

Quelle précision pour une mire d'étalonnage?

Do we really need an accurate calibration pattern?

par Jean-Marc LAVEST*, Marc VIALA**, Michel DHOME*

* LASMEA
Laboratoire des Sciences et Matériaux pour l'Electronique, et d'Automatique
UMR 6602 du CNRS, Université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand
63177 Aubière cedex, France
lavest@lasmea.univ-bpclermont.fr dhome@lasmea.univ-bpclermont.fr

** CEA-LETI
Département d'Electronique et d'Instrumentation Nucléaire
Service Logiciels et Architecture
CEA/SACLAY
91191 Gif-sur-Yvette cedex
mviala@grue.cea.saclay.fr

résumé et mots clés

Cet article soulève le problème de l'influence des erreurs introduites par la métrologie d'une mire d'étalonnage sur la détermination des paramètres intrinsèques d'un capteur vidéo. Afin de s'affranchir de ces erreurs, une approche d'auto-calibrage est décrite permettant conjointement d'estimer les paramètres internes du capteur vidéo et la géométrie de la mire, au sein d'un formalisme d'étalonnage multi-images.

Par la problématique qu'il soulève, cet article coïncide avec les approches de *Shape from Motion* et d'*Auto-calibrage* des capteurs, en gardant cependant la spécificité d'être décrit selon un formalisme photogrammétrique et donc d'intégrer implicitement les aberrations géométriques des objectifs. Nous nous sommes attachés à insister sur l'aspect descriptif de la méthode pour permettre aux lecteurs une vision globale de la mise en œuvre du procédé.

Étalonnage, mire volumique, photogrammétrie, métrologie.

abstract and key words

The metrology of calibration patterns is often a real problem in computer vision to obtain a reliable estimation of the intrinsic and extrinsic parameters that model a video camera device. In order to take into account these errors a self-calibration method is described, that enables us to compute in the same time the traditional calibration parameters and the 3D geometry of the calibration pattern using a multi-images calibration algorithm. Experimental results shows that the proposed algorithm leads to reliable calibration results and proves that calibration errors no longer depend on the accuracy of calibration point measurement, but on the accuracy of calibration point detection in the image plane.

Camera calibration, Calibration pattern, Photogrammetry, Metrology.

1. introduction

L'utilisation de capteurs de vision à des fins de mesure nécessite dans de nombreux cas le recours à l'étalonnage des paramètres

internes de la caméra, plus connus sous le nom de paramètres intrinsèques.

Les techniques mises en œuvre [Bro71], [Tsa86], [FT87] s'appuient classiquement sur une mire volumique de géométrie parfaitement déterminée. Il s'avère dans la pratique que le choix important des objectifs que l'on est amené à utiliser (fish-

eye pour une inspection grand champ ou zoom [LL96] pour un examen de détail) rend difficile voire impossible l'étalonnage des caméras à partir d'une seule et même mire.

L'utilisation de mires spécifiques, adaptées aux contraintes de l'application, engendre des coûts de construction et de mesure qui sont non négligeables.

Dans cet article nous posons le problème de l'influence des erreurs introduites par la métrologie de la mire sur la précision des paramètres internes de la caméra.

Après une première partie qui pose rapidement le formalisme photogrammétrique utilisé ainsi que l'estimation de la précision sur les paramètres calculés, nous abordons successivement l'influence d'erreurs de métrologie de la mire, puis de la détection de la projection dans le plan image des points de la mire, sur les résultats d'étalonnage.

Afin de palier ces erreurs, nous décrivons par la suite une approche d'auto-calibrage capable d'estimer la géométrie de la mire en même temps que les paramètres internes de la caméra. L'expérimentation basée sur des données synthétiques puis réelles montre que l'approche préconisée est capable d'intégrer des erreurs importantes de la mire et laisse entrevoir un large domaine d'applications.

2. calibrage géométrique

Dans cette section, nous abordons le problème du calibrage des caméras CCD selon le formalisme utilisé en photogrammétrie [Bro71], [Fai76], [LI94a]. Le modèle de projection utilisé pour le processus de formation d'images se réfère au modèle sténopé, approximation du modèle optique de lentille mince.

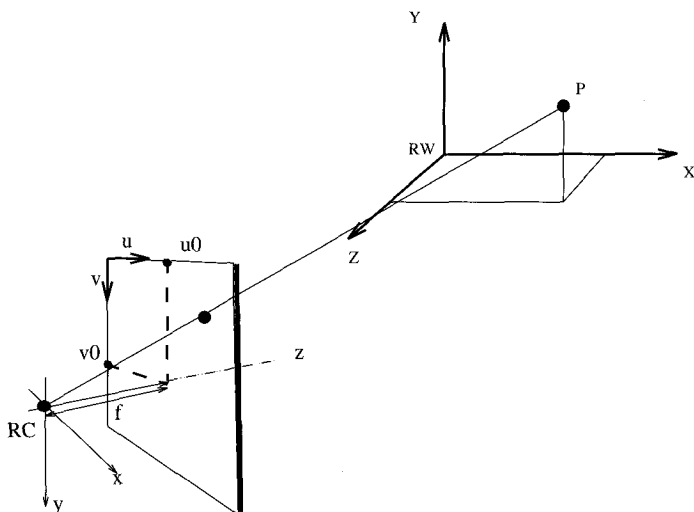


Figure 1. – Modèle Sténopé, Géométrie de l'Image et Systèmes de Coordonnées.

L'approche photogrammétrique se distingue par une modélisation fine des phénomènes de distorsion optique [Bro66] provoqués à la surface des lentilles et introduisant des déformations d'images plus ou moins importantes.

Les paramètres intrinsèques que nous devons déterminer sont : Le point principal $o(u_0, v_0)$, la distance focale f , la taille des pixels de la matrice CCD (dx, dy) ou leur rapport, et enfin les paramètres de distorsion optique introduits par l'objectif de la caméra.

Les paramètres extrinsèques sont composés de la matrice de rotation R et du vecteur de translation T qui définissent la transformation rigide entre le référentiel de la caméra et celui de l'objet.

2.1. modèle mathématique

Soit une projection perspective entre une image 2D et un objet 3D (sous une hypothèse sténopé). La relation entre un point de l'étalon et sa projection dans l'image est décrite par l'expression suivante :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \lambda_i \left[R \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + T \right] \quad (1)$$

Où :

- (x_i, y_i, z_i) est un point image défini dans le Référentiel Caméra (cf. figure 1 avec $z \equiv f$, i.e., la distance focale de la caméra),
- λ_i est un facteur d'échelle introduit lors du passage de R^3 à R^2
- (X_i, Y_i, Z_i) sont les coordonnées du point de la mire définies dans le référentiel du monde $W-XYZ$,
- (T_x, T_y, T_z) est le vecteur de translation,
- R la matrice de rotation, paramétrisée par les trois angles d'Euler. (α rotation autour de l'axe x , β autour de l'axe y , et γ autour de l'axe z)

En éliminant λ_i dans (1) et en supprimant l'indice i , nous obtenons les expressions suivantes appelées *équations de colinéarité* en photogrammétrie :

$$\left. \begin{aligned} x &= f \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \\ y &= f \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Si nous exprimons (x, y) dans le système de coordonnées pixel de l'image nous obtenons :

$$\left. \begin{aligned} x &= (u + e_x - u_0)dx - do_x \\ y &= (v + e_y - v_0)dy - do_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Dans cette expression e_x, e_y sont les erreurs de mesure respectivement selon les coordonnées x et y , (i.e., les corrections à apporter aux mesures pour qu'il existe une correspondance parfaite avec

les données issues de la fonction de projection). do_x, do_y sont les composantes de distorsion optique qui se divisent entre deux parties : distorsion radiale et tangentielle, (i.e., $do_x = do_{xr} + do_{xt}$ et $do_y = do_{yr} + do_{yt}$).

