

Une méthode de Calibration Radiométrique de Caméra à focale variable

Jean-Philippe Tarel

INRIA

Domaine de Voluceau, Rocquencourt
B.P. 105, 78153 Le Chesnay Cedex, France.

Tél : (1) 39 63 54 79

E-mail: Jean-Philippe.Tarel@inria.fr

<http://www-syntim.inria.fr/syntim/recherche/tarel/index-fra.html>

Résumé

Corriger les défauts de la radiométrie de la caméra se révèle important puisqu'elle permet de vérifier l'hypothèse de similarité des cellules CCD faite dans de nombreuses méthodes d'analyse d'images, comme le shape-from-shading, la reconstruction par corrélation et l'extraction de contours. Nous décrivons la modélisation de ces défauts radiométriques à partir de la physique du senseur. Les paramètres de ce modèle peuvent être estimés par différentes expérimentations que nous avons réalisées sur notre objectif, ce qui a permis de partiellement valider le modèle et d'en proposer un autre simplifié, qui reste valide expérimentalement pour un objectif à focale variable. Enfin, les avantages de la correction radiométrique sont illustrés sur différents processus d'analyse d'image.

Mots-clés:

calibration de caméra, radiométrie, bruit, reconstruction par corrélation, shape-from-shading.

1 Introduction

Dans un système de vision, il est utile, pour faciliter l'analyse des images, de connaître la physique du capteur qui les fournit. En particulier, il est important d'avoir les caractéristiques géométriques et radiométriques de la caméra. La modélisation géométrique du capteur et les méthodes d'estimation de ses paramètres font l'objet de la calibration de caméra. La calibration géométrique de caméra est un sujet bien exploré [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] et l'on dispose de nombreux modèles d'une caméra à focale fixe [6, 8]. Par contre, la calibration radiométrique n'a été encore que rarement étudiée en vision par ordinateur [9]. Elle permet pourtant de supposer que,

après correction, chaque pixel a un comportement identique du point de vue photométrique. Or, de nombreuses méthodes d'analyse des images, comme les détecteurs de contours, les

Abstract

In Computer Vision methods such as shape-from-shading, 3D reconstruction by correlation and edge detection, all the pixels of the CCD matrix are assumed equivalent. A radiometric camera calibration step is necessary to verify this hypothesis, which is the subject of this paper. First, the modeling of the sensor, based on its physical properties, is described. A method to estimate the parameters of this model is given and the results of experimentations are described. These experiments valid the complete model only partially, and simplifications of this model are subsequently proposed which remain experimentally correct with focal length variations. Finally, improvements of the image analysis process after performing radiometric calibration are demonstrated.

Keywords:

camera calibration, radiometry, noise, reconstruction by correlation, shape-from-shading.

méthodes de reconstruction par corrélation et le shape-from-shading reposent sur l'hypothèse que chaque pixel a la même réponse.

Nous nous intéressons ici uniquement à la partie radiométrique de la calibration. Il y a de nombreuses sources de perturbations radiométriques, comme les divers défauts de construction qui peuvent affecter la matrice CCD. Par exemple, une cellule CCD a une remarquable linéarité mais, suivant le pixel, sa réponse peut avoir une pente différente,

d'où des écarts de sensibilité. L'objectif de la caméra perturbe lui aussi la radiométrie à cause du phénomène de "vignettage" en particulier, qui produit un assombrissement sur les bords de l'image.

Ces perturbations sont décrites succinctement dans la partie 2. Comme nous avons pu le constater expérimentalement (partie 4), les variations réelles de radiométrie d'un pixel à un autre sont difficiles à modéliser complètement. La correction passe donc par la prise d'images de référence permettant de calibrer indépendamment chacun des pixels (partie 3). Dans la partie 4, nous présentons des résultats sur l'estimation des corrections à apporter sur la caméra à focale variable du laboratoire, et les difficultés pratiques rencontrées au cours de nos expérimentations sont discutées. Enfin, dans la dernière partie, l'intérêt de la calibration radiométrique est illustré sur quelques exemples.

2 Défauts radiométriques

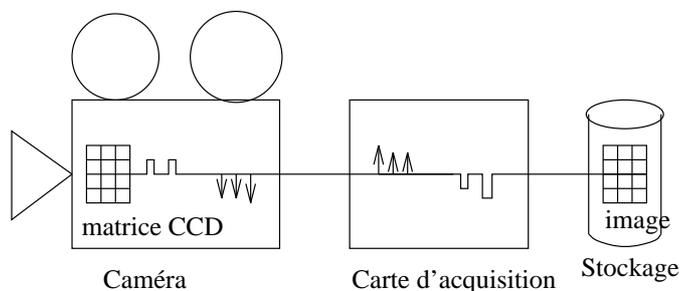


FIG. 1 - Système d'acquisition d'images.

Les pixels sur une image peuvent avoir un comportement radiométrique différent du fait des défauts de construction de la matrice CCD [10] et des écarts d'éclairage dus à l'optique de l'objectif [11]. Il est aussi nécessaire de modéliser le bruit du capteur pour avoir un modèle complet du processus de formation des images [9]. On ne s'intéresse pas ici aux déformations de type géométrique : distorsions, synchronisation du balayage.

2.1 Écarts de sensibilité de la matrice CCD

Une cellule CCD, par effet photoélectrique, produit un nombre d'électrons proportionnel au nombre de photons incidents durant le temps d'intégration. Le rendement quantique est très bon. Comme les défauts de linéarité sont inférieurs à 0.1% sur une large plage de fonctionnement, la réponse d'une cellule CCD est donc proportionnelle à l'éclairage reçu par sa surface. Le gain de la réponse dépend de l'épaisseur de la couche de silicium de la cellule, dont la régularité sur toute la surface de la rétine est difficile à maîtriser parfaitement lors du processus de fabrication. Les variations de sensibilité peuvent facilement atteindre 1% sur l'ensemble de la rétine car le rendement quantique d'une cellule est très sensible à son épaisseur. De plus, différents défauts, dits cosmétiques, affectent localement la qualité de la surface sensible. Par exemple, il est fréquent de trouver des pixels insensibles dans une matrice CCD.

