

Introduction à la vision panoramique catadioptrique*

Introduction to the catadioptric panoramic vision

El Mustapha Mouaddib

CREA – Université de Picardie Jules Verne, 7, rue du Moulin Neuf, 80000 Amiens, France,
mouaddib@u-picardie.fr

Manuscrit reçu le 30 septembre 2005

Résumé et mots clés

Augmenter le champ de vue des systèmes de vision pour le rendre panoramique, voire omnidirectionnel, tel est l'objectif de la vision omnidirectionnelle. Plusieurs solutions ont été imaginées pour y arriver parmi lesquelles l'approche catadioptrique tient une place privilégiée. Beaucoup d'applications, notamment en robotique mobile, ont prouvé l'intérêt de cette approche de la perception visuelle artificielle. Elles ont aussi soulevé une multitude de questions théoriques et pratiques. Après une période « empirique » de conception des caméras, beaucoup de travaux de recherche ont traité de la formalisation et la modélisation géométrique et optique. C'est actuellement l'aspect le plus abouti. L'objectif de ce papier est d'introduire la vision omnidirectionnelle et de donner un aperçu rapide des modèles géométriques existants et des méthodes de calibrage afin de faciliter la lecture des articles de ce numéro. Les articles parus dans ce numéro spécial seront référencés, lorsqu'il y a lieu, pour les situer par rapport aux modèles géométriques utilisés.

Vision, omnidirectionnel, panoramique, catadioptrique.

Abstract and key words

Increase the field of view of vision systems in order to obtain panoramic (omnidirectional) images is the objective of the omnidirectional vision. Many solutions have been imagined and the catadioptric approach holds a privileged place. Many applications, in particular in mobile robotics, have proved the benefits of this artificial visual perception approach. They also raised a multitude of theoretical and practical questions. After an "empirical" period for the design of these cameras, numerous works have dealt with the geometrical and optical formalization and modelling. The objective of this paper is to introduce the omnidirectional vision and to give a fast outline of the existing geometrical models and calibration methods in order to make easier the reading of the articles proposed in this journal. The papers published here will be referred, when it is necessary, to locate them in comparison with the used geometrical models.

Computer Vision, Omnidirectional, panoramic, catadioptric.

* Une partie importante de cette introduction a été publiée dans les actes de JNRR 05, E. Mouaddib, La vision Omnidirectionnelle, Actes des Journées Nationales de la Recherche en Robotique 2005.

1. Généralités

La vision omnidirectionnelle est le procédé de vision qui fournit une sphère de vue du monde observé à partir de son centre. La vision panoramique est une réduction de la vision omnidirectionnelle et elle fournit une (image) bande de vue.

Dans la pratique, nous avons l'habitude de nommer communément la vision omnidirectionnelle ou la vision panoramique, le résultat d'une vision avec un champ couvrant les 360° par rapport à l'axe vertical. Dans la nature, on trouve chez certains mammifères des dispositifs de vision naturelle capables d'approcher ce champ, grâce à des formes adaptées ou à des mouvements très amples des yeux. Chez les êtres qui en sont dépourvus, cette capacité est relayée par une rotation du support des organes visuels pour permettre de couvrir les zones non visibles directement.

Dans les systèmes artificiels, auxquels nous nous intéressons dans cet article, l'omnidirectionnalité est obtenue par des moyens semblables auxquels s'ajoutent des dispositifs optiques basés sur la réflexion à l'aide de miroirs.

Le dispositif ayant été en vogue après l'apparition des caméras CCD et connu des photographes qu'ils soient professionnels ou non, est celui basé sur les objectifs grands angles (œil de poisson). Simples d'utilisation puisqu'ils s'adaptent comme les autres objectifs sur les caméras, ils présentent néanmoins l'inconvénient d'introduire de fortes distorsions dans l'image.

Accéder à l'omnidirectionnalité par le mouvement du capteur, qu'il soit linéaire [5] ou matriciel, est un moyen *a priori* intuitif et simple. En réalité, cette approche pose des problèmes de positionnement, de synchronisation des prises des vues et de temps de prise des images. En effet, là où il faut une acquisition avec une caméra munie d'un objectif, il en faut plusieurs avec un dispositif tournant pour reconstituer la totalité d'une image. Cette approche n'est pas utilisable dans le cas des scènes dynamiques. Multiplier les caméras pour former une ceinture est également une solution qui fait toujours l'objet d'études. Mais l'unification des différentes vues en une seule cohérente par coïncidence des centres de vues, nécessite des précautions de fabrication qui ne sont pas triviales.

Enfin le dernier procédé, repose sur l'association d'une caméra et d'un miroir de révolution (Fig. 1, Fig. 2) qui en réfléchissant les rayons lumineux provenant de toutes les directions, forme une image omnidirectionnelle une fois projetée sur le capteur. Ces dispositifs se nomment des capteurs catadioptriques : dioptriques pour la réfraction (lentilles) et catoptrique pour la réflexion (miroirs). Cette dénomination est classique chez les opticiens. Ce procédé est appelé la caméra centrale panoramique par [25].

L'objectif de ce papier est d'introduire la vision omnidirectionnelle, de donner un aperçu rapide des modèles géométriques existants et des méthodes de calibrage afin de faciliter la lecture des autres articles de ce numéro spécial.



