

Calibrage de caméra plénoptique à partir des images brutes

C.A. Noury¹

C. Teulière¹

M. Dhome¹

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France
charles_antoine.noury@uca.fr

Résumé

Dans cet article nous présentons une nouvelle méthode de calibrage de caméra plénoptique à partir d'une mire damier, utilisant directement les images brutes du capteur. A la différence des méthodes existantes qui utilisent une étape préliminaire de reconstruction d'image nécessitant une interpolation, nous proposons de détecter les coins de la mire directement dans les micro-images avec une précision subpixelique. Le calibrage est ainsi formalisé comme la minimisation d'une erreur de reprojection exprimée dans l'espace du capteur. La méthode proposée est validée à la fois en simulation et sur images réelles.

Mots Clefs

Caméra plénoptique, calibrage métrique.

Abstract

In this paper we present a new plenoptic camera calibration process based on a checkerboard pattern, using only raw data. Unlike existing methods using an image synthesis step needing interpolation, we propose to detect pattern corners directly into micro-images with sub-pixelic precision. Calibration is thus formalized as the reprojection error minimization expressed in sensor space. This proposed method has been validated in simulation as well as on real images.

Keywords

Plenoptic camera, metric calibration.

1 Introduction

Une caméra plénoptique est un capteur passif qui échantillonne quatre dimensions d'un champ de lumière : la position (x, y) et l'orientation d'incidence (θ, ϕ) de ses rayons lumineux sur le capteur. En effet, contrairement à une caméra classique, les caméras plénoptiques sont conçues de manière à ce que chaque pixel du capteur ne reçoive que les rayons correspondant à une orientation d'incidence particulière.

Ce concept de *photographie intégrale* remonte au siècle XXIème siècle avec les travaux de Lippmann (1908) et Ives (1930) [12, 9]. De nombreuses variantes de caméras plénoptiques ont vu le jour depuis [1, 19].

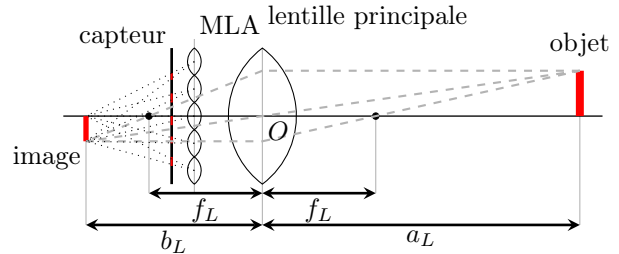


FIGURE 1 – Modèle de caméra plénoptique Galiléen.

C'est en 2005 que la première caméra plénoptique grand public fait son apparition. Il s'agit de la Lytro première génération conçue par Ng [15, 14] aussi appelée caméra plénoptique non focalisée. Ce modèle est composé d'une matrice de micro-lentilles (MLA) située dans le plan focal d'une lentille principale. La distance focale des micro-lentilles est égale à la distance entre le capteur et la MLA. Chaque micro-lentille capture les rayons lumineux passant par l'ouverture de la lentille principale, permettant d'estimer la direction des rayons passant par la lentille principale.

En 2009, Georgiev et Lumsdaine [13] ont présenté une version modifiée nommée caméra focalisée. Dans cette version, la MLA est mise au point sur l'image de l'objet formée par la lentille principale. Lorsque le plan focal de la lentille principale est situé devant la MLA, ce modèle est appelé Keplérien. Lorsqu'il est placé derrière, c'est un modèle Galiléen (Fig. 1). Dans ces modèles la résolution spatiale est plus grande que la caméra non focalisée au détriment de la résolution angulaire. Ce type de caméra plénoptique fut ensuite commercialisé en 2010 par Raytrix GmbH.

Le fait de pouvoir obtenir une information sur l'orientation des rayons à partir d'une seule acquisition passive ouvre la voie à de nombreuses applications en vision par ordinateur. Cela permet, par exemple, d'obtenir des images synthétisées d'une même scène correspondant à différents points de vue [20]. Une image synthétisée est une image reconstruite à partir de l'image brute simulant une image acquise avec une caméra sténopé. Cela permet aussi de faire une remise au point sur un détail de la scène après enregistrement de l'image [15, 13]. Les caméras plénoptiques sont égale-

ment utilisées pour obtenir des cartes de profondeur, effectuer de l’odométrie visuelle [22] et des algorithmes de Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) [6]. Pour cela une connaissance précise des paramètres de calibrage du capteur est nécessaire.