Nous introduisons ici, les deux formes communément utilisées en photogrammétrie [Ame84] :

$$\left. \begin{aligned} do_{xr} &= (u - u_0)dx(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6) \\ do_{yr} &= (v - v_0)dy(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} do_{xt} &= p_1[r^2 + 2(u - u_0)^2dx^2] \\ &\quad + 2p_2(u - u_0)dx(v - v_0)dy \\ do_{yt} &= p_2[r^2 + 2(v - v_0)^2dy^2] \\ &\quad + 2p_1(u - u_0)dx(v - v_0)dy \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

où dans les expressions (3), (4), et (5),

- u, v sont les coordonnées image dans le référentiel pixel,
- u_0, v_0 les coordonnées du point principal dans le référentiel pixel,
- a_1, a_2, a_3 les coefficients du polynôme qui modélise la distorsion radiale,
- p_1, p_2 les coefficients du polynôme qui modélise la distorsion tangentielle,
- dx, dy représentent les facteurs d'échelle du pixel élémentaire,
- le paramètre $r = \sqrt{(u - u_0)^2dx^2 + (v - v_0)^2dy^2}$, est la distance radiale depuis le point principal.

En substituant (3), (4) et (5) dans (2), nous obtenons le système suivant :

$$\left. \begin{aligned} u + e_x &= u_0 + (do_{xr} + do_{xt})/dx \\ &\quad + \left(\frac{f}{dx}\right) \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = P(\Phi) \\ v + e_y &= v_0 + (do_{yr} + do_{yt})/dy \\ &\quad + \left(\frac{f}{dy}\right) \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = Q(\Phi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

soit encore,

$$\left. \begin{aligned} e_x &= P(\Phi) - u \\ e_y &= Q(\Phi) - v \end{aligned} \right\} E(\Phi) \quad (7)$$

La projection perspective étant toujours définie à un facteur d'échelle, on fixe usuellement ($dx=1$). En posant $f_x = \frac{f}{dx}$ et $f_y = \frac{f}{dy}$, le vecteur de paramètres Φ à estimer prend alors la forme suivante :

$$\Phi = [u_0, v_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y, T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$$

2.2. résolution du problème

Le problème de calibrage consiste donc à estimer le vecteur qui minimise ($S = \sum_{i=1}^n (e_{x_i}^2 + e_{y_i}^2)$), où $P(\Phi)$ et $Q(\Phi)$ sont des fonctions non linéaires de Φ .

Un moyen de résoudre ce problème est de faire une linéarisation de (7) à partir d'une valeur initiale Φ_0 et de calculer un vecteur de correction $\Delta\Phi$ à apporter au vecteur de paramètres.

Soient n points 3D et leurs points correspondants dans l'image, on peut écrire sous forme matricielle le système de $2 \times n$ équations linéarisées :

$$V(\Phi) = E(\Phi_0) + \frac{\partial E}{\partial \Phi_i} \Delta\Phi_i \quad (8)$$

$$V = L + A \Delta\Phi \quad (9)$$

avec

$$L = E(\Phi_0) \quad \text{et} \quad A = E'_{\Phi_0} = \frac{\partial E}{\partial \Phi|_{\Phi=\Phi_0}}$$

L représente la valeur du critère et A la matrice jacobienne du système, autour du vecteur courant Φ_0 .

Soit la matrice de pondération des mesures¹ W ,

la résolution au sens des moindres carrés de (9) revient à estimer :

$$\min_{\Delta\Phi \in \mathbb{R}^{15}} (V^T W V) \quad (10)$$

En posant $\Omega = V^T W V$, nous devons obtenir à la solution du système que l'ensemble des dérivées partielles sur nos inconnues sont nulles; soit encore :

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} = 0, \text{ i.e.,}$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \Phi} = 2V^T W \frac{\partial V}{\partial \Phi} = 2V^T W A = 0, \implies A^T W V = 0$$

En substituant V par son expression extraite de (9), l'équation ci-dessus devient :

$$A^T W (L + A \Delta\Phi) = A^T W L + A^T W A \Delta\Phi = 0$$

ce qui conduit à la solution de $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = -(A^T W A)^{-1} (A^T W L) \quad (11)$$

1. En général, W est une matrice diagonale $2n \times 2n$. Si toutes les mesures sont faites avec la même précision et qu'il n'existe pas de corrélation entre les paramètres, alors W est la matrice identité : i.e., $W = I$.

2.3. calibrage multi-images

Une des causes principales de mauvais résultats de calibrage provient des erreurs de mesure (quelles soient dans l'image aussi bien que sur la mire).

Pour pallier ce problème, il est possible de combiner dans un même système plusieurs images provenant de la même caméra mais pour des positions spatiales (rotation et/ou translation) différentes.

Dans ce cas, les paramètres intrinsèques sont les mêmes pour toutes les images et le calibrage estime le vecteur de paramètres suivant :

$$\Phi_{9+6m} = \left[x_0, y_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y, T_x^1, T_y^1, T_z^1, \alpha^1, \beta^1, \gamma^1, \dots, T_x^m, T_y^m, T_z^m, \alpha^m, \beta^m, \gamma^m \right]^T$$

La matrice $A_{2mn \times (9+6m)}$ de (9) est alors de la forme :

$$A = \begin{bmatrix} & A_{2n \times 6}^{11} & & & & 0 \\ & & \ddots & & & \\ A_{2mn \times 9}^1 & & & A_{2n \times 6}^{ii} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & A_{2n \times 6}^{mm} \\ & & & 0 & & \end{bmatrix}$$

où m est le nombre d'images et n le nombre de points par image. Le nombre total d'équations est $(2mn)$ et le nombre total de paramètres est $(9 + 6m)$.

La redondance r , différence entre le nombre de mesures et le nombre d'inconnus, est donnée par $r = 2mn - 9 - 6m$, et prend une valeur bien plus importante que dans le cas d'un calibrage avec une seule image.

Un avantage important de l'approche multi-images est également de permettre une utilisation plus souple de la mire. En effet pour l'étalonnage des objectifs à focale courte, la mire ne peut jamais couvrir tout le champ de l'image. Une série de vues permet alors d'obtenir des données réparties sur toute la surface du capteur et de rendre beaucoup plus robuste l'estimation des paramètres de distorsion a_1, a_2, a_3, p_1, p_2 essentiellement pour les objectifs de courte focale.

3. précision

3.1. calcul théorique

A partir d'une estimation au sens des moindres carrés (9) et (10), il est possible de calculer une estimation du vecteur résiduel V :

$$\hat{V} = [I - A(A^T W A)^{-1} A^T W] L \quad (12)$$

ainsi que l'estimation de l'erreur standard de poids unitaire (*standard error of unit weight*), qui représente une estimation *a posteriori* du bruit σ_0 sur les points détectés dans l'image.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T W V}{r} \quad (13)$$

où r est la redondance du système.

La valeur de la matrice de covariance associée aux paramètres de Φ est donnée par :

$$C_\Phi = (A^T W A)^{-1} \quad (14)$$

Ainsi il est possible de calculer pour chaque paramètre ϕ_i , la précision de son estimée :

$$\hat{\sigma}_{\phi_i}^2 = \hat{\sigma}_0^2 c_{ii} \quad (15)$$

Un moyen de mesurer la fiabilité (qualité) d'un ajustement au sens des moindres carrés est de calculer la redondance relative du système [Tor81], i.e.,

$$q = \text{tr} \left[I - A(A^T W A)^{-1} A^T \right] = \frac{r}{N} \quad (16)$$

où dans (13) et (15), r représente la redondance, N est le nombre total d'équations de mesure, et c_{ii} est le *ieme* élément diagonal de la matrice de covariance C_Φ .

Comme nous l'avons noté, la redondance relative pour un calibrage multi-images, est bien plus importante que pour un calibrage simple. Il résulte une plus grande fiabilité dans les résultats du calibrage multi-images, $q_{multi} = \frac{r}{2mn} = 1 - \frac{9+6m}{2mn}$, par rapport à la résolution simple-image, $q_{single} = 1 - \frac{13}{2n}$. Si $m > 1$, alors $q_{multi} > q_{single}$.

3.2. facteurs expérimentaux

Il existe de multiples facteurs qui affectent la précision des paramètres calculés au cours d'un calibrage. Les répercussions sont non négligeables pour des applications de reconstruction par exemple. Rappelons quelques uns de ces facteurs :

- le nombre et la précision des mesures. La précision de mesure des points 2D dans l'image et des points 3D sur la mire sont les facteurs qui affectent le plus les résultats de calibrage. Usuellement, on suppose que les mesures sur la mire sont sans erreur, ce qui n'est pas vrai. En supposant toutefois que ces erreurs sont aléatoires, il résultera une erreur résiduelle dans l'image après l'optimisation des paramètres d'étalonnage;

- la configuration géométrique de la prise de vue, i.e., la relation entre la caméra et la mire de calibrage. On montre que cette configuration a des répercussions sur l'allure de la matrice de covariance du système est donc sur l'inter-dépendance des paramètres [LL97];

- le modèle mathématique utilisé pour la projection perspective et la correction des facteurs de distorsion;
- la stabilité du système d'acquisition. (Effet de jitter) [Bey92a];
- la cohérence photométrique nécessaire pour un étalonnage de qualité [Bey92a] [Tar96];

3.3. influence de la mire

L'influence de la mire peut être envisagée de plusieurs façons. Dans [LL97] les auteurs montrent que la forme géométrique de la mire influe notablement sur la corrélation entre les paramètres d'étalonnage.

