

Les objectifs photo Fish-Eye
(note de cours de l'UE PRAT)

Henri Maître

20 septembre 2015

Table des matières

0.1. Les systèmes hypergones : les <i>fisheyes</i>	7
0.1.1. Les fonctions de projection	7
0.1.2. m Fisheye circulaire et diagonal	9
0.1.3. Les fisheyes en pratique	10
0.2. Calibrage des caméras	12
0.2.1. Un peu de géométrie de la formation des images	12
0.2.2. Calibrage multi-images : l'ajustement de faisceaux	15
0.2.3. Calibrage des caméras fisheye	15
Bibliographie	19

Ce texte est issu du chapitre 3 : "L'objectif photographique" de l'ouvrage "Du photon au pixel" (H. Maître), paru en septembre 2015 chez ISTE (en français) et chez Wiley (en anglais : "From Photon to Pixel").

On peut remplacer les généralités présentées par cet ouvrage par des textes classiques en optique : [PER 94, CHA 97, SMI 90, FLE 62]

0.1. Les systèmes hypergones : les *fisheyes*

Les systèmes à très large champs, dénommés hypergones, forment une classe à part des objectifs photographiques, par le parti pris de ne pas faire référence à la géométrie de projection des objectifs ordinaires. Pour ceux-ci, il existe une relation linéaire entre la position du point dans l'image et la tangente de l'angle que forme, avec l'axe optique, le rayon objet. Compte tenu de la croissance de la fonction tangente, cette relation ne peut être maintenue avec des capteurs de dimension finie lorsque le champ de visée s'élargit et que l'on approche de l'angle limite de 90° . Si l'on veut doter un appareil d'un champ de vision aussi large, il est indispensable de modifier la géométrie de l'image de façon à comprimer les angles en périphérie de champ. On construit donc des images très déformées qui se distinguent au premier regard des photographies ordinaires. C'est l'effet *fisheye*. Cet effet est parfois recherché pour ses qualités artistiques ; on conserve alors telle quelle l'image ainsi produite. Mais on peut également le rechercher pour des applications particulières en imagerie scientifique, en surveillance, en vision des robots, pour guider les véhicules autonomes. On est alors amené souvent à corriger ou compenser ces déformations pour rapporter l'image dans un repère plus commun. C'est pourquoi on étudie simultanément les déformations introduites par l'hypergone et les transformations inverses qui permettent de les corriger.

0.1.1. Les fonctions de projection

Pour accroître le champ de projection de l'image, il existe de multiples façons de déformer optiquement cette image [MIY 64]. L'étude de leurs formules optiques est complexe et conduit à des formes généralement singulières de distorsion. On préfère rapprocher les distorsions particulières par leurs propriétés, définies de façon analytique. Mathématiquement, l'objectif est de définir une application monotone d'un intervalle le plus grand possible de $[0, \pi/2]$ vers $[0, 1]$, raisonnablement linéaire au voisinage de 0 de façon à ce que l'image ne soit pas trop déformée en son centre.

Dans le système sténopé qui nous a servi de modèle géométrique, un rayon incident issu de P faisant un angle θ avec l'axe optique Oz passe par le centre optique O (le trou du sténopé) et crée un point image P' d'abscisse x dans le plan image situé à distance f de O , avec :

$$x = f \operatorname{tg}(\theta) \quad (1)$$

Reportons ce schéma sur la figure 1, issue de [HUG 10] où l'on a représenté, dans le même demi-espace, le rayon incident et le plan image, et utilisons la nomenclature de [MIY 64]. Ce schéma est celui du sténopé inversé qui est commode pour ne pas inverser les signes des variables. Nous l'utiliserons de nouveau prochainement (figure 6).