En 2013 Dansereau et al. ont présenté le premier modèle *pixel-to-ray* d’une caméra Lytro permettant d’obtenir une matrice intrinsèque [5]. Leur modèle plénoptique est composé du modèle sténopé pour la MLA et celui de la lentille mince pour l’objectif de la caméra. Chaque pixel est mis en correspondance avec un rayon lumineux. Ils mettent en relation les points 3D de la scène avec les rayons lumineux des observations qui leur sont associées puis minimisent l’erreur dans l’espace 3D : la distance entre le rayon et le point 3D.

Johannsen et al. ont proposé une méthode de calibrage d’une caméra Raytrix [10] rendue automatique par Heinze et al. [8]. Les observations sont calculées dans l’espace 3D grâce aux images synthétisées et aux cartes de profondeur correspondantes. Ainsi l’optimisation des paramètres se fait en minimisant l’erreur 3D entre un objet et ses observations.

La plupart des méthodes de calibrage de caméras plénoptiques compactes utilisent des images synthétisées et des cartes de profondeur [10, 18, 21] or il est nécessaire d’avoir les paramètres intrinsèques de la caméra pour les obtenir. Pour passer outre ces difficultés, certaines méthodes utilisent les logiciels constructeurs fournis avec la caméra comme *Lytro Desktop* ou *RxLive* qui possèdent déjà les paramètres de projection de la caméra. Mais la qualité du calibrage peut être détériorée à cause des pertes d’informations qu’engendrent ces calculs. Par exemple, la majorité des calculs de synthèse d’images comporte des phases d’interpolation [20].

Dans cette article nous proposons une méthode pour remédier à ces problèmes qui consiste à travailler uniquement avec les données brutes de la caméra. Notre méthode se rapproche de celle de [3] qui met en relation les coins avec les bords de cases de damier détectés dans les micro-images.

Contrairement à la méthode précédente, nous proposons de détecter directement la projection des coins de damier dans les micro-images avec une précision subpixelique.

Nous initialisons les paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra en utilisant les informations présentes dans les images brutes. Nous raffinons ensuite ces paramètres avec une optimisation non-linéaire en minimisant l’erreur de reprojection entre les observations et les prédictions dans l’espace image.

Après avoir expliqué le modèle de projection utilisé (Section 2), nous détaillerons notre processus de calibrage (Section 3) et présenterons nos résultats en simulation et sur scène réelle (Section 4).

2 Modélisation

Cette section décrit le modèle de caméra plénoptique utilisé lors du calibrage. La lentille principale et les micro-lentilles sont respectivement modélisées par le modèle de la lentille mince (Section 2.1) et du sténopé (Section 2.2).

Tout au long de cet article, nous utiliserons les coordonnées homogènes pour définir un point 3D et 2D. Par exemple, un point dans le repère caméra sera décrit dans cette notation $P_C = (X_C, Y_C, Z_C, 1)^\top$.

Tous ces repères suivent la même convention : Lorsque que la caméra est pointée vers un objet, l’axe Z est dirigé vers cet objet tel que ($Z_C > 0$) et les axes Y et X sont respectivement orientés vers le bas et la droite. L’origine du repère de la caméra est confondue avec le centre optique O de la lentille principale. Celle de la MLA est située au coin supérieur gauche de la matrice. Et l’origine du capteur est placée au pixel $(0, 0)$.

Une matrice de changement de repère A vers B notée ${}^B T_A$ est une matrice 4×4 composée d’une rotation (matrice 3×3) et d’une translation (1×3) :

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.1 Modèle de la lentille mince

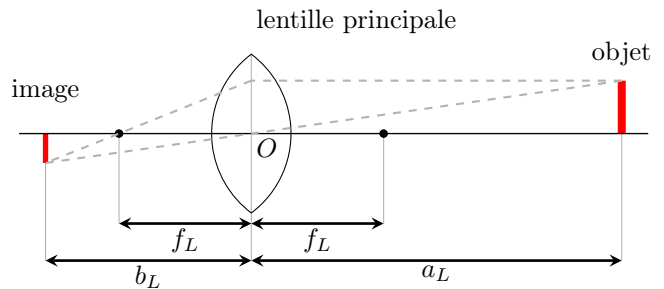


FIGURE 2 – Projection du modèle lentille mince.

Les rayons provenant d’un objet à une distance a_L de la lentille convergente traversent la lentille et sont déviés pour former une image de l’autre côté à une distance b_L (Figure 2). Cette projection satisfait l’équation de la lentille mince :

$$\frac{1}{f_L} = \frac{1}{a_L} + \frac{1}{b_L} \quad (2)$$

où f_L est la distance focale de la lentille, a_L est la distance entre l’objet et le centre optique de la lentille O et b_L est la distance entre l’image et O .