Dans ce paragraphe nous souhaitons aborder l'influence d'une erreur de mesure tridimensionnelle de la mire sur la précision des paramètres d'étalonnage calculés.

Protocole

Soit une séquence de 11 images de synthèse représentant une mire de 11 points, observée à l'aide d'un objectif (focale 10 mm). La séquence est calculée de manière à permettre l'observation de la mire sous des points de vues fortement distincts. La caméra théorique est paramétrée par le vecteur suivant ($f_x = 1670, f_y = 1671, u_0 = 391, v_0 = 278$);

Le tableau 1 montre les résultats d'étalonnage pour différentes valeurs de bruit (en millimètres) introduit sur chaque coordonnée (x, y, z) de la mire. Le bruit le plus important représente un volume d'incertitude de localisation du point 3d de 8 mm^3 . L'encombrement de la mire représente un volume de $(0.6 \times 0.6 \times 0.4 \text{ m}^3)$; elle est observée à une distance d'environ 1,5 mètre.

L'écart-type associé à chacun des paramètres internes de la caméra est estimé à partir de l'expression (15).

Ces tableaux montrent l'influence importante de la qualité de la mire dans une approche d'étalonnage classique. On s'aperçoit d'une part que les paramètres intrinsèques sont rapidement affectés par ce bruit et d'autre part qu'une erreur supérieure à

Tableau 1. – Résultats d'étalonnage pour des erreurs croissantes (en mm) sur chaque coordonnée volumique des points de la mire.

bruit mm sur x,y,z	$f_x(\text{pix})$	$\sigma f_x(\text{pix})$	$f_y(\text{pix})$	$\sigma f_y(\text{pix})$
0.00 mm	1670.0	1.0e-9	1671.0	1.0e-9
0.01 mm	1668.92	0.21	1669.98	0.21
0.1 mm	1659.68	2.12	1661.24	2.15
0.5 mm	1626.55	10.26	1630.40	10.36
2.0 mm	1610.26	44.04	1623.36	44.59

bruit mm sur x,y,z	$u_0(\text{pix})$	$\sigma u_0(\text{pix})$	$v_0(\text{pix})$	$\sigma v_0(\text{pix})$
0.00 mm	391.0	1.0e-9	278.0	1.0e-9
0.01 mm	391.27	0.15	277.89	0.17
0.1 mm	393.66	1.55	277.10	1.72
0.5 mm	402.47	7.42	276.11	8.13
2.0 mm	422.83	30.01	296.10	32.00

(2 mm) sur chaque axe de la mesure des points de la mire fait diverger l'optimisation. Cette valeur critique est à rapprocher des conditions expérimentales précision/distance d'observation; on montrerait que l'étalonnage d'un fish-eye divergerait sur des erreurs de mesure de mire beaucoup plus faibles.

Notons également le biais sur les résultats introduit par une erreur de mesure de mire, pour l'approche multi-images. En effet, $(x + 3 \times \sigma_x)$ n'encadre pas toujours la valeur théorique définie pour ces expériences pour une valeur de bruit de 0.0 mm^3

Les bruits générés ici sont aléatoires et calculés selon une loi normale. On pourrait également envisager l'influence d'un biais mécanique de construction introduit, par exemple, par la non-orthogonalité des faces d'un cube d'étalonnage.

3.4. influence de détection des points dans l'image

Protocole

Le protocole expérimental reste le même que précédemment. Les points volumiques de la mire sont supposés, dans cette expérience, sans erreur de métrologie.

Les tableaux ci-dessous montrent les résultats d'étalonnage pour différentes valeurs de bruit (en pixel) introduit sur les coordonnées (u, v) des projections de chaque point de la mire.

Nous avons bien entendu gardé la même caméra de synthèse paramétrée par le vecteur de calibrage suivant ($f_x = 1670, f_y = 1671, u_0 = 391, v_0 = 278$);

L'analyse du tableau 2 montre qu'une détection sous-pixellique est indispensable pour réaliser un étalonnage de qualité. Au delà de 0.5 pixel les erreurs sur les paramètres intrinsèques de la caméra commencent à devenir importantes.

Tableau 2. – Résultats d'étalonnage pour des erreurs (en pixel) croissantes sur les coordonnées images, de la projection des points de la mire.

bruit (u,v) pix	$f_x(\text{pix})$	$\sigma f_x(\text{pix})$	$f_y(\text{pix})$	$\sigma f_y(\text{pix})$
0.00 pix	1670.00	1.0e-9	1671.00	1.0e-9
0.01 pix	1670.05	0.25	1671.07	0.26
0.02 pix	1670.16	0.77	1671.24	0.78
0.05 pix	1670.58	1.94	1671.79	1.96
0.50 pix	1704.82	20.63	1708.11	20.77
1.00 pix	1837.17	51.95	1842.94	52.02

bruit (u,v) pix	$u_0(\text{pix})$	$\sigma u_0(\text{pix})$	$v_0(\text{pix})$	$\sigma v_0(\text{pix})$
0.00	391.00	1.0e-9	278.00	1.0e-9
0.01	391.22	0.20	278.27	0.23
0.02	391.66	0.56	278.76	0.63
0.05	392.63	1.41	279.93	1.58
0.50	402.92	14.70	303.34	16.53
1.00	400.93	33.58	346.96	40.94

On peut noter qu'il n'existe pas de biais pour cette expérience; les valeurs trouvées encadrent correctement les données théoriques. En effet si on se réfère aux équations de colinéarités, les coordonnées images représentent bien les « mesures » du système minimisé ce qui n'est pas le cas des coordonnées 3d qui interviennent de façon plus complexe dans les expressions $P(\Phi)$ et $Q(\Phi)$.

4. auto-calibrage

L'idée directrice part du constat suivant : les mires d'étalonnage de qualité sont souvent difficiles à réaliser mécaniquement (utilisation de matériaux en Invar) et une mesure précise des points 3d utilisés s'avère onéreuse. La confiance que l'on accorde dans le temps à une mire est directement liée à ses conditions de manipulation. De plus l'utilisation d'un capteur à focale courte où d'un zoom conduit à recourir à différentes mires adaptées aux conditions expérimentales.

Est-il possible dans une approche multi-images, de réestimer la géométrie de la mire en même temps que l'on détermine les paramètres intrinsèques de la caméra?

4.1. formulation du problème

Soient les équations de colinéarités :

$$\left. \begin{aligned} u + e_x &= u_0 + (do_{xr} + do_{xt})/dx \\ &+ \left(\frac{f}{dx}\right) \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + T_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = P(\Phi) \\ v + e_y &= v_0 + (do_{yr} + do_{yt})/dy \\ &+ \left(\frac{f}{dy}\right) \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + T_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + T_z} = Q(\Phi) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Le vecteurs de paramètres à estimer, si l'on désire étalonner le capteur et calculer les coordonnées des points de la mire, prend alors la forme suivante :

$$\Phi_{9+6m+3*n} = \left[x_0, y_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y, \right. \\ \left. X^1, Y^1, Z^1, \dots, X^n, Y^n, Z^n, \right. \\ \left. T_x^1, T_y^1, T_z^1, \alpha^1, \beta^1, \gamma^1, \dots, T_y^m, T_z^m, \alpha^m, \beta^m, \gamma^m \right]^T$$

Où n représente le nombre de points de la mire et m le nombre d'images d'observation.

4.2. calcul de la redondance

Nombre d'inconnus :

9 (paramètres intrinsèques) + 3 * n (points de la mire) + 6 * m (paramètres extrinsèques).

Nombre d'équations :

2 * m * n .

La redondance du système $r = 2 * m * n - (9 + 3 * n + 6 * m)$ est assurée sans trop de difficultés. Dans le cas de notre protocole de synthèse où on utilisait 11 points sur la mire ($n=11$), un minimum de 3 images permet de surdéterminer le système.