Figure 1. Un robot mobile muni d'une caméra panoramique (miroir parabolique).



Figure 2. Un exemple d'image omnidirectionnelle : un anniversaire.

2. Prodiges d'un champ de recherche

L'idée de l'omnidirectionnalité a été exploitée pour des dispositifs optiques avant le 20^e siècle. Mais la première exploitation d'un miroir de révolution (un hyperboloïde) couplé avec une caméra a été réalisée par Rees en 1970 [23]. Ensuite, il a fallu attendre près de 20 ans pour que Yagi, en concevant le système COPIS [28], donne un coup d'accélération aux travaux de recherche dans ce domaine. Le système COPIS utilise un miroir conique et il était destiné à la navigation de robots mobiles (localisation, détection et évitement d'obstacles). L'efficacité de ce système dans le cadre de cette application est certainement pour beaucoup dans ce regain d'intérêt. Mais le miroir conique n'est pas l'idéal d'un point de vue optique (astigmatisme,

« absence » de point de vue unique (section 3.1)). Pour l'application évoquée ci dessus, nul besoin de ces propriétés car l'image est exploitée directement dans le plan d'évolution du robot. On montre facilement, que cette simplification se fait moyennant une hypothèse forte sur l'alignement de l'axe optique de la caméra avec celui du miroir conique. Pour d'autres applications nécessitant la reconstruction, on va chercher d'autres formes géométriques pour les miroirs.

C'est ainsi que [14], a utilisé un miroir sphérique pour une application de navigation par comparaison entre les images acquises avec une image de référence. Dans [30], c'est une autre application pour la navigation d'un robot mobile qui a été développée avec un miroir hyperboloïde. Toutes les applications citées et les autres, se caractérisent par leur démarche plutôt « empirique ». C'est dans [20] que la géométrie (voir la section 3.1) des différentes formes de miroirs panoramiques ainsi que la formation des images obtenues avec ces capteurs ont été étudiées. Les auteurs en ont déduit la théorie du point de vue unique. À partir de là, les bases de la compréhension des différences entre les diverses géométries des miroirs et leurs différences optiques (flou, résolution,...) étaient connues. À l'issue de cette étude, les auteurs ont conçu un capteur omnidirectionnel catadioptrique sur la base de deux contraintes : facilité d'implémentation et du calibrage et facilité de reconstruction 3D.

Cette mise en place des fondations, a donné lieu à toute une série de travaux sur la modélisation, le formalisme, le calibrage et à des applications.

3. Les caméras catadioptriques : aspects théoriques et pratiques

Nous allons décrire, très brièvement, dans cette section la construction des caméras catadioptriques et plus particulièrement une contribution très intéressante sur la vision omnidirectionnelle. Il s'agit de ce qu'on appelle la théorie du point de vue unique (Single View Point) ou encore la théorie de la formation des images catadioptriques. Cette théorie a été publiée par Nayar et Baker dans [20] et on peut trouver une version très complète dans [2].

3.1. Le point de vue unique

C'est un centre de projection unique. Sa nécessité a été soulignée pour la première fois par [23] puis mentionnée à nouveau dans [30], [18] et [21]. Dans cet article, les auteurs, à partir de la formation d'une image sur un miroir ponctuel et en respectant

les lois de la réflexion, ont construit la contrainte du point de vue unique. La résolution de cette contrainte (équation) fournit deux solutions générales. Des cas particuliers de ces solutions, donnent les formes et les conditions à respecter pour obtenir des miroirs avec un point de vue unique. Tous les miroirs suivants admettent un point de vue unique : miroirs plans, miroirs paraboloides, miroirs hyperboloïdes, miroirs ellipsoïdes, miroirs sphériques, miroirs coniques. Pour les deux derniers, le respect de la contrainte du point de vue impose de positionner la caméra sur le sommet du cône et au centre de la sphère. Dans de telles configurations, ces miroirs sont inutilisables. Dans la pratique, on éloigne les caméras des miroirs. On perd la propriété du point de vue unique, mais les capteurs sont utilisables. Pour résumer les miroirs sphériques et coniques admettent un point de vue unique, mais le montage miroirs + caméras n'en a pas.

Le miroir plan

Le point de vue unique existe et il est sur la bissectrice perpendiculaire à la droite reliant le point focal et son image virtuelle. [18] a réalisé un capteur omnidirectionnel à l'aide de quatre miroirs et de quatre caméras, disposés en pyramide. Moyennant une juxtaposition des quatre points de vue, il a réussi à obtenir un point de vue unique et un champ de $360^\circ \times 50^\circ$.

Le miroir ellipsoïde

Le point de vue unique de ce miroir est à l'intérieur. C'est un miroir concave.

Le miroir hyperboloïde (Fig. 3.a)

Le point de vue unique se trouve en F' . Les rayons réfléchis convergent au point F . C'est une solution intéressante. Comme on le voit sur la figure 3, la réussite de la réalisation d'un capteur hyperboloïde nécessite de faire coïncider le point focal avec le point F (centre optique de la caméra et 2^e foyer de l'hyperboloïde). Ce miroir a été réalisé pour la première fois par [23].

