

## STEREOSCOPIE PASSIVE AVEC DES ARCS DE CERCLE

M. ALAMI, A. OSORIO, L. PERALTA

CRIIF-LIMSI(CNRS), Tour 66, 4, Place Jussieu 75252 PARIS Cedex 05 FRANCE

## RESUME

Les méthodes K2D utilisées en robotique sont basées sur la mise en correspondance de plusieurs images de la même scène prises à partir de points de vue différents. A partir du codage d'une image de contours avec des primitives du type arcs de cercle, il est possible d'améliorer la démarche de mise en correspondance au niveau des résultats et des temps de calcul. Ce travail présente une contribution à ce types de méthodes en y ajoutant un algorithme du type prédiction et vérification d'hypothèses. La méthode s'avère efficace tant pour des scènes d'environnement robotique que s'il s'agit d'objets appartenant à d'autres gammes de produits. L'augmentation du volume de codage nécessaire à la segmentation d'une image et du temps de calcul global, sont largement compensés par la qualité des résultats obtenus dans la stéréo-correspondance.

## Mots clés:

Vision par ordinateur. Vision stéréoscopique. Robots. Segmentation par arcs de cercle.

## 1. INTRODUCTION

Dans ces dernières années de nombreux travaux ont été publiés, concernant l'utilisation de la stéréovision en robotique et spécialement dans des problèmes d'assemblages, voir par exemple: Hannach [HAN74], Baker [BAK81], Marr et Poggio [MAR79], Hwang [HWA80], Ikeuchi [IKE81].

Il est bien connu que la difficulté majeure en stéréovision est la mise en correspondance des images produites par les deux capteurs (en général par deux caméras). Cette mise en correspondance se pose en des termes très différents suivant le niveau auquel on décide de travailler.

- Niveau du pixel.
- Niveau des transitions d'intensité sur une ligne épipolaire.
- Niveau des caractéristiques (arcs de courbe, segments, jonctions, régions, ...).
- Niveau des objets.

Nous nous plaçons ici au niveau des caractéristiques et nous travaillons essentiellement sur des arcs de cercle. Ce choix permet d'une part de travailler sur des entités plus significatives (les arcs de cercle par exemple) puisqu'elles incorporent déjà un élément sémantique.

## 2. PRETRAITEMENT DES IMAGES

Les contours d'intensité lumineuse sont extraits des images tout en gardant la direction du gradient de chaque point de contour. Les chaînes de contours sont par la suite approchées par des arcs de cercle. Enfin des relations de voisinage sont calculées entre les arcs de cercle de l'approximation curviligne. Les arcs de cercle voisins forment une classe d'équivalence qu'on appellera par la suite composante connexe. La description finale d'une image est donc un ensemble de composantes connexes. Chaque CC est construite par un critère de proximité entre les extrémités des arcs de cercle auxquels sont attachés des caractéristiques géométriques et de connectivité.

Les détails de l'algorithme de prétraitement ont été présentés dans un autre article [ALA86].

## ABSTRACT

K2D methods used in robotics are based on the matching of features in several images taken from different points. Using a circle arc coding it is possible to obtain better results in the overall 3D representation. In this paper we describe a prediction-verification method used for the matching of images approached by arcs of circle. This method has been tested on images of industrial parts as well as common life objects. The increase in computational burden is compensated by the overall improvement in the stereovision results.

## Keywords:

Computer vision. Stereoscopic vision. Robotics. Segmentation by arcs of circle.

## 3. ETALONNAGE DU SYSTEME DE VISION

Une procédure d'étalonnage a été développée [RHO84] pour estimer les paramètres du banc stéréoscopique. Si on accepte une approximation "pin-hole" de la caméra [HWA80], les coordonnées (u,v) d'un point appartenant à la surface de travail et les coordonnées (x,y) du point correspondant dans le plan de l'image, sont reliées par la transformation bilinéaire:

$$u = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1} \quad \text{et} \quad v = \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1}$$

Les coefficients  $a_1, \dots, a_8$  dépendent de la position de la caméra et de son orientation, la position de l'axe optique dans l'image et le facteur d'échelle sur l'image.