4.3. conditions initiales

Il est évident que l'optimisation du système non-linéaire requiert des conditions initiales dans le domaine de convergence. Nous montrerons dans la partie expérimentale que cette contrainte est satisfaite sans trop de difficultés dès lors que l'on a pris soin d'observer la mire sous des attitudes d'orientation différentes. Ce qui revient à assurer des angles de triangulation importants pour l'estimation des points de la mire.

Une section particulière de l'article sera consacrée au problème des conditions initiales de convergence.

4.4. solution à un facteur d'échelle

Paramètres intrinsèques

De façon classique la matrice des paramètres intrinsèques est toujours déterminée à un facteur d'échelle près. L'introduction usuelle du facteur ($dx = 1$) permet de fixer l'ensemble des paramètres en une unité arbitraire de pixels.

Paramètres extrinsèques

Dès lors qu'on estime à l'intérieur du processus les coordonnées tridimensionnelles des points de la mire, la géométrie extrinsèque du système est elle aussi fixée à un facteur d'échelle près. En effet il est toujours possible de trouver une mire plus volumineuse observée de plus loin qui donnerait strictement la même image.

Cette perte de métrique est sans grande importance pour l'étalonnage d'une caméra simple où seuls les paramètres intrinsèques représentent un intérêt pour l'utilisateur. Cependant pour l'étalonnage d'une base stéréo, il convient d'injecter une métrique dans les équations pouvant se résumer à la distance précise entre 2 points de la mire, parmi n . Il est possible de contraindre le facteur d'échelle directement dans les équations de colinéarité en imposant les coordonnées (x, y, z) de deux points particuliers. Ces points sont alors exclus du processus d'optimisation; la norme de leur distance est assurée à la solution de la convergence fixant ainsi de façon globale le problème du facteur d'échelle.

4.5. travaux similaires

Si la problématique que nous soulevons dans cet article est axée sur l'influence des erreurs de métrologie d'une mire, la formulation du problème de prise en compte de ces erreurs cotoie des domaines de recherche largement investigués.

En effet, la formulation décrite dans les paragraphes précédents suppose pouvoir estimer conjointement le mouvement de la caméra entre chaque vue, la structure du modèle et les paramètres de la caméra. Des travaux comme ceux de [PK94], [LF97], [FLM92], [SF92] pour n'en citer que quelques uns font référence dans le domaine du *Shape from Motion* ou de l'*Auto-calibrage*.

Notre approche, du fait qu'elle requiert un modèle approximatif de la mire, est en retrait par rapport aux travaux précédents mais garde l'avantage important d'intégrer un vecteur de paramètres intrinsèques de caméra complexe apte à prendre en compte des déformations d'image importantes. De plus le formalisme proposé ne suppose en rien qu'un point soit visible sur toute la séquence d'images et s'adapte immédiatement à des séquences d'un nombre de vues quelconque.

Ces techniques d'auto-calibrage incluant la prise en compte des déformations d'images ont été introduites par le milieu photogrammétrique. Nous pouvons citer [Bey92a], [Bro89], [Fra80], [Wol83]. Néanmoins, elles n'ont été que très peu publiées dans le milieu de la Communauté Vision [Bey91],[Bey92b], et restent très peu prolixes quant aux conditions expérimentales et mises en œuvre pratiques.

5. mise en œuvre

Nous abordons dans cette section certains détails pratiques nécessaires à la mise en œuvre de la méthode décrite.

5.1. détection de tache

Il est primordial de réaliser une détection sub-pixellique des amers dans les images. L'utilisation de pastilles photoréfléchissantes nous a conduit à élaborer un détecteur de tache spécifique. Celui-ci est basé sur un modèle à 10 paramètres qui appréhende à la fois la transformation photométrique de la luminance et la déformation géométrique de la tache dans l'image.

5.1.1. transformation photométrique

Le modèle théorique de tache utilisé présente une symétrie de révolution. Afin de modéliser le plus fidèlement possible la transformation de luminance subie par le capteur au voisinage de taches, nous avons programmé un modèle de transition capable

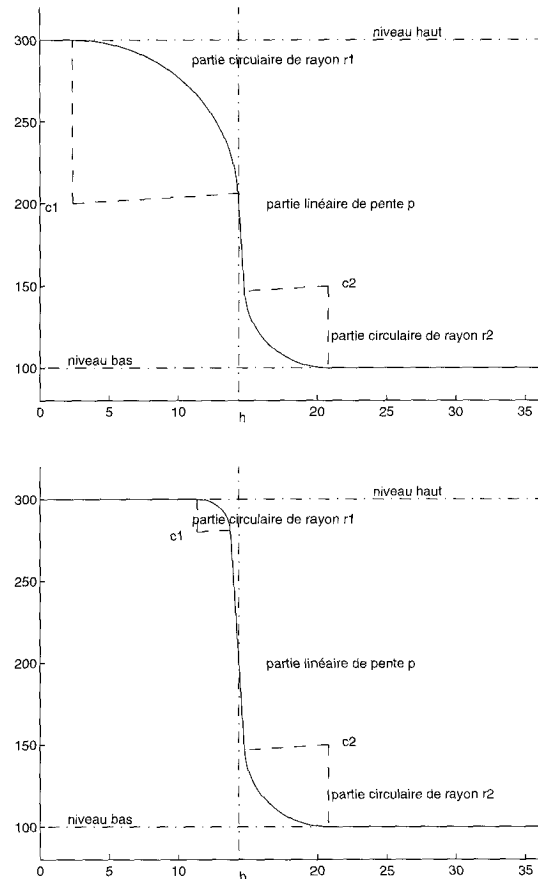


Figure 2. – Exemples de paramétrisation de la transition de luminance.

de contrôler à la fois la pente de luminance ainsi que les ruptures de pente au démarrage et au sommet d'une transition.

La vue 2 montre la coupe de deux transitions différentes de luminance depuis le centre de la tache circulaire théorique. La pente p se raccorde par deux arcs de cercle de rayon variable (r_1 et r_2) sur les niveaux haut et bas de la luminance (n_h, n_b). La localisation du front montant h permet d'appréhender des taches de dimension variable.

En tout, six paramètres (p, r_1, r_2, n_h, n_b, h) devront être optimisés pour assurer l'adéquation du modèle à image.

5.1.2. transformation géométrique

La transformation géométrique consiste à paramétrer les changements de forme subis par le contenu de l'image au voisinage d'une tache, pour la mettre en adéquation avec le modèle théorique circulaire de luminance. Nous avons retenu un modèle affine.

Afin d'éviter les soucis de sous ou sur-échantillonnage sur les pixels du capteur CCD qui représentent notre mesure, l'algorithme estime la meilleure transformation affine A (voir figure 3) qui

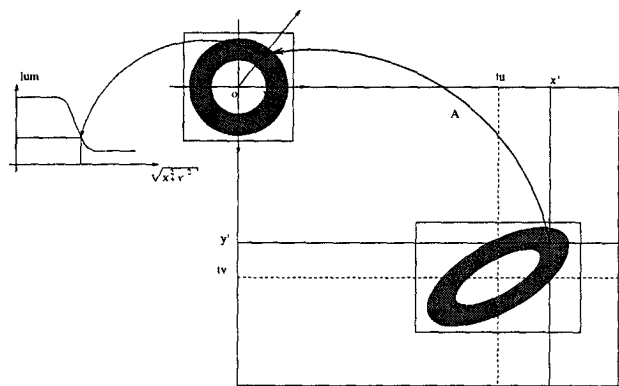


Figure 3. – Transformation géométrique de la tache.

ramène la tache de forme elliptique sur le modèle circulaire.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \cos \theta & -\lambda_2 \sin \theta \\ \lambda_1 \sin \theta & \lambda_2 \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x' - t_u \\ y' - t_v \end{pmatrix} \quad (18)$$

5.1.3. procédure d'optimisation des taches

Une localisation initiale grossière (t_u, t_v) d'une tache à détecter est préalablement requise. A initialisation, une étude locale de la luminosité estime sur un voisinage le rayon grossier de la tache, ses axes d'inertie et les niveaux de luminosité bas et haut. Nous réalisons ensuite une optimisation non-linéaire par l'algorithme de Levenberg-Marquardt de manière à minimiser la différence quadratique sur un domaine elliptique entourant la tache, entre la luminosité au point (t_u, t_v) et celle donnée par le modèle.