Les écarts de sensibilité entre pixels, de par la linéarité du capteur, peuvent donc être modélisés par un biais multiplicatif $g_{sensibilité}^i$ propre à chaque pixel i (voir équation 1).

2.2 Courant d'obscurité

Généralement, la matrice CCD fonctionne à température ambiante. En conséquence, un signal thermique s'ajoute à la réponse de chaque élément. C'est le courant d'obscurité. D'un pixel à l'autre, le courant d'obscurité peut varier de 10%. Nous avons observé une valeur de cet ordre avec notre caméra (partie 4.2). Le courant d'obscurité est bien sûr proportionnel au temps d'intégration. Par là-même, il reste faible pour des temps d'intégration très courts tels ceux que l'on rencontre habituellement en vidéo. Si un temps d'intégration long est utilisé comme dans les applications astronomiques, il est alors nécessaire de refroidir le capteur pour diminuer le bruit thermique [10]. Ce biais est additif. Il peut donc être modélisé par une variable aléatoire $I_{obscurité}^i$. A ce dernier s'ajoute le bruit $I_{transmission}^i$ dû à la transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. $I_{transmission}^i$ est supposé centré et indépendant d'un pixel à l'autre. Avec notre système, ce bruit est assez important à cause du passage numérique/analogique en sortie de caméra puis analogique/numérique en entrée de la carte d'acquisition des images (figure 1).

2.3 Variations d'éclairage dues à l'objectif

Un objectif ne produit pas un éclairage uniforme de la rétine même si un écran blanc uniforme est observé. De plus, cet assombrissement aux bords varie avec la focale. Nous avons observé une variation maximum de 4% avec notre objectif (voir partie 4.4). Comme pour l'écart de sensibilité des cellules CCD, la variation d'éclairage est modélisable par un biais multiplicatif $g_{objectif}^i$. La modélisation de cette variation $g_{objectif}^i$, en fonction de la position du pixel, est possible si l'optique de l'objectif est complètement connue. Malheureusement, ces informations ne sont que très rarement données par le constructeur. Néanmoins, de par la conception des objectifs, la variation d'éclairage doit présenter une symétrie circulaire autour du centre de la caméra. Nous allons donc décrire l'assombrissement observable pour des modèles très rudimentaires d'objectif.

2.3.1 Modèle sténopé

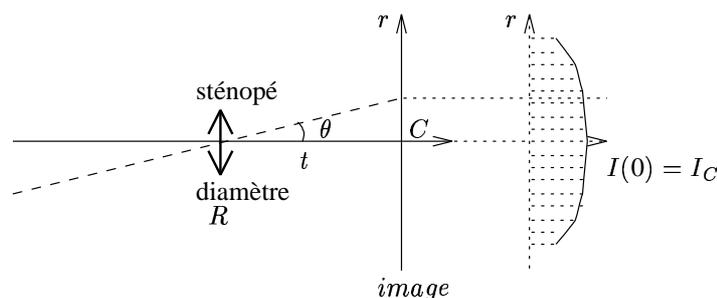


FIG. 2 - Profil de l'assombrissement aux bords d'une lentille en trou d'épingle de tirage t .

Soumise à un éclairage uniforme (écran blanc infini), une lentille mince de petit diamètre éclaire le plan image avec une décroissance circulaire, fonction de la distance à son centre C (figure 2). Dans ce cas, l'éclairage maximum $I(0)$ s'observe donc au centre C et l'assombrissement au bord est donné par la formule suivante [12] :

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \cos^4(\theta) = \frac{1}{(1 + (\frac{r}{f})^2)^2}$$

où θ est l'angle selon lequel le pixel voit l'objet réel (figure 2). Le paramètre t est assimilé couramment à une focale, mais nous préférons le terme, plus exact en optique, de tirage.

Comme les rétines des caméras sont généralement petites, l'assombrissement est assez faible. Par exemple, une rétine de 10 mm, avec un objectif de 50 mm, est assombrie au bord d'au maximum 2%. Outre une variation globale de l'éclairément de la rétine (variation de $I(0)$), un changement de tirage induit une variation locale de l'assombrissement en un point donné de la rétine. Ainsi, le doublement du tirage de l'objectif précédent divise l'écart d'assombrissement en chaque point par quatre.

Cette description est valide pour un objectif à une seule lentille, mais la décroissance est encore plus forte pour un objectif réel à cause du phénomène dit de "vignettage" des objectifs.

2.3.2 Objectif simplifié

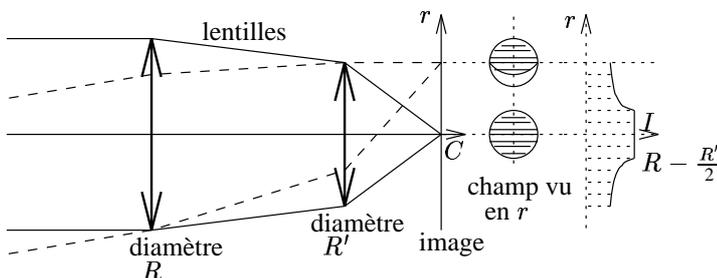


FIG. 3 - Phénomène de vignettage d'un objectif. Suivant sa position, un point r de l'image ne voit pas la même portion du champ de vue.