Afin de déterminer les 8 coefficients de la transformation bilinéaire il suffit de connaître la position de 4 points sans triade colinéaire sur le plan de travail et la position de leurs points image. Néanmoins, ces coefficients ne permettent pas de déduire la position de la caméra.

La position de la caméra peut-être déterminée avec seulement quatre points d'étalonnage si on fait une hypothèse supplémentaire sur le facteur d'échelle, la position de l'axe optique étant toujours inconnue. En effet, nous avons supposé que sur le plan image, les échelles longueurs-pixel sont les mêmes dans le sens horizontal et vertical.

## 4. CONSTRUCTION DES COMPOSANTES CONNEXES

L'image des arcs de cercle est représentée par un ensemble de CCs. Chaque CC est construite par un critère de proximité entre les extrémités des arcs de cercle. Chaque extrémité peut être connectée à une ou plusieurs extrémités d'arcs de cercle. Le nombre d'extrémités voisines dépend de la distance maximale qu'on a choisi pour décider que deux extrémités sont connexes. La distance choisie est suffisamment faible pour tenir compte de la continuité souvent vérifiée des bords des objets et pour éviter que les CCs comportent trop d'arcs. L'intérêt est de limiter le nombre de "ramifications" dans chaque CC et de diminuer le nombre de combinaisons pendant l'appariement des CCs.



Une fois les CCs construites, on calcule les caractéristiques de chaque arc de cercle, en plus de ses coordonnées propres c'est à dire ses deux extrémités plus son centre. Les caractéristiques de chaque arc sont les suivantes :

- Sa longueur :  $l = R\theta$ ,  $R$  étant le rayon de l'arc,  $\theta$  étant l'angle d'ouverture de l'arc.
- Limite de la zone d'appariement valable:  $[Y_1..Y_2]$ ,  $Y_1$  et  $Y_2$  sont les ordonnées des deux extrémités de l'arc.
- Son orientation.
- La position et la distance de l'extrémité de l'arc le plus proche n'appartenant pas à la même composante connexe.

Enfin, on élimine les composantes connexes dont la longueur est inférieure à un certain seuil donné. Ces CCs augmentent le nombre de combinaisons possibles, donc augmentent le temps de traitement.

## 5. MISE EN CORRESPONDANCE DES ARCS DE CERCLE

Les traitements étalonnage et prétraitement cités dans le paragraphe précédent sont effectués sur l'image de gauche ainsi que celle de droite.

Dans notre application les deux caméras sont à peu près à la même hauteur, donc deux points homologues se trouvent projetés sur le plan de travail au voisinage de la même ordonnée  $Y$ . Cela est une caractéristique de notre système de vision. Par conséquent, nous pouvons chercher les arcs de cercle homologues même si le cadrage respectif des deux caméras est différent. Cette importante caractéristique de notre système nous a amené à faire la correspondance entre les arcs de cercle obtenus par projection des arcs de cercle des images gauche et droite sur le plan de travail, et non pas directement entre les arcs de cercle des deux images.

### 5.1 PRINCIPE DE MISE EN CORRESPONDANCE

Les candidats à la mise en correspondance, sont décrits par une liste de caractéristiques. On définit alors un appariement comme un couple  $(a, b)$  d'arcs de cercle, tels que les deux extrémités de  $a$  ont comme homologues les deux extrémités de  $b$ .

Dans notre problème, nous avons adapté les règles de la vision stéréoscopique, décrites par Marr [MA77a], [MA77b].

- La loi d'unicité d'après laquelle un point d'une vue ne peut avoir qu'une correspondance unique sur l'autre vue.
- La loi de continuité : si deux points sont proches dans l'espace, ils doivent avoir des disparités voisines.

La notion d'unicité n'est pas conservée car les chaînes de contours homologues sont approximées par un nombre différent d'arcs de cercle. On admet donc qu'un arc de cercle peut être décomposé en plusieurs parties. Cette décomposition permet de considérer aussi les effets des parties cachées.