La projection d’un point $P_C = (X_C, Y_C, Z_C, 1)^\top$ en un point $P_V = (X_V, Y_V, Z_V, 1)^\top$ à travers la lentille

mince est définie par K_L :

$$P_V \propto K_L \cdot P_C \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} f_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_L & 0 \\ 0 & 0 & -1 & f_L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 Modèle sténopé

Le modèle sténopé est couramment utilisé dans la littérature pour décrire la projection d'un point $P_C = (X_C, Y_C, Z_C, 1)^\top$ vers un pixel $p = (u, v, 1)^\top$ dans l'espace image de la caméra. Ce modèle décrit la formation d'image avec la projection perspective d'une scène sur un plan considérant que chaque rayon de lumière passe à travers le centre optique O de la lentille.

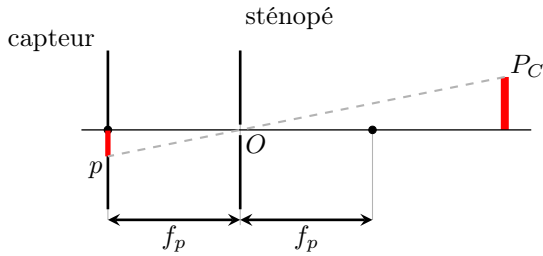


FIGURE 3 – Projection du modèle sténopé.

La fonction de projection d'un sténopé K_p s'exprime ainsi :

$$p \propto K_p \cdot P_C \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

où (u, v) sont les coordonnées pixelliques du point projeté dans le repère image. (f_x, f_y) sont les focales pixeliques telles que $f_x = f_p/d_x$ et $f_y = f_p/d_y$, avec f_p la distance focale et d_x, d_y les dimensions d'un pixel selon (x, y) (en mètres). (u_0, v_0) sont les coordonnées pixelliques du point principal dans le repère image.

2.3 Modèle complet sans distorsion

Dans une caméra plénoptique, les rayons provenant d'un objet sont projetés à travers la lentille principale puis à travers les micro-lentilles. Alors que le modèle sténopé ne considère qu'un unique rayon par point de l'objet, le modèle de la lentille mince prend en compte le faisceau lumineux incident (Figure 2). Les rayons lumineux issus d'un même point de l'espace sont projetés à travers différentes micro-lentilles. C'est pourquoi la lentille principale d'une caméra plénoptique est souvent modélisée comme une lentille mince.

La projection d'un point de la scène $P_W = (X_W, Y_W, Z_W, 1)^\top$ vers un pixel $p_l = (u, v, 1)^\top$ à travers la lentille principale puis une micro-lentille d'indice l est décrite par la relation :

$$p_l = K_l \cdot P_W \quad (7)$$

avec :

$$K_l = K_{pl} \cdot {}^lT_V \cdot K_L \cdot {}^C T_W \quad (8)$$

où ${}^C T_W$ est la fonction de changement de coordonnées du repère de la scène au repère de la caméra. lT_V le changement de coordonnées du repère de la lentille principale au repère de la MLA. K_{pl} la fonction de projection du modèle sténopé de la micro-lentille d'indice l (Section 2.2).

2.4 Modélisation des distorsions

Pour modéliser au mieux le comportement du système, nous prenons en compte les aberrations optiques générées par la lentille principale. Ce modèle de distorsions est appliqué sur P_V . Les distorsions considérées sont les distorsions radiales et tangentielles décrites ci-dessous :

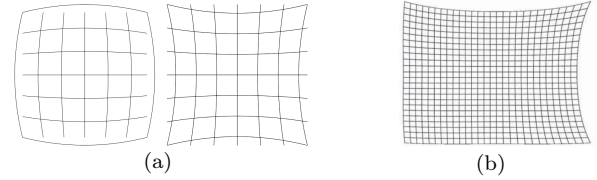


FIGURE 4 – Effet des distorsions (a) radiale et (b) tangentielle sur l'image d'une grille régulière.

Distorsion radiale. La distorsion radiale est définie par un polynôme dépendant de la variable $r = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$, la distance entre un point projeté (x_u, y_u) et l'axe optique.

$$\Delta r_{rad} = A_0 r^3 + A_1 r^5 + A_2 r^7 + \dots \quad (9)$$

Le point final (x_{rad}, y_{rad}) est obtenu après l'application de Δr_{rad} sur (x_u, y_u) :

$$\Delta x_{rad} = x_u \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r}$$

$$\Delta y_{rad} = y_u \cdot \frac{\Delta r_{rad}}{r}$$

Dans notre implémentation nous considérons les trois premiers coefficients (A_0, A_1, A_2) .