L'épaisseur de l'objectif constitué d'une série de lentilles ne permet pas à tous les pixels de recevoir le même flux lumineux (figure 3). Le vignettage est d'autant plus important que l'objectif est ouvert [11]. La non-uniformité d'éclairage peut aisément atteindre 10% entre le centre et le bord du champ.

Dans le cas où l'objectif peut être réduit à deux diaphragmes de diamètre R et R' comme dans la figure 3, la fonction d'assombrissement s'obtient par autocorrélation des deux disques [13] (figure 4) :

2.3.3 Objectif réel

L'effet de vignettage s'ajoute à la variation avec l'angle solide décrite dans les sections précédentes. Dans les objectifs réels, d'autres phénomènes interviennent telles la réflexion et les diffractions qui compliquent l'obtention de l'expression formelle de $g_{objectif}$.

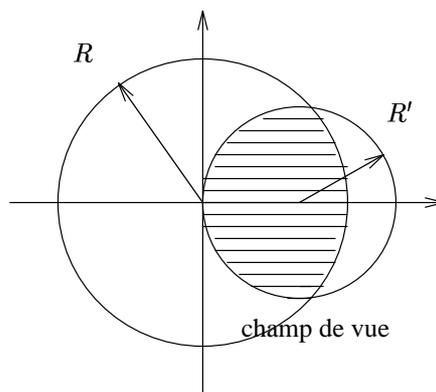


FIG. 4 - Autocorrélation de deux disques pour calculer l'assombrissement dû au vignettage.

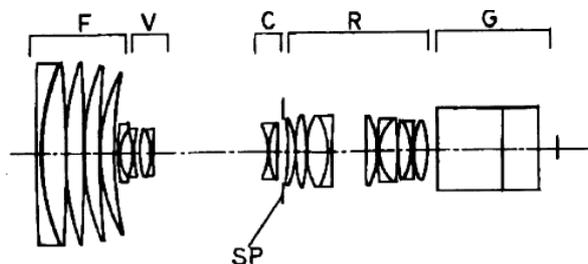


FIG. 5 - Dispositif optique réel de notre objectif Canon J15x9.5B 1:1.8 à focale variable extrait du brevet associé [14].

De nombreux objectifs zooms possèdent quatre groupes optiques : une lentille Frontale, un Variateur, un Compensateur et un Relai optique (groupes F, V, C, R dans la figure 5). Chacun de ces groupes assurent une fonction privilégiée. La lentille frontale bouge seule pour assurer la mise au point. Le variateur permet d'obtenir de grandes variations de la longueur focale. Le compensateur est l'élément qui maintient constant le plan de focalisation. Enfin, le relai optique assure la convergence des rayons lumineux dans le plan de l'image.

La variation de la focale introduit dans les objectifs réels des changements de l'assombrissement au bord, qui sont des fonctions du déplacement des lentilles. Ces variations sont relativement complexes à modéliser et calculer, si bien que les opticiens se contentent pour un objectif réel d'estimer les variations radiométriques par des techniques de lancer de rayons de type Monte-Carlo.

3 Correction radiométrique

D'après la description précédente, le modèle radiométrique de la caméra est pour chaque pixel i de position (x, y) :

$$I_{lue}^i = g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i I_{exacte}^i + I_{obscurité}^i + I_{transmission}^i \quad (1)$$

où I_{exacte}^i est l'intensité qui serait lue si la caméra était parfaite. La variation d'illumination de la rétine produite par

l'objectif s'avère le phénomène le plus important avec les écarts de sensibilité. Mais tandis que l'on peut modéliser les variations d'illumination par un polynôme à symétrie circulaire, il se révèle impossible d'avoir le modèle de la répartition des écarts de sensibilité des cellules CCD, d'après nos expérimentations effectuées sur la caméra couleur du laboratoire. Il est donc nécessaire de calibrer radiométriquement sans modèle a priori, pixel par pixel.

Pour chacun des pixels, on cherche à retrouver son intensité exacte I_{exacte}^i à partir de l'intensité observée I_{lue}^i . Il faut donc obtenir le produit $g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$ et $I_{obscurité}^i$ pour chaque pixel i . L'image des offsets $I_{obscurité}^i$ est obtenue par la prise d'une image avec l'objectif fermé, à la température de travail. D'autre part, $g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$ s'obtient à un facteur près, en prenant l'image d'une surface de pigment uniforme éclairée uniformément. Cette image se nomme Plage de Lumière Uniforme (PLU) ou "flat-field" en astronomie. La procédure de correction radiométrique est très simple au niveau calcul, puisqu'il suffit de soustraire l'image d'offsets à celle qui doit être calibrée, puis de diviser le résultat par la PLU normalisée. Par contre, l'obtention pratique d'images de référence de bonne qualité est plus difficile.

4 Expérimentations

Pour obtenir des images d'offsets et PLU de bonne qualité, il est important d'éliminer préalablement le bruit temporel de transmission. Nous avons donc réalisé des expérimentations pour étudier ce bruit avant de nous intéresser à l'estimation du courant d'obscurité et des écarts de sensibilité. Le système d'acquisition utilisé pour ces mesures est constitué d'une caméra CCD Sony couleur XC-007 avec un objectif Canon J15×9.5B 1:1.8 à focale variable et d'une carte d'acquisition S2200 de Datacell.

4.1 Bruit temporel

Le bruit temporel contenu dans les images est produit essentiellement par la transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. Ce bruit est assez important. Il est supposé gaussien centré, comme en témoigne l'histogramme du bruit observé de la figure 6. Celui-ci a été obtenu par différence d'images acquises à des instants différents.