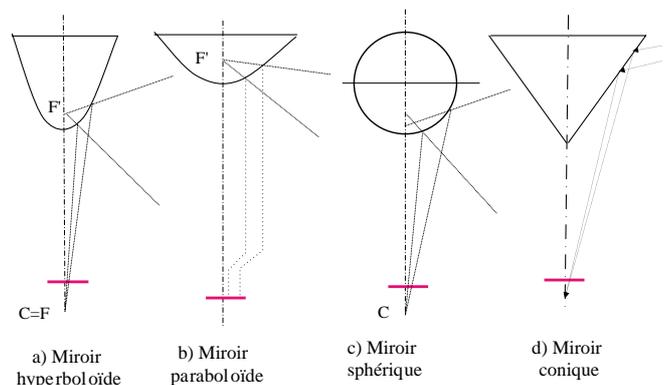


Figure 3. Formes géométrique des miroirs.

Le miroir parabolique (Fig. 3.b)

Pour contourner la contrainte de l’alignement lors de la fabrication, [19] a proposé d’utiliser un miroir parabolique. Comme ce dernier réalise une projection orthographique, le problème consistant à faire coïncider le point de vue unique et le point focal est supprimé. Pour exprimer les choses autrement, on peut dire, en le citant, que « il y a invariance des images par translations du miroir par rapport au système ». Il existe un autre moyen pour obtenir une projection orthographique, c’est l’utilisation d’une optique télécentrique. [19] a combiné l’utilisation des deux (le miroir parabolique et l’objectif télécentrique) afin de simplifier les contraintes de réalisation du capteur, comme cela a été précisé ci-dessus, et afin d’améliorer la qualité optique des images (notamment pour réduire la coma et l’astigmatisme introduits par la courbure du miroir). Pour éviter les inconvénients des objectifs télécentriques (prix, poids, taille), on peut remplacer les lentilles télécentriques par un miroir sphérique ou un miroir parabolique concave. Ces objectifs sont commercialisés. Enfin, les capteurs utilisant un miroir parabolique donnent un modèle simple et des propriétés intéressantes pour le calibrage.

Le miroir conique (Fig. 3.c)

Le point focal et le point de vue unique sont confondus au sommet du cône. Autrement, le lieu des points de vue uniques est un cercle de rayon dépendant de la distance entre le pinhole et le sommet du cône ainsi que de l’angle au sommet du cône. Malgré cela, le miroir conique a fait l’objet de plusieurs utilisations, car il offre une résolution verticale intéressante et les droites verticales sont bien exploitables. [29] a proposé le capteur COPIS et a préconisé de choisir une focale courte. Ce principe a été utilisé dans [17] et dans [6]. Une étude très récente [16] a montré qu’il est possible dans certaines conditions de considérer qu’une caméra associée à un miroir conique peut être considérée comme ayant un point de vue unique.

Le miroir sphérique (Fig. 3.d)

Le point de vue unique (qui se trouve au centre de la sphère (miroir)) et le point focal sont confondus. Cette solution ne présente pas d’intérêt. Cependant, comme dans le cas du miroir conique des caméras utilisant ce miroir sont utilisées dans plusieurs applications de robotique et de télésurveillance.

3.2. Les miroirs sans point de vue unique

En dehors des quadriques citées ci dessus, aucune autre forme ne possède de point de vue unique. Ces formes de miroirs sont souvent utilisées pour obtenir des comportements géométriques et optiques particuliers, comme par exemple une résolution verticale constante [13], une résolution centrale plus importante, ...

4. Modélisation des caméras catadioptriques

La modélisation d’une caméra catadioptrique panoramique relève de la même démarche que celle des caméras perspectives, à ceci près que les rayons lumineux sont réfléchis par le miroir de révolution. Cette réflexion introduit une transformation supplémentaire dont il faut tenir compte. La transformation dépend de la surface du miroir. Nous ferons référence dans cette section aux caméras ayant un point de vue unique ; donc essentiellement les paraboliques et les hyperboliques. Les miroirs ne vérifiant pas cette propriété seront abordés dans l’article paru dans ce numéro et qui s’intitule : « Les surfaces caustiques par la géométrie – Application aux capteurs catadioptriques ». Nous montrons (Fig. 4) le schéma des transformations qui considère que l’axe du miroir et l’axe optique de la caméra sont confondus. La forme de la quadrique dépend du miroir utilisé.

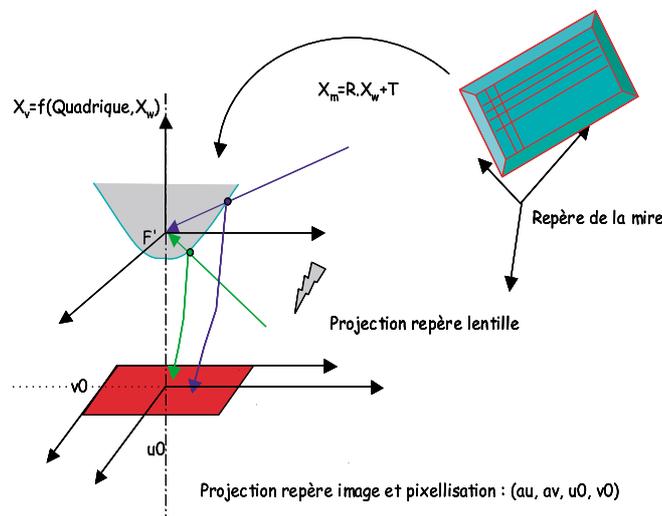


Figure 4. Schéma général de formation des images catadioptriques.

