La Vision Omnidirectionnelle

El Mustapha Mouaddib
CREA - Université de Picardie Jules Verne
7, Rue du Moulin Neuf - 80000 Amiens - France
mouaddib@u-picardie.fr

Résumé

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. En revanche, la grande majorité des outils développés en vision perspective, doit être re-visitée et adaptée aux images omnidirectionnelles à cause de la modification introduite par les miroirs, du voisinage et de la résolution. Nous montrerons les nombreux apports de la vision omnidirectionnelle et nous tenterons de donner un aperçu des problèmes ouverts. Nous fournirons également une cartographie nationale des équipes et des projets de recherche dans cette thématique ainsi que quelques indications sur le contexte international.

Mots Clef

Vision, omnidirectionnel, panoramique, catadioptrique.

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 omnidrectionnelle 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 ont 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'omnidirectionalité 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 (oeil 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'omnidirectinalité par le mouvement du capteur, qu'il soit linéaire [6] 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 : dioptres 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 [43].

Nous nous intéresserons dans le cadre de cet article, à cette dernière approche, pour en expliquer le principe, la théorie, la pratique et surtout pour insister sur ses apports théoriques et ses apports pour certaines applications comme la robotique mobile.

On ne peut finir cette introduction sans conseiller au lecteur de consulter le livre traitant de manière complète de la vision omnidirectionnelle et qui a été édité en 2001 [5] ainsi que le numéro spécial de la revue française Traitement du Signal - Numéro spécial Vision Omnidiectionnelle - 2005.

FIG. 1 – Un robot mobile muni d'une caméra panoramique (miroir paraboloïde).

FIG. 2 – Un exemple d'image omnidirectionnelle : un anniversaire.

1.1 Prodromes d'un champ de recherche

L'idée de l'omnidirectionalité a été exploitée pour des dispositifs optiques avant le 20ème siècle. Mais la première exploitation d'un miroir de révolution (un hyperboloïde) couplé avec une caméra a été réalisée par Rees en 1970 [38]. Ensuite, il a fallu attendre près de 20 ans pour que Yagi, en concevant le système COPIS [47], 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 d'obstacles 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 2.1)). 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 [19], a utilisé un miroir sphérique pour une application de navigation par comparaison entre les images acquises avec une image de référence. Dans [49], 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 [33] que la géométrie (voir la section 2.1) 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. A partir de là, les bases de la compréhension des différences entre les diverses géométries des miroirs et leurs différences optiques (flou, résolution,...) étaient connues. A 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.

2 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 [33] et on peut trouver une version très complète dans [1].

2.1 Le point de vue unique

C'est un centre de projection unique. Sa nécessité a été soulignée pour la première fois par [38] puis mentionnée à nouveau dans [49], [31] et [34]. 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 paraboloïdes, 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 sur la surface 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. [31] 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˚x50˚.

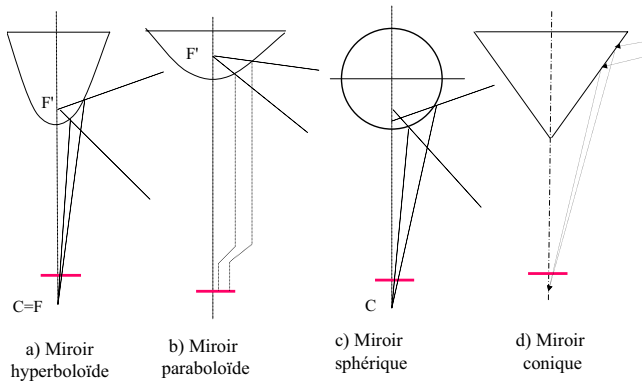

FIG. 3 – Formes géométrique des miroirs.

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) : Le point de vue unique se trouve en F'. Les rayons réfélchis convergent au point F. C'est une solution intéressante. Comme on le voit sur la figure ci dessus, 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 2ème foyer de l'hyerpboloïde). Ce miroir a été réalisé pour la première fois par [38].

Le miroir paraboloïde. (Fig. 3) : Pour contourner la contrainte de l'alignement lors de la fabrication, Nayar a proposé d'utiliser un miroir paraboloïde. 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 citant [32], 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. [32] a combiné l'utilisation des deux (le miroir paraboloïde 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 concave. Ces objectifs sont commercialisés. Enfin, les capteurs utilisant un miroir paraboloïde donnet un modèle simple et des propriétés intéressantes pour le calibrage.

