



SYSTEME MULTISENSEUR DE PERCEPTION 3D POUR LE ROBOT MOBILE HILARE

Michel Ferrer

► To cite this version:

Michel Ferrer. SYSTEME MULTISENSEUR DE PERCEPTION 3D POUR LE ROBOT MOBILE HILARE. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1982. Français. NNT : . tel-00181392

HAL Id: tel-00181392

<https://theses.hal.science/tel-00181392>

Submitted on 23 Oct 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE (Sciences)

en vue de l'obtention

du TITRE de DOCTEUR de 3^e CYCLE

Spécialité : E.E.A. - Option : Automatique

par

Michel FERRER

Maître ès-Sciences

SYSTEME MULTISENSEUR DE PERCEPTION 3D POUR LE ROBOT MOBILE HILARE

Soutenue le 21 décembre 1982, devant la Commission d'examen :

MM. Y. SEVELY

Président

M. BRIOT

G. GIRALT

J.-P. HERMANN

C. LAURGEAU

}
Examineurs

AVANT-PROPOS

- :-

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué dans le cadre du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du C.N.R.S. de Toulouse, au sein de l'opération "Perception pour Robots Evolutifs".

Nous remercions Monsieur Y. SEVELY, Professeur à l'Université Paul Sabatier, d'avoir accepté la Présidence de notre Jury de Thèse.

Nous remercions aussi :

- Monsieur M. BRIOT, Maître-Assistant au Département Génie Electrique de l'I.U.T. de Toulouse, responsable de l'opération P.R.E. au LAAS, qui a bien voulu assurer la charge de rapporteur de nos travaux ;*
- Monsieur G. GIRALT, Directeur de Recherche au CNRS, responsable du programme Robotique au LAAS ;*
- Monsieur J.P. HERMANN, Maître de Recherche au CNRS, détaché à la Régie Renault Billancourt ;*
- Monsieur C. LAURGEAU, Professeur au Département Génie Mécanique de l'I.U.T. de Nantes,*

pour leur participation au jury.

Nous tenons à associer dans nos remerciements G. BAUZIL, Ingénieur au CNRS, pour l'aide efficace et toujours amicale qu'il nous a apportée durant ces années de recherche.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui, à des titres divers, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire, et en particulier :

- *à tous les membres de l'équipe Robotique, LSR, et principalement à :
Denis ALLARD, Patrick BARAONA, Laurence BOISSIER, Patrick BORGNA,
Ghazi CHAOUI, Raja CHATILA, Marcia DE BARROS CORREIA, Bernard DURIN,
Edson FERREIRA, Malik GHALLAB, Alberto IZAGUIRRE, Marc RENAUD,
Abderrahman RIAD, Ralph SOBEK, Jean-Charles TALOU, Marc VAISSET ;*
- *à tout le personnel du service MITRI, et principalement à :
R. FADEL, P. RIBES, C. MARROT ;*
- *à Madame A. HERAL et Mademoiselle H. CAMARASA SUNE pour la dactylo-
graphie et à Messieurs D. DAURAT, R. LORTAL, R. ZITTEL pour le tirage
de cet ouvrage.*

*Nous tenons aussi à remercier le personnel du CEDOCAR de
Toulouse pour l'aide qu'il nous a apportée au niveau de la recherche biblio-
graphique.*

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : LA PERCEPTION DES ROBOTS MOBILES	5
<u>I.1. INTRODUCTION</u>	7
<u>I.2. PRESENTATION DES PRINCIPAUX SYSTEMES DE PERCEPTION</u>	9
I.2.1. <i>Introduction</i>	9
I.2.2. <i>Systèmes de perception</i>	11
I.2.2.1. <i>SHAKY</i>	11
I.2.2.2. <i>JASON</i>	12
I.2.2.3. <i>MARS ROVER</i>	13
I.2.2.4. <i>MRV</i>	17
I.2.2.5. <i>CART</i>	19
I.2.2.6. <i>VESA</i>	23
I.2.2.7. <i>ANU Mobile Robot</i>	25
I.2.2.8. <i>YAMABIKO</i>	26
I.2.2.9. <i>LOCOMOTIVE ROBOT</i>	28
I.2.2.10. <i>MEL-DEIC</i>	29
I.2.2.11. <i>CMU ROVER</i>	30
I.2.3. <i>Conclusion</i>	31
<u>I.3. LE ROBOT MOBILE HILARE</u>	33
I.3.1. <i>La structure mécanique</i>	35
I.3.2. <i>Le système de locomotion</i>	36
I.3.3. <i>Le système de perception</i>	36
I.3.4. <i>La structure informatique</i>	38
I.3.4.1. <i>Le matériel</i>	38
I.3.4.2. <i>Le logiciel</i>	39
I.3.5. <i>La structure décisionnelle</i>	40
I.3.6. <i>La structure d'apprentissage</i>	42
I.3.7. <i>Hypothèses simplificatrices de travail</i>	42
<u>I.4. CONCLUSION</u>	42