Notre interprétation de la loi de continuité est la suivante: la scène observée est constituée d'objets dont les surfaces sont en général continues. Par conséquent si l'appariement des deux arcs de cercle est correct, alors l'appariement de deux arcs voisins aux précédents est probablement correct si la distance entre les extrémités voisines deux à deux est inférieure à un seuil.

Cette règle n'est pas applicable lorsqu'il y a des variations brusques de profondeurs. Cependant elle est vérifiée dans la plus grande partie des cas.

### 5.2 ALGORITHME DE TRAITEMENT

On a défini une fonction gain qui représente le gain dû à l'appariement sur deux CCs gauche et droite. Le gain dû a un parcours est fonction de la longueur parcourue de part et d'autre et des variations des disparités dans les chemins.

1.1- On choisit les CCs dont les champs d'appariement sont le plus haut dans les images et qui se recouvrent. L'appariement total ou partiel de deux CCs permet de calculer la valeur du gain qui est dû aux parcours des chemins respectifs.

1.2- Comme les arcs de cercle sont ouverts, on commence à faire l'appariement avec des arcs à "orientations verticales" et on effectue le suivi dans les deux sens à partir des deux extrémités de ces derniers, ce qui permet de ne pas propager les erreurs des parcours horizontaux (voir plus loin).

Cas de plusieurs chemins: C'est le cas où deux composantes connexes gauche et droite présentent plusieurs chemins possibles à partir de l'appariement initial. En d'autres termes si une ou plusieurs extrémités d'arcs de cercle se trouvent connexes à plus d'un arc de cercle. L'appariement se fait en exploitant toutes les possibilités, c'est à dire tout les chemins deux à deux possibles. On choisit les chemins, qui permettent de maximiser la fonction gain.

1.3- Deux CCs (ou parties de CCs) gauche et droite peuvent se correspondre si la droite épipolaire associée à l'extrémité  $I$  d'un arc de cercle de la CC de gauche intersecte un arc de cercle de la CC de droite ou inversement. On calcule alors la première ordonnée  $X'$  du point d'intersection  $I'$  et la disparité horizontale  $Disph$  est définie par  $Disph = X_{G_i} - X_{D_r}$ .

Cas de plusieurs possibilités au niveau de l'appariement initial: Ce cas se présente si la droite épipolaire associée à une extrémité de l'arc de cercle intersecte plus d'un arc de cercle de la CC de l'autre vue. On se trouve devant plusieurs appariements initiaux. On essaye d'autres appariements à partir des nouveaux arcs initiaux. On choisit donc le parcours qui permet de maximiser la fonction gain.

1.4- A partir de deux points  $I$  et  $I'$  pris précédemment, on sélectionne deux chemins possibles (vers le "haut" et vers le "bas") gauche et droite et on effectue le suivi de ces chemins (règle de continuité). Le suivi peut être effectué de deux manières.

- a. En utilisant les lignes épipolaires: c'est le cas de parcours verticaux. En effet si  $I$  et  $I'$  sont appariés sur une même ligne épipolaire, l'extrémité  $J$  de l'arc le plus court verticalement a bien son correspondant  $J'$  sur l'autre arc qui se trouve sur la ligne épipolaire associée à  $J$ . Les deux arcs ont des orientations voisines.
- b. En utilisant la longueur de l'arc le plus court: cas de parcours horizontal. En effet si deux sommets  $I$  et  $I'$  de deux arcs se correspondent, on essaye de faire correspondre l'autre extrémité  $J$  de l'arc le plus court. Si la droite épipolaire associée à l'extrémité  $J$  n'intersecte pas l'arc qu'on est en train d'examiner, cela veut dire que, ou bien l'orientation des deux arcs est très différente et dans ce cas on abandonne le suivi de chemin, ou bien les arcs sont horizontaux, ce qui entraîne un léger décalage de la ligne épipolaire associée au sommet  $J$  par rapport à l'arc dont un des sommets a déjà été apparié. Dans ce cas on décide de faire un parcours par la longueur de l'arc le plus court. Ce qui veut dire en d'autres termes que la longueur de l'arc dont les sommets sont  $I$  et  $J$  est égale à la longueur de l'arc correspondant dont les sommets sont  $I'$  et  $J'$ . Le décalage des lignes épipolaires correspond à la disparité verticale  $Dispv = Y_J - Y_{J'}$ .