Le miroir conique. (Fig. 3) : 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. [48] a proposé le capteur COPIS et a préconisé de choisir une focale courte. Ce principe a été utilisé dans [29] et dans [7]. Une étude très récente [23] 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) : Le point de vue unique et le point focal sont confondus. Cette solution n'est pas intéressante, car l'image ne contiendrait que l'image de la caméra ! Cependant, comme dans le cas du miroir conique des caméras utilisant ce miroir sont utilisées dans plusieurs applications de robotique et de télésurveillance.

2.2 Les miroirs sans point de vue unique

En dehors des quadriques citées ci dessus, toute autre forme ne possède pas de point de vue unique. Ces formes de miroirs sont souvent utilisées pour obtenir des comportements géométriques et optiques particuliers [18](résolution verticale constante, résolution centrale plus importante, ...).

3 Modélisation de caméras catadioptriques

Il s'agit de la modélisation de tout le processus de formation des images.

3.1 Les modèles ad hoc

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

3.2 Les modèles génériques

Dans [15], 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 pole nord dans le cas d'un miroir paraboloïde (projection stéréographique) et entre le pole 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.

3.3 Les caustiques

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], [44]. Pour une méthode de construction géométrique, voir [20].

4 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.

4.1 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. [22] a proposé une technique simple et rapide pour calibrer les miroirs paraboliques. Les paramètres estimés sont les coordonnées du centre optique et le paramètre du miroir. La précision obtenue n'est pas bonne. Mais le technique est intéressante pour l'initialisation des paramètres avant des les affiner avec une méthode non linéaire. Les auteurs de [13] 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.

4.2 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 [8] (6 paramètres extrinsèques, 2 paramètres du miroir, 5 paramètres pour la transformation rigide miroir-caméra, 4 paramètres intrinsèques et 2 pour la distorsion). Dans [17], les auteurs ont calibré une caméra associée à un miroir paraboloïde convexe et un miroir sphérique concave (c'est une approximation d'un miroir paraboloïde 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 paraboloïde, ce désalignement. Ce calibrage est ensuite validé en rectifiant les images et en calculant une carte 3D. Le nombre important de paramètres amène des difficultés d'initialisation de convergence. Dans [45], nous avons proposé une méthode basée sur cette dernière approche, c'est à dire l'utilisation d'une mire externe. Le modèle que nous utilisons est le modèle générique (sphère d'équivalence) de [3]. L'avantage de cette approche est qu'avec un modèle unique, nous montrons qu'on peut calibrer des caméras catadioptriques différentes : miroirs paraboloïdes ou hyperboloïdes.

Afin de simplifier la procédure de calibrage, les auteurs de [9] ont automatisé toute cette procédure. Ils l'ont appliqué à un miroir hyperboloïde associé à une caméra perspective. Pour cela, ils ont proposé 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. Parmi les apports de cet article, il y a la génération automatique des points 3D de la mire (de part sa conception) et l'extraction précise des points images.

Très récemment, dans [40] et [37], 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 [14], les auteurs décrivent un algorithme de calibrage de caméras paracatadioptriques (miroir paraboloïde) 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 parallélépipédique 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 avec 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 cet article [50], les auteurs présentent une nouvelle méthode de calibrage basée sur l'utilisation des invariants qui permet d'obtenir un formalise 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.

4.3 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. A partir de là, il faut estimer la matrice fondamentale [22] et [15].

4.4 Choix du modèle

Quel modèle choisir pour la calibrage ? Quels paramètres estimer ? Les modèles génériques, qui ont été développés à partir du théorème de l'équivalence, permettent d'obtenir un algorithme unique de calibrage des capteurs avec point de vue unique. Quel que soit la caméra à calibrer, on estime la même quantité de paramètres. Cet algorithme est séduisant, mais il implique qu'on estime plus de paramètres qu'il n'en faut. On peut parfois corriger les défauts de courbure des miroirs, mais on peut aussi introduire un biais dans l'estimation des paramètres. A contrario, l'utilisation des modèles paramétriques ad hoc peut être plus précise si le miroir est conforme dans sa forme au modèle utilisé pour le calibrage.