CHAPITRE II : TRAITEMENT D'IMAGES MULTINIVEAUX	45
<u>II.1. INTRODUCTION</u>	47
<u>II.2. QUELQUES TECHNIQUES DE TRAITEMENT D'IMAGES</u>	47
II.2.1. Acquisition, Numérisation et Filtrage de l'Image	47
II.2.2. Segmentation de l'image	49
II.2.3. Modélisation de la scène	50
II.2.4. Identification des objets	51
<u>II.3. ETUDE DU SYSTEME DE TRAITEMENT D'IMAGES MULTINIVEAUX</u>	52
II.3.1. Introduction	52
II.3.2. Procédure d'extraction de contours	53
II.3.2.1. Traitement des points caractéristiques	56
II.3.2.2. Traitement des débuts de contour	60
II.3.2.3. Ordonnancement des points mémorisés	60
II.3.3. Procédure de traitement des adjacences	61
II.3.3.1. Principe	61
II.3.3.2. Détection et traitement des adjacences	62
II.3.3.3. Fausses affectations	65
II.3.3.4. Traitement de mise à jour	65
II.3.4. Procédure de structuration des adjacences	66
II.3.4.1. Principe	67
II.3.4.2. Exemple de simulation	68
II.3.5. Réduction du graphe des adjacences	72
II.3.6. Procédure de fusion	72
II.3.7. Paramètres d'un contour	73
<u>II.4. CONCLUSION</u>	73

CHAPITRE III : CHOIX DU CAPTEUR OPTOÉLECTRONIQUE	75
<u>III.1. INTRODUCTION</u>	77
<u>III.2. LES CAPTEURS OPTOELECTRONIQUES</u>	77
III.2.1. Les caméras de télévisions classiques	78
III.2.2. Les caméras à semi-conducteur	79
III.2.2.1. Les caméras à photo MOS	79
III.2.2.2. Les caméras à photodiodes	80
III.2.2.3. Les caméras matricielles	81
III.2.2.4. Les caméras unilignes	84
<u>III.3. BILAN SUR LES CAPTEURS D'IMAGES</u>	85
<u>III.4. LE SYSTEME D'ACQUISITION D'IMAGES</u>	87
III.4.1. Présentation	87
III.4.2. La caméra MC 520	88
III.4.3. Le numériseur vidéo	90
III.4.4. La carte RSB 6020	92
<u>III.5. CONCLUSION</u>	95
CHAPITRE IV : INTÉGRATION DU CAPTEUR TÉLÉMÉTRIQUE	97
<u>IV.1. INTRODUCTION</u>	99
<u>IV.2. LE TELEMETRE LASER</u>	100
IV.2.1. Rappels sur le fonctionnement d'un laser	100
IV.2.2. Le principe du télémètre laser	101
IV.2.3. Caractéristiques du télémètre	102
IV.2.4. Performances du télémètre	105
<u>IV.3. LE SYSTEME CAMERA/LASER</u>	110
IV.3.1. Position du problème	110
IV.3.2. Solutions envisagées	111

<u>IV.4. MISE EN PLACE DE LA STRUCTURE DEFLECTRICE</u>	113
IV.4.1. Modélisation de la structure	113
IV.4.2. Formulation du problème	119
IV.4.3. La tourelle	126
<u>IV.5. CONCLUSION</u>	127

CHAPITRE V : EXPÉRIMENTATION 131

<u>V.1. EXPERIMENTATION I : Exploration de l'environnement du robot HILARE par télémétrie laser</u>	133
V.1.1. Introduction	133
V.1.2. Balayage azimutal d'un secteur	133
V.1.2.1. Présentation	133
V.1.2.2. Les points significatifs	134
V.1.3. Recherche des points significatifs	136
V.1.3.1. Le principe de base	136
V.1.3.2. Le principe retenu	137
V.1.3.3. Choix du pas δ de balayage rapide	138
V.1.4. Les algorithmes	141
V.1.4.1. Balayage à pas constant	141
V.1.4.2. Détection des points significatifs	143
V.1.5. Les résultats	146
V.1.6. Conclusion	151

<u>V.2. EXPERIMENTATION II : Localisation du robot HILARE par détection de balises lumineuses</u>	153
V.2.1. Introduction	153
V.2.2. Acquisition des images	154
V.2.3. Traitement des images	154
V.2.4. Identification des balises	155
V.2.5. Recherche des balises	155
V.2.6. Position et orientation du robot	155
V.2.7. Conclusion	157

<u>V.3. CONCLUSION</u>	158
------------------------	-----

CONCLUSION	159
ANNEXE I	165
<u>A.I. NOTIONS DE STEREOVISION</u>	167
A.I.1. Introduction	167
A.I.2. Modèle de la caméra	167
A.I.3. Choix des caractéristiques	168
A.I.4. Correspondance des caractéristiques	169
A.I.5. Détermination de la troisième dimension	170
ANNEXE II	171
<u>A.II. FORMAT DES ORDRES DE COMMANDE</u>	173
A.II.1. Ordres de commande de la tourelle caméra/laser	173
A.II.1.1. Positionnement des miroirs et tir laser	173
A.II.1.2. Déplacements mixtes	173
A.II.1.3. Déplacements élémentaires	174
A.II.1.4. Remises à zéro	174
A.II.1.5. Arrêts d'urgence	175
A.II.2. Ordres de commande du système de perception (3D)	175
A.II.2.1. Commande d'exploration laser (EA)	175
A.II.2.2. Format du message émis en réponse à la commande EA	175
A.II.2.3. Commande de localisation du robot (PR)	176
A.II.2.4. Format du message émis en réponse à la commande PR	176
A.II.2.5. Choix de la représentation graphique pour la commande EA	176
BIBLIOGRAPHIE	177

INTRODUCTION

Le contexte économique et social actuel ainsi que le développement de techniques nouvelles ont contribué à l'essor remarquable que connaît aujourd'hui la robotique.

La robotique est une science pluridisciplinaire qui vise à déterminer et à mettre en oeuvre une automatisation souple et fiable de tâches traditionnellement exécutées par des opérateurs humains.

Ce cadre conceptuel a donné lieu à l'étude d'automates re-programmables et multi-fonctionnels capables d'interagir avec leur environnement : les robots.

Le caractère adaptatif de ces derniers leur confère un degré d'universalité de plus en plus élevé, en relation avec leur "intelligence". Les concepts d'intelligence et de vision artificielles apparaissent ici fortement liés à la notion de robot.