Il est assez simple d'éliminer ce bruit temporel par la moyenne d'une série d'images de la même scène prise à des instants t différents. La figure 7 montre la variation de la variance du bruit en fonction du nombre d'images moyennées par rapport à la même image de référence. La décroissance de la courbe est fonction de la racine de l'inverse du nombre d'images. La courbe théorique de la variance v est facile à obtenir à partir de l'équation (1) :

$$\begin{aligned} v(I_{lue} - I_{lue}^{ref}) &= v(I_{obscurité} - I_{obscurité}^{ref}) \\ &+ \frac{1}{n} \sum_t I_{transmission}^t - \frac{1}{n_{ref}} \sum_t I_{transmission}^{t,ref} \\ &= \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ref}} \right) v(I_{transmission}) + 2v(I_{obscurité}) \end{aligned}$$

où n est le nombre d'images moyennées et n_{ref} le nombre d'images moyennées dans l'image de référence. $v(I_{transmission})$

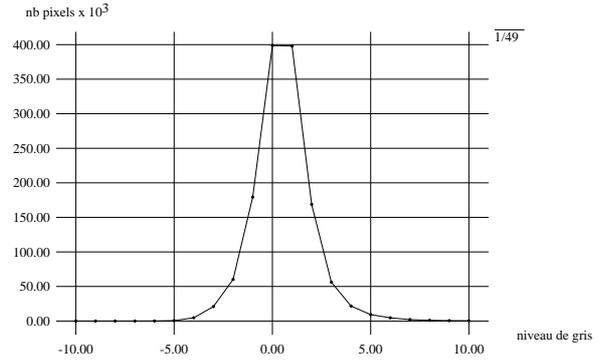


FIG. 6 - Histogramme du bruit de transmission entre la caméra et la carte d'acquisition. L'allure est gaussienne avec un écart type de 1.5 niveau de gris.

est alors la variance du bruit temporel de transmission entre la caméra et la carte, tandis que $v(I_{obscurité})$ est la variance du bruit thermique des pixels de la rétine.

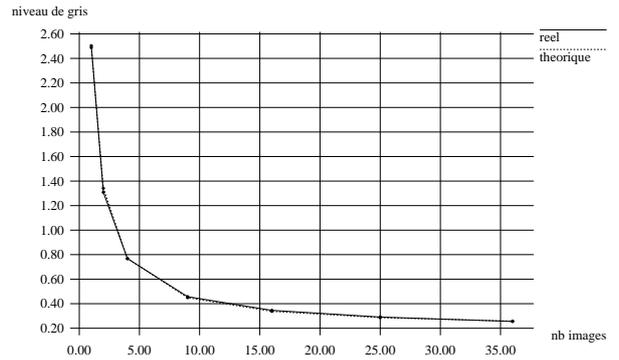


FIG. 7 - Variation théorique et réelle de la variance du bruit en fonction du nombre d'images moyennées.

Par régression linéaire avec la courbe $\frac{1}{n} + \frac{1}{n_{ref}}$, nous avons obtenu 1.52 niveau de gris comme estimation de l'écart type de $I_{transmission}$, et 0.27 niveau de gris comme estimation de l'écart type de $I_{obscurité}$. Dans la figure 7 sont tracées deux courbes, l'une observée, l'autre théorique. Elles se superposent très bien, ce qui valide partiellement le modèle radiométrique utilisé.

En conséquence $I_{transmission}$ est, avec notre dispositif, une variable aléatoire gaussienne centrée de variance 1.5 niveau de gris.

4.2 Courant d'obscurité

Le courant d'obscurité engendre un fond constant sur toute l'image. Nous avons mesuré que ce fond a une valeur $\bar{I}_{obscurité}$ entre 10 et 11 niveaux de gris sur la plage de température ambiante. L'écart type du courant d'obscurité qui a été obtenu dans la partie précédente permet de déduire que d'un pixel à un autre, le courant d'obscurité varie de 3% en moyenne. Néanmoins, la valeur 0.27 de l'écart type du courant d'obs-

curité est assez faible pour être négligée.

En conséquence, l'image d'offsets $I_{obscurité}$ peut donc être supposée constante sur toute la surface sensible sans trop d'erreurs.

4.3 Écart de sensibilité

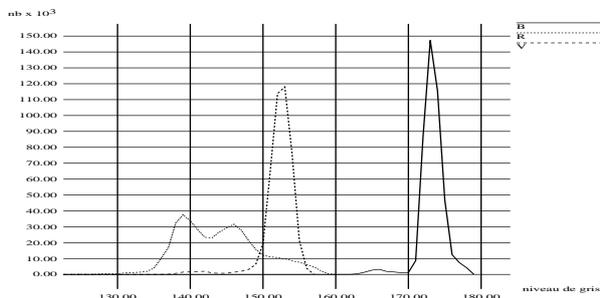


FIG. 8 - Histogramme pour les canaux Rouge, Vert et Bleu de l'écart de sensibilité de notre caméra CCD.

En retirant l'objectif et en le remplaçant par un papier diffusant, la surface sensible est alors éclairée uniformément et l'image obtenue donne à un facteur près le $g_{sensibilité}^i$ de chaque pixel. Avec notre caméra, nous avons observé par comparaison des intensités des pixels de ce type d'image, une variance importante de 1.8 à 5.5 niveaux de gris suivant le canal de couleur (figure 8).

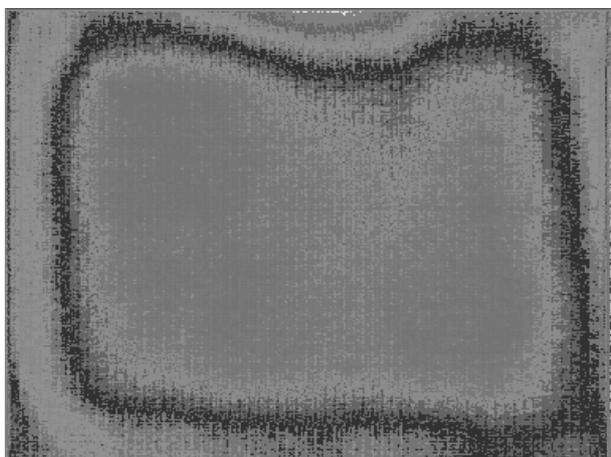


FIG. 9 - Image en fausse couleur des écarts de sensibilité de la matrice CCD de notre caméra sur le canal Rouge.