5 Traitement des images

Les miroirs utilisés pour obtenir des images omnidirectionnelles introduisent des déformations et modifient notablement la notion de voisinage et la résolution à l'intérieur de l'image. Il en résulte que si on utilise de manière aveugle les opérateurs de traitement des images développées pour les images perspectives, alors on ne peut pas obtenir de résultats satisfaisants.

5.1 La convolution

Certains auteurs ont donc proposé de revisiter ces opérateurs. C'est ainsi que [10] a proposé de réécrire la convolution en tenant compte précisément de la transformation géométrique supplémentaire introduite par le miroir.

5.2 La correction du voisinage

Dans [41], c'est le problème de la mise en correspondance de points d'intérêts entre deux images prises avec deux caméras catadioptriques qui a été solutionné en utilisant un voisinage dont la géométrie et la taille dépend de la position dans l'image. La forme de ce voisinage a été calculée en deux étapes : calcul de l'intersection d'angles solides avec le miroir et projection de ces intersections sur le plan de l'image. Une méthode similaire se trouve dans [21]. Dans le cadre du projet OMNIBOT (Robea), deux approches ont été développées pour la prise en compte de la particularité de la formation des images omnidirectionnelles. La première consiste à calculer le voisinage (sur l'image) en projetant un voisinage conçu sur un cylindre (3D). Ensuite, ils utilisent des opérateurs morphologiques flous à noyaux variables pour images omnidirectionnelles afin de compenser les effets de l'échantillonnage et du voisinage. Dans [12], les auteurs ont adapté les champs de Markov à ces images après avoir redéfini la notion de voisinage en utilisant le théorème de l'équivalence (sphère d'équivalence).
Tous ces travaux ont montré clairement que la correction du voisinage améliore les résultats.

5.3 Les droites

La difficulté vient du fait que, dans le cas général, une droite se projette en une portion de conique sur l'image. Le problème peut être simplifié si on suppose les paramètres intrinsèques (caméra et miroir) connus, car on réduit alors le nombre de paramètres à estimer à 2. Ceci peut être fait soit en projetant l'image sur la sphère équivalente [45], soit directement dans l'image [51].

6 Asservissement visuel

L'objectif est d'aboutir à l'asservissement visuel en utilisant des images omnidirectionnelles catadioptriques. Ce domaine a été très peu étudié. La principale difficulté consiste à déterminer la matrice d'interaction, qui du coup doit prendre en compte la projection supplémentaire introduite par le miroir. Il a d'abord été abordé en utilisant les points comme primitives [2]. Ensuite, l'étude a été étendue en utilisant des droites comme primitives et ce pour des asservissements visuels de robots holonomes [25] puis pour des robots non holonomes [26]. Par ailleurs, une étude de la robustesse de l'asservissement visuel vis à vis de l'estimation des paramètres 3D est disponible dans[27]. La commande d'une formation de robots mobiles a été abordée dans les [36] et [46]. Enfin citons [24] qui utilise la géométrie épipolaire pour la commande d'un robot à 3 degrés de liberté.

7 Multi-vues/stéréovision

De la même façon qu'en utilisant plusieurs (au moins 2) caméras perspectives on peut réaliser de la stéréovision, on peut faire de la 3D en utilisant plusieurs caméras panoramiques ou plusieurs miroirs et une seule caméra.
La géométrie épipolaire des images panoramiques a été très largement étudiée (voir par exemple [42]). La formulation des matrices fondamentales et essentielles a été établie. Les lignes épipolaires sont des coniques (intersection du plan avec les miroirs). Pour la reconstruction 3D dense, les premiers travaux en France ont été faits à l'université de Paris

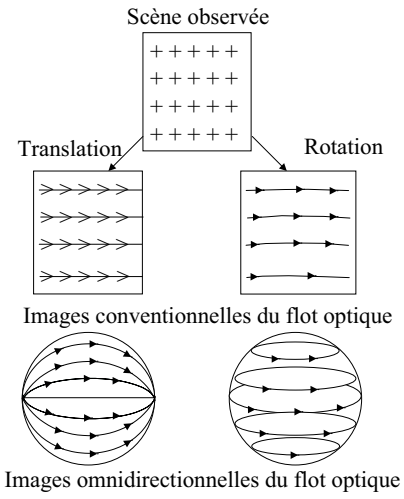

FIG. 4 – Schéma du flot optique dans le cas critique.