La figure 4 montre un exemple de modèle de tache obtenu à la convergence à côté de l'image réelle de luminosité.

5.2. série de vues

Comme nous l'avons préalablement souligné, l'auto-calibrage d'une caméra ne peut fonctionner que si la série de vues analysée

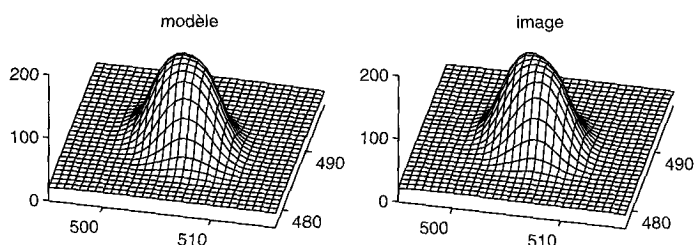


Figure 4. – Exemple de convergence.

offre des points d'observation différents formant des vues convergentes sur la mire. Ceci est la condition nécessaire pour contraindre la triangulation spatiale et donc les coordonnées volumiques des points de la mire.

Nous n'avons pas réalisé une étude très précise de l'influence des angles de triangulation entre les différents points d'observation. D'un point de vue pratique, l'utilisation de taches photoréfléchissantes couplée à un éclairage annulaire haute fréquence centré sur la caméra, permet d'obtenir d'excellentes vues de pastilles même sous des angles d'observation importants

Les vues (figure 5) montrent une séquence type de calibrage avec tout d'abord cinq images approximativement centrées présentant de forts angles d'observation. Bouger la caméra autour de l'objet revient à bouger l'objet devant la caméra. La pastille localisée complètement dans un angle de la plaque joue le rôle de détrompeur et permet de visualiser que l'objet est placé sous des attitudes variables. Soit encore, pour un objet supposé fixe dans l'espace, que la caméra l'observe selon des attitudes très différentes.

Pour quatre dernières vues, nous avons volontairement placé la mire dans les coins de l'image pour contraindre l'estimation des coefficients de distorsion.

5.3. initialisation du vecteur de calibrage

Un protocole d'autocalibrage selon une approche photogrammétrique requiert un vecteur de calibrage initial au voisinage de la solution. Cette initialisation se décompose en trois parties :

1. Géométrie de la mire

Chaque coordonnée est grossièrement mesurée (quelques mm). L'utilisation de mire plane facilite grandement cette étape qui en pratique ne prend guère plus de quelques minutes lors de la première utilisation de la mire.

2. Paramètres intrinsèques

Les coefficients de distorsions (radiale et tangentielle) sont généralement initialisés à 0. Le point principal est placé au centre de l'image et une mesure grossière de la focale est faite à partir de la focale en (mm) de l'objectif et de la taille du pixel élémentaire de la matrice CCD utilisée (entre 10 et 15 μm pour des caméras classiques) : (exemple $(f_x = f_y = f_{obj}/10\mu\text{m})$).

Une approche linéaire classique Faugeras/Toscani [FT87] donnerait la même chose pour une mire volumique. Les résultats sont cependant plus incertains avec des objets plats.

3. Paramètres extrinsèques de localisation

L'écriture sous la forme des angles d'Euler des matrices de rotation requiert une initialisation satisfaisante de la position de la mire devant la caméra. Nous avons coutume d'utiliser pour nos mires planes une localisation de Dementhon [Dem95]. Cet

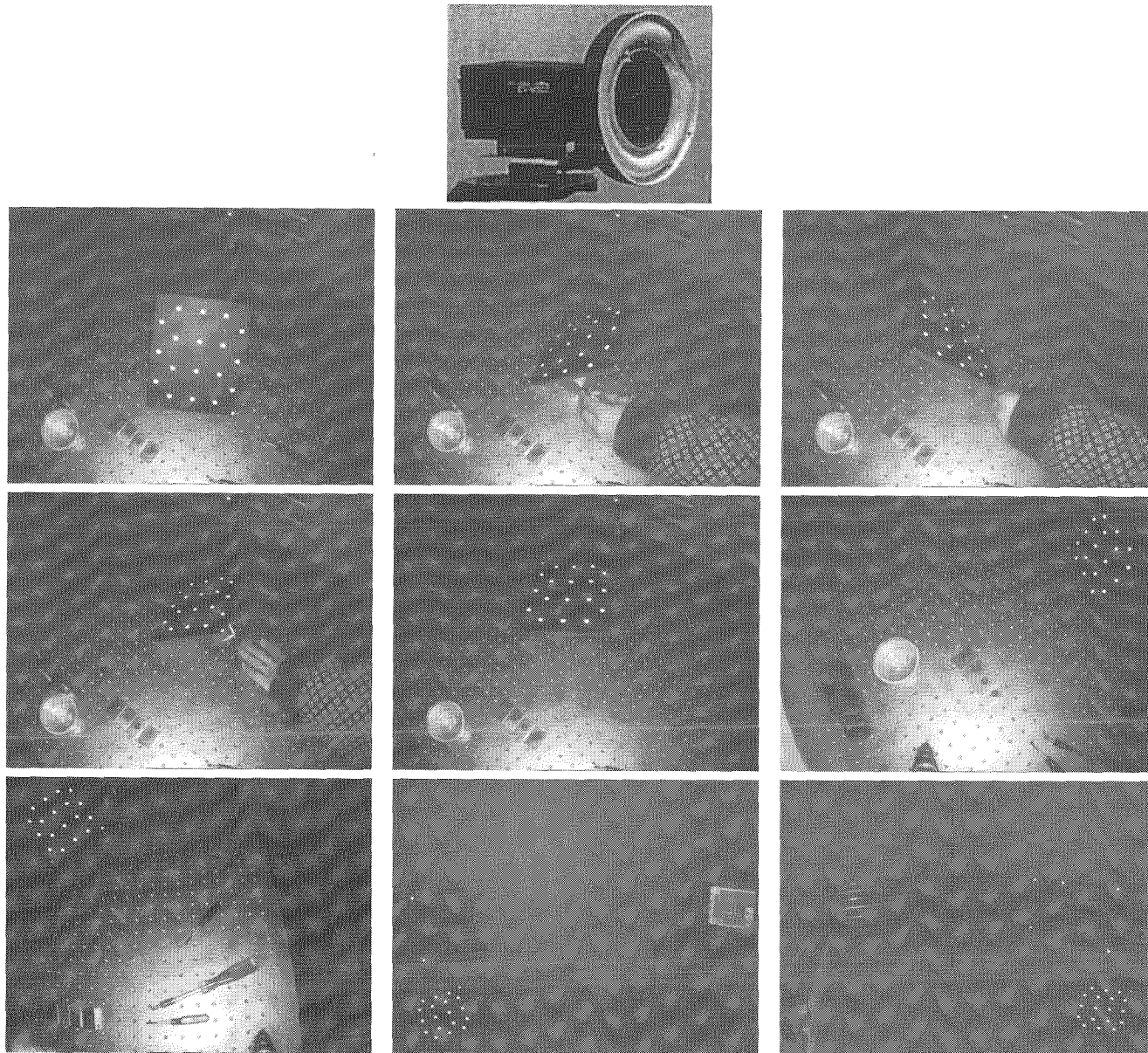


Figure 5. – Exemple d'une série de vues pour auto-calibrage.

l'algorithme nécessite une gestion particulière pour les objets plats puisque deux solutions sont alors possibles à chaque itération. Il possède cependant l'avantage de ne requérir aucune valeur initiale de la position spatiale de l'objet. Bien entendu la matrice intrinsèque grossière utilisée par l'algorithme est celle déterminée au paragraphe précédent. Pour une utilisation de mire volumique le calibrage simple [FT87] apporte une initialisation suffisante aux points 2 et 3.

L'optimisation du processus non linéaire de calibrage se fait par l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Le critère minimisé représente une somme quadratique en pixels entre les coordonnées

du point mesuré dans l'image et celles du point projeté par le modèle de transformation (voir paragraphe 4).

6. expérimentation

L'étude expérimentale sur la prise en compte des erreurs de métrologie de la mire, se scinde en deux parties. Tout d'abord nous traitons le cas de synthèse évoqué précédemment, puis nous abordons des étalonnages réels sur des objectifs de focale différente.