Distorsion tangentielle. La distorsion tangentielle est produite par le mauvais alignement entre le capteur et la lentille. Nous utilisons la formulation de Brown [4] avec les deux premiers coefficients (B_0, B_1) .

$$\Delta x_{tan} = B_0 \cdot (r^2 + 2x_u^2) + 2B_1 x_u y_u \quad (10)$$

$$\Delta y_{tan} = B_1 \cdot (r^2 + 2y_u^2) + 2B_0 x_u y_u \quad (11)$$

2.5 Modèle complet avec distorsions

Après avoir modélisé les aberrations géométriques, la fonction de projection plénoptique K_l est redéfinie :

$$p = K_l \cdot P_W \quad (12)$$

$$K_l = K_{pl} \cdot {}^l T_V \cdot K_D \cdot K_L \cdot {}^C T_W \quad (13)$$

avec :

$$K_D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_{rad} + \Delta x_{tan} \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_{rad} + \Delta y_{tan} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

La taille d'une micro-image étant petite (20×20 pixels pour la caméra Raytrix), nous avons choisi de négliger les distorsions causées par les micro-lentilles.

3 Méthode de calibrage proposée

Notre méthode de calibrage est basée sur une mise en correspondance 2D/3D entre les points 3D d'une mire damier et leurs observations dans l'image. Si cette approche est standard pour les caméras classiques, les méthodes actuelles de calibrage de caméras plénoptiques utilisent généralement les images reconstruites à partir de logiciels constructeurs [10, 18, 21], négligeant ainsi les éventuelles interpolations réalisées par ces derniers. Nous proposons ici une méthode de calibrage utilisant une détection dans les micro-images, afin d'exprimer directement le problème d'optimisation dans l'espace du capteur, nous affranchissant ainsi d'une étape de reconstruction.

Plus formellement, si S désigne le vecteur de paramètres du modèle à estimer, le but est de minimiser la fonction de coût $\varepsilon(S)$ qui est la somme des erreurs quadratiques entre les projections des coins de damier à travers les micro-lentilles par la fonction $K_l(S)$ et leurs observations $p_{i,k,l}$ dans les différentes micro-images correspondantes.

La fonction de coût $\varepsilon(S)$ s'écrit :

$$\varepsilon(S) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_{i,k}} \|K_l(S) \cdot P_k - p_{i,k,l}\|^2, \quad (15)$$

où $i \in \{1, \dots, I\}$ est l'indice de image courante. P_k , $k \in \{1, \dots, K\}$ sont les points 3D de la mire. $L_{i,k}$ est le nombre d'observations de P_k dans l'image i . Et K_l est la fonction de projection définie à l'équation 13.

La procédure de calibrage est résumée Figure 5.

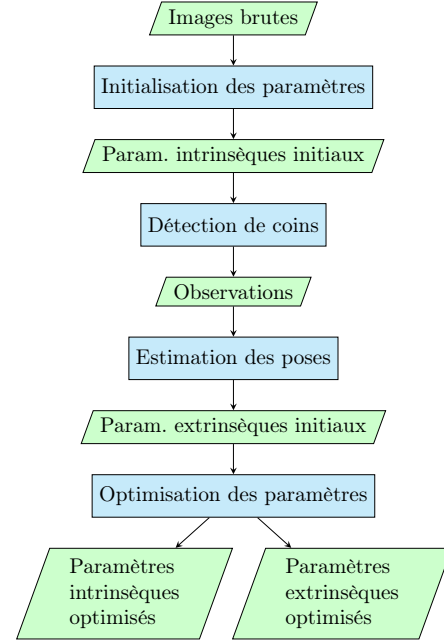


FIGURE 5 – Procédure de calibrage de la caméra plénoptique

Une première phase d'initialisation des paramètres intrinsèques nous permet d'estimer la position des micro-images dans l'image brute (Section 3.1). Ces paramètres permettent alors de parcourir les micro-images pour détecter les coins de damier (Section 3.2). Les poses de caméras sont alors initialisées (Section 3.3) puis les paramètres intrinsèques et extrinsèques sont affinés (Section 3.4).

3.1 Initialisation des paramètres intrinsèques

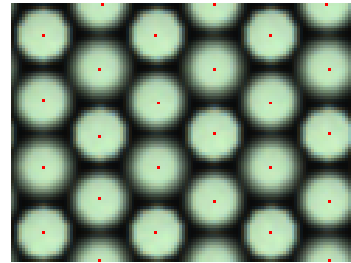


FIGURE 6 – Zoom sur une image brute de scène blanche avec les détections des centres de micro-images.

Pour estimer la position de chaque micro-image, nous estimons les paramètres de projection des centres des micro-lentilles dans l'image brute.

En utilisant une image brute obtenue d'une scène blanche (Figure 6), les projections des centres des

micro-lentilles sont détectés aux maximums d'intensité lumineuse des micro-images comme décrit dans la méthode de Dansereau et al. [5].

