscopique



Une fois les images numérisées et mémorisées, des algorithmes adaptés vont localiser, le plus finement possible, les points de référence. Nous verrons que la méthode de localisation sur les images numériques est adaptée à la géométrie des motifs. Le choix du motif de la mire est lié à la méthode de localisation ; il peut diminuer l'influence des facteurs limitant la précision.

Pour nos expériences, nous avons opté pour les choix suivants : Le capteur vidéo stéréoscopique est monté sur un banc optique (Micro-Contrôle), la mire qui contient des motifs phototraccés, est rétro-éclairée de manière uniforme. Sur cette mire, nous avons mesuré les cotes des points de référence au microscope pour atteindre une résolution du micron. L'électronique d'acquisition a été optimisée ; le convertisseur analogique numérique est commandé par l'horloge de lecture des pixels issue de la caméra CCD [6]. Des algorithmes de localisation à la précision « subpixel » sont ensuite mis en oeuvre. Enfin, comme le sujet est statique, nous accumulons 50 images afin de réduire le bruit de l'image numérique, par filtrage temporel. Le rapport signal sur bruit global s'élève alors à 50 dB sur l'image ainsi obtenue.

1.2. Calibrage des paramètres

Le calibrage géométrique d'une caméra consiste à établir la transformation ponctuelle qui, à tout point $M(x,y,z)$ de l'espace tridimensionnel rapporté à un référentiel « objet », associe un point $m(u,v)$ de l'espace bidimensionnel du plan image dans le référentiel « image ».

Dans la pratique, pour calibrer une caméra, on utilise des points caractéristiques de la scène 3D (points de référence), dont on connaît la position avec précision dans le référentiel lié à l'objet. La modélisation du système de prise de vues définit les paramètres (distance focale, position du centre optique, coefficients de distorsion radiale, transformation entre les référentiels objet et image ...) de la transformation objet-image. Ces mêmes paramètres seront utilisés pour la reconstruction tridimensionnelle image-objet.

En écrivant les équations qui lient les paramètres pour les points de référence utilisés, on obtient un système d'équations surdimensionné qui permet leur calcul.

Après étude de plusieurs algorithmes, nous avons retenu la méthode de Tsai [2] [3], dont les paramètres ont une signification physique réelle. La résolution des équations fait intervenir une contrainte physique pour séparer les paramètres intrinsèques (propres au capteur) et extrinsèques (pour le changement de référentiel) à partir de points de référence coplanaires. Nous utilisons, pour cette méthode, entre 40 et 75 points de référence sur la mire.

II. Motifs classiques de mires pour le calibrage de caméras vidéo

Plusieurs types de motifs ont été utilisés par les auteurs d'algorithmes de calibrage. Plus la localisation des points de référence (sur l'image de la mire) est précise, meilleure devient la détermination des paramètres recherchés.

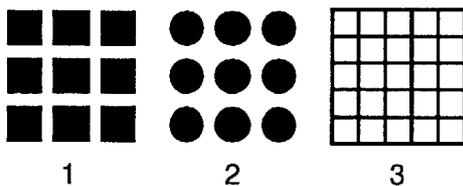


Fig 2. Motifs de mires les plus courants

De nombreuses mires ont été proposées dans la littérature, (figure 2), allant des carrés [2], disques [9] ou grilles [8] à des systèmes qui intègrent des petites LEDs [7].

Nous allons développer le cas des motifs simples, « carré » et « disque ».

2.1. Coins d'un carré

La mire est composée d'un ensemble de carrés dont la longueur du côté est connue ou mesurée. Les quatre coins des carrés constituent les points de référence ; ils doivent être localisés sur l'image numérique.

Pour un coin du carré, on détecte d'une part, les points de la transition verticale et d'autre part, les points de la transition horizontale à l'aide d'un opérateur « subpixel ». Ensuite, une régression linéaire est appliquée aux deux sous-ensembles de points (horizontaux et verticaux) pour obtenir les équations des droites correspondantes. Les coordonnées image du coin du carré sont calculées par intersection des deux côtés sécants.