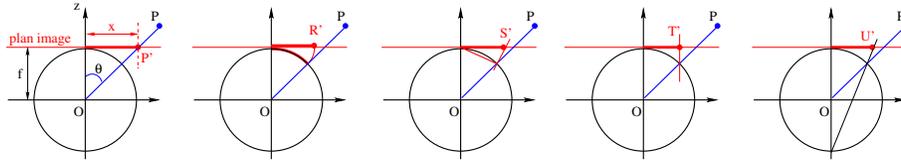


Figure 1 – Cinq schémas de principe de formation d'image. A gauche, la configuration du sténopé et de la plupart des objectifs usuels : le point image P' est situé dans la direction du point objet P . Les quatre autres configurations ont pour but de réduire les distances au bord du champ de façon à accepter des angles de vue plus larges. De gauche à droite : Q' est le point d'équidistance angulaire, S' correspond à une vue dite équisolide, T' est une projection orthographique, U' est une projection stéréographique (d'après [HUG 10]).

Dans le cas de la projection en équidistance angulaire, on reporte dans le plan image la longueur de l'arc de cercle intercepté. On obtient la transformation directe $x_R = \phi(x)$ et inverse $x = \phi^{-1}(x_R)$:

$$x_R = f\theta \quad x_R = f \operatorname{Arc} \operatorname{tg}(x/f) \quad x = f \operatorname{tg}(x_R/f) \quad (2)$$

Dans le cas de la projection en égal angle solide, on reporte pour x_S la longueur de la corde interceptée :

$$x_S = 2f \sin(\theta/2) \quad x_S = 2f \sin \left[\frac{\operatorname{Arc} \operatorname{tg}(x/f)}{2} \right] \quad x = f \operatorname{tg} [2 \operatorname{Arc} \sin(x_S/2f)] \quad (3)$$

La projection orthographique projette l'intersection du cercle de rayon f sur le plan. Elle comprime très fortement les grands angles et devient alors difficilement inversible. Elle ne sert donc pas souvent pour les hypergones :

$$x_T = f \sin(\theta) \quad x_T = f \sin [\operatorname{Arc} \operatorname{tg}(x/f)] = \frac{fx}{\sqrt{f^2 + x^2}} \quad x = \frac{fx_T}{\sqrt{f^2 - x_T^2}} \quad (4)$$

La projection stéréographique s'obtient par reprojection à partir du point du cercle opposé au centre de l'image. Elle fournit un point U' tel que :

$$x_U = 2f \operatorname{tg}(\theta/2) \quad x_U = 2f \operatorname{tg} \left[\frac{\operatorname{Arc} \operatorname{tg}(x/f)}{2} \right] \quad (5)$$

$$x = f \operatorname{tg} \left[2 \operatorname{Arc} \operatorname{tg} \left(\frac{x_U}{2f} \right) \right] = \frac{f^2 x_U}{f^2 - \frac{x_U^2}{4}} \quad (6)$$

Ces fonctions directes et inverses sont tracées sur les figures 2 et 3, où nous avons dénommé « sténopé » la projection d'un objectif ordinaire fonctionnant dans les conditions de Gauss.

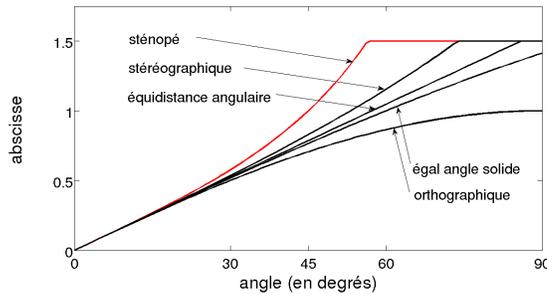


Figure 2 – La transformation directe de projection des objectifs. La projection en équidistance angulaire (courbe (3)) est la référence. Deux hypergones sont représentés : la projection en égal angle solide (4) et la projection orthographique (5), ainsi que le sténopé (1) et la projection stéréographique (2). Le photodétecteur est de dimension 1,5 fois la distance focale et la position du point image (en ordonnées) est exprimée en rapport de la distance focale. Les points objets qui se projettent au-delà de 1,5 ne sont donc plus vus.