Même après soustraction de la variance du bruit de transmission, on obtient des écarts type de $g_{sensibilité}^i$ importants. Les écarts de sensibilité doivent donc être systématiquement corrigés. L'écart de sensibilité, estimé à 4% dans notre cas, peut produire jusqu'à une erreur d'une dizaine de niveaux de gris, à l'intensité maximum.

La figure 9 montre en fausses couleurs l'image obtenue avec l'objectif Canon J15×9.5B, après soustraction de l'offset $I_{obscurité}$ pour la composante Rouge. D'après cette figure, les écarts de sensibilité présentent donc plutôt une symétrie rectangulaire. On retrouve le même aspect des variations pour les autres canaux de couleur.

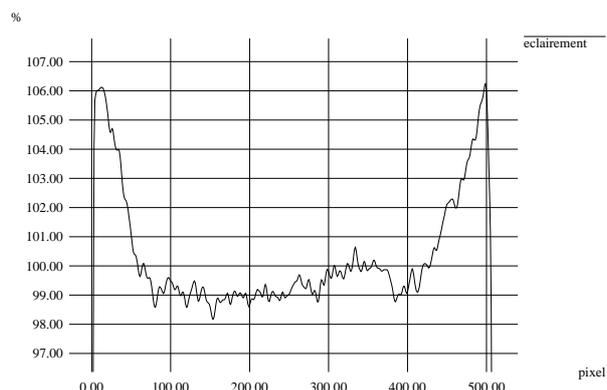


FIG. 10 - Coupe de l'image de la figure 9 après lissage.

Ainsi, dans la figure 10, coupe de l'image de la figure 9 après lissage, le profil des écarts de sensibilité est en forme de trapèze. Néanmoins, la forme de la répartition sur la matrice CCD de ces écarts reste difficile à modéliser.

Les variations des écarts de sensibilité sont très liées à la technique de construction de la matrice CCD. Les résultats précédents ne peuvent donc pas être utilisés pour une autre caméra.

4.4 Variation d'éclairage

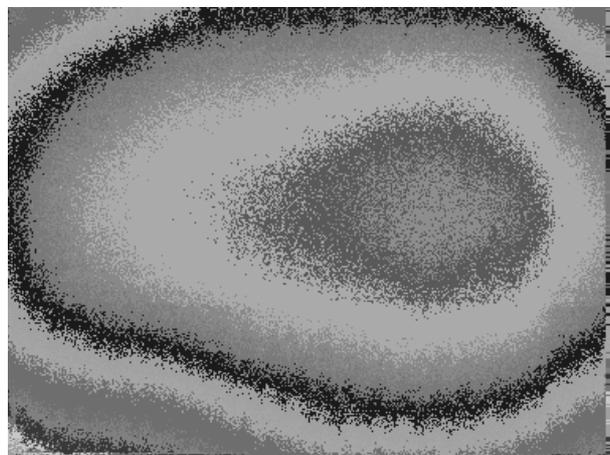


FIG. 11 - Image en fausse couleur des variations d'éclairage produit par notre objectif sur le canal Rouge.

Pour obtenir les variations d'éclairage $g_{objectif}^i$, il est nécessaire de photographier une surface à radiométrie constante, sous un éclairage uniforme comme le soleil. La figure 11 montre en fausses couleurs l'image obtenue avec l'objectif Canon, après soustraction de l'offset $I_{obscurité}$ et correction des écarts de sensibilité $g_{sensibilité}^i$. Les variations d'éclairage présentent une symétrie circulaire. Cet effet s'explique par la construction à symétrie radiale de l'objectif. Sur la figure 11, la symétrie n'est pas parfaitement circulaire à cause de la difficulté à obtenir une carte $g_{sensibilité}^i$ très précise du fait de la difficulté pratique à avoir un éclairage uniforme de la rétine.

Dans nos tests, les variations maximum de $g_{objectif}^i$ sont de 4%, ce qui correspond à une erreur d'une dizaine de niveaux de gris pour l'intensité maximum enregistrable. L'objectif produit donc un des défauts radiométriques prépondérants du même ordre de grandeur que les écarts de sensibilité $g_{sensibilité}^i$.

Nous avons réalisé le même type d'expérimentations avec un autre objectif, un 80mm 1:2.8 Tessar de Zeiss-Opton qui nous a fourni des résultats analogues.

4.5 Stabilité de la variation d'éclairement

En outre, nous avons étudié la variation d'éclairement lors de la modification des caractéristiques de l'objectif, du zoom, de la mise au point et du diaphragme. Nous avons constaté avec une certaine surprise que le changement de ces paramètres ne produit qu'une variation relativement faible de l'éclairement (figure 12). Lors de nos expérimentations, nous avons observé un biais moyen de 1.5 niveaux de gris, malgré la présence de poussières sur le parcours lumineux. En effet, celles-ci produisent des variations locales de l'éclairement visibles à courte focale.