6.1. données synthétiques

La connaissance de la géométrie 3D du protocole de synthèse, nous permettra à la solution de vérifier les paramètres intrinsèques de la caméra mais également la corrélation entre la mire reconstruite et les données tridimensionnelles de référence, les deux objets étant reliés par un facteur d'échelle.

Sans bruit sur les images

Nous reprenons ici les conditions expérimentales définies au paragraphe 3.3. A partir d'une série de données synthétiques, chaque coordonnée tridimensionnelle (x, y, z) de la mire est systématiquement bruitée par un bruit normal d'amplitude fixée (σ_b) , avant d'appliquer l'algorithme d'étalonnage.

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{theo} + \sigma_b \\ y_{theo} + \sigma_b \\ z_{theo} + \sigma_b \end{pmatrix} \quad (19)$$

L'analyse du tableau 3 montre que l'approche préconisée permet sur ces données de synthèses de redéterminer systématiquement la véritable matrice de paramètres intrinsèques de la caméra pour des amplitudes de perturbations importantes des coordonnées de la mire (σ_b 0.01 mm à $\sigma_b = 10$ mm).

Le paramètre k donne le facteur d'échelle sur la géométrie de la mire, obtenu à la solution des différentes expériences. Il est calculé à partir de la moyenne des ratios de l'ensemble des distances entre deux points 3d reconstruits (P_i) et de leurs distances réelles (\hat{P}_i).

$$k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \frac{|P_i - P_{i-1}|}{|\hat{P}_i - \hat{P}_{i-1}|} \quad (20)$$

σ_k représente l'écart type de cette distribution.

Dans le tableau 3, on note que σ_k est systématiquement nul, car le système a parfaitement corrigé l'ensemble des points 3d de la mire ainsi que les paramètres intrinsèques et extrinsèques pour permettre l'adéquation des expressions de colinéarités (17). Le nombre d'itérations pour atteindre la convergence est directement lié aux conditions initiales et nous avons volontairement choisi de partir loin des paramètres corrects ($f_{init} = 3000$ pix au lieu de 1670 pix) pour regarder la robustesse de la convergence.

Les résultats de ce tableaux sont à comparer avec l'expérience (tableau 1) mettant en œuvre l'approche algorithmique classique.

Avec bruit sur les images

Pour cette expérience (tableau 4) nous avons considéré deux amplitudes de bruit image distinctes (0.01 et 0.1 pixel). A chaque configuration, les points volumiques de la mire sont perturbés par des amplitudes respectivement de $\sigma_b = 0.1mm$ et $\sigma_b = 10mm$ sur chaque coordonnées.

L'analyse du tableau 5 montre que l'algorithme estime systématiquement une géométrie extrinsèque similaire (au facteur d'échelle près) pour des bruits de ($\sigma_b = 0.1mm$) à ($\sigma_b = 10mm$),

et converge vers la même solution de paramètres internes de la caméra (à bruit image fixé).

Conclusion

L'erreur d'étalonnage, par rapport à la solution de synthèse, ($f_x = 1670, f_y = 1671$), ($u_0 = 391, v_0 = 278$) n'est plus fonction de la précision de construction de la mire, mais de la précision de détection des points dans l'image. La première partie du tableau 4 montre que pour une mire réalisée au centimètre-cube près, une détection sub-pixellique de 0.01 pixel conduit à des résultats quasiment parfaits.

Tableau 3. – Résultats d'étalonnage, sur données de synthèse, pour des bruits croissants sur chaque coordonnée volumique de points de la mire.

Solution théorique de calibration ($f_x=1670 f_y= 1671 u_0=391 v_0=278$)							
Conditions initiales du vecteur de calibration ($f_x=3000 f_y=3000 u_0=300 v_0=300$)							
bruit sur x,y,z	convergence			résultats			
	nb itéra	k	σ_k	f_x (pix)	f_y (pix)	u_0 (pix)	v_0 (pix)
$\sigma_b(mm)$							
0.01	45	0.9838	0.0	1670	1671	391	278
0.1	45	0.9838	0.0	1670	1671	391	278
1.0	47	0.9832	0.0	1670	1671	391	278
10.0	48	0.9767	0.0	1670	1671	391	278

Tableau 4.

Tab 4 : conditions initiales (resu en pixel) ($f_x=3000 f_y=3000$) ($u_0=300 v_0=300$)			
bruit image (u,v) 0.01 pix			
bruit mire (x,y,z) $\sigma_b = 0.1$ mm		bruit mire (x,y,z) $\sigma_b = 10.0$ mm	
$f_x = 1666.64$	$\sigma = 0.35$	$f_x = 1666.64$	$\sigma = 0.35$
$f_y = 1668.03$	$\sigma = 0.36$	$f_y = 1668.03$	$\sigma = 0.36$
$u_0 = 391.49$	$\sigma = 0.26$	$u_0 = 391.49$	$\sigma = 0.26$
$v_0 = 278.73$	$\sigma = 0.31$	$v_0 = 278.73$	$\sigma = 0.31$
nb itera=47		nb itera=48	
$\sigma_0=0.01$		$\sigma_0=0.01$	
$k = 0.97538$	$\sigma_k = 0.000101$	$k = 0.97433$	$\sigma_k = 0.000103$

bruit image (u,v) 0.1 pix			
bruit mire (x,y,z) $\sigma_b = 0.1$ mm		bruit mire (x,y,z) $\sigma_b = 10.0$ mm	
$f_x = 1651.35$	$\sigma = 3.50$	$f_x = 1651.35$	$\sigma = 3.50$
$f_y = 1652.99$	$\sigma = 3.54$	$f_y = 1652.99$	$\sigma = 3.54$
$u_0 = 396.03$	$\sigma = 2.60$	$u_0 = 396.03$	$\sigma = 2.60$
$v_0 = 285.10$	$\sigma = 3.01$	$v_0 = 285.10$	$\sigma = 3.01$
nb itera=48		nb itera=49	
$\sigma_0=0.094$		$\sigma_0=0.094$	
$k = 0.97538$	$\sigma_k = 0.000910$	$k = 0.97433$	$\sigma_k = 0.000910$

6.2. données réelles

6.2.1. expérimentation objectif 10 mm

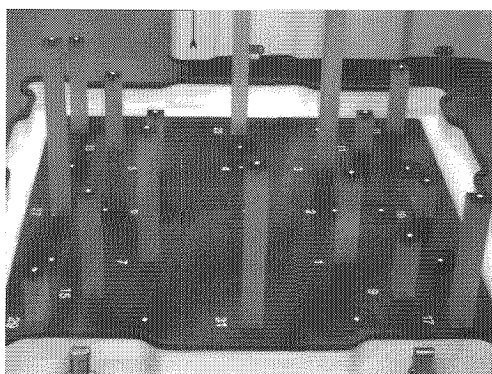


Figure 6. – Mire d'étalonnage.

Le tableau 5 présente les résultats d'un étalonnage classique multi-images sur une série de 11 images d'une mire de 30 points. La géométrie de la mire, figure 6, est connue à 0.02 mm près selon chaque coordonnée. Son encombrement représente un volume de $0.6 \times 0.6 \times 0.4 \text{ m}^3$. Chaque amers est constitué d'une pastille photoréfléchissante.

Tableau 5.

Tab 5 : Résultats étalonnage données réelles :		
caméra	: Sony XC75CE	
objectif	: 10 mm Angénieux	
carte de digitalisation	: Silicon Graphics	
algorithme	: Etalon. photogrammétrique classique	
mire	: CEA-Saclay	
Nombre d'images : 11		
Nombre de mesures : 289		
Residus ex moy et e-type (pix)	-9.150e-06	3.344e-02
Residus ey moy et e-type (pix)	1.233e-05	2.634e-02
Std error of unit weight (pix)		3.686107e-02
		σ
$f_x(\text{pix})$	1672.89	2.08e-01
$f_y(\text{pix})$	1676.03	2.09e-01
$u_0(\text{pix})$	386.74	4.26e-01
$v_0(\text{pix})$	276.86	3.65e-01
a_1	1.538e-01	5.12e-03
a_2	-8.758e-01	1.44e-01
a_3	6.121e+00	1.23e+00
p_1	6.478e-04	7.12e-05
p_2	7.684e-05	6.41e-05

L'étalonnage multi-images donne des résultats de variation des résidus de l'ordre de 0.033 et 0.026 pixel sur les coordonnées u et v des 289 points de mesure. Aux vus des précisions d'étalonnage avancées dans le rapport de l'Agence Spatiale Européenne sur l'étalonnage de capteurs de vision [Esa97], on peut qualifier ces résultats de bonne qualité.