Lorsque les centres des micro-images sont localisés, nous pouvons initialiser les différents paramètres détaillés Table 1. Les poses du capteur et de la MLA sont estimées dans le repère de la caméra. μ_{space} désigne l'écart moyen entre les micro-lentilles (en μm).

Paramètres	nbr. inconnues
μ_{space}	1
Pose de la MLA	6
Pose du capteur	3
total	10

TABLE 1 – Paramètres de intrinsèques à initialiser.

Pour contraindre l'optimisation le capteur est considéré parallèle à la lentille mince.

Ces paramètres sont optimisés grâce à un algorithme de Levenberg-Marquardt (LM). On minimise la somme des erreurs quadratiques entre les projections des centres des micro-lentilles $K_{pl}(S_{int}) \cdot P_W$ et leurs observations o_l correspondantes dans l'image brute. Ici, le vecteur d'état S_{int} est défini par les paramètres cités Table 1.

La fonction de coût $\varepsilon(S_{int})$ s'écrit :

$$\varepsilon(S_{int}) = \sum_{l=1}^L \|K_{pl}(S_{int}) \cdot P_W - o_l\|^2 \quad (16)$$

Les paramètres de la lentille principale sont initialisés en utilisant les paramètres de l'objectif donnés par le constructeur.

3.2 Détection des coins de damier

Grâce à l'initialisation des paramètres de la grille de micro-lentilles, nous pouvons parcourir les micro-images et détecter les coins de damier.

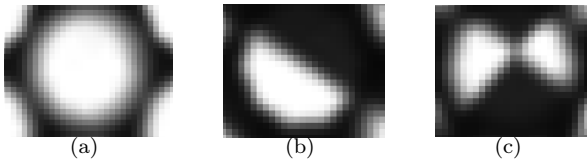


FIGURE 7 – Micro-images de type (a) plein, (b) bord et (c) coin.

Notre méthode de détection se déroule en deux principales étapes : durant notre calibrage nous utilisons un damier ce qui nous permet de supposer qu'il n'y que trois types de micro-images à détecter (*coin*, *bord*, *plein*) en fonction de leur contenu comme illustré dans la Figure 7. Nous caractérisons d'abord les différents

types de micro-images pour de ne garder que les micro-images utiles et donc de diminuer les temps de calcul. Enfin nous détectons les coins dans micro-images de type *coin*.

L'utilisation de détecteurs de coins classiques tel que Harris [7] ne donne pas de résultats satisfaisants. En effet, de nombreux coins sont détectés au bords des micro-images à cause du vignettage généré par les bords des micro-lentilles. Aussi, certaines micro-images sont floues car la MLA d'une caméra Raytrix est composée de trois types de micro-lentilles définis par trois distances focales différentes empêchant ainsi de localiser précisément le coin.

Nous proposons de caractériser les micro-images à partir d'une représentation en histogramme : les gradients en coordonnées polaires sont calculés pour obtenir leurs magnitudes et leurs orientations. Un histogramme est obtenu en cumulant les valeurs des magnitudes pour chaque orientation.

Trois types de gabarits d'histogrammes sont rencontrés lors de l'observation d'un mire damier : la courbe correspondant à une micro-image de type *plein* ne contient aucun pic alors que celle d'un type *bord* possède un pic. Pour une micro-image de type *coin*, la courbe présente deux pics. Ces pics donnent une information sur le nombre de bords de case de damier et leurs orientations présents dans la micro-image.

Pour chaque micro-image de type *coin*, une image modèle est générée à partir des caractéristiques obtenues dans l'histogramme (orientations des lignes, couleurs, position approximative du coin). La position du coin est raffinée avec une précision subpixelique en optimisant la transformation affine 2D permettant de passer de l'image modèle à la micro-image courante avec une Efficient Second-order Minimization (ESM) (Benhimane et al. [2]).

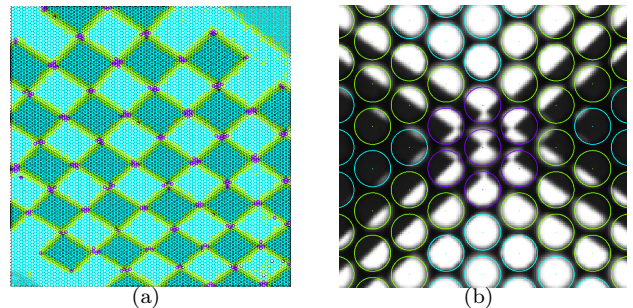


FIGURE 8 – Détection de micro-images de types *plein* (bleu), *bord* (vert) et *coin* (violet) pour des images de Raytrix : (a) image brute, (b) zoom.