Le point de référence « image » est détecté ainsi avec une bonne précision ; sa détermination repose dans la pratique sur une centaine de points de contour.

2.2. Centre d'un disque

La mire est composée de disques dont les centres représentent les points de référence.

Voici l'algorithme de localisation des centres que nous avons utilisé [7] :

Sur l'image, pour la recherche du point central d'un disque, nous distinguons les points intérieurs de ce disque des points de la circonférence avec une procédure d'extraction de contour classique. Les coordonnées du centre sont obtenues en calculant le barycentre des points intérieurs de ce disque affectés du coefficient 1, et des points de la circonférence affectés du coefficient $n(p)/n_{max}$, où $n(p)$ désigne le niveau de gris du point, et n_{max} le niveau de gris maximum du disque blanc. Par cette méthode, on pondère le barycentre des points intérieurs par la contribution des pixels en circonférence du disque.

2.3. Résultats

Pour le motif carré, nous avons mesuré l'erreur maximale sur les coordonnées des coins à 1/10ème de pixel, avec une moyenne à 1/20ème de pixel sur l'image numérique.

Pour le motif disque, la méthode est plus rapide, avec aussi, au maximum, une erreur de 1/10ème de pixel sur les coordonnées image.

Pour évaluer les performances de notre système de mesures tridimensionnelles, nous avons utilisé ces deux mires pour le calibrage des caméras.

L'erreur de reconstruction des coordonnées des points de référence (coordonnée z) permet une évaluation de l'erreur de mesure et permet de comparer les méthodes. La figure 3 montre l'amplitude de cette erreur pour 2 séries de mesures sur un couple d'image comprenant 42 points de référence, ceci pour chaque type de mire. Nous exprimons l'erreur de reconstruction en une fraction du champ objet qui était de 24mm dans notre expérience. Le 1/1000ème du champ correspond à 24 μ m sur l'objet.



III. Définition d'une mire optimale

3.1. Détection locale

Pour s'affranchir de l'influence de la distorsion géométrique de l'objectif que l'on ne connaît pas lors de la procédure de localisation, nous choisissons d'étudier localement la position du motif. Ceci nous permet de considérer cette distorsion géométrique sur la zone de travail comme étant constante. La forme en disque est à rejeter car la précision de la méthode de localisation diminue avec la taille du motif. Nous allons donc choisir un motif rectiligne et utiliser le filtrage Laplacien gaussien ($L \cdot G$) comme opérateur subpixel pour la localisation. Cet opérateur était utilisé dans le cas des motifs carrés.

3.2. Filtrage Laplacien Gaussien

La localisation des contours rectilignes est réalisée en cherchant les lieux de passage par zéro de l'image filtrée par un noyau de type passe-bande qui coupe les hautes fréquences (gaussien) tout en détectant les transitions de luminosité (laplacien) [5].

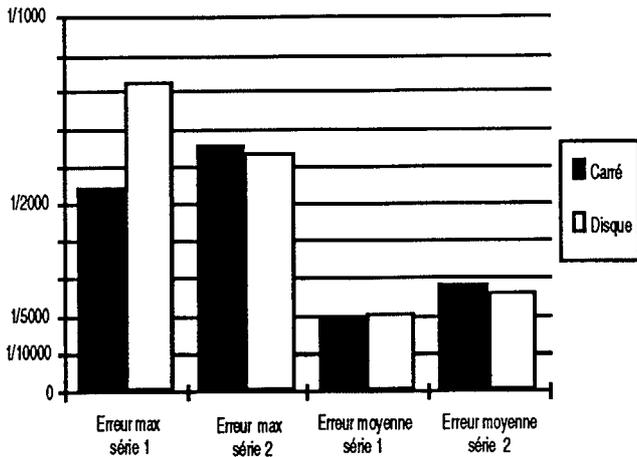


Fig 3. Erreur de reconstruction en z pour les points de calibrage.