0.1.2. *m* Fisheye circulaire et diagonal

Le but des optiques hypergones est d'imager les points situés en périphérie du champ visuel. Ces points sont situés sur un cône faisant un angle voisin de $\pi/2$ avec l'axe de visée. Ils devraient donc s'inscrire dans un cercle sur le capteur du plan image (figure 4 à gauche). Cette configuration est appelée *fish-eye* circulaire. Elle ne privilégie aucune direction mais ne fait pas un bon usage du capteur dont de nombreux pixels ne sont pas utilisés.

Une autre configuration s'est popularisée (en particulier pour les applications scientifiques et la vision industrielle), qui consiste à adapter le faisceau de façon à ce que la totalité du capteur soit utilisée. Pour cela, on adapte la diagonale du capteur (sa plus

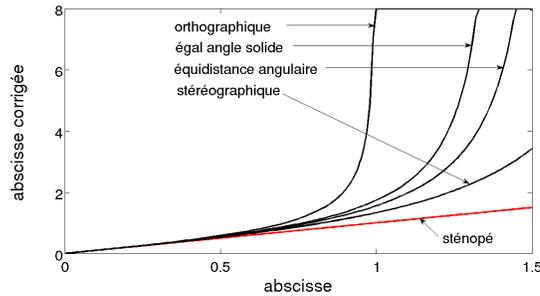


Figure 3 – La transformation inverse de projection des hypergones, dans les mêmes conditions que sur la figure 2, qui permet de retrouver une image conforme à ce que donnerait un sténopé de même champ angulaire. Les ordonnées ont été limitées ici à huit fois la distance focale.

grande dimension) à l'angle du cône. On dénomme cette configuration *fish-eye* diagonal. Dans ce cas, tout le champ du photodétecteur est couvert, mais certaines zones du champ visuel ne sont pas imagées.

La grande variété des dimensions des photodétecteurs conduit aujourd'hui à de nombreuses configurations différentes, compromis entre la situation circulaire et la situation diagonale.

0.1.3. Les fisheyes en pratique

Le choix des objectifs hypergones n'est pas très large sur le marché car le grand public les utilise relativement peu. La conception d'un tel objectif est par ailleurs soumise à de nombreuses contraintes contradictoires. Il n'est pas surprenant alors qu'ils soient assez onéreux.

Les modèles disponibles sont généralement développés pour les réflex et pour les hybrides haut de gamme. Ils pourront alors exploiter des capteurs relativement larges, condition nécessaire pour étendre l'angle de vue. Les distances focales des hypergones doivent également être très courtes comme nous l'avons vu. Mais on sait que les systèmes réflex ne permettent pas de réduire beaucoup la distance focale en raison de la présence du miroir mobile qui doit se loger entre l'optique et le plan image. Ayant conçu un système à très courte focale, il faudra donc repousser son plan image loin de la dernière lentille. Ceci est possible en plaçant une lentille divergente en amont de l'objectif, dans la situation inverse exactement d'un téléobjectif (on dénomme d'ailleurs cette configuration de « téléobjectif inversé »). En adaptant judicieusement la position et la vergence de la lentille divergente aux paramètres de l'objectif, on peut accroître le tirage (donc l'espace entre la dernière lentille et le capteur) sans modifier