4.1. Les modèles ad hoc

Ces modèles utilisent directement les équations du miroir ainsi que celles des caméras associées.

Cas du miroir parabolique

Cet objectif est régi par l’équation d’un parabolique dans un repère centré en son foyer. Voir également l’article intitulé « Stéréovision panoramique dense ».

L’équation du parabolique est :

$$z_p = \frac{-h^2 + (x_p^2 + y_p^2)}{2h} \tag{1}$$

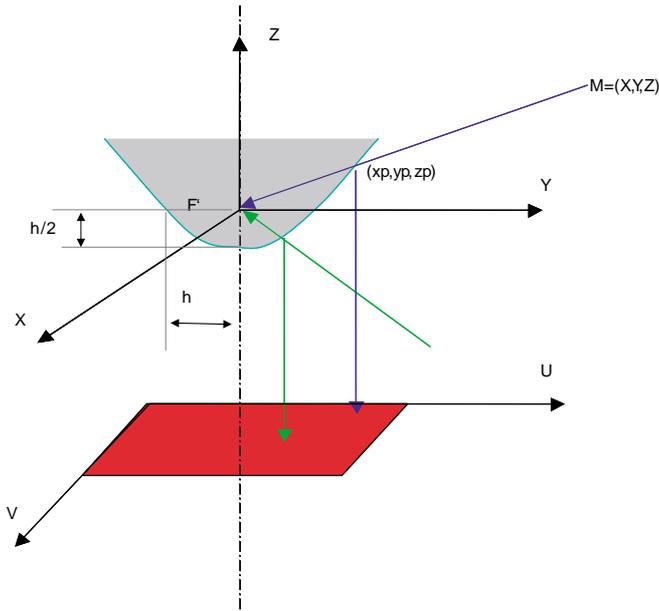


Figure 5. Schéma d'un miroir paraboloidé.

$2h$ représente le latus rectum (donc la distance entre F et le sommet est égale à $h/2$). L'équation de la droite (rayon provenant du point 3D) passant par le point focal et par le point $M(X, Y, Z)$ est:

$$x_p = \lambda X, y_p = \lambda Y \text{ et } z_p = \lambda Z.$$

On remplace x_p , y_p et z_p dans l'équation du paraboloidé et on obtient une équation du second degré. On résoud pour obtenir l'expression du paramètre:

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z} \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{h}{-\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z}$$

On retient la solution de λ qui permet d'obtenir le point d'impact sur le miroir qui se trouve du côté du point 3D. D'où:

$$x_p = \frac{hX}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z}$$

$$y_p = \frac{hY}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z} \quad (3)$$

$$z_p = \frac{hZ}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z}$$

Dans le cas d'un miroir paraboloidé associé à une lentille télécentrique, les rayons lumineux sont projetés parallèlement à l'axe optique. D'où:

$$x = x_p, y = y_p \text{ et } z = 0. \text{ Et:}$$

$$x = x_p = \frac{hX}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z} \quad (4)$$

$$y = y_p = \frac{hY}{\sqrt{(X^2 + Y^2 + Z^2)} - Z}$$

Le passage aux coordonnées pixelliques et au repère de l'image:

$$u = \alpha_u x + u_0$$

$$v = \alpha_v y + v_0 \quad (5)$$

α_u et α_v sont, respectivement, les rapports de conversion mm vers des pixels suivant l'axe OX et OY . u_0 et v_0 sont les coordonnées du centre optique dans l'image en pixels.

Cas du miroir « Remote Reality »

Cet objectif est constitué d'un miroir paraboloidé convexe, qui réfléchit les rayons sur un miroir sphérique concave, qui à son tour renvoie les rayons sur la lentille puis le capteur. Le miroir sphérique joue le rôle de la lentille télécentrique utilisée classiquement et réalise en théorie une projection orthographique. Cet objectif offre l'avantage d'être plus compact et plus léger qu'un équivalent utilisant une lentille télécentrique. Il a été étudié de manière poussée dans [12] et également dans l'article de ce numéro intitulé « Stéréovision panoramique dense ».

Cas du miroir hyperboloidé

L'article, paru dans ce numéro spécial, intitulé « Etalonnage de caméras catadioptriques hyperboloides » traite le cas d'un miroir hyperboloidé. Les auteurs utilisent le modèle développé dans [1]. Dans cette section, nous allons présenter l'autre modèle.

L'équation d'un hyperboloidé dans un repère centré en son foyer (Fig. 6) est:

$$\frac{(z_p + e)^2}{a^2} - \frac{x_p^2 + y_p^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

e représente l'excentricité: $e = \sqrt{a^2 + b^2}$,
où $a = \frac{1}{2}(\sqrt{4e^2 + 4h^2} - 2h)$ et $b = \sqrt{h\sqrt{4e^2 + 4h^2} - 2h^2}$.