Nous concluons que les motifs de la mire de calibrage en carré ou en disque ont des performances comparables, aussi bien pour l'erreur maximale (garantie à 1/1000 ème du champ) que pour l'erreur moyenne (à 1/5000 ème du champ environ).

En cherchant à améliorer la précision de la localisation des points de référence sur l'image numérique, nous avons étudié la contribution de la distorsion géométrique radiale due aux lentilles des objectifs des caméras. Nous en corrigeons les effets sur les coordonnées image des points de référence trouvés par la phase de localisation. A cause de la taille importante des motifs qui nous permet de faire une régression linéaire pour le carré ou un barycentrage pour le disque, cette distorsion déforme les motifs et contribue à une part significative de l'imprécision de localisation d'après nos résultats de simulation.

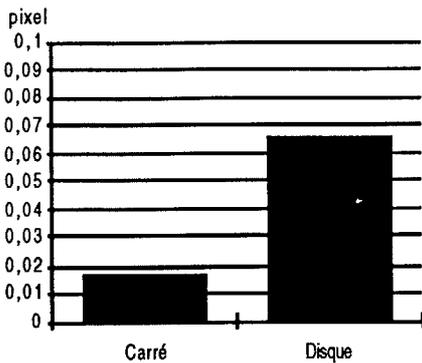


Fig 5. Erreur de localisation due à la distorsion de l'objectif

La figure 5 représente l'influence de la distorsion sur la localisation pour chaque type de mire. La précision de la méthode de localisation, qui s'élève à 1/10 ème de pixel est très affectée dans le cas des disques, par l'effet de la distorsion géométrique.

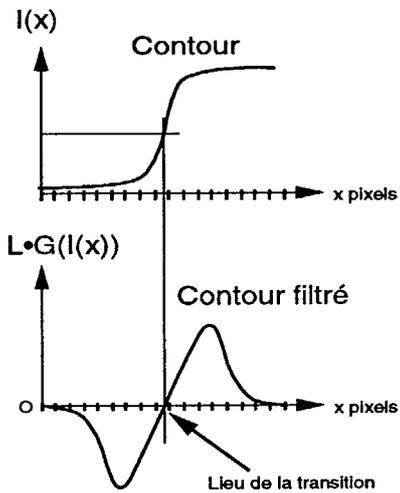


Fig 6. Localisation par filtrage $L \cdot G$

Berzins étudie la réponse d'un tel filtre pour le coin d'un carré [4], il montre que le laplacien (qui n'est pas ici une dérivée isotrope) introduit une erreur au voisinage immédiat du coin qui est préjudiciable lors de la régression linéaire.

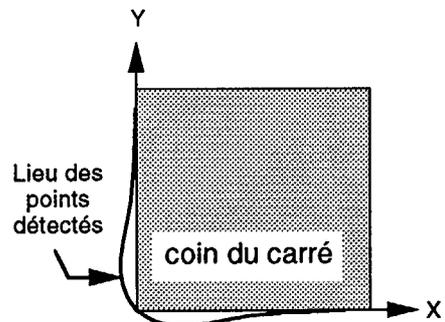


Fig 7. Erreur de localisation par filtrage $L \cdot G$ au voisinage d'un coin.

Lorsque le côté adjacent est pris en compte dans la convolution (à moins de 6 pixels du coin pour le cas d'un masque $L \cdot G$ de 11×11), il y a perturbation de la localisation (fig 7). Dans le cas du motif carré, notre algorithme de localisation rejette ces points situés à proximité du coin.