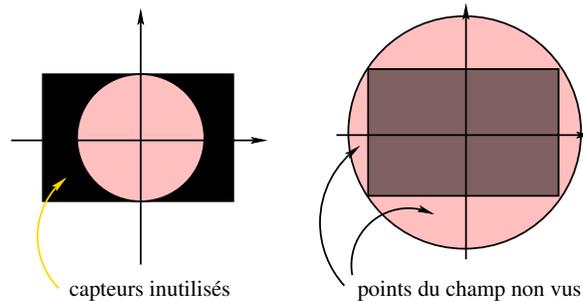


Figure 4 – Fisheye circulaire, à gauche, et diagonal, à droite. Ces dénominations proviennent de la façon dont le champ vu est couvert par le capteur. En configuration circulaire, tout le champ est imagé mais le capteur n’est pas totalement utilisé ; en configuration diagonale, tout le capteur est utilisé, mais de nombreux points en périphérie du champ ne sont pas vus. Avec un capteur de $24\text{ mm} \times 36\text{ mm}$, il faut diviser la focale par 1,8 pour passer de la configuration circulaire à la configuration diagonale.

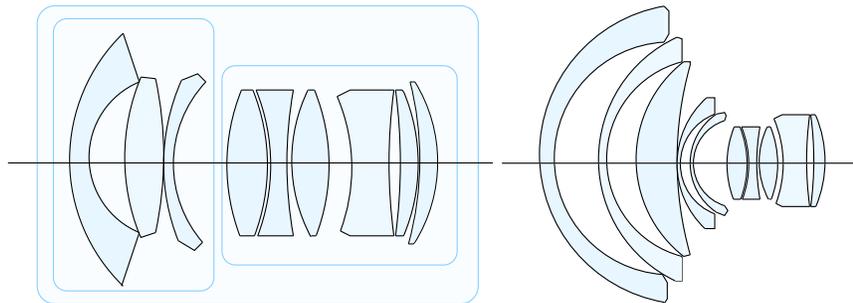


Figure 5 – A gauche, objectif à très large champ. Les trois lentilles du train situé à gauche constituent un objectif divergent ; combinées à la partie droite (qui est à peu près un objectif de courte focale), elles permettent d’accroître le tirage de façon à autoriser l’emploi de la visée réflex. C’est une configuration de télescope inversé (appelé rétrofocus). A droite, schéma type d’un hypergone : la lentille frontale est très large et fortement saillante. Il utilise de nombreuses lentilles convexes-concaves à forte courbure, emboîtées, d’indice variable.

notamment la longueur focale. Il ne reste plus alors qu’à s’attaquer aux aberrations qui ne manquent pas dans des chemins optiques si loin de l’axe (voir figure 5). Pour cela, on procède, comme pour tous les objectifs, en remplaçant chaque lentille par des doublets de verres bien choisis.

L’encombrement et le poids des hypergones les plus performants sont alors souvent considérables car les optiques d’entrée sont très larges et très courbées. Leur prix croît également en proportion.

La plupart des fisheyes du commerce ont des focales variant de 5 à 18 mm. De très rares systèmes proposent des angles supérieurs au demi-espace (certains proposent un demi-angle de 110°). La plupart des systèmes disponibles visent un demi-angle de 90° en configuration diagonale avec des focales de 10 à 15 mm, adaptées au format 135.

Les images qu'ils produisent présentent, comme nous l'avons vu, de fortes distorsions, surtout sensibles en périphérie de champ. Les droites, si elles ne sont pas radiales, sont courbées et d'autant plus qu'elles sont en périphérie. En cela, l'orientation de l'appareil est un facteur important de l'aspect des objets de la scène (à la différence d'un objectif ordinaire qui fait une image à peu près identique d'un objet quel que soit le cadrage). Un objet proche, situé en bord de champ prend généralement une ampleur considérable qu'il n'aurait pas au centre de l'image. La position du centre de visée par rapport à la ligne d'horizon, dans les paysages, permet également de faire passer continument d'un espace clôt, voire enfermé, à un espace ouvert. A ce titre, l'hypergone est un excellent support de créativité artistique. La qualité parfois faible des images due à un faible stigmatisme, aux aberrations chromatiques et à d'inévitables problèmes de vignettage, apparaît souvent secondaire dans cet esprit.

0.2. Calibrage des caméras

La première partie de cette section est donnée à titre d'information. Elle dépasse largement les attendus du projet de Master.