Le tableau 6 présente les résultats obtenus par l'approche décrite dans l'article.

Une analyse des résultats montre que les solutions obtenues entre les expériences (tableau 5) (étalonnage classique et mire connue) et (tableau 6) (auto-calibrage) sont tout à fait similaires. Les résidus sont sensiblement plus faibles pour la seconde mais ceci ne semble pas être un paramètre objectif de comparaison car il ne faut pas perdre de vue que le nombre de degrés de liberté a été augmenté dans le processus de calibrage. Quel que soit le bruit injecté sur les coordonnées volumiques de la mire (jusqu'à $1.\text{cm}^3$) la solution reste identique à la convergence.

Comme les dimensions de la mire sont parfaitement connues dans cette expérimentation, le facteur σk nous renseigne sur l'adéquation entre la mire recalculée par l'expérience (Tab 6) et la vérité terrain. On note, à la solution, une modification d'environ $(1.2e-4)\%$ des points recalculés pour satisfaire aux équations de colinéarité du système d'étalonnage. En utilisant une vérité

Tableau 6.

Tab 6 : Résultats étalonnage sur données réelles : Auto-calibrage		
caméra	: Sony XC75CE	
objectif	: 10mm Angénieux	
carte de digitalisation	: Silicon Graphic	
algorithme	: Auto-calibrage.	
Nombre d'images : 11		
Nombre de mesures : 271		
Residus ex moy et e-type (pix)	2.934e-07	1.875e-02
Residus ey moy et e-type (pix)	-5.486e-09	1.337e-02
Std error of unit weight (pix)		1.972624e-02
Stat facteur d'échelle (\bar{k} et σk)	0.98733	0.00012
		σ
$f_x(\text{pix})$	1672.85	1.33e-01
$f_y(\text{pix})$	1675.96	1.34e-01
$u_0(\text{pix})$	386.48	2.68e-01
$v_0(\text{pix})$	277.26	2.34e-01
a_1	1.458e-01	3.20e-03
a_2	-6.749e-01	9.02e-02
a_3	4.685e+00	7.69e-01
p_1	5.960e-04	4.44e-05
p_2	5.599e-05	4.04e-05

Quelle précision pour une mire d'étalonnage

terrain il est alors possible de quantifier la précision de reconstruction de ma mire obtenue par l'algorithme.

Conclusion

Il résulte que si l'on est capable d'observer précisément n points d'une mire sur m images, la connaissance précise de la géométrie de la mire ne semble pas indispensable pour obtenir les paramètres intrinsèques de la caméra avec une très bonne précision.

6.2.2. expérimentation : Fish-eye 3.8 mm

Dans cette expérience nous réalisons l'étalonnage d'un objectif de type fish-eye (3.8 mm) à très forte distorsion radiale. La mire à été rapidement réalisée avec une plaque peinte en noire sur laquelle nous avons collé une série de pastilles photoréfléchissantes (≈ 0.1 mm d'épaisseur), de diamètre adapté aux conditions de prise de vues. La caméra est équipée d'un éclairage annulaire hautes-fréquences pour obtenir une réponse photonique optimale des pastilles quelque soit l'angle d'observation de la mire. La géométrie de la mire est grossièrement mesurée (≈ 0.5 cm).

La figure 5 (présentée au paragraphe précédent) montre les vues d'étalonnage utilisée pour cette expérience et met en évidence la forte distorsion de l'objectif. A cours de la séquence, la mire est déplacée pour obtenir des points de mesure sur toute la surface photosensible du capteur.

La connaissance approximative de la géométrie de la mire permet par un algorithme linéaire de donner une valeur initiale aux rotations et translations (R_i, T_i) relatives à chaque image. Pour l'expérience ci-dessous les valeurs initiales des focales ont été fixées compte tenue de la camera :

1. Camera JAI M10 CCIR, pixel carré $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$.
2. Objectif 3.8 mm.
3. Image au format CCIR 768×576 pixels.

$$\left. \begin{array}{l} fx = 3.8e^{-3}/10e^{-6} = 380\text{ pix} \\ fy = fx = 380\text{ pix} \\ u_0 = nbcol/2 = 384\text{ pix} \\ v_0 = nbliq/2 = 288\text{ pix} \\ a_1, a_2, a_3 = 0 \\ p_1, p_2 = 0 \end{array} \right\} (21)$$

Pour cette expérimentation (tableau 7), l'algorithme d'étalonnage a estimé une géométrie de la mire et convergé vers une solution des paramètres intrinsèques donnant des résidus tout à fait acceptables (0.019 et 0.018 pix). La convergence est assurée en moins de 20 itérations avec les valeurs initiales indiquées. L'objectif présente une focale courte (463 pix) conduisant approximativement à 80 degrés de champ de vue.

Pour se rendre compte de la planéarité de la mire reconstruite, nous avons calculé le plan passant trois des points 3d reconstruits. Après avoir appliqué une matrice de changement de base, le tableau 8 présente les coordonnées des pointstriangulés.

Tableau 7.

Tab 7 : Résultats étalonnage sur données réelles Fish-Eye		
caméra	: JAI M50	
objectif	: 3.8mm Ernitec	
carte de digitalisation	: Silicon Graphics	
algorithme	: Autocalibrage	
Nombre d'images	: 9	
Nombre de mesures	: 162	
Residus ex moy et e-type (pix)	-4.3172e-05	1.973e-02
Residus e y moy et e-type (pix)	-3.7996e-06	1.620e-02
Std error of unit weight (pix)		1.805e-02
		σ
$fx(\text{pix})$	463.09	2.90e-01
$fy(\text{pix})$	463.46	2.91e-01
$u_0(\text{pix})$	374.19	3.20e-01
$v_0(\text{pix})$	283.60	4.17e-01
a_1	3.7501e-01	1.74e-03
a_2	1.0648e-01	3.29e-03
a_3	1.9344e-01	2.62e-03
p_1	1.4374e-04	1.24e-04
p_2	1.6366e-03	2.49e-04

La reconstruction obtenue présente une planéarité de l'ordre de quelques centièmes de millimètres analysable sur la coordonnée (z) des points du tableau.

Enfin, les figures (7) montrent une vue d'ensemble prise de la caméra fish-eye et la même vue redressée après calcul de la distorsion inverse.

7. discussion et conclusion

Détection des amers

Toute la précision de la méthode décrite dans cet article s'appuie sur la qualité de détection des amers dans les images. Nous avons montré qu'une approche sub-pixellique à 0.01 ou 0.02 pixel conduit à des résultats pratiquement parfaits.

Dans les faits, nous avons constaté que les approches de détection de tâches s'avéraient plus robustes que les détections de croix. Il semble que [Esa97] arrive aux mêmes conclusions. Les résultats expérimentaux décrits dans cet article utilisent un détecteur de tâche subpixellique qui repose sur une transformation affine plus

Tableau 8. – Coordonnées tridimensionnelles de la mire reconstruite.

$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$	σ_x	σ_y	σ_z
0	0	0	6.66121e-06	5.43793e-06	8.61488e-06
0.0502033	-0.000534982	1.31916e-05	7.01699e-06	5.78446e-06	8.6954e-06
0.102	-4.33681e-19	0	7.14207e-06	6.06141e-06	8.78471e-06
-0.0257243	0.0271295	3.20114e-05	7.04045e-06	5.4425e-06	9.94925e-06
0.0241959	0.0275883	-5.07796e-06	6.99356e-06	5.72715e-06	8.89402e-06
0.0742209	0.0281763	2.05515e-05	7.2576e-06	6.04387e-06	8.99985e-06
0.123744	0.0288367	-1.14633e-06	7.29686e-06	6.2709e-06	9.09309e-06
-0.0239686	0.0673332	2.18441e-05	7.70737e-06	6.02978e-06	1.17549e-05
0.0258921	0.0678961	3.4633e-05	7.13159e-06	5.90668e-06	9.1923e-06
0.0757651	0.0684248	1.94672e-05	7.41311e-06	6.20045e-06	9.32956e-06
0.125682	0.0687987	-2.36406e-05	7.66466e-06	7.05559e-06	1.01771e-05
-0.0238956	0.107237	-1.8055e-05	6.97237e-06	6.09134e-06	9.51863e-06
0.0254573	0.107604	-1.13854e-05	7.18513e-06	6.10035e-06	9.43121e-06
0.0758551	0.108304	-1.0167e-05	7.91417e-06	7.15089e-06	1.05692e-05
0.125525	0.108971	-1.70667e-05	7.56158e-06	6.52164e-06	9.75469e-06
-0.00116101	0.133106	0	1.04875e-05	1.00222e-05	1.29397e-05
0.0506034	0.133895	-1.38544e-05	7.37885e-06	6.3693e-06	9.66726e-06
0.100809	0.134195	-3.15231e-05	7.57797e-06	6.54603e-06	9.85272e-06