VI [6] en utilisant une paire de caméras linéaires alignées verticalement (géométrie épipolaire simple) en rotation.
En stéréovision catadioptrique, un important travail de calibrage de la paire stéréo et de reconstruction 3D a été fait en utilisant 2 caméras panoramiques alignées verticalement [17]. Un autre moyen pour faire de la stéréovision, consiste à utiliser une caméra avec plusieurs miroirs. [30] ont publié une étude sur les différentes configurations possibles, leur caractérisation et leur comparaison. Un autre système [35] combinant une caméra catadioptrique et la projection d'un cercle émis par un laser et réfléchi par un miroir de révolution sur l'environnement. Ce système permet de faire une reconstruction 3D euclidienne à l'échelle.

8 Navigation en robotique mobile

La vision omnidirectionnelle est très utile pour la navigation des robots mobiles. Ceci peut être illustré à l'aide de deux axes : l'estimation du flot optique et la localisation.
Les premiers travaux ont été faits sur l'évitement d'obstacles après analyse du flot optique [47]. Dans le cas des images conventionnelles il y a ambiguïté entre une translation et une rotation lorsque l'amplitude du mouvement est faible. L'autre difficulté avec les images conventionnelles réside dans le fait que le champ de vue étant réduit, les primitives à suivre peuvent manquer. L'ambiguïté disparaît dans le cas d'une projection sphérique 4 grâce à l'équivalence entre la vision omnidirectionnelle catadioptrique et la projection sphérique. Des expérimentations ont été réalisées par [16] en utilisant un capteur parabolique en mouvement et elles ont montré que l'ambiguïté a été levée.
Mis à part [11], cet aspect de la vision omnidirectionnelle est très peu étudié en France.
Parallèlement, beaucoup de travaux sur la localisation ont été menés. Le fait que les amers soient répartis, offre deux avantages : pouvoir sélectionner les amers et améliorer la précision. On peut à titre indicatif se référer à [28].

9 La recherche en omnidirectionnel en France

Les travaux sur la vision omnidirectionnelle ont commencé en France presque simultanément au début des années 1990 au LISIF (Paris 6), au CREA (Amiens) et à l'Université de Franche-Comté. Au LISIF, c'est l'approche caméras linéaires tournantes qui a été privilégiée pour obtenir des images de grande résolution [6]. Au CREA , c'est la vision catadioptrique omnidirectionnelle (un miroir conique-Projet SYCLOP) qui a été utilisé pour répondre à des besoins en localisation de robots mobiles [29]. A Besançon, c'est le projet STAN (Système de Transport à Apprentissage Neuronal) qui a utilisé la vision omnidirectionnelle à l'aide d'un miroir conique également [7]. Cette activité n'a pas eu de suite à Besançon. Le GRAVIR (Grenoble) a entamé des travaux sur la reconstruction 3D en 2000 [39]. A partir de 2000, plusieurs projets régionaux et nationaux (notamment le projet OMNIBOT (Robea)) de recherche ont donné un coup d'accélérateur. L'autre raison est due au fait que les caméras panoramiques disponibles sont de plus en plus fiables. Actuellement, les équipes travaillant sur la VO sont : CREA (Amiens), LISIF (Paris 6), GRAVIR (Grenoble), LAAS (Toulouse), LIRMM (Montpellier), LASMEA (Clermont Ferrand), INRIA (Sophia), IRIT (Toulouse). Toutes les thématiques sont à peu près couvertes.

10 Conclusions

Nous avons présenté dans ce papier un aperçu général sur l'état d'avancement des recherches en vision omnidirectionnelle. Nous avons donné la priorité aux références bibliographiques nationales quand elles existent. Si ce "créneau" a été pendant plusieurs années cantonné à 2 ou 3 laboratoires, il est devenu depuis les années 2000 bien couvert grâce à quelques projets nationaux. Comme on peut le constater également, tous les aspects sont traités de manière conséquente par des équipes françaises.
En robotique mobile, plusieurs démonstrateurs utilisant des caméras panoramiques existent. Des contributions très originales en asservissement visuel (champ qui demeure assez peu couvert à l'étranger), en géométrie et en traitement des images ont été apportées par des équipes françaises.
On peut considérer que la géométrie est très bien avancée. Mais des efforts restent à faire au niveau du calibrage, comme par exemple sur des mires adaptées, même si les travaux existants sont très satisfaisants. En revanche pour les traitements de ces images, nous n'en sommes qu'au début. Nous avons vu dans ce papier que la connaissance des paramètres intrinsèques (le calibrage) permet d'améliorer les résultats en corrigeant le voisinage et de simplifier l'extraction des droites. La question est de savoir si on sera toujours obligé de payer ce prix pour l'amélioration des ré-