Contraintes d'appariement: les deux arcs gauche et droite sélectionnés ont, ou bien même longueur, (cas du parcours horizontal) ou bien leurs extrémités respectives appartiennent à la même ligne épipolaire. Pour que les deux arcs soient intégrés aux chemins gauche-droite respectivement, il faut qu'ils respectent les contraintes suivantes:

- a. Faible disparité verticale des deux points finaux dans le cas d'un parcours par la longueur: en effet si la ligne épipolaire associée à une extrémité se trouve décalée par rapport à la ligne épipolaire associée à l'autre extrémité, la disparité verticale des deux points finaux doit être inférieure à un seuil donné. Ce seuil dépend du léger décalage des deux caméras qui sont supposées être à la même hauteur. Il dépend aussi de la précision de l'approximation.
- b. Disparité horizontale limitée: cette disparité doit être inférieure à un seuil donné. Ce seuil dépend de la profondeur de l'objet, la valeur de la disparité augmente quand la profondeur de l'objet est plus importante. Il dépend aussi de l'inclinaison des caméras par rapport à la scène et de l'angle que font les deux axes optiques entre eux. Le seuil peut être défini à partir de la géométrie.

- c. Direction du parcours similaire: elle est déterminée par la variation verticale et horizontale  $Y_{G1} - Y_{G2}$ ,  $X_{G1} - X_{G2}$  de l'arc de gauche et la variation verticale et horizontale  $Y_{D1} - Y_{D2}$ ,  $X_{D1} - X_{D2}$  de l'arc de droite.  
La variation verticale ou horizontale pour les deux arcs à appairer doit être inférieure à un seuil.  
Dans le cas où le sens vertical diffère :

$$\frac{|Y_{G1} - Y_{G2}|}{l_G} < s \quad \text{et} \quad \frac{|Y_{D1} - Y_{D2}|}{l_D} < s$$

Dans le cas où le sens horizontal diffère :

$$\frac{|X_{G1} - X_{G2}|}{l_G} < s \quad \text{et} \quad \frac{|X_{D1} - X_{D2}|}{l_D} < s$$

$l_G$  et  $l_D$  étant la longueur des arcs de cercle récupéré.  $s$  est un seuil donné.

Si toutes les contraintes sont vérifiées, on calcul le gain de l'appariement des deux arcs, on les intègre aux chemins respectifs gauche et droite. Le suivi des chemins s'effectue en considérant les derniers points J et J' comme points de départ et on procède de la même manière que précédemment. Pendant le suivi, les points de départ peuvent ne pas appartenir à la même ligne épipolaire, mais à des lignes épipolaires proches (dans le cas des parcours horizontaux).

Trois cas peuvent se présenter pendant le suivi des chemins:

- Soit on a apparié un arc de gauche avec une partie seulement de l'arc de droite et dans ce cas on tente d'apparier un arc connexe à l'arc de gauche (que l'on vient d'apparier) avec la partie qui reste de l'arc de droite.
- Soit c'est le contraire de b).
- Soit les extrémités se trouvent très proches d'une même ligne épipolaire. Dans ce cas on tente d'apparier les deux arcs connexes aux précédents.

On quitte le chemin si une des contraintes n'est pas vérifiée, ou bien si on est arrivé à la fin de l'une des deux CCs.