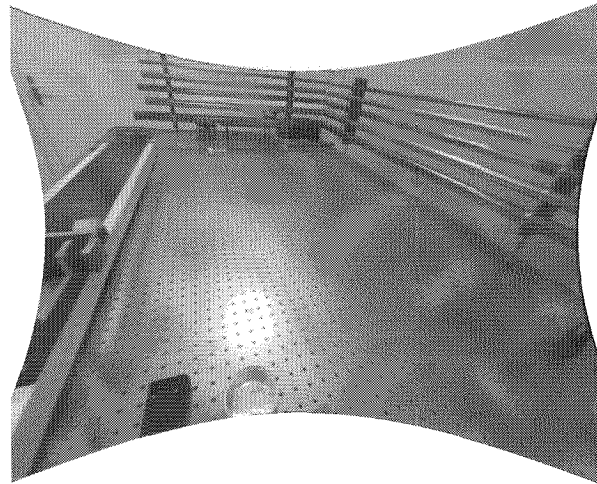


Figure 7. – Correction de la distorsion

facteur d'échelle couplée à une paramétrisation de la réponse photonique, transformant le modèle théorique d'une tâche pour l'adapter au contenu de l'image.

Introduction d'une métrique

Comme nous l'avons dit précédemment la géométrie extrinsèque entre les différentes vues n'est déterminée qu'à un facteur d'échelle près. Pour lever cette inconnue il suffit d'introduire parmi tous les points de la mire la connaissance de la distance précise entre deux points.

En fait, on pourrait envisager l'utilisation d'une mire très grossière adaptée aux conditions expérimentale, dans laquelle on rajouterait

une mire de deux amers photoréfléchissants en matériaux très stable (invar) et mesurée avec précision. Le coût final de la mire est résumé à l'estimation précise de la distance entre ces deux points.

Souplesse d'utilisation

L'utilisation de l'approche décrite dans cet article s'avère très souple et permet de réaliser des étalonnages avec des mires modulables selon la distance focale de l'objectif utilisé. Les résultats de résidus obtenus en comparaison avec les approches classiques utilisant une mire mesurée avec précision, montrent la robustesse de l'algorithme.

Quelle précision pour une mire d'étalonnage

Perspectives

Nous envisageons actuellement d'étendre ces travaux au cas d'un étalonnage sur scènes naturelles à partir d'une mise en correspondance subpixelique d'amers texturés. Des approches de Shape from Motion proposées par Kanade et autres seront utilisées pour fournir une valeur initiale de la géométrie extrinsèque du système de prises de vues.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ame84] American Society for Photogrammetry, *Manual of Photogrammetry*, 4th edition, 194.
- [Bey91] H.A. Beyer. An introduction to photogrammetric camera calibration. *Séminaire Orasis St-Malo*, pages pp. 37-42, 1991.
- [Bey92a] H.A. Beyer. *Geometric and Radiometric Analysis of CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System*. PhD thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 51, ETH, Zurich., May 1992.
- [Bey92b] H.A. Beyer. Accurate calibration of ccd cameras. In *Proc. of Int Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages pp. 96-101, Champaign, Illinois, June 1992.
- [Bro66] D.C. Brown. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 32(3), 1966.
- [Bro71] D.C. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol 8 (Nr 37) : pp. 855-866, 1971.
- [Bro89] D.C. Brown. Emerging trends in non-topographic photogrammetry. (Chp 22, 2nd Edition 1989), 1989.
- [D.F95] L.S. Davis D.F. Dementhon. Model-based object pose in 25 lines of code. *International Journal of Computer Vision*, 15(2) : 123-141, 1995.
- [Fai87] W. Faig. calibration of close-range photogrammetric system : Mathematical formulation. In *Proc. of XIII congress of Int. Society for Photogrammetry*, pp. 1479-1486, Tokyo, japan, 1987.
- [FLM92] O. Faugeras, T.Q. Long, and S.J. Maybank. Camera self-calibration : Theory and experiments. In *Proc of ECCV'92*, pages pp. 321-334, Italy, 1992.
- [Fra80] C.S. Fraser. Multiple focal setting self calibration of close range metric cameras. Volume Vol 46, pages pp. 1161-1171, Sept, 1980.
- [FT87] O. Faugeras and G. Toscani. Camera calibration for 3d computer vision. in *Proc. of CVPR*, Tokyo, japan, 1987.
- [LF97] T.Q. Long and O.D. Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondances and fundamental matrices. *IJCV*, Vol 22 (Nr 3) : pp. 261-289, 1997.
- [Li94] M. Li. Camera calibration a head-eye system for active vision. In J.O. Eklund, editor, *Proc. of 3rd European Conf. on Computer Vision*, pages I : 543-554, Stockholm, May 1994.
- [LL96] M. Li and JM. Lavest. Some aspects of zoom lens calibration. *IEEE PAMI*, Vol 18 (Nr 11), 1996.
- [Pa97] P. Plancke and al. Calibration of vision system (calvin). *Final Report of European Space Agency*, (WPB5-T1), 1997.
- [PK94] C.J. Poelman and T. Kanade. A paraperspective factorisation method for shape and motion recovery. *Third European Conference on Computer Vision, ECCV94, Stockholm*, Vol 2 : pp. 97-108, May 1994.
- [SF92] S.J. Maybank and O.D. Faugeras. Theory of self-calibration of a moving camera. *IJCV*, Vol8 (Nr 2) : pp. 123-151, 1992.
- [Tar96] J.P. Tarrel. *Estimation géométrique et appariement en modélisation automatique*. PhD thesis, Université paris Dauphine, 1996.
- [Tor81] K. Torlegård. Accuracy improvement in close range photogrammetry. *Schriftenreihe, Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen, Hochschule der Bundeswehr München*, Heft 5, September 1981.
- [Tsa86] R.Y. Tsai. An efficient and accurate calibration technique for 3d machine vision. In *In proc. of CVPR*, pp. 364-374, Miami, USA, 1986.
- [Wol83] P.R. Wolf. *Elements of Photogrammetry*. Mac-Graw Hill Book Company, 1983.

Manuscrit reçu le 2 avril 1998.

LES AUTEURS

Jean-Marc LAVEST



Jean-Marc lavest est Maître de Conférences à l'Institut des Sciences pour l'Ingénieur CUST de Clermont-Ferrand. Après un séjour post doctoral au Royal Institute of Technology de Stockholm chez le Professeur Jan-Olof Eklundh, il rejoint le groupe GRAVIR du LASMEA, UMR 6602 du CNRS. Ses activités de recherche concernent l'utilisation des zooms en vision artificielle, le calibrage précis des systèmes vidéo et la métrologie par vision.

Michel DHOME



Michel Dhome est Directeur de Recherche au CNRS et exerce au sein du LASMEA, UMR 6602 du CNRS à Clermont-Ferrand. Il a obtenu sa thèse à l'Université Blaise-Pascal avant de séjourner un an comme boursier post-doctoral à Ottawa. Ses activités de recherche concernent le domaine de la Vision Artificielle et plus particulièrement la localisation, la modélisation et la reconnaissance d'objets volumiques.

Marc VIALA



Marc Viala né en 1965, est ingénieur diplômé du CUST génie électrique, il possède une thèse de doctorat dans le domaine de la reconstruction 3D. Il est recruté au CEA-leti (Direction des Technologies Avancées) en 1993. Il s'est d'abord occupé dans le cadre du projet SYMPHONIE des aspects algorithmie et logiciels associés. C'est ainsi qu'il a développé le compilateur (SPL) de ce calculateur. Depuis il travaille sur les problèmes de reconstruction 3D et de vidéogrammétrie. Il a notamment développé une méthode originale de métrologie 3D par vision qui a fait l'objet d'un brevet.