La droite passant par le foyer de l'hyperboloidé et par le point $M(X, Y, Z)$, donné dans le repère du miroir est:

$$x_p = \lambda X, y_p = \lambda Y \text{ et } z_p = \lambda Z.$$

On remplace ces termes dans l'équation (6) et on en déduit les solutions de λ qui correspondent aux deux intersections avec le miroir:

$$\lambda = \frac{b^2(-eZ \pm a\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2})}{b^2 Z^2 - a^2(X^2 + Y^2)} \quad (7)$$

La projection perspective se fait de la manière suivante (en tenant compte du fait que la distance entre les points focaux est égale à $2e$):

$$\frac{x}{f} = \frac{x_p}{2e + z_p}$$

$$\frac{y}{f} = \frac{y_p}{2e + z_p} \quad (8)$$

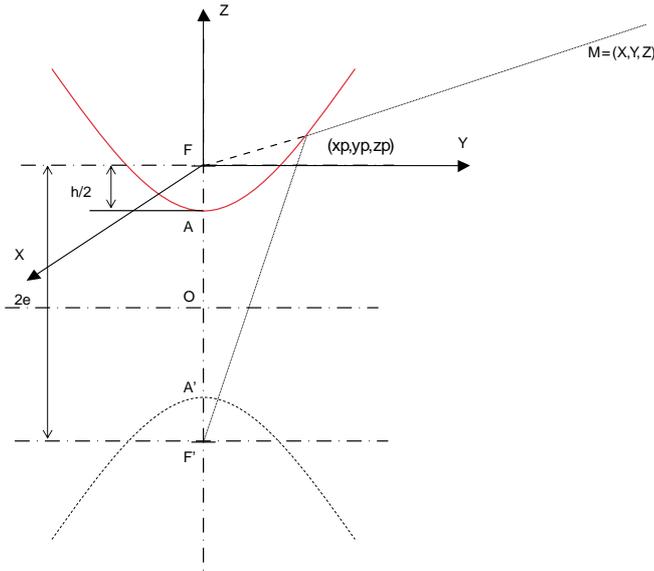


Figure 6. Schéma de la formation de l'image d'un point pour un miroir hyperbolique.

On pose, sans perte de généralité, $f = 1$ et on remplace les autres variables pour obtenir les coordonnées (x,y) en fonction des coordonnées du point 3D et des paramètres du miroir :

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_p}{2e + z_p} \\ y &= \frac{y_p}{2e + z_p} \end{aligned} \tag{9}$$

Puis, on remplace λ , x_p, y_p et z_p pour obtenir les coordonnées du point image sur la caméra normalisée :

$$\begin{aligned} x &= \frac{4Xeh/\sqrt{4e^2 + 4h}}{2e} \\ &= \frac{\sqrt{4e^2 + 4h^2}\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \pm Z}{4Yeh/\sqrt{4e^2 + 4h}} \\ y &= \frac{4Yeh/\sqrt{4e^2 + 4h}}{2e} \\ &= \frac{\sqrt{4e^2 + 4h^2}\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \pm Z}{4Xeh/\sqrt{4e^2 + 4h}} \end{aligned} \tag{10}$$

4.2. Les modèles génériques

Ces modèles sont utilisés dans les articles suivants de ce numéro spécial : « Champs de Markov pour le traitement d'images catadioptriques », « Opérations morphologiques floues à noyaux variables pour images omnidirectionnelles à point de vue unique » et « Asservissement visuel en vision omnidirectionnelle à partir de droites ».

Dans [10], Geyer et Daniilidis ont introduit une théorie d'unification pour les caméras catadioptriques ayant un point de vue unique (*i.e.* single viewpoint, central catadioptric image). En substance, ils ont montré qu'il est possible de modéliser ces

caméras en utilisant d'abord une projection sur une sphère (de rayon égal à un par exemple) suivie d'une projection sur un plan à partir d'un point. Ce dernier point se trouve sur le pôle nord dans le cas d'un miroir parabolique (projection stéréographique) et entre le pôle nord et le centre de la sphère pour les miroirs hyperboloïdes. Cette modélisation introduit deux paramètres qui sont reliés aux paramètres des miroirs en fonction de chaque forme. Une version modifiée a été proposée dans [3]. Ces modèles sont intéressants car ils permettent d'exhiber des propriétés intéressantes pour le calibrage et pour la détection de droites par exemple. Mais il faut que la condition du point de vue unique soit vérifiée, ce qui est parfois délicat à cause de l'assemblage miroir + caméra.

Le théorème de l'équivalence [11] entre toute projection centrale et une projection sphérique suivie d'une projection sur un plan (Fig. 7), donne la relation ci dessous, qui modélise toutes les caméras à point de vue unique. ξ est fonction de l'excentricité et φ est fonction de l'excentricité et de l'échelle. Par définition, le latus rectum est égal à $2h$.

$M_s(x_s, y_s, z_s)$ est le point d'intersection de la droite passant par le centre de la sphère (centre du miroir) et le point 3D $M(X, Y, Z)$ avec la sphère :

$$\begin{aligned} x_s &= \lambda X \\ y_s &= \lambda Y \\ z_s &= \lambda Z \end{aligned} \tag{11}$$

L'équation de la sphère est :

$$x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 = R^2 \tag{12}$$

On peut prendre $R = 1$ sans perte de généralité. D'où :

$$\lambda = \frac{\pm 1}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \tag{13}$$

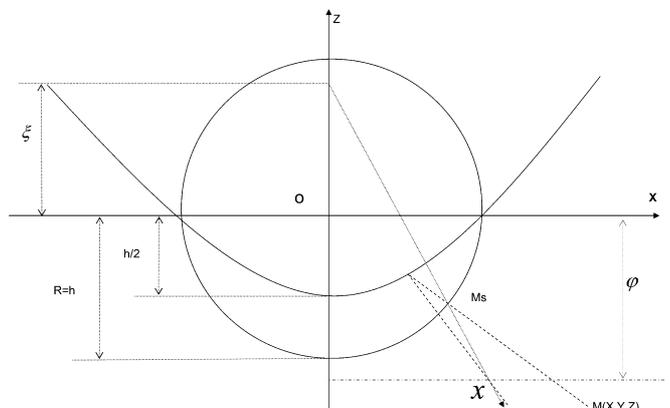


Figure 7. Illustration de l'équivalence entre la projection par le miroir et la projection sur la sphère suivie par une projection à partir du point ξ .