0.2.1. *Un peu de géométrie de la formation des images*

Nous avons jusqu'ici traité les aspects géométriques de formation de l'image par l'appareil photographique dans le repère de la caméra, mais une problématique très importante en vision par ordinateur consiste à relier les coordonnées d'un point de la scène à la position de son image dans la photo, en fonction des paramètres spécifiques de l'appareil photo : ses coordonnées et son orientation, ainsi que la focale de son objectif. Cette problématique comporte la détermination de ces paramètres (généralement inconnus), c'est ce que l'on appelle le calibrage de l'appareil. Le calibrage a appelé une très large littérature [DHO 03, FAU 93]. Nous ne nous servons ici que de quelques éléments particulièrement simples de ces propriétés géométriques.

Comme la grande majorité des auteurs sur ce sujet, nous considérons que la caméra est parfaite, c'est-à-dire sans aberrations. Nous modélisons sa géométrie par celle du sténopé (voir la section ??), et afin d'éviter de manipuler des grandissements négatifs liés au retournement de l'image, nous choisissons le modèle de sténopé inversé (figure 6) qui se justifie pleinement lorsque les objets observés sont beaucoup plus loin que la distance focale. Nous utiliserons également le systèmes de coordonnées homogènes

qui permet de manipuler, dans une même formulation linéaire, les rotations et les translations¹.

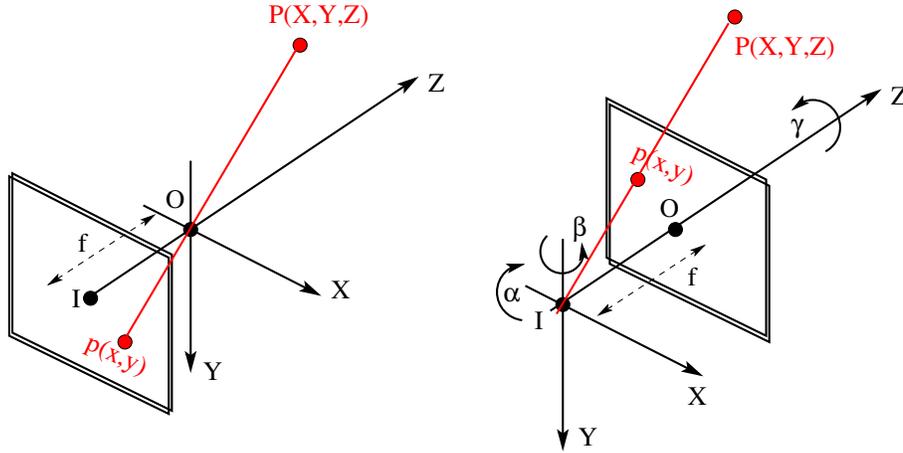


Figure 6 – Modèles géométrique de caméra. A gauche : le sténopé, à droite le sténopé inversé qui est adopté dans la plupart des modèles de vision. Les deux modèles sont équivalents (à l'inversion de l'image près) si l'objet observé P est à une distance Z très supérieure à la distance focale f .

Dans cette représentation, les coordonnées (x, y, s) du point p , exprimées dans l'image sont liées aux coordonnées $(X, Y, Z, 1)$ du point P , dans une représentation universelle liée à la Terre, par la relation matricielle très générale :

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = M_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

et la matrice M , appelée matrice de calibrage, s'écrit sous la forme [DHO 03] :

$$M = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & x_0 \\ 0 & 1/dy & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & O_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & O_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & O_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

1. La représentation homogène plonge un point d'un espace \mathbb{R}^n dans un espace de dimension $n + 1$ en multipliant ses n coordonnées par un scalaire s et en affectant s à la $(n + 1)^e$ coordonnée. Le point à l'infini de \mathbb{R}^n est alors représenté par $s = 0$. On montre [SID 00] que les coordonnées homogènes sont particulièrement adaptées à traiter les problèmes de géométrie projective rencontrés en vision et en synthèse d'image, et en particulier les changements de repères et la formation des images, au moyen de calcul matriciel.