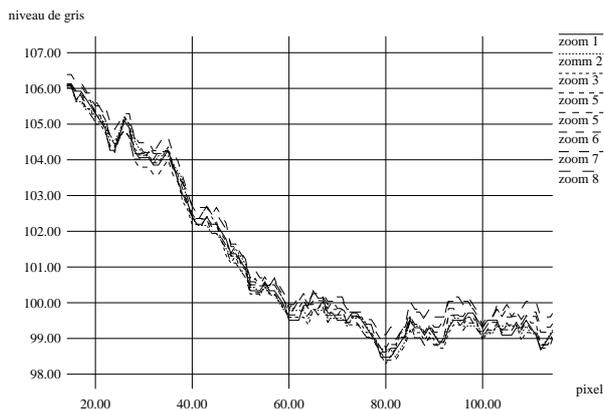


FIG. 12 - Variation de l'éclairement avec la focale.

Ces expérimentations sont a priori difficiles à réaliser car il faut pouvoir acquérir à différentes focales (de 9.5 mm à 143 mm) l'image d'un fond uniforme. Toutefois, elles s'effectuent aisément par temps de fort brouillard.

En conséquence, nous avons constaté expérimentalement que le profil radiométrique de la caméra ne change approximativement qu'à un facteur d'échelle près avec le zoom, la mise au point et le diaphragme.

4.6 Modèle expérimental simplifié

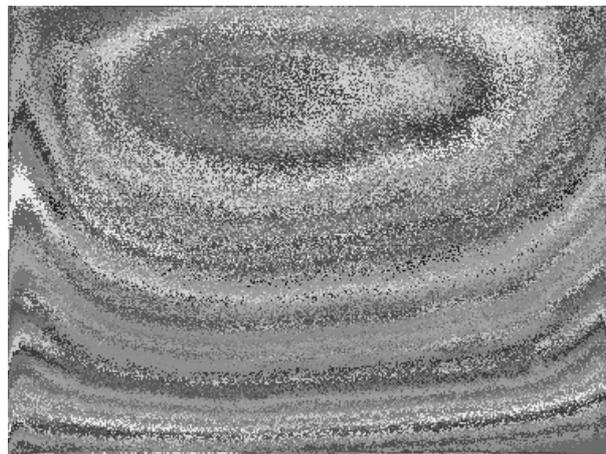
Suite à nos expérimentations, dans le cadre de notre application, il est possible de poser le modèle radiométrique simplifié suivant :

$$I_{vue}^i = g^i I_{exacte}^i + \overline{I_{obscurité}^i} + I_{transmission}^i \quad (2)$$

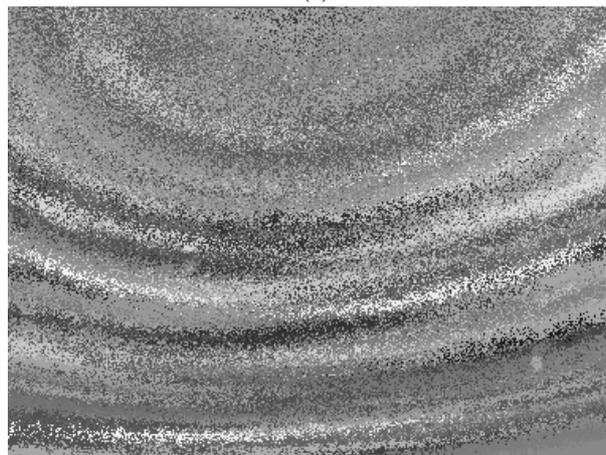
où $g_i = g_{sensibilité}^i g_{objectif}^i$. Ce modèle reste approximativement valide avec une caméra équipée d'un objectif à focale variable.

La méthode de calibration simplifiée consiste donc à soustraire à l'image la valeur $\overline{I_{obscurité}}$ puis à diviser par l'image PLU de référence g_i . Dans le cas d'une caméra couleur, ce calcul est réalisé indépendamment sur chaque canal.

5 Exemples de corrections de la radiométrie



(a)



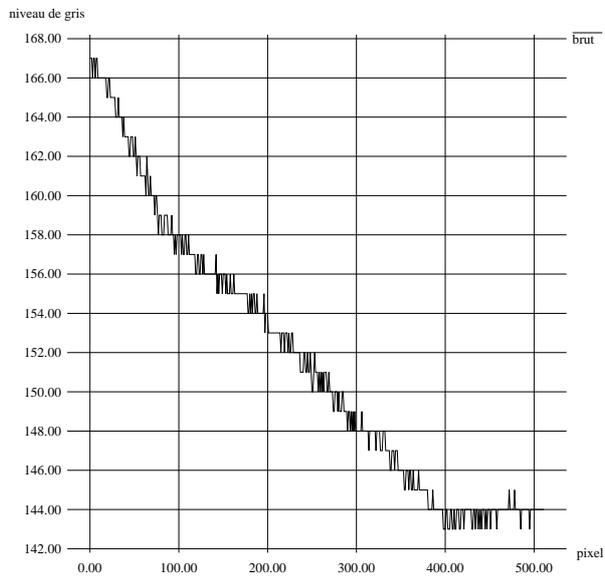
(b)

FIG. 13 - Vue avant (a) et après (b) correction radiométrique des gradients présents dans un ciel bleu près du zénith.

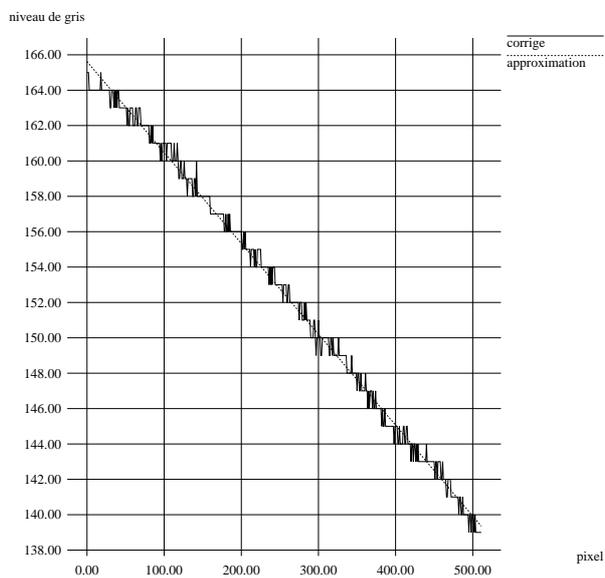
Nous avons fait des essais de correction sur des images de ciel qui présentent l'avantage d'avoir un gradient lumineux reconnaissable. Par exemple, sur la figure en fausses couleurs 13, la forme du gradient avant correction (a) paraît torturée. Cependant, après correction radiométrique (b), la structure réelle du gradient apparaît. Cette image est prise avec un grand champ dans une direction proche du zénith.