Selon leur degré d'intelligence, les robots sont classés en générations ; on parle de génération 1, 2 et 3.

Le robot mobile HILARE (*) développé au LAAS est précisément apparenté à cette dernière génération. Il est le support expérimental nécessaire à l'application de toutes les théories et techniques de la robotique avancée.

De tels robots expérimentaux n'ont à ce jour aucune application précise. On peut cependant envisager dans un avenir relativement proche diverses utilisations industrielles comme par exemple l'approvisionnement des postes de travail et le convoyage des pièces dans les ateliers flexibles.

Ces opérations sont assurées aujourd'hui par des engins guidés (par fils généralement, par traits de peinture,...) ce qui suppose une infrastructure rigide, voire contraignante, à laquelle sont attachés des problèmes de contrôle et de sécurité (fils de guidage rompus, effacement des traits de peinture) lors d'une utilisation en milieu industriel hostile.

Les robots mobiles devraient pouvoir introduire dans ce domaine une souplesse d'utilisation et d'action tout en assurant le respect des contraintes industrielles.

Le travail effectué au sein de l'équipe Robotique s'inscrit dans le cadre des recherches sur la conception et la réalisation de systèmes multisenseurs et multiniveaux de décision pour robots à grande autonomie.

Notre étude qui s'insère dans le vaste domaine de la vision artificielle s'est attachée plus particulièrement au développement du système de perception trois dimensions (3D) du robot complet HILARE.

Elle comprend schématiquement deux volets :

- Le premier est relatif à l'analyse des informations visuelles délivrées par une caméra vidéo ;
- Le second concerne la mise en place du système de perception 3D.

L'organisation du mémoire s'articule autour de ces deux volets.

Après avoir posé le problème de la vision pour les robots mobiles complets et exposé les principaux systèmes de perception, nous décrivons l'architecture générale du robot HILARE (chapitre I).

Nous présentons ensuite les algorithmes de traitement d'images multiniveaux (chapitre II) destinés à être embarqués sur HILARE ainsi que son système de vision 3D.

Ce système est physiquement constitué par une structure mécanique supportant une caméra à semiconducteur (chapitre III) et un télémètre laser (chapitre IV) qui apparaissent comme deux capteurs complémentaires.

L'intégration de ces deux capteurs est assurée par un logiciel de commande et de traitement des données. Une phase expérimentale (chapitre V) permet de concrétiser ces divers aspects.

* (Heuristiques Intégrées au Logiciel et aux Automatismes dans un Robot Evolutif).

CHAPITRE I

I.1 - INTRODUCTION

Le haut degré d'adaptabilité des robots est pour une grande part lié aux facultés qu'ils ont d'appréhender leur environnement. Cette capacité de recevoir des informations du monde extérieur est essentiellement due à l'utilisation d'organes sensoriels extéroceptifs.

Divers types de capteurs sont utilisés en robotique et selon leur nature, on parle de perception tactile, [1], [2], [3], [4] ou de perception visuelle. Seul ce dernier type de perception sera évoqué dans ce mémoire.

La plupart des robots travaillent dans un contexte de scène à deux dimensions (2D). Diverses techniques et méthodes typiquement employées dans ce cas pour traiter des images vidéo sont présentées au paragraphe § II.2.

Néanmoins, dans certaines applications et notamment en ce qui concerne les robots mobiles, il est nécessaire de percevoir la scène en relief.

Ce type de perception qui met en jeu trois dimensions (3D) a donné lieu à de nombreuses théories et études qui ont fait l'objet d'un développement plus ou moins approfondi suivant les ouvrages scientifiques [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Les différents moyens pour accéder au 3D peuvent se regrouper selon trois volets :

i) Utilisation de deux caméras

C'est la stéréovision, Cette technique est basée sur la triangulation entre deux vues différentes d'une même scène et est utilisée pour déterminer la distance.

Une présentation de cette technique est donnée en Annexe I. Notons d'autre part qu'une étude actuellement développée au L.A.A.S permet d'illustrer les problèmes posés par la stéréovision [13], [14].

ii) Utilisation d'une seule caméra

- avec des prises de vue sous des angles différents (K2D) ; on se ramène à la stéréovision. Une variante de la stéréovision classique est

l'estimation des distances par analyse dynamique d'images obtenues par déplacements de la caméra dans la scène. [15], [16], [17], ; ou bien par analyse de diverses images d'une même scène prise sous différents éclairages mais sous un même angle (caméra à poste fixe) [18], [19]

- et d'un laser. Il existe principalement deux groupes d'approches :

. Dans le premier, la méthode consiste à balayer la scène avec un faisceau laser (généralement dans le visible) et à capter le point ou la ligne d'impact sur l'objet par un élément photosensible (caméra, photomultiplicateur...) [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Ces méthodes sont souvent orientées vers la description d'objets (cylindres, polyèdres...). On peut préciser également, que dans ce contexte dit de lumière structurée, le laser est quelquefois remplacé par des faisceaux de lumière oblique ou par des flash stroboscopiques.

. Les méthodes du second groupe mettent en oeuvre un télémètre laser. L'information de distance est ici immédiate et la plupart du temps le télémètre est utilisé seul. De fait les applications associant ces deux types de capteurs (caméra + télémètre laser), somme toute complémentaires, sont très rares. C'est néanmoins la solution adoptée pour le système de vision du robot HILARE. On verra plus loin (§I.3) les raisons qui ont motivé un tel choix.

iii) Utilisation d'un télémètre laser uniquement

La scène n'est plus ici traduite par des informations lumineuses mais par des informations de distance délivrées par le télémètre. Ce procédé nécessite un balayage systématique de la scène et l'on imagine facilement le dilemme, résolution/temps d'exécution, qui est posé pour avoir une image correcte.