où : dx et dy sont les dimensions du pixel (taille du photosite), (x_0, y_0) sont les coordonnées dans l'image du point I d'intersection de l'axe optique et du plan image, f est la distance focale, (O_x, O_y, O_z) la position du centre optique de l'objectif photo O dans le repère de l'objet, et les termes R_{ij} de la matrice 3×3 de rotation \mathcal{R} s'expriment à l'aide des angles d'Euler α , β et γ de la rotation par rapport aux trois axes Ox , Oy et Oz^2 par :

$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (9) \end{aligned}$$

Partant de l'équation (7), éliminant la variable intermédiaire s et exprimant la position du point p en pixels (x', y') , plutôt qu'en distances (x, y) , on obtient les équations de colinéarité de la photogrammétrie :

$$\begin{cases} x' &= f \frac{R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + O_x}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + O_z} \\ y' &= f \frac{R_{21}X + R_{22}Y + R_{23}Z + O_y}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + O_z} \end{cases} \quad (10)$$

Ces équations montrent donc une relation homographique entre les coordonnées de P et celles de p (à la différence de l'équation homogène 7 qui est linéaire).

Les paramètres $\{x_0, y_0, f, dx, dy\}$ sont les paramètres intrinsèques de l'appareil photo.

Les paramètres $\{R_{ij}, (i, j = 1, \dots, 3)\}$ (où α, β, γ) et O_x, O_y, O_z sont les paramètres extrinsèques du calibrage.

Il y a quinze inconnues au problème de calibrage, puisque les seize termes sont définis à un coefficient près. Mais il y a également des contraintes entre ces variables (les trois rotations sont des transformations unitaires introduisant une contrainte chacune) qui doivent être prises en compte. Il faut donc connaître les coordonnées d'au moins six points de l'espace objet et de leurs coordonnées pour calculer M au facteur

2. Attention, l'ordre dans lequel on applique la transformation est très important, la rotation n'étant pas commutative.

d'échelle s près. En pratique, on essaie de surdimensionner le problème en incluant beaucoup plus de points dans la solution.

De très nombreuses méthodes ont été proposées pour résoudre le problème de calibrage, soit sous la forme (7), soit sous la forme (10), utilisant des cibles artificielles (mires) ou naturelles (amers) [DER 03, FAU 93, LAV 03]. Elles se distinguent surtout par leur robustesse à prendre en compte les inévitables petites erreurs sur les pointés des images de ces points ainsi que les distorsions des objectifs que nous avons négligées jusqu'ici.

0.2.2. Calibrage multi-images : l'ajustement de faisceaux

Si l'on dispose de ν images prises sous divers angles de prise de vue, mais si l'on ne dispose d'aucune information sur les points de la scène (aucune valeur (X, Y, Z)), on peut essayer de résoudre le problème de détermination simultanée des paramètres du calibrage et des coordonnées inconnues de points qui vont servir à positionner les images les unes par rapport aux autres. Cette approche, classique en photogrammétrie, s'appelle l'ajustement de faisceaux (*bundle adjustment*). Elle procède itérativement en raffinant les paramètres de calibrage par descente de gradient, à partir d'une bonne estimation initiale.

Pour cela, on ajoute $3n$ inconnues (X_i, Y_i, Z_i) aux équations (10), correspondant aux positions inconnues de points M_i dont on repère pour chacune les ν projections m_i^j (une dans chaque image $j : (x_i^j, y_i^j)$). On suppose connue et fiable l'association de ces points, soit parce qu'on les a associés manuellement, soit parce qu'ils résultent d'un algorithme de détection robuste.