1.5- Mémorisation du chemin: Les caractéristiques des arcs appariés que l'on mémorise sont:

- Les coordonnées des extrémités calculées précédemment.
- La longueur de chaque arc.
- La disparité horizontale et verticale des extrémités qui se correspondent.

$$Disph_1 = |X_{G1} - X_{D1}| \quad Disph_2 = |X_{G2} - X_{D2}|$$

$$Dispv_1 = |Y_{G1} - Y_{D1}| \quad Dispv_2 = |Y_{G2} - Y_{D2}|$$

2.1- Validation des appariements: l'intervalle des disparités que nous avons autorisé entre les images projetées est relativement grand et dépend uniquement de la géométrie des caméras et de la scène observée. Par conséquent l'appariement de deux CCs n'est pas forcément la bonne, car dans une zone d'appariement plusieurs CCs (ou parties) peuvent se ressembler. Ce qui nous a amené à tenter tout les appariements possibles.

On continue à calculer le gain du à l'appariement de toutes les combinaisons possibles entre CC de gauche avec des CC candidates possibles de droite. Ensuite on détermine la combinaison d'affectations qui maximise la fonction gain. Dans ce dernier calcul, on prend en compte la possibilité de ne pas affecter une ou plusieurs CCs. Le regret de ne pas affecter une CC est proportionnel à la longueur de la CC.

2.2- Ensuite sélection d'autres CCs dont les champs d'appariement se recouvrent: retour en 1.1. On termine le processus si toutes les CCs ont été testées.

3- Réinjection des parties de CCs qui restent: la non affectation d'une partie d'une CC au cours d'un appariement signifie que:

- Soit cette partie n'a pas d'homologue.
- soit la partie qui reste est homologue d'une autre partie d'une CC déjà affectée

D'où la réinjection du reste des CCs dans un nouveau processus d'appariement en gardant l'information sur les CCs mères. Le critère utilisé est la restauration du gain issue de l'appariement des CCs mères et en ajoutant un autre terme au niveau de la fonction gain. Ce terme dépend de la différence de la variation de la disparité des CCs mères et de la variation de la disparité des CCs filles.

## 6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous présentons ici les résultats du programme d'appariement sur un exemple, en montrant les paires d'arcs de cercle appariés. Ce programme a été implanté sur IBM3090.

Les appariements sont corrects dans une proportion supérieure à 96%, pour des temps de calcul de l'ordre de 0.01 seconde pour des images simples à 1 seconde pour des images plus complexes.

## 7. CONCLUSION

La vision stéréoscopique est un moyen efficace de récupérer l'information de profondeur. Le problème est d'arriver à réaliser la mise en correspondance de la manière à la fois la plus sûre et la plus rapide.

Nous avons essayé de mettre en correspondance des entités de haut niveau en nous appuyant sur des règles simples. Nous avons utilisé une description des images par des composantes connexes d'arcs de cercle de contours et une technique de recherche sur la ligne épipolaire et en fixant des seuils de disparités maximales.

L'approximation des contours par des arcs de cercle permet d'améliorer la représentations des pièces industrielles et une réduction de la quantité globale des données. L'utilisation des arcs de cercle comme caractéristiques est moins stable que les segments de droite dans le cas des objets polyédriques néanmoins l'information portée par un arc de cercle dans le cas des objets non polyédrique est sémantiquement plus significative et plus importante.

Ces résultats montrent qu'il est possible d'effectuer la reconnaissance et le positionnement de pièces industrielles tridimensionnelles avec des temps et une précision corrects, tout en utilisant un capteur bon marché.

## REFERENCES

- [ALA86] M. ALAMI, L. HENNIGER, L. PERALTA & A. OSORIO  
"Finding picture edges by circle approach". Séminaire international de l'image électronique. CESTA, 21-25 avril 1986 Nice France
- [HAN74] M. J. HANNACH  
"Computer matching of areas in stereos images", NTIS AD 786-720 1974.
- [HWA80] J. J. HWANG  
"Computer stereo vision for three dimensional objet location", PhD, Univ of Tenesse, Knoxville, 1980.
- [IKE81] K. IKEUCHI  
"Determination surface orientation of specular surface using the photometric stereo method", IEEE PAMI-6 Nov 1981.
- [MA77a] D. MARR, T. POGGIO  
"A Theory of Human Stereo Vision", Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Memo 446 (November 77).
- [MA77b] D. MARR, T. POGGIO, G. PALM  
"Analysis of Cooperative Stereo Algorithm", Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Memo 446 (October 77).
- [MAR79] D. MARR, T. POGGIO  
"A computational theory of human stereo vision", Proc Roy Soc London B204 pp 301-328 1979.