La projection sur le plan de l'image est obtenue en utilisant une projection à partir de ξ du point M_s sur le plan se trouvant à ϕ suivant l'axe OZ .

$$\frac{x_s}{\xi - z_s} = \frac{x}{\xi + \phi}$$

$$\frac{y_s}{\xi - z_s} = \frac{y}{\xi + \phi} \quad (14)$$

$$x = \frac{(\xi + \phi)X}{\xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z}$$

$$y = \frac{(\xi + \phi)Y}{\xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z} \quad (15)$$

Pour trouver la correspondance dans le cas d'un paraboloides, il faut poser l'égalité entre les coordonnées en utilisant les deux modèles, c'est-à-dire entre l'équation (4) et l'équation (15):

$$\frac{hX}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z} = \frac{(\xi + \phi)X}{\xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z}$$

$$\frac{hY}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z} = \frac{(\xi + \phi)Y}{\xi\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} - Z} \quad (16)$$

On rappelle que $R = h = 1$. Ensuite, on déduit les valeurs des différents paramètres: $\xi = 1$ et comme $\xi + \phi = h = 1$, donc $\phi = 0$. Ceci peut aussi se vérifier sur la figure (Fig. 8): intersection des rayons réfléchis par le miroir et ceux obtenus à partir du pôle nord ($\xi = 1$) pour la valeur de $\phi = 0$.

Par un développement similaire, on peut retrouver l'équivalence entre les paramètres du modèle générique et les paramètres de la caméra utilisant un miroir hyperboloïde.

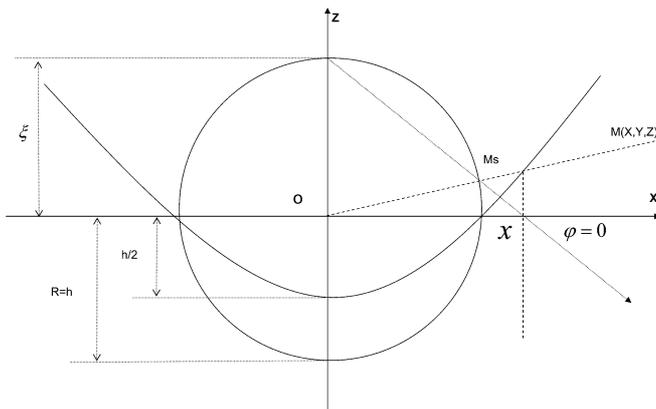


Figure 8. Illustration de l'équivalence entre la projection par le miroir paraboloides et la projection sur la sphère suivie par une projection stéréographique.

4.3. Les caustiques

Les caustiques sont utilisées dans l'article, paru dans ce numéro spécial, intitulé « Les surfaces caustiques par la géométrie - Application aux capteurs catadioptriques ». Une caustique

(bien connue et depuis très longtemps des opticiens) est l'ensemble des rayons réfléchis par un dioptre. Les miroirs ne satisfaisant pas (volontairement pour des raisons de résolution ou involontairement à cause des imprécisions d'assemblage) la contrainte du point de vue unique (convergence des rayons caustiques en un point) peuvent être modélisés à l'aide des caustiques [4], [26].

5. Calibrage

Le calibrage est une opération qui consiste à estimer les paramètres intrinsèques de la caméra. Dans le cas des caméras catadioptriques, ces paramètres englobent les paramètres du miroir, ceux du dispositif optique (objectif), ceux du capteur CCD (la rétine) et de la carte de numérisation du signal vidéo. Afin de pouvoir réaliser le calibrage, il est indispensable de modéliser tout le processus de formation de l'image. Le modèle doit faire l'objet d'un compromis entre simplicité et précision. La simplicité est indispensable à la résolution analytique ou numérique des équations et la précision est garante de la fidélité du comportement du modèle. Le calibrage en vision omnidirectionnelle est l'aspect le plus étudié (abouti) à l'heure actuelle. Nous proposons la classification suivante pour (espérer) une lecture plus aisée.

5.1. Le calibrage intrinsèque

Le calibrage intrinsèque consiste à utiliser l'image du miroir et les données du fabricant du miroir pour estimer les paramètres intrinsèques de la caméra catadioptrique. [15] a proposé une technique simple et rapide pour calibrer les miroirs paraboloides. Les paramètres estimés sont les coordonnées du centre optique et le paramètre du miroir. La précision obtenue n'est pas bonne. Mais la technique est intéressante pour l'initialisation des paramètres avant des les affiner avec une méthode non linéaire. Les auteurs de [8] estiment les paramètres intrinsèques de la caméra et la position du miroir par rapport à la caméra (défauts d'alignements). Mais les paramètres propres du miroir sont supposés connus.