sultats de traitement de ces images ?
On a parfois laissé croire que la vision omnidirectionnelle pouvait promettre plus notamment sur des aspects théoriques. Pour l'instant, il n'en est rien. Mais son intérêt pratique pour la robotique mobile, les véhicules et la télésurveillance, pour ne citer que ces aspects, est suffisamment conséquent pour qu'elle mérite qu'on continue à s'y intéresser.

10.1 Liens utiles

http ://www.cis.upenn.edu/ kostas/omni.html
http ://www.panoramicphoto.com/timeline.htm
http ://www.cs.drexel.edu/ ahicks/design/design.html

Références

[1] S. Baker and S.K. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. *IJCV*, 35(2) :175–196, November 1999.

[2] J. Barreto, F. Martin, and H. Horaud. *Visual Servoing/Tracking Using Central Catadioptric Images*, chapter VI, pages 245–254. Springer Tracts in Advanced Robotics 5. Springer Verlag, 2003.

[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 and S.B. Kang. *Panoramic Vision : Sensors, Theory, Applications*. Springer, 2001.

[6] R. Benosman, T. Maniere, and J. Devars. Multidirectional stereovision sensor, calibration and scene reconstruction. In *ICPR 96*, pages ? ?– ? ?, 1996.

[7] 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.

[8] C. Cauchois, E. Brassart, C. Pégard, and C. Clérentin. Technique for calibrating an omnidirectional sensor. In *IEEE/RSJ int. Conf. on Int. Robots ans Systems-IROS 99*, pages ? ?– ? ?, 1999.

[9] F. Comby, C. Cadreas de Kereleau, and O. Strauss. Etalonnage de caméras catadioptriques hyperboloides. *Traitement du Signal*, Numéro Spécial sur la Vision Omnidirectionnelle, 2005.

[10] K. Daniilidis, A. Makadia, and T. Bülow. Image processing in catadioptric planes : Spatiotemporal derivatives and optical flow computation. In *OMNIVIS02*, pages 3–10, 2002.

[11] C. Demonceaux and D. Kachi. Optical flow estimation in omnidirectional images using wavelet approach. *IEEE Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks (OMNIVIS03) hel with CVPR03*, June 21, 2003.

[12] C. Demonceaux and P. Vasseur. Champs de markov pour le traitement d'images catadioptriques. *Traitement du Signal*, Numéro Spécial sur la Vision Omnidirectionnelle, 2005.

[13] J. Fabrizio, J.P. Tarel, and R. Benosman. Calibration of panoramic catadioptric sensors made easier. In *OMNIVIS02*, pages 45–52, 2002.

[14] C. Geyer and K. Daniilidis. Catadioptric camera calibration. In *ICCV99*, pages 398–404, 1999.

[15] C. Geyer and K. Daniilidis. A unifying theory for central panoramic systems. In *In Proc. Europ. Conf. on Computer Vision, Dublin, Ireland, 2000*, 2000.

[16] J. Gluckman and S.K. Nayar. Ego-motion and omnidirectional cameras. In *ICCV98*, pages 999–1005, 1998.

[17] 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.

[18] R. Andrew Hicks and Ronald K. Perline. Equi-areal catadioptric sensors. In *Proc. of Omnivis02*, pages 13–18, June 2, 2002.

[19] 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.

[20] S. Ieng and R. Benosman. Les surfaces caustiques par la géométrie - application aux capteurs catadioptriques. *Revue Traitement du signal TS*, Numéro spécial Vision omnidrectionnelle 2005, 2005.

[21] S. S. Ieng, R. Benosman, and J. Devars. An efficient dynamic multi-angular feature points matcher for catadioptric views. In *Omnivis 03 Omnidirectional Vision and Camera Networks Workshop, CVPR03*, pages ? ?– ? ?, 2003.

[22] S.B. Kang. Catadioptric self-calibration. In *CVPR00*, pages I : 201–207, 2000.