Les études réalisées dans ce domaine sont dirigées principalement vers la cartographie (une telle approche sera évoquée dans le cadre du système de perception du robot MARS ROVER du Jet Propulsion Laboratory, §. I.2.2.3) ou bien par une utilisation conjointe des informations de distance et de luminance vers l'analyse de scène. [27], [28], [29].

On dispose dans ce dernier cas de deux images complémentaires :

- une image des distances déduite de la différence de phase existant entre le faisceau émission, modulé en amplitude, et le signal lumineux de retour ;
- une image des intensités lumineuses obtenue par l'analyse du pouvoir réfléchissant de la cible. Le facteur de réflexion est proportionnel à l'amplitude du signal électrique de réception généré par photomultiplication.

Malgré des inconvénients notoires (lenteur d'acquisition, complexité des calculs ...) ce procédé a l'avantage de faire abstraction des ombres et des reflets dans la scène observée.

Quelquefois, le télémètre laser est remplacé par des télémètres à ultrasons ou à microondes, principalement dans le domaine de la cartographie.

La plupart des systèmes de perception pour robots mobiles que nous allons exposer dans ce chapitre fait appel à des techniques stéréoscopiques. Ces techniques étant très spécifiques, il nous a paru souhaitable de joindre à ce mémoire quelques rappels sur la stéréovision (Annexe I) auxquels le lecteur pourra éventuellement se référer.

I.2 - PRESENTATION DES PRINCIPAUX SYSTEMES DE PERCEPTION

I.2.1. Introduction

Il n'existe, tout au plus, qu'une dizaine de projets de robots mobiles complets dans le monde.

Nous n'englobons pas dans ce dénombrement non exhaustif les véhicules automatiques guidés (par fils ou traits de peinture) qui ont pris ces dernières années une certaine importance dans les Grandes industries (convoyage de pièces, approvisionnement de postes de travail ...) ; ni même les engins téléguidés généralement utilisés dans des milieux hostiles (espace, centrales nucléaires, fonds marins ...) et commandés à distance par un opérateur ; ni même encore les robots marcheurs et les robots développés en simulation.

Notre étude étant orientée vers la perception 3D, nous nous sommes attachés à traiter uniquement les systèmes utilisant une telle perception de l'univers.

Les premiers projets de robots mobiles complets ont vu le jour aux U.S.A. Certains n'ont pas abouti par suite de difficultés financières et de problèmes liés aux moyens techniques et informatiques (capteurs, mini-calculateurs) insuffisamment développés à l'époque.

Citons parmi les précurseurs SHAKEY (1968 - 1973) du S.R.I (Stanford Research Institute), JASON (1970 - 1975) de l'université de BERKELEY, le MARS ROVER (1973, 1979) du J.P.L (Jet Propulsion Laboratory) et enfin CART (1966 - 1980) de l'université de Stanford.

Avec les progrès de la microélectronique et les nécessités industrielles, on assiste depuis quelques années (depuis 1978 environ) à un regain d'intérêt pour les robots de la troisième génération. Une preuve, s'il en faut, de cet élan qui déborde du cadre des laboratoires de recherche, est la prévision pour les années 1984 de l'arrivée de robots mobiles autonomes (intelligents) dans l'industrie [35]. Leur fonction serait orientée vers le gardiennage automatique de nuit dans les entreprises et les musées. Le système de perception de ces "gardiens" serait composé de radars à micro-ondes, de capteurs infrarouge et de télémètres ultrasonores.

Présentement, nous allons raisonnablement nous tourner vers une description des robots existant (ou ayant existés).

L'architecture mécanique, informatique et décisionnelle de certains d'entre eux a déjà été décrite par R. CHATILA (§.I.2) dans son mémoire traitant du système de navigation pour le robot mobile HILARE [36]. Le lecteur pourra éventuellement s'y reporter. En ce qui concerne ce chapitre, nous n'y exposerons en conséquence que les systèmes de perception des principaux robots mobiles complets que nous avons pu recenser.

I.2.2. Systèmes de perception

I.2.2.1. SHAKEY (1968 - 1973) du SRI [37] .

i) Système de perception

Le robot portait une caméra vidicon et un télémètre optique montés sur un support orientable.

Des "moustaches de chat" tout autour du véhicule jouaient le rôle de proximateurs de sécurité.

Une liaison hertzienne assurait la transmission du signal vidéo du véhicule vers un ordinateur utilisé en temps partagé qui assumait toutes les tâches.

ii) Algorithmes de perception

Le système de vision était exclusivement basé sur l'utilisation d'une caméra conventionnelle. Le robot évoluait dans un univers idéalisé constitué de boîtes, de coins, de murs et de portes... Il existait deux programmes de vision :

- l'un produisait des lignes de contour et était utilisé pour localiser les zones du sol dépourvues d'obstacle.

- l'autre, mis au point un peu plus tard, tentait de localiser et d'identifier des objets disjoints .

- a) Le programme d'extraction des contours de l'image faisait appel à des opérateurs locaux du type gradient. Les traitements s'effectuaient à partir d'une image numérisée de 120 x 120 sur 16 niveaux de gris (4 bits)

- La première des opérations était la recherche des points significatifs de changement de l'intensité lumineuse qui se produisent généralement aux frontières d'objets.

- La deuxième étape était la détermination de la direction locale de ces frontières. Cela était fait en déplaçant des masques de "ligne" dans toute l'image et en recherchant la correspondance avec le gradient. On obtient avec cette méthode des petits segments.