Partant de bonnes valeurs initiales des paramètres intrinsèques et extrinsèques, utilisant les équations (10), on peut former une mesure de l'erreur de positionnement de l'image de ces points utilisant les paramètres approchés. La somme de ces erreurs forme un critère de qualité du calibrage. Linéarisant les équations (10) par rapport aux paramètres de calibrage, et procédant à une descente de gradient, on parvient à réduire l'erreur. Disposant de $2\nu n$ équations et de $9 + 6\nu$ inconnues, on obtient un système inversible lorsque, par exemple, on dispose de $n = 11$ points distincts vus sur $\nu = 3$ images différentes.

Bien sûr la mise en œuvre pratique de cette approche dépend beaucoup des conditions expérimentales (disponibilité d'une valeur de départ fiable, position des caméras, disposition des points dans la scène, etc.) [DER 03].

0.2.3. Calibrage des caméras fisheye

Les caméras hypergones (*fisheye*), disposant de focales très courtes, et d'un angle de champ très large fonctionnent très loin des conditions de Gauss de l'optique des

lentilles minces que nous avons utilisée dans ce chapitre. La modélisation par un sténopé est tout à fait inadaptée et nos conclusions précédentes ne peuvent pas leur être appliquées. Nous avons décrit les fisheyes au section (0.1). Abordons ici les aspects liés à leur calibrage. Nous ne considérerons que le *fish-eye* circulaire qui est constitué de dioptries sphériques et non le *fish-eye* diagonal qui ne couvre pas la totalité du demi-espace frontal.

Une approche très générale, s'appuyant sur cette hypothèse de sphéricité, exploite le fait que les images sont distordues selon une loi radiale, ce qui permet d'introduire des termes d'aberrations dans nos formules précédentes, termes que nous avons négligés jusqu'alors.

Utilisant les équations (10), posant $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, nous pouvons exprimer la position r' d'un point idéalement incident en r soumis aux aberrations qui l'écartent des conditions d'Abbe :

$$r' = r(1 + a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + a_4 r^8 + \dots) \quad (11)$$

où (x_0, y_0) est le centre de projection dans l'image, r est l'excentricité radiale du pixel et les a_i expriment l'importance de l'aberration (voir section ??). Seuls les termes pairs des développement sont conservés, en facteur du terme r , conformément à l'équation (?). Cela ajoute donc quelques inconnues (quatre si l'on se limite à l'ordre 8 du développement) mais surtout, de délicats problèmes de conditionnement numérique apparaissant alors en raison des valeurs élevées de l'ordre des termes correctifs, problèmes que l'on doit traiter au cas par cas [LAV 00, MIC 03].

Le calibrage de caméras est aujourd'hui bien maîtrisé et constitue une brique indispensable à de nombreux domaines d'application : photogrammétrie, simulation, effets spéciaux en réalité virtuelle, etc. De nombreux produits sont disponibles sur le marché. De plus, des logiciels sont disponibles en accès libre depuis de nombreuses années pour permettre un calibrage mono ou multi caméras comme « *Camera Calibration Toolbox for Matlab* »³, « *OcamCalib* »⁴ ou « *MultiCamera* »⁵.

Les photos des exemples sont disponibles à l'adresse : http://perso.telecom-paristech.fr/~maitre/cours/projet_fish_eye/

3. *Camera Calibration Toolbox for Matlab* de Jean-Yves Bouguet : www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

4. *OcamCalib* de Davide Scaramuzza : sites.google.com/site/scarabotix/ocamcalib-toolbox s'appuie sur la bibliothèque de J.Y. Bouguet.

5. *Multi-Camera Self-Calibration* de Tomas Svoboda : cmp.felk.cvut.cz/~svoboda/SelfCal/.