En rétrécissant le champ, le gradient du ciel apparaît comme linéaire avec une bonne approximation. Ainsi, on observe sur les coupes de la figure 14 que la correction radiométrique rétablit la variation linéaire normale de l'intensité du ciel.

En rétablissant les gradients réels, la calibration radiométrique permet d'améliorer la segmentation par région des images. Par exemple, sur un toit de matériau uniforme et lambertien, on retrouve grâce à la calibration radiométrique



(a)

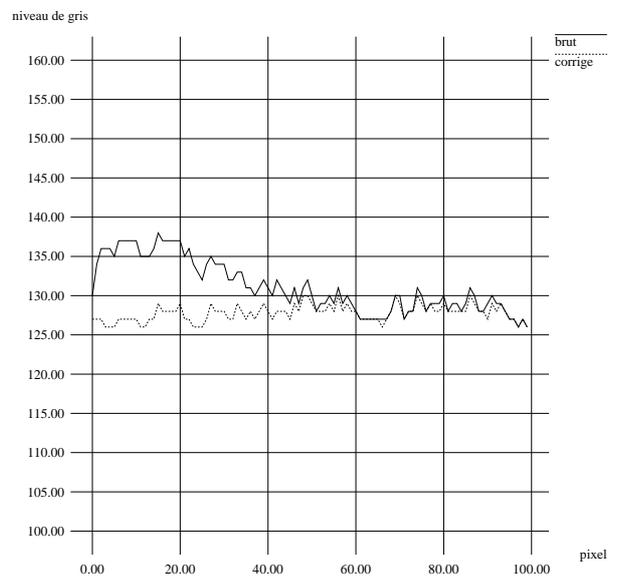


(b)

FIG. 14 - Coupe d'une image du ciel avant (a) et après (b) correction radiométrique.



(a)



(b)

FIG. 15 - (a) Detail de l'image d'un bâtiment. (b) coupe du toit de ce bâtiment avant et après correction radiométrique. Le lieu de la coupe est visible en noir sur le détail (a).

une distribution constante de l'intensité sur cette région (figure 15).

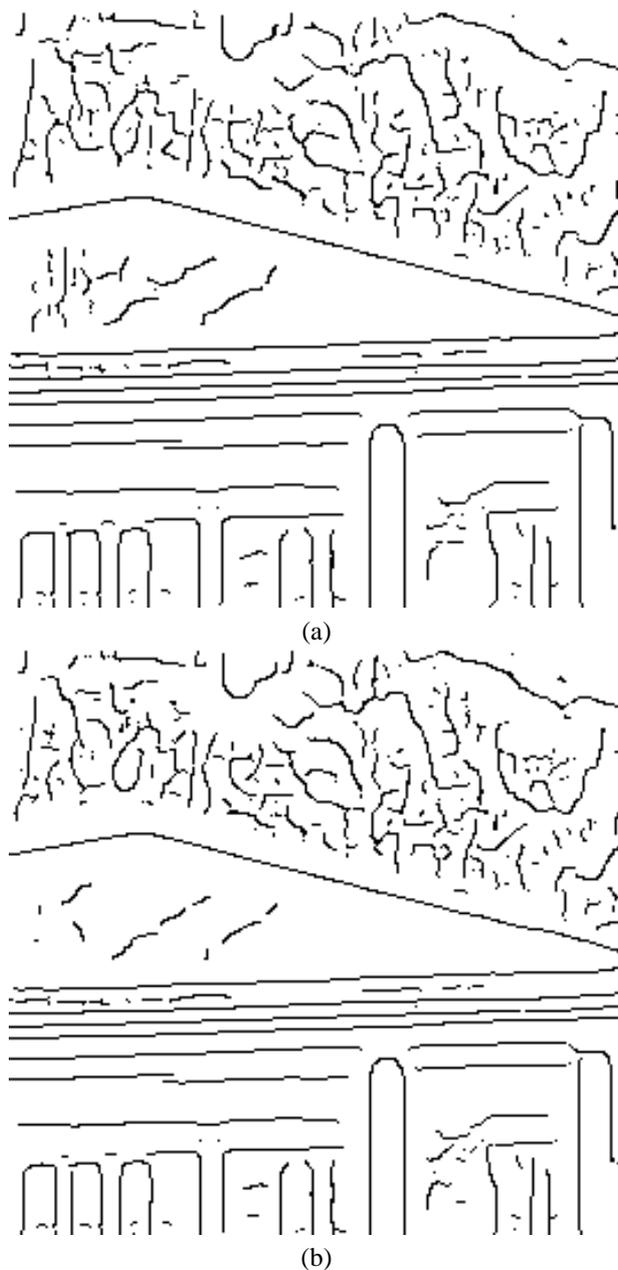


FIG. 16 - Image des contours avant (a) et après correction radiométrique (b) du détails de la figure 15(a). Des contours parasites sont éliminés grâce à la correction radiométrique.