- L'étape suivante consistait donc à lisser les segments ainsi obtenus de manière à construire des segments plus longs. Cela était fait en

lissant par une seule droite tous les segments d'un même groupe.

• Le pas final avait pour but de connecter toutes les lignes. Ceci était fait en considérant toutes les extrémités tout à tour et en essayant pour chacune d'elles de trouver par extrapolation l'aboutissement (raccordement) de la ligne considérée à une autre.

L'extraction de contours peut engendrer des erreurs qui compliquent l'analyse de l'image. En conséquence, la seule information qui puisse être déterminée avec certitude est la ligne de contour au sol.

Un programme réalisait cette extraction et la ligne obtenue correspondait typiquement aux traces des objets posés sur le sol. Il était obtenu ainsi un polygone irrégulier sur le sol qui bornait l'espace que l'on savait vide.

b) Le programme d'identification des objets utilisait un ensemble d'opérateurs locaux et un programme d'exécution. Les opérateurs locaux traitaient l'image des gradients à la recherche de la droite unique joignant deux points ou de toutes les droites issues d'un point donné.

Chaque opérateur retournait un ensemble de réponses possibles accréditées d'une impression (idéal, probable ...) à l'issue de chaque test. Le programme d'exécution explorait la scène en appelant les opérateurs locaux et en évaluant les résultats en fonction des réponses précédentes et construisait ainsi sa connaissance du monde. Ce programme était organisé comme un arbre de décision. A chaque noeud dans l'arbre correspondait un test et les impressions relatives aux réponses étaient associées aux branches.

I.2.2.2. JASON (1970 - 1975) de l'université de Berkeley [38], [39].

1) Système de perception

Le véhicule était doté d'un sélecteur ultrasonore et de proximités.

Il possédait également un synthétiseur de parole simple, il était relié comme SHAKEY à un ordinateur de contrôle par une liaison hertzienne.

Une caméra CCD 100 x 100 était en projet [40] vers la fin de l'existence de JASON mais nous n'avons trouvé aucune trace de sa mise en place effective.

ii) Fonctionnement des capteurs

a) Détecteur ultrasonore. Le pinceau très directif issu d'une torche ultrasonore était modulé en fréquence.

Un examen de l'amplitude et de la longueur relative des échos permettait de déterminer la distance de la cible mais également sa nature.

Le principe de base tablait sur le fait que des objets mous réfléchissent faiblement les hautes fréquences et vice-versa. Il existait néanmoins des ambiguïtés liées à l'angle avec lequel le faisceau était réfléchi. L'angle de réflexion affectant la longueur de l'écho. Un mur situé en biais pouvait être interprété par JASON comme un obstacle mou situé directement en face de lui. Une information sémantique était utilisée pour résoudre ces problèmes.

Ces informations étaient finalement utilisées par un algorithme complexe [41] qui devait construire un modèle simplifié de l'environnement du robot. En ce sens, les obstacles voisins ou contigus étaient regroupés afin de former des blocs d'objets ou "pseudo objets".

b) Les proximètres. JASON utilisait six proximètres du type diodes électro-luminescentes en infra-rouge (LED).

Cinq d'entre eux régulièrement répartis sur le pourtour du véhicule constituaient une ceinture de protection invisible contre des obstacles imprévus.

Le dernier situé sur le devant et orienté vers le bas était destiné à la détection des irrégularités brusques sur le sol directement en face du robot.

Le faisceau de lumière infra-rouge très directif émis par chaque proximètre était modulé de telle sorte que la détection ne puisse jamais être induite en erreur par la lumière ambiante, le soleil ou une source de chaleur.

1.2.2.3. Le MARS ROVER (1973 - 1979) du JPL [42]

Le MARS ROVER du Jet Propulsion Laboratory a été développé dans le cadre des recherches parrainées par la NASA sur les véhicules autonomes d'exploration de la planète Mars.

i) Système de perception.

Le système de perception du robot était composé de deux caméras TV fixées parallèlement et d'un télémètre laser.

L'ensemble était monté sur une même structure à environ 1,2 m au dessus de la surface du véhicule.

Le MARS ROVER était également équipé de divers capteurs de vitesse et d'attitude ainsi que d'une liaison hertzienne.

La tâche de base du système était la détection et la localisation d'objets mais également d'obstacles éventuels pour le véhicule ou son bras manipulateur.

ii) Système de caméras stéréo.

Le système était composé de deux caméras (GE TN - 2000) du type "solid state" à injection de charge (CID) et d'un processeur numériseur mémoire d'images RAPID [43] conçu au JPL. RAPID avait été créé pour augmenter la vitesse de traitement des images et permettre des fonctions temps réel comme la poursuite d'objets.

Il possédait un module mémoire organisé en 256 lignes de 256 pixels sur 8 bits.

Les capteurs de lumière des deux caméras étaient rectangulaires et constitués par 188 x 244 éléments photosensibles. Le signal vidéo était numérisé par RAPID sur 8 bits formant ainsi les deux images numériques, base du traitement stéréo.

Le traitement se poursuivait par un étalonnage des caméras au travers d'un modèle linéaire "pin hole", par un "matching" des deux images, puis enfin par l'évaluation des distances [44], [45].

a) Etalonnage des Caméras. Il consiste à déterminer un ensemble de paramètres qui permet de relier un point de l'espace 3D et sa projection sur les deux plans images.

Dans le cas du modèle "pin hole" qui était utilisé pour le MARS ROVER ces paramètres concernaient :

- . la localisation du centre de la lentille
- . l'orientation de l'axe principal de la lentille
- . et la distance focale

Ces paramètres étaient bien sûr définis pour les deux caméras. Généralement ils sont évalués en déterminant les coordonnées images d'un ensemble de points de référence pris dans l'univers 3D. Dans le cas du MARS ROVER, ces points étaient symbolisés par la pince du bras manipulateur qui évoluait devant les caméras.