5.2. Le calibrage avec des mires

Les méthodes utilisant des mires externes ont recours à la connaissance partielle (quelques droites) ou totale (coordonnées 3D des points) des mires.

Les points

L'objectif est de calibrer le maximum de paramètres du capteur catadioptrique. On exploite des mires comprenant des points (ou d'autres formes géométriques) connus dans un repère local.

En utilisant les points images correspondants, on peut résoudre numériquement le modèle, par une technique d'optimisation. L'avantage est que l'approche est utilisable pour tout type de miroir et de caméras et permet de traiter des modèles complets. Cela peut aller jusqu'à 19 paramètres [7] (6 paramètres extrinsèques, 2 paramètres du miroir, 5 paramètres pour la transformation rigide miroir-caméra, 4 paramètres intrinsèques et 2 pour la distorsion). Dans [12] et dans l'article, paru dans ce numéro spécial, intitulé « Stéréovision panoramique dense », les auteurs ont calibré une caméra associée à un miroir parabolique convexe et un miroir sphérique concave (c'est une approximation d'un miroir parabolique et d'une lentille télécentrique). Le montage mécanique des deux miroirs peut provoquer un désalignement des axes des miroirs. C'est pour cela que les auteurs ont proposé d'estimer en plus des paramètres intrinsèques de la caméra et du miroir parabolique, ce désalignement. L'avantage de cette approche est qu'avec un modèle unique, nous montrons qu'on peut calibrer des caméras catadioptriques différentes : miroirs paraboliques ou hyperboliques.

Afin de simplifier la procédure de calibrage, l'article paru dans ce numéro spécial et qui s'intitule « Étalonnage de caméras catadioptriques hyperboliques » propose une méthode de calibrage paramétrique qui englobe une mire adaptée (grille plane à coller autour du support du miroir), l'extraction automatique des points par des intersections de droites et l'estimation des paramètres du calibrage.

Très récemment, dans [24] et [22], les auteurs ont proposé une méthode de calibrage générique (caméras avec ou sans point de vue unique) et non paramétrique. Ils procèdent en utilisant une mire de calibrage qui est déplacée plusieurs fois. Ces déplacements ne sont pas connus, mais ils doivent permettre un recouvrement suffisant de points. C'est la mise en correspondance et un calibrage initial (fait à l'aide d'une seule mire) entre les points de recouvrement qui va permettre d'estimer le mouvement et d'affiner le calibrage en incorporant les autres points.

Les droites

Au contraire des méthodes utilisant les points, les méthodes qui ont recours aux droites cherchent des propriétés intéressantes des capteurs catadioptriques pour simplifier le calibrage. Ainsi dans [9], les auteurs décrivent un algorithme de calibrage de caméras paracatadioptriques (miroir parabolique) basé sur l'utilisation d'ensembles de droites parallèles. Les propriétés géométriques et l'hypothèse, faite par les auteurs, d'alignement entre l'axe du miroir et celui de la caméra, rend possible l'estimation des paramètres intrinsèques. Un parallèle peut être fait avec l'utilisation des lignes de fuite de l'image d'un objet parallépipédique capté par une caméra perspective. Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter que le parallélisme entre les droites. Aucune autre information n'est nécessaire. L'inconvénient est que la méthode ne concerne que les caméras paracatadioptriques. Barreto *et al.* dans [3] ont généralisé l'approche. Ils ont montré que 3 droites quelconques suffisaient pour calibrer toute caméra ayant point de vue unique.

Néanmoins, ces méthodes supposent que l'axe optique du miroir et celui de la caméra sont confondus. Une autre difficulté réside dans le fait qu'il est indispensable d'estimer la conique (l'image de la droite) de manière robuste.

Les sphères

Dans [31], les auteurs présentent une nouvelle méthode de calibrage basée sur l'utilisation des invariants qui permet d'obtenir un formalisme unique pour le calibrage soit en utilisant des images de lignes soit en utilisant des images de sphères. Les résultats expérimentaux montrent que le calibrage utilisant des images de sphère est plus robuste et plus précis que celui obtenu avec des droites.

5.3. L'autocalibrage

L'autocalibrage ne nécessite pas la connaissance de mires externes. Comme dans le cas des caméras conventionnelles, il nécessite deux images et la mise en correspondance d'une image à l'autre. À partir de là, il faut estimer la matrice fondamentale [15] et [10].

6. Conclusion

Même si des travaux récents [24] tendent à élaborer des modèles applicables aux caméras avec ou sans point de vue unique, il peut être plus efficace de distinguer ces deux familles. Pour la famille des caméras avec point de vue unique, nous pouvons utiliser soit les modèles ad hoc soit les modèles génériques. L'avantage des modèles génériques est précisément de permettre le calibrage des caméras basées sur des miroirs différents avec le même algorithme. Mais on estime un paramètre de trop, si on part de l'hypothèse que les courbures sont respectées.