3.3 Estimation des poses

Pour optimiser les paramètres de la caméra, nous mettons en correspondance les coins de la mire avec les ob-

servations. Cette étape nécessite actuellement un clic par image pour indiquer un coin qui servira de repère pour l’indexation des autres coins.

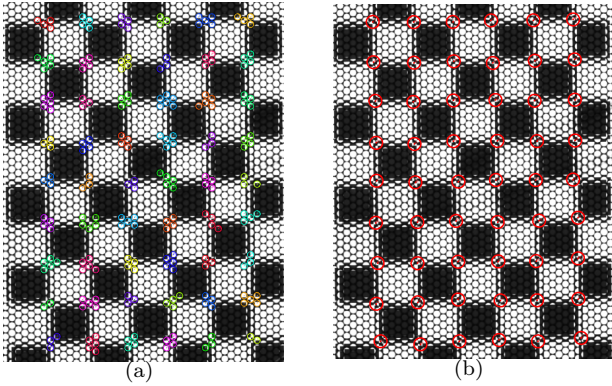


FIGURE 9 – Image brute contenant les groupes d’observations (a) et leurs barycentres (b)

Nous estimons les poses de la caméra pour chaque image en utilisant les informations images brutes : pour chaque groupe d’observations correspondant à un coin de damier (Figure 9(a)) nous calculons leur barycentre dans l’image (Figure 9(b)). Ces barycentres correspondent à la projection des coins de damier à travers la lentille principale avec le modèle sténopé. Nous estimons les poses de la caméra grâce un algorithme de Perspective-n-Point (PnP) [16, 11].

3.4 Optimisation globale

Après l’initialisation de tous les paramètres de projection de la caméra (Table 2), ils sont optimisés dans un algorithme de LM avec la fonction de coût (Eq. 15). Les paramètres définissant le vecteur d’état S sont référencés dans la table ci-dessous :

Paramètres	nbr. inconnues
f_L (mm)	1
(A_0, A_1, A_2)	3
(B_0, B_1)	2
Pose de la MLA (mm)	6
Poses de caméra (mm)	$6 \times I$

TABLE 2 – Paramètres de la caméra à optimiser.

où f_L désigne la focale de la lentille mince, (A, B) sont respectivement les paramètres de distorsions radiales et tangentielles de la lentille mince. Chaque pose est composée d’une translation (3 paramètres) et d’une rotation (3 paramètres). Nous considérons que la pose du capteur et la valeur de μ_{space} sont déterminées après l’optimisation présentée Section 3.1. I est le nombre d’images utilisés.

Ainsi on optimise au total 6 paramètres extrinsèques par image et 12 paramètres intrinsèques.

4 Évaluation

4.1 Protocole expérimental

Dans cette section, nous évaluons la méthode proposée. Les tests ont d’abord été réalisés en simulation puis sur scène réelle.

Sur simulateur. Nous avons développé un logiciel permettant de simuler une caméra plénoptique. Il permet de projeter des points 3D de scènes virtuelles vers l’espace image selon le modèle défini dans l’équation (13) ainsi que de générer des images plénoptiques par lancer de rayon. Ce simulateur est utilisé pour évaluer quantitativement la précision des résultats donnés par la procédure d’optimisation dans un environnement maîtrisé.

Sur scène réelle. Nos expériences ont été réalisées avec une caméra Raytrix *R5* équipée d’un capteur Baumer *HGX40* et d’un objectif Tamron *23FM16SP* de distance focale égale à $16mm$.

12 images ont été acquises à une distance moyenne de $80cm$ d’une mire plane dont les caractéristiques sont connues.

L’optimisation non linéaire des paramètres utilise l’algorithme de Levenberg-Marquardt implémenté dans la bibliothèque LMA : <https://github.com/bezout/LMA> [17].

Nous optimisons les paramètres de la Table 2 et présentons les résultats dans les Tables ??, 4 et 5. On note D la distance entre la lentille principale et la MLA ainsi que d la distance entre la MLA et le capteur. Par soucis de lisibilité seuls les paramètres les plus significatifs sont présentés ici.

4.2 Simulation

Les poses de la caméra ont été générées aléatoirement selon une loi normale à une distance moyenne de $80cm$ de la mire et avec la contrainte que chaque coin de damier soit projeté au moins dans une micro-image.

Après avoir généré 30 poses et des observations, nous avons ajouté une erreur initiale sur nos paramètres de projection de caméra avant l’optimisation. L’erreur initiale sur les poses de la caméra est de $\pm 50mm$ en translation et de $\pm 0.1rad$ en rotation sur chaque axe. Celle sur f_L est de $\pm 1mm$ et celles appliquées sur chaque axe de la translation de la MLA) est de $\pm 5\mu m$. Une erreur de $1e^{-3}$ a été ajoutée sur tous les paramètres de distorsion A_0 et B_0 .