- [OSO85] A. OSORIO, H. HENNINGER, A. MELLER, L. PERALTA,  
"Vision Integration in advanced robotics". International SPIE, Cannes, Décembre 1985.
- [OSO85] A. OSORIO, H. HENNINGER, A. MELLER, L. PERALTA,  
"Programmation d'une cellule flexible d'assemblage". Journées Nat. SM90. ADI-CNET-INRIA. VERSAILLES. Décembre 1985

- [RHO83] K. BEN RHOUMA, L. PERALTA, A. OSORIO,  
"A K2-D Perception Approach for Assembly Robots", Eurasip 1983, Erlangen, W. Germany, pp 227-230.
- [RHO84] K. BEN RHOUMA, L. PERALTA, A. OSORIO,  
"Analyse de scènes par une méthode du type K2D pour la manipulation de pièces en Robotique Avancée". Premier Colloque Image. Biarritz Mai 1984

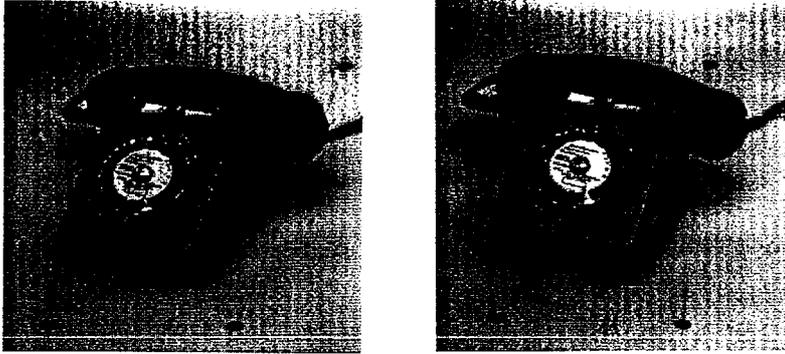


figure 1 : images digitalisées gauche et droite



figure 2 : images de contours gauche et droite

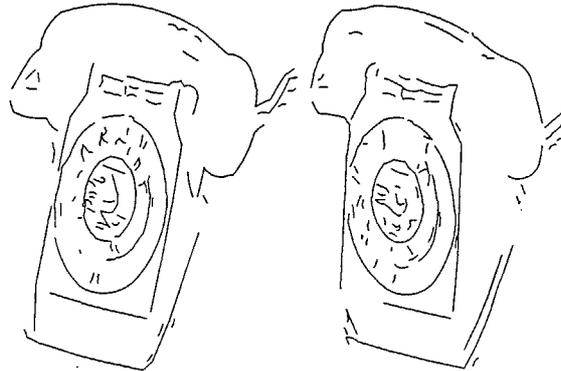


figure 3 : approximation des contours par des arcs de cercle et projection sur la scène de travail

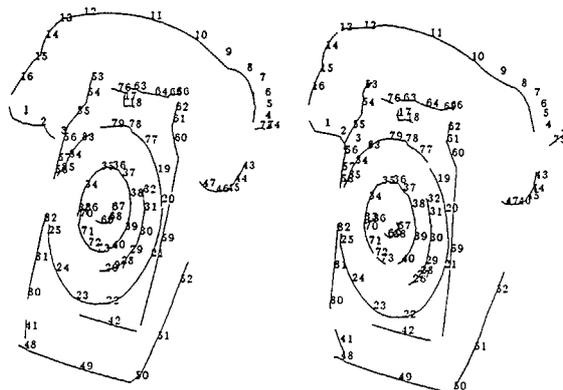


figure 4 : les arcs de cercle appariés