Références

- [1] S. BAKER and S.K. NAYAR, A theory of catadioptric image formation. In *ICCV 98*, pages 35-42, 1998.
- [2] S. BAKER and S.K. NAYAR, A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *IJCV*, 35(2):175-196, November 1999.
- [3] J.P. BARRETO and H. ARAUJO, Geometric properties of central catadioptric line images. In *ECCV02*, page IV: 237 ff., 2002.
- [4] C. BELLVER CEBREROS, E. GOMEZ GONZALEZ and M. RODRIGUEZ DANTA, Obtention of meridian caustics and catacaustics by means of stigmatic approximating surfaces. In *Applied optic*, volume 3, 1994.
- [5] R. BENOSMAN, T. MANIERE and J. DEVARIS, Multidirectional stereovision sensor, calibration and scene reconstruction. In *ICPR 96*, 1996.

- [6] E. BIDEAU. *Système de transport à apprentissage neuronal – Application de la vision omnidirectionnelle à la localisation d'un robot mobile autonome*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 1 1995.
- [7] C. CAUCHOIS, E. BRASSART, C. PÉGARD and C. CLÉRENTIN, Technique for calibrating an omnidirectional sensor. In *IEEE/RSJ int. Conf. on Int. Robots and Systems-IROS 99*, 1999.
- [8] J. FABRIZIO, J.P. TAREL and R. BENOSMAN, Calibration of panoramic catadioptric sensors made easier. In *OMNIVIS02*, pages 45-52, 2002.
- [9] C. GEYER and K. DANILIDIS, Catadioptric camera calibration. In *ICCV99*, pages 398-404, 1999.
- [10] C. GEYER and K. DANILIDIS, A unifying theory for central panoramic systems. In *In Proc. Europ. Conf. on Computer Vision, Dublin, Ireland, 2000*, 2000.
- [11] C. GEYER and K. DANILIDIS, Catadioptric projective geometry. *IJCV*, 45(3):223-243, December 2001.
- [12] J. J. GONZALEZ-BARBOSA, *Vision panoramique pour la robotique mobile : stéréovision et localisation par indexation d'images*. PhD thesis, Université de Toulouse III- LAAS, 1 2004.
- [13] R. Andrew HICKS and Ronald K. PERLINE, Equi-areal catadioptric sensors. In *Proc. of Omnivis02*, pages 13-18, June 2, 2002.
- [14] J. HONG, X. TAN, B. PINETTE, R. WEISS and E.M. RISEMAN, Image-based homing. In *Proceedings. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 620 -625, vol.1, 9-11 April 1991.
- [15] S.B. KANG, Catadioptric self-calibration. In *CVPR00*, pages I: 201-207, 2000.
- [16] S.S. LIN and R. BAJCSY, True single view point cone mirror omnidirectional catadioptric system. In *ICCV01*, pages II: 102-107, 2001.
- [17] E. MOUADDIB and C. PEGARD, Localization using omnidirectional vision. In *7th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 95), Barcelona*, volume 1, pages 133-138, 1995.
- [18] V. NALWA, A true omnidirectional viewer. In *Technical report, Bell Laboratories, Holmdel, NJ 07733, USA*, 1996.
- [19] S.K. NAYAR, Catadioptric omnidirectional camera. In *CVPR97*, pages 482-488, 1997.
- [20] S.K. NAYAR and S. BAKER, Catadioptric image formation. In *IJW 97*, pages 1431-1437, 1997.
- [21] S.K. NAYAR and S. BAKER, Catadioptric image formation. In *DARPA97*, pages 1431-1438, 1997.
- [22] S. RAMALINGAM and S. K. STURM, P. and LODHA, Towards complete generic camera calibration. In *Proceedings. IEEE CVPR*, 2005.
- [23] D. REES, Panoramic television viewing system. In *United States Patent No. 3,505,465*, 1970.
- [24] P. STURM and S. RAMALINGAM, A generic concept for camera calibration. In *ECCV*, 2004.
- [25] T. SVOBODA, T. PAJDLA and V. HLAVAC, Central panoramic cameras. In *Research Report K335/97/147*, December 5, 1997.
- [26] R. SWAMINATHAN, M.D. GROSSBERG, and S.K. NAYAR. Caustics of catadioptric cameras. In *Proceedings. Eighth IEEE ICCV 2001*, pages 2 -9 vol.2, 2001.
- [27] P. VASSEUR and E. MOUADDIB, Central catadioptric line detection. In *15th British Machine Vision Conference*, September 2004.
- [28] Y. YAGI and S. KAWATO, Panoramic scene analysis with conic projection. In *IROS90*, pages xx-yy, 1990.
- [29] Y. YAGI and S. KAWATO, Panoramic scene analysis with conic projection. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 181 - 187, 1990.
- [30] K. YAMAZAWA, Y. YAGI and M. YACHIDA, Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection. In *IROS93*, pages 1029-1034, 1993.
- [31] X. YING and Z. HU, Catadioptric camera calibration using geometric invariants. In *ICCV03*, pages 1351-1358, 2003.



El Mustapha **Mouaddib**

El Mustapha Mouaddib est professeur à l'Université de Picardie Jules Verne. Il dirige le CREA EA 3299 (Centre de Robotique, Electrotechnique et Automatique) depuis 2001. Il est également co-animateur de l'équipe Perception En Robotique, équipe qu'il a co-crée avec le professeur Claude Pégard en 1993. Ses travaux de recherches s'articulent autour de la problématique de la perception artificielle en privilégiant la vision omnidirectionnelle.