Pour chacune des positions du bras, le programme localisait les coordonnées du point image correspondant. Afin que la localisation puisse être plus facile, et plus fiable, le bras tenait dans sa pince une petite source lumineuse.

b) Evaluation de la distance

Les hypothèses de travail, à cause de l'utilisation prévue du véhicule, étaient que la scène vue devait être approximativement plane et que les distances variaient régulièrement vers l'horizon.

Pour réduire la recherche de correspondance des caractéristiques entre les deux images la théorie des lignes "épipolar" ou épipolaires (cf. Annexe I) était utilisée.

Le "matching" ou correspondance était réalisé en effectuant une stéréo-corrélation sur une fenêtre dont la taille variait avec la variance de l'intensité lumineuse du pixel (I, J) de l'image (Une grande variance donnait une fenêtre de petite taille et vice-versa).

En premier lieu, une corrélation des lignes du haut et du bas permettait d'estimer l'échelle des variations des disparités (hypothèse de scène régulière)

Ensuite une pré-analyse était effectuée sur une image échantillonnée (1 ligne sur n) pour situer les maximums locaux des disparités appelés "tie points".

A chaque maximum local correspondait un segment de recherche sur l'autre image.

Une recherche rapide basée sur le calcul de paramètres statistiques (variance) sur les points constituant la fenêtre de scrutation était alors utilisée pour trouver de bons candidats à la correspondance.

Les candidats ainsi choisis étaient ensuite évalués pour sélectionner le "match" optimal et définir finalement leur position dans l'espace 3D.

On notera que la recherche rapide était faite sur tous les pixels de la ligne alors que la corrélation était effectuée uniquement sur les fenêtres de variance similaire.

Une étude du voisinage (ligne courante $\pm (n-1)$) des disparités possibles était aussi exécutée afin d'en réduire le nombre

iii) Système de télémètre laser [46].

Le télémètre sur le MARS ROVER avait essentiellement deux fonctions :

- la localisation d'objets pour la prise par un manipulateur
- la détection d'obstacles pour la navigation

Il possédait plusieurs fonctions élémentaires ("reset" azimuth et site, procédure d'étalonnage par tir sur des points prédéfinis, balayage d'une ligne ...) mais également des fonctions plus élaborées (balayage rectangulaire ou alternatif) qui lui permettaient de jouer son rôle de système de perception au même titre que les deux caméras vidéo.

Plusieurs applications typiques ont été réalisées.

a) Recherche de rocs. Le balayage rectangulaire (d'une zone définie par quatre points) permettait de rechercher sur un certain nombre de lignes balayées (20 généralement) le point le plus élevé assimilé à la partie haute du rocher.

La zone correspondant à ce point était ensuite rebalayée de manière à définir la position et l'orientation du plus gros rocher.

Les informations de distance étaient également converties en intensités lumineuses pour une représentation sur un moniteur vidéo.

b) Détection d'obstacle. Le balayage alternatif (va et vient rapide) associé au balayage rectangulaire permettait de détecter des obstacles par une étude de la continuité des mesures de distance. Lorsqu'une discontinuité trop importante était décelée, le véhicule avait ordre de stopper.

c) Image des distances : Avant tout déplacement du MARS ROVER, une prise de vue de l'environnement devait être prise.

Une seule image vidéo délivre des informations 2D. La stéréo donne des informations 3D mais cela nécessite beaucoup de corrélation entre les données des deux images. Finalement, il avait été envisagé la solution d'une seule image prise par un télémètre.

Les informations de distance étaient converties en informations lumineuses pour être visualisées sur un moniteur vidéo. Ce type d'image a été employé dans le domaine de la cartographie (localisation des obstacles) et même de l'analyse de scène en utilisant des techniques "classiques" de traitement d'images avec des données 3D.

I.2.2.4. Le MRV (1973 - 1979) du RPI [47]

Le Mars Roving Véhicule du Rensselaer Polytechnic Institute (Troy, New York) a été développé parallèlement au MARS ROVER. La stratégie employée est cependant différente. Le MRV intervenait au troisième niveau dans la tâche d'exploration.

- La reconnaissance globale devait être assurée par l'engin orbital
- L'exploration de sites particuliers par des sondes
- et les études détaillées de zones locales, entre deux sites par exemple, par le MRV.

Le MRV devait explorer des zones de 100 km à des vitesses de l'ordre de 1,5 m/min.

La communication entre le centre de calcul et le robot pouvait prendre de 10 à 40 minutes. Un contrôle humain en temps réel n'était pas pensable. L'intervention par intermittance d'un opérateur avait donc été envisagée. Le MRV devait être capable pendant les périodes sans contrôle d'éviter de façon autonome les obstacles.

A cette fin le véhicule était équipé de divers capteurs de vitesse, d'attitude et d'un système de triangulation laser pour la détection d'obstacles.

i) Système de triangulation

Le système était situé à l'avant du véhicule. Il était constitué d'une structure mécanique verticale qui contenait le laser. Le faisceau du laser était émis verticalement vers un miroir rotatif à facettes qui surmontait la structure et permettait ainsi un balayage en site.

Après réflexion sur un obstacle, le faisceau était capté par un récepteur situé au bas de la structure.

L'ensemble de la structure était monté sur un socle rotatif qui assurait un mouvement azimutal de tout le système de triangulation.

ii) Méthode de triangulation

Elle s'appuyait d'une part sur la connaissance de l'angle d'émission du faisceau laser et des positions relatives de l'émetteur (miroir) et du récepteur, mais également sur l'évaluation de l'angle d'incidence, du faisceau réfléchi, sur le capteur.