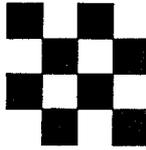


3.3. Proposition du motif damier

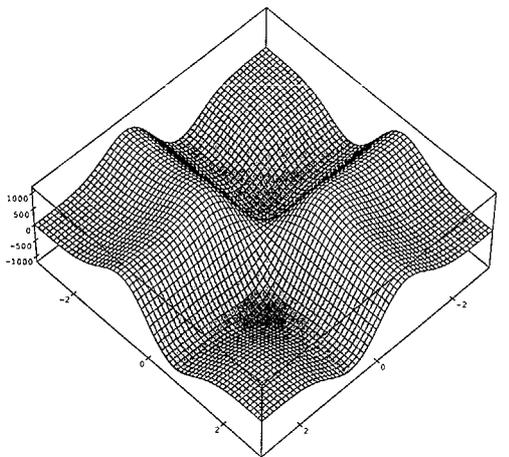
Le motif damier (fig 8.a) n'affecte pas la localisation par l'opérateur L•G, même à proximité du coin car les effets de la transition adjacente s'annulent.

Nous proposons une mire dont les points de référence sont les coins du motif damier.

Voici la réponse simulée du filtre L•G à cette image.



8.a



8.b

Fig 8. Réponse L•G à un coin du motif damier

Ainsi, les motifs sont de dimensions plus réduites (ce qui était exclu lorsque l'on faisait des régressions linéaires ou des barycentrages). Il devient possible de tracer un plus grand nombre de points de références par unité de surface de mire.

La méthode de localisation peut être la suivante :

- Détection du pixel central avec un algorithme de contour classique, au pixel près.
- Filtrage L•G dans un voisinage suffisant pour faire apparaître la réponse de la figure 8.b
- Calcul itératif des coordonnées du point de référence par minimisation de l'erreur entre la réponse mesurée et une réponse simulée en ce point.

Conclusion

A partir des résultats de la reconstruction 3D pour des systèmes calibrés avec des motifs en carré ou en disque, nous avons montré qu'une détection locale des points de référence conduit à diminuer les sources d'erreur de cette détection.

L'influence de la distorsion géométrique de l'objectif limite la précision de détection sur des motifs de grande dimension. Nous ne pouvons envisager une réduction de la taille des motifs qui augmenterait le poids de l'erreur au voisinage du coin pour le carré ou l'erreur de barycentrage sur un faible nombre de points pour le disque.

Le motif en damier répond alors à deux exigences : une détection locale au voisinage du coin et un nombre de points de référence plus important.

A partir de la méthodologie proposée, nous travaillons aux expériences pratiques qui viendront valider cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] **Métrieologie par stéréovision. Acquisition synchrone et précision subpixel pour la calibration.** Fristot 92, Thèse de doctorat INPG, Grenoble 2 Juillet 92.

[2] **A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy Machine Vision Metrology Using Off the Shelf TV Cameras and Lenses,** Tsai 86, IEEE Journal of Rob. and Autom.-3, n° 4, Aug 87, 323-344.

[3] **Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3D machine vision metrology,** Lenz 87, IEEE Trans. PAMI-10, no5, Sept 88, 713-719.

[4] **Accuracy of Laplacian Edge detectors.** Berzins 1984, Computer Vision, Graphics and Image Processing, n° 27, 1984, 195-210.

[5] **Detection of Intensity Changes with Subpixel Accuracy Using Laplacian-Gaussian Masks.** Huertas 1986, IEEE Trans. PAMI-8, n°5, Sept 86, 651-664.

[6] **Acquisition d'images avec synchronisation par l'horloge pixel. Application à la mesure tridimensionnelle.** Fristot 92, Proc COMDEM 92, 15-17 Juil 92, CETIM-Senlis, France, 430-435.

[7] **N.O.I.S.I.V : Un système pour l'expérimentation en vision passive tridimensionnelle par ordinateur.** RAGI 89, Thèse de doctorat INPT, Toulouse 16 Janvier 1989.

[8] **Vision artificielle en dimension trois.** Faugeras 88, Rapport CNRS Traitement d'Images: du Pixel à l'Interprétation, Aussois, 19-22 Avril 88.

[9] **Contribution à l'intégration de la vision dans la commande d'un robot.** Izaguirre 83, Thèse Université P. Sabatier, Toulouse, déc 83.