[23] S.S. Lin and R. Bajcsy. True single view point cone mirror omni-directional catadioptric system. In *ICCV01*, pages II : 102–107, 2001.

[24] G.L. Mariottini, E. Alunno, J. Piazzi, and D. Prattichizzo. Epipole based visual servoing for central catadioptric cameras. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, June 2005.

[25] Y. Mezouar, H. Hadj Abdelkader, and P. Martinet. Utilisation des droites en asservissement visuel omnidirectionnel. *RFIA*, 1, 2004.

[26] Y. Mezouar, H. Haj Abdelkader, P. Martinet, and F. Chaumette. Central catadioptric visual servoing from 3d straight lines. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'04*, volume 1, pages 343–349, Sendai, Japan, September 2004.

[27] Y. Mezouar and E. Malis. Robustness of central catadioptric image-based visual servoing to uncertainties on 3d parameters. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems,IROS'04*, volume 1, pages 1389–1394, Sendai, Japan, September 2004.

[28] E. Mouaddib and B. Marhic. Geometrical matching for mobile robot localisation. *Trnasactions on robotics and Automation*, Vol 16, Num 5 :542–552, 2000.

[29] 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.

[30] E. Mouaddib, R. Sagawa, T. Echigo, and Y. Yagi. Stereo vision with a single camera and multiple mirrors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA2005*, April 2005.

[31] V. Nalwa. A true omnidirectional viewer. In *Technical report, Bell Laboratories, Holmdel, NJ 07733, USA*, pages ? ?– ? ?, 1996.

[32] S.K. Nayar. Catadioptric omnidirectional camera. In *CVPR97*, pages 482–488, 1997.

[33] S.K. Nayar and S. Baker. Catadioptric image formation. In *IUW 97*, pages 1431–1437, 1997.

[34] S.K. Nayar and S. Baker. Catadioptric image formation. In *DARPA97*, pages 1431–1438, 1997.

[35] R. Orghidan, E.M. Mouaddib, and J. Salvi. Omnidirectional depth computation from a single image. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, accepted for publication, 2005.

[36] A. Paulino and H. Araujo. Multiple robots in geometric formation : Control structure and sensing. In *International Symposium on Intelligent Robotic Systems*, pages 103–112, University of Reading, UK, July 2000.

[37] S. Ramalingam and S. K. Sturm, P.and Lodha. Towards complete generic camera calibration. In *Proceedings. IEEE CVPR*, 2005.

[38] D. Rees. Panoramic television viewing system. In *United States Patent No. 3,505,465.*, pages ? ?– ? ?, 1970.

[39] P. Sturm. A method for 3d reconstruction of piecewise planar objects from single panoramic images. In *Proceedings. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 119 –126, 2000.

[40] P. Sturm and S. Ramalingam. A generic concept for camera calibration. In *ECCV*, 2004.

[41] T. Svoboda and T. Pajdla. Matching in catadioptric images with appropriate windows and outliers. In *Proc. of the 9th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Verlag. Warsaw, Poland, 5–7 September*, pages ? ?– ? ?, 2001.

[42] T. Svoboda, T. Pajdla, and V. Hlavac. Epipolar geometry for panoramic cameras. In *ECCV98*, pages 218–232, 1998.

[43] T. Svoboda, T. Pajdla, and V. Hlavac. Central panoramic cameras. In *Research Report K335/97/147*, December 5, 1997.

[44] 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.

[45] P. Vasseur and E. Mouaddib. Central catadioptric line detection. In *15th British Machine Vision Conference*, September 2004.

[46] R. Vidal, O. Shakernia, and S. Sastry. Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 584–589, Taipei, Taiwan, September 2003.

[47] Y. Yagi and S. Kawato. Panoramic scene analysis with conic projection. In *IROS90*, pages xx–yy, 1990.

[48] 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.

[49] K. Yamazawa, Y. Yagi, and M. Yachida. Omindirectional imaging with hyperboliodal projection. In *IROS93*, pages 1029–1034, 1993.

[50] X. Ying and Z. Hu. Catadioptric camera calibration using geometric invariants. In *ICCV03*, pages 1351–1358, 2003.

[51] X. Ying and Z. Hu. Catadioptric line features detection using hough transform. In *ICPR04*, pages IV : 839–842, 2004.