Le problème de base était la bonne évaluation de cet angle. Plusieurs détecteurs ont été envisagés : des détecteurs discrets, des caméras binaires et matricielles.

La comparaison avait porté sur des critères de résolution, de vitesse, d'angle d'ouverture et de sensibilité à la longueur d'onde du laser notamment (904 nm).

Finalement, les détecteurs linéaires étaient apparus comme un compromis entre la complexité des détecteurs discrets (plus rapides cependant) et le coût élevé de plusieurs détecteurs matriciels.

Une première étude avait porté sur des barrettes de 20 photodiodes et avait permis de mettre en évidence certains problèmes posés par cette méthode de triangulation (retours secondaires à cause de doubles réflexions, ou bien pas de retour du tout lorsque le faisceau réfléchi était bloqué par un obstacle).

Une seconde solution, utilisant des barrettes de 1024 photodiodes avait été envisagée. Afin de réduire les problèmes connus avec le premier système, le détecteur avait été placé cette fois au dessus du laser.

iii) Un autre système de détection d'obstacle [48]

Cet autre système était également destiné aux véhicules d'exploration de la planète MARS. Il faisait appel aux données délivrées par un télémètre laser qui balayait la surface devant le robot.

Les mesures de distance varient d'un point à un autre de la surface du sol avec des changements brusques liés à la présence d'obstacle.

Le but de ce système était de développer un détecteur d'obstacle susceptible de déterminer les lignes délimitant un obstacle discret. Comme par exemple les sommets des cailloux et les bords éloignés des cratères.

Un tel système était basé sur l'emploi de techniques stochastiques. Les bruits introduits dans les lectures du télémètre laser étaient traités par un algorithme comprenant une version simplifiée du filtre de Kalman de manière à obtenir des lignes de contour d'obstacles discrets pouvant être situés à des distances éloignées (40 m)

I.2.2.5. CART (1966 - 1980) de l'université de Stanford [49], [50]

Le système de vision du robot CART est essentiellement constitué par une caméra vidéo.

Une liaison radio permet de relier le véhicule à un ordinateur central fonctionnant en mode temps partagé.

Le guidage de CART fait appel à des techniques de stéréovision. Une première approche [33] qui devait permettre d'évaluer les distances d'objets à partir de deux images s'est avérée impossible à cause des erreurs de "matching" et des modèles de caméra incertains. Une autre approche utilise la technique "slider stereo" qui permet par un déplacement latéral de la caméra de prendre neuf prises de vue de la même scène.

i) Etalonnage de la caméra

La première étape de cette longue analyse stéréoscopique consiste à déterminer la distance focale et les distorsions géométriques de la caméra.

A cette fin, le véhicule est placé devant un mur, à une distance pré-déterminée, sur lequel se trouve une grille (motif) de référence constituée d'un réseau de points et d'une croix centrale.

Un programme numérise l'image et localise automatiquement les points et la croix, et construit deux polynômes des moindres carrés (un pour X et un autre pour Y) de degré trois ou quatre. Ces polynômes sont utilisés pour corriger la position des points objets perçus par la caméra.

ii) "Interest Operator"

Après la phase d'étalonnage le programme d'évitement d'obstacles peut être lancé. Il débute par l'activation d'un mécanisme qui translate très précisément la caméra de manière à prendre neuf prises de vue différentes de la même scène.

L' "Interest Operator" ou opérateur d'intérêt est alors appliqué à l'une de ces images, généralement la cinquième (i. e. l'image centrale), afin de sélectionner de bonnes caractéristiques pour le "matching".

Ces caractéristiques sont conceptuellement des points dans l'univers 3D mais elles sont trouvées en examinant des zones locales.

- D'abord, cet opérateur déplace une fenêtre (3 x 3) centrée successivement en chaque point de l'image et calcule la variance entre les pixels adjacents suivant les quatre directions (horizontale, verticale et les deux diagonales).

- Pour chacune des fenêtres, il sélectionne la valeur minimale de la variance comme étant la "mesure d'intérêt".

- Finalement les points caractéristiques sont choisis aux endroits où la "mesure d'intérêt" est localement maximale.

Pour réduire les effets du bruit et le temps d'exécution, l'opérateur est appliqué à des images réduites.

iii) "Binary Correlator"

Cet opérateur permet de trouver pour chacune des caractéristiques sélectionnées par l' "Interest Operator", la meilleure correspondance dans les huit autres images.

Le principe étant de chercher la correspondance d'une fenêtre (englobant le point caractéristique dont on cherche le "match") de l'image centrale, à l'intérieur d'une zone de recherche sur une image similaire. Cette zone peut être l'image entière ou bien une fenêtre rectangulaire.

La recherche des correspondances utilise la stratégie "course to fine" qui consiste à affiner la solution tout au long de l'analyse. Cet opérateur travaille également sur des images réduites et utilise une technique de variation de la résolution.

La recherche débute sur des images dont le niveau de réduction (linéaire) est le plus élevé (1/16).

Une fenêtre de dimension $n \times n$ (typiquement $n = 6$) centrée autour du point caractéristique traité dans l'image centrale réduite, est convoluée avec une zone de recherche qui est généralement toute la deuxième image (même niveau de réduction) pour trouver la meilleure correspondance. La fenêtre $n \times n$ est transférée pixel par pixel vers l'autre image en calculant pour chaque tentative de correspondance (15 à 16) un coefficient de corrélation. La valeur la plus grande de ce coefficient traduit la meilleure correspondance.