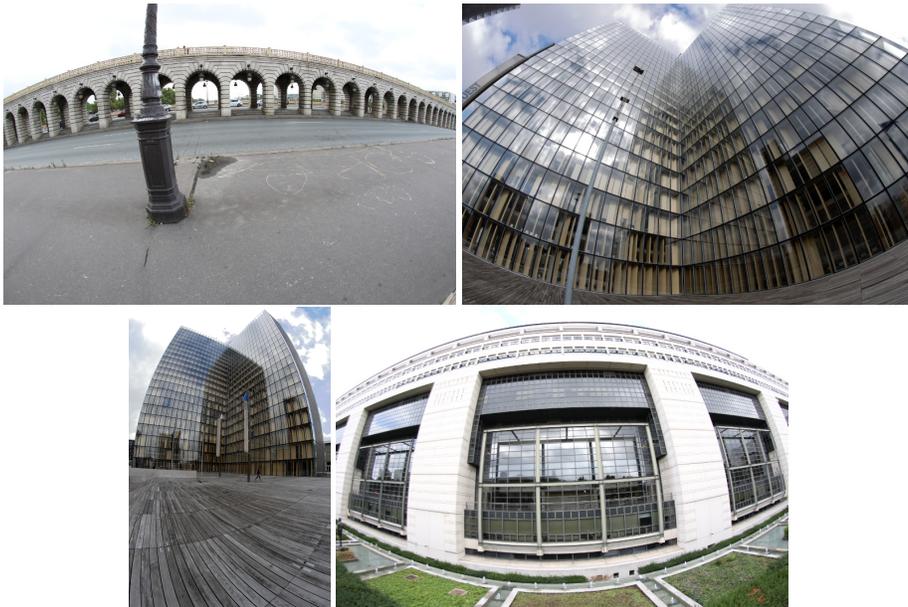


Figure 7 – *Exemples de photos de type "fish-eye"*

Bibliographie

- [CHA 97] CHARTIER G., *Manuel d'Optique*, Hermès, Paris, 1997.
- [DER 03] DERICHE R., « Auto-étalonnage des capteurs vidéo », DOHME M., Ed., *Perception visuelle par imagerie vidéo*, Chapitre 2, p. 59-88, Hermès, Lavoisier, Paris, 2003.
- [DHO 03] DHOME M., *Perception visuelle par imagerie vidéo*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2003.
- [FAU 93] FAUGERAS O., *Three-dimensional computer vision : a geometric view-point*, MIT Press, 1993.
- [FLE 62] FLEURY P., MATHIEU J., *Images optiques*, Eyrolles, Paris, 3 édition, 1962.
- [HUG 10] HUGHES C., DENNY P., JONES E., GLAVIN M., « Accuracy of fish-eye lens models », *Applied Optics*, vol. 49-17, p. 3338-3347, 2010.
- [LAV 00] LAVEST J., DHOME M., « Comment calibrer les objectifs à très courte focale », AF-CET, Ed., *Conférence Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, Paris, p. 81-90, 2000.
- [LAV 03] LAVEST J.-M., RIVES G., « Étalonnage des capteurs de vision », DOHME M., Ed., *Perception visuelle par imagerie vidéo*, Chapitre 1, p. 23-58, Hermès - Lavoisier, Paris, 2003.
- [MIC 03] MICUSIK B., PAJDLA T., « Estimation of omnidirectional camera model from epipolar geometry », IEEE, Ed., *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, p. 485-490, juin 2003.
- [MIY 64] MIYAMOTO K., « Fish Eye lens », *Journal of the Optical Society of America*, vol. 54, p. 1060-1061, 1964.
- [PER 94] PEREZ J.-P., *Optique géométrique, ondulatoire et polarisation.*, Masson (Paris), 4e édition édition, 1994.
- [SID 00] SIDIER J.-C., *Géométrie projective*, Dunod, Paris, 2000.
- [SMI 90] SMITH W. J., *Modern Optical Engineering*, Mc-Graw-Hill, New-York, Etats-Unis, 1990.

Bib_TE_X Bib_TE_X