Le calibrage a été d’abord testé avec des observations parfaites puis avec des observations bruitées de ± 1 pixel.

Les résultats en simulation sont présentés dans les Tables 3 et 4.

Observations \ Images	10	20	30
Parfaites	$8.9e^{-14}$	$8.9e^{-14}$	$9.3e^{-14}$
Bruitées	1.004	0.992	0.994

TABLE 3 – RMSE au bout de 200 itérations avec observations parfaites et bruitées en fonction du nombre d’images utilisées pour le calibrage.

Paramètres	Réf.	10	20	30
f_L (mm)	16	16.010 (0.067%)	15.988 (0.073%)	15.996 (0.022%)
A_0	0	$2.2e^{-4}$	$2.5e^{-4}$	$3.2e^{-5}$
B_0	0	$1.0e^{-3}$	$-1.6e^{-3}$	$2.7e^{-4}$
μ_{space} (μm)	125	123.415 (1.268%)	124.819 (0.145%)	124.62 (0.304%)
D (mm)	15.2	15.178 (0.143%)	15.207 (0.047%)	15.202 (0.011%)
d (μm)	450	471.8 (4.844%)	442.8 (1.600%)	448.2 (0.262%)

TABLE 4 – Comparaison des paramètres intrinsèques d’une caméra plénoptique simulée avec la vérité terrain (valeurs exactes et pourcentage d’erreur) en fonction du nombre d’images (10, 20 et 30) avec observations bruitées.

4.3 Images réelles

Initialisation des paramètres intrinsèques.

L’écart moyen entre les micro-lentilles a été arbitrairement défini à $125\mu m$. Les poses du capteur et de la MLA ont été initialisées à l’aide d’un simulateur.

La distance focale f_L de la lentille mince a été définie à $16mm$ et ses paramètres de distorsion à zéro.

Ces paramètres ont ensuite été optimisés en minimisant la fonction de coût (16).

Optimisation globale. Lors de l’optimisation globale, nous optimisons l’ensemble des paramètres cités Table 2.

Paramètres	Valeurs optimisées
f_L (mm)	15.979
(A_0, A_1, A_2)	$2.9e^{-4}, -9.8e^{-6}, 9.8e^{-8}$
(B_0, B_1)	$6.4e^{-3}, 1.1e^{-4}$
μ_{space} (μm)	125.751
D (mm)	15.384
d (μm)	238.2

TABLE 5 – Paramètres intrinsèques de la caméra plénoptique après optimisation.

Validation. La projection des coins de damier après optimisation est proche des observations (Figure 10(b)) avec un Root Mean Square Error (RMSE) final

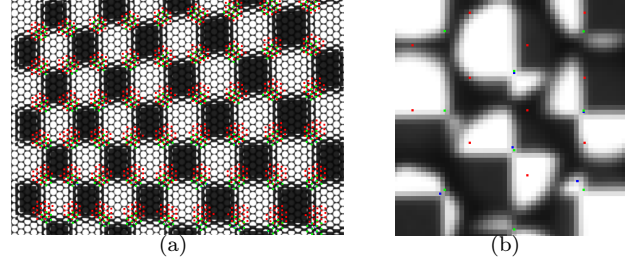


FIGURE 10 – Image brute totale (a) et zoomée (b) contenant les observations d’un coin de damier (bleu) et ses projections dans la caméra avant (rouge) et après (vert) optimisation.

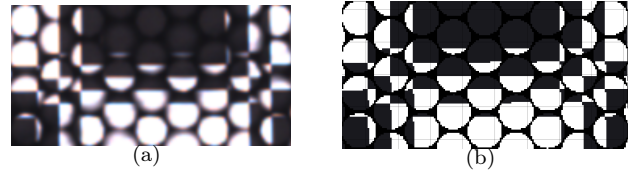


FIGURE 11 – Zoom sur une image réelle (a) et sur une image faite en simulation utilisant les paramètres intrinsèques et extrinsèques optimisés (b)

égal à 1.0838 au bout de $1e^4$ itérations.

Après optimisation, nous avons simulé une scène composée d’un damier et d’une caméra dont les paramètres sont ceux optimisés (Figure 11(b)). L’image résultante est proche de l’image réelle ce qui illustre la bonne adéquation entre le modèle proposé (et simulé) et la caméra réelle.