On peut observer la même amélioration pour la détection des contours. L'image de la figure 15 (a) est traitée avec un algorithme d'extraction des contours [15] avant et après correction. Les paramètres du filtre sont identiques. Néanmoins, des contours parasites sur le toit (figure 16 (a)) de l'image avant correction sont absents sur la figure 16 (b) qui est corrigée. Une méthode de segmentation par regroupement de régions [16] a été utilisée sur la même image, avant et après correction radiométrique. On remarque sur le résultat (figure 17) qu'une région parasite apparaît sur l'image avant correction.

6 Conclusion

Des expérimentations avec un objectif à focale variable Canon J15×9.5B et Tessar 80mm ont permis d'observer que :

- la distribution des écarts de sensibilité radiométrique des cellules de la matrice CCD est difficile à modéliser de par sa forme,
- un changement du zoom, mise au point et diaphragme produit des variations faibles de l'illumination sur la rétine.

Ces expériences témoignent de la difficulté d'une modélisation théorique des corrections à apporter pour avoir une image bien calibrée photométriquement. Il est donc nécessaire de réaliser une calibration radiométrique à partir d'au moins une image de référence. Nous estimons que cette méthode permet de réduire l'écart de radiométrie entre les pixels de la rétine de 10% à environ 2% d'erreur. Les pixels les plus erronés dans l'image se trouvent sur le bord, dans une bande de 70 pixels pour le format vidéo 768x576.

Suite à nos expérimentations, dans le cadre de notre application, il est possible de poser le modèle radiométrique de la caméra simplifié donné par l'équation 2. Ce modèle reste approximativement valide lors d'une variation de la focale.

Remerciements

Nous remercions Christophe Meilhac et Thierry Lépine, pour leur aide et leurs explications sur l'optique des objectifs à focale variable.

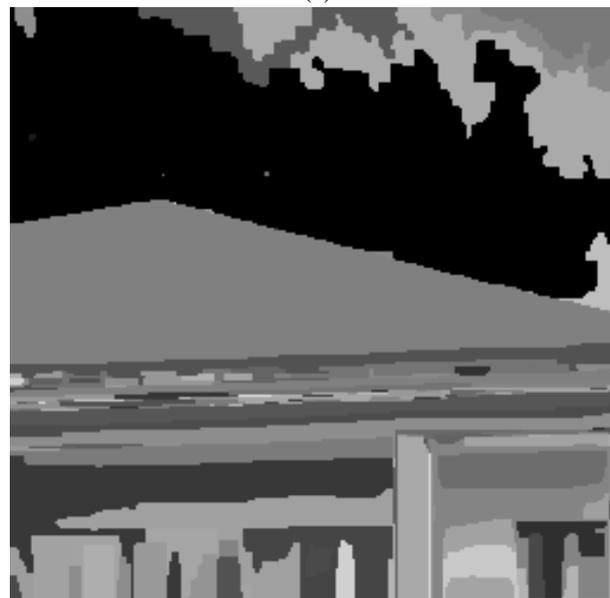
Références

- [1] Tsai (R.Y.). – An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. *In : Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 364–374. – Miami Beach, USA, June 1986.
- [2] Toscani (G.). – *Systèmes de calibration et perception du mouvement en Vision Artificielle*. – Thèse de PhD, Université Paris-Sud, 1987.
- [3] Dhome (M.), Richetin (M.), Lapreste (J.T.) et Rives (G.). – The inverse perspective problem from a single view for polyhedra location. *In : CVPR'88 (IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Ann Arbor, MI, June 5–9, 1988)*. pp. 61–66. – Washington, DC., June 1988.
- [4] Horaud (R.). – An analytic solution for the p-4p problem. *Computer Vision, Graphics and Image Processing, Academic Press*, 1989.
- [5] Mohr (R.) et Morin (L.). – Relative positioning from geometric invariants. *In : IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 139–144. – Hawaii, June 1991.
- [6] Beyer (H.A.). – Accurate calibration of ccd-cameras. *In : IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 96–101. – Champaign, June 1992.

- [7] Tarel (J.P.) et Gagalowicz (A.). – Calibration de caméra à base d'ellipses. *Traitement du Signal*, vol. 12, n° 2, 1995, pp. 177–187. – <http://www-rocq.inria.fr/syntim/textes/calib-eng.html>.
- [8] Weng (J.), Cohen (P.) et Herniou (M.). – Calibration of stereo cameras using a non linear distortion model. In : *Proceedings, Tenth International Conference on Pattern Recognition*, pp. 246–253. – Atlantic City, USA, June 1990.
- [9] Healey (G.) et Kondepudy (R.). – Radiometric ccd camera calibration and noise estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, n° 3, 1994, pp. 267–276.
- [10] Buil (C.). – *Construction et utilisation des caméras CCD en astronomie amateur*. – Société d'Astronomie Populaire, 1989.
- [11] Andréani (R.). – *L'objectif photographique*. – Photo-Revue, 1971.
- [12] Horn (B.K.P.). – *Robot Vision*. – The MIT Press. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1986.
- [13] Bruhat (G.). – *Optique*. – Masson 5ème édition, 1959.
- [14] USUI (Fumiaki). – Zoom lens. – CANON INC brevet n° JP6250086 (En Japonais), June 1994.
- [15] Deriche (R.). – Using canny's criteria to derive an optimal edge detector recursively implemented. *International Journal of Computer Vision*, vol. 1, n° 2, 1987.
- [16] Ackah-Miezan (A.) et Gagalowicz (A.). – Discrete models for energy minimizing segmentation. In : *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Vision*, pp. 200–207. – 11-13 May, Berlin, 1993. <http://www-rocq.inria.fr/syntim/textes/iccv93-eng.html>.



(a)



(b)

FIG. 17 - Image de segmentation avant (a) et après correction radiométrique (b) du détails de la figure 15(a). Une région parasite apparaît sur l'image non corrigée.