5 Conclusion et perspectives

Dans cet article nous avons présenté une nouvelle méthode de calibrage d’une caméra plénoptique focalisée. Dans cette méthode le problème de calibration est formulé comme la minimisation d’une erreur de reprojection exprimée directement dans l’espace des données du capteur. Nous avons ainsi montré que l’on peut calibrer cette caméra sans reconstruire d’images synthétisées pour obtenir les observations nécessaires. Pour cela nous avons proposé un détecteur spécifique permettant de localiser précisément les coins de damier dans chacune des micro-images. Après avoir initialisé les paramètres intrinsèques de la caméra grâce à une seule image brute prise d’une scène blanche, nous optimisons tous les paramètres en minimisant l’erreur de reprojection entre les observations et les projections des coins dans l’espace image. Notre méthode a été validée quantitativement en simulation et qualitativement sur les images réelles d’une caméra Raytrix. Nos travaux futurs viseront notamment à analyser le gain

apporté par cette procédure de calibration sur l'estimation de profondeur à partir d'une caméra plénoptique.

6 Remerciements

Nous remercions Christophe Cudel du laboratoire MIPS de l'Université de Haute-Alsace pour nous avoir permis de faire des acquisitions avec la caméra.

Ces recherches ont été financées par le programme de recherche "Investissements d'avenir" à travers le Laboratoire d'Excellence IMobS3 (ANR-10-LABX-16-01) et le projet FUI n°17 CLEAN Robot.

Références

- [1] E. H. Adelson and J. Y. A. Wang. Single lens stereo with a plenoptic camera. *PAMI*, 14(2) :99–106, 1992.
- [2] S. Benhimane and E. Malis. Real-time image-based tracking of planes using efficient second-order minimization. In *IROS*, volume 1, pages 943–948. IEEE, 2004.
- [3] Y. Bok, H.-G. Jeon, and I. S. Kweon. Geometric calibration of micro-lens-based light field cameras using line features. In *PAMI*, Lecture Notes in Computer Science, pages 287–300. IEEE, 2017.
- [4] D. C. Brown. Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering*, 32(3) :444–462, 5 1966.
- [5] D. Dansereau, O. Pizarro, and S. Williams. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras. In *CVPR*, pages 1027–1034, June 2013.
- [6] F. Dong, S.-H. Ieng, X. Savatier, R. Etienne-Cummings, and R. Benosman. Plenoptic cameras in real-time robotics. *IJRR*, 32(2) :206–217, 2013.
- [7] C. Harris and M. Stephens. A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference*, volume 15, page 50, 1988.
- [8] C. Heinze, S. Spyropoulos, S. Hussmann, and C. Perwass. Automated robust metric calibration of multi-focus plenoptic cameras. In *I2MTC*, pages 2038–2043, 5 2015.
- [9] H. E. Ives. Parallax panoramagrams made with a large diameter lens. *OSA*, 20(6) :332–340, Jun 1930.
- [10] O. Johannsen, C. Heinze, B. Goldluecke, and C. Perwass. On the calibration of focused plenoptic cameras. In *GCPR*, 2013.
- [11] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, and P. Fua. Epnp : An accurate o(n) solution to the pnp problem. *IJCV*, 81(2), 2009.
- [12] G. Lippmann. Epreuves reversibles. photographies integrales. *Comptes Rendus De l'Academie Des Sciences De Paris*, 146 :446–451, 1908.
- [13] A. Lumsdaine and T. Georgiev. The focused plenoptic camera. In *ICCP*, pages 1–8, San Francisco, CA, April 2009.
- [14] R. Ng. *Digital light field photography*. PhD thesis, Stanford University, Stanford, USA, July 2006.
- [15] R. Ng, M. Levoy, M. Brédif, G. Guval, M. Horowitz, and P. Hanrahan. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. Technical report, Stanford University, Computer Sciences, CSTR, 05 2005.
- [16] D. Nistér. An efficient solution to the five-point relative pose problem. *PAMI*, 26(6) :756–777, 2004.
- [17] D. Ramadasan, M. Chevaldonné, and T. Chateau. Mclsam : a multiple constrained slam. In *BMVC*, pages 107–1, 2015.
- [18] K. H. Strobl and M. Lingenauber. Stepwise calibration of focused plenoptic cameras. *CVIU*, 145 :140–147, 2016.
- [19] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, and M. Levoy. High performace imaging using large camera array. *ACM TOG*, 24(3) :765–776, July 2005.
- [20] S. Xu, Z.-L. Zhou, and N. Devaney. *Multi-view Image Restoration from Plenoptic Raw Images*, chapter ACCV, pages 3–15. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [21] N. Zeller, C. Noury, F. Quint, C. Teulière, U. Stilla, and M. Dhome. Metric calibration of a focused plenoptic camera based on a 3d calibration target. *ISPRS Annals*, pages 449–456, 2016.
- [22] N. Zeller, F. Quint, and U. Stilla. Narrow field-of-view visual odometry based on a focused plenoptic camera. *ISPRS Annals*, II-3/W4 :285–292, 2015.