La zone $n \times n$ ainsi déterminée sur la deuxième image réduite (1/16) est alors repérée sur la version réduite de niveau 1/8. Cette zone constituée maintenant par $2n \times 2n$ pixels devient la nouvelle zone de recherche. Ainsi la fenêtre $n \times n$ dans la version réduite (1/8) de l'image centrale, sera convoluée avec cette zone $2n \times 2n$ de la deuxième image.

Le processus se poursuit ainsi (5 fois) en réalisant des correspondances de plus en plus fines sur des zones de plus en plus détaillées, jusqu'à ce que la fenêtre $n \times n$ soit décelée dans l'image non réduite.

iv) Evaluation des distances

a) "Slider Stereo"

Par la méthode "Slider stereo" un mouvement latéral de la caméra permet d'obtenir pour neuf positions stables, des prises de vue similaires de la même scène. Une corrélation des 36 (8 !) paires d'images possibles donne une estimation des distances des points dans la scène.

Les points dont la distance doit être évaluée sont déterminés sur l'image centrale soit par le "Binary Correlator" pour faire correspondre des caractéristiques dont les positions sont déjà connues, soit par l'"Interest Operator".

Le "Correlator" assure la correspondance de tous les points choisis sur l'image centrale avec leurs vis à vis sur les huit autres images. La mesure par rapport à une paire particulière d'images donne des estimations de distance représentées comme des distributions gaussiennes pondérées par le coefficient de corrélation et le taux de disparité suivant l'axe vertical.

Les 36 distributions sont ensuite sommées et le pic résultant traduit une bonne mesure de la profondeur.

b) "Motion Stereo"

La recherche des informations de distance par déplacement du véhicule ("Motion Stereo") fait également appel aux opérateurs "Interest Operator" et "Binary Correlator".

Après avoir localisé les objets par la méthode précédente ("Slider Stereo"), le robot avance d'un mètre puis s'arrête pour percevoir à nouveau son environnement.

A ce stade là, CART repère les points caractéristiques de l'image centrale précédente et tente de les retrouver dans la nouvelle image centrale correspondant à sa position d'arrêt.

Il déduit de cette manière des informations de position, d'orientation et de distance (actualisées à chaque arrêt) qui constituent des données pour le contrôle de la Navigation.

I.2.2.6. VESA (1978 ...) du LATEA

Ce robot est actuellement en cours de développement au Laboratoire d'Application des Techniques Electroniques Avancées de l'INSA de Rennes.

i) Système de perception

a) Tactile

Ce système est composé en premier lieu d'un arceau de sécurité entourant le véhicule lui permettant de détecter le côté où se produit un choc éventuel [51].

Il possède également un bras télescopique rotatif muni à son extrémité d'un capteur tactile [52]. Ce bras permet de détecter des obstacles et d'en évaluer grossièrement la forme (concave ou convexe) ainsi que le rayon de courbure.

b) Optique

Le système optique est constitué par un télémètre optique à triangulation et par un détecteur d'obstacle mixte. Le télémètre est destiné à détecter des obstacles distant du robot d'une dizaine de mètres. Il n'est cependant utilisé avec une bonne précision (5%) que pour des distances faibles (1,50 m) [51]. Le but du système mixte "OPSONAIR" est également la détection d'obstacles mais il utilise les informations de nature différente (distance, luminance).

ii) Détection des obstacles

a) Le système "OPSONAIR"

Il regroupe un capteur ultrasonore qui permet l'évaluation des distances et un détecteur optique qui autorise la détermination de la teinte (liée à la longueur d'onde dominante) de l'obstacle.

Le récepteur du détecteur optique est composé de deux cellules photoélectriques sensibles au spectre des couleurs.

Compte tenu de la différence de directivité de leur cône de réception, elles jouent un rôle distinct. L'une est sensibilisée à l'inten-

sité lumineuse réfléchie par les obstacles tandis que l'autre, plus directive, est orientée vers la détection de teintes.

Le système "OPSONAIR" devrait permettre la détection d'obstacles par l'utilisation conjointe des mesures de distance et d'une classification de teintes selon huit groupes de référence.

Le télémètre basé sur l'emploi d'un système ultrasonore multi-fréquence doit permettre de mesurer des distances comprises entre 50 cm et 10 m. Actuellement le capteur n'est guère utilisé que pour la détection d'obstacles rectangulaires distant de 50 cm à 2 m

Le système optique utilise le principe d'apprentissage qui consiste en l'occurrence à mémoriser T_i valeurs de teintes ($i = 1$ à 8) pour différentes valeurs d'intensités lumineuses L_j , ($j = 1$ à 4). La procédure de détection doit alors déterminer la classe de couleur à laquelle appartient un point quelconque $P (L, T)$ délivré par le capteur.

Pour le premier prototype, la classification était limitée à deux classes (noir et blanc) . Une version en étude actuellement se composerait de plusieurs cellules réceptrices. Les unes pour mesurer l'illumination et les autres munies de différents filtres de couleur, pour déterminer la teinte.

b) Localisation des obstacles

Le robot VESA fait appel pour cette tâche au système mixte précédemment décrit.

Le télémètre peut être utilisé de deux façons. Lorsque le véhicule est à l'arrêt, il procède à une analyse circulaire de l'environnement. Mais dans ce cas, la détection des coins des obstacles rectangulaires est incertaine voire impossible. Par contre, lorsque le robot est en mouvement cette détection est améliorée si toutefois la distance n'est pas trop grande.

Pour pallier la non détection des coins à l'arrêt, la stratégie de déplacement fait appel à la classification des teintes.

Dans son univers d'évolution idéalisé (les faces des obstacles rectangulaires sont peintes avec des couleurs différentes) le robot VESA

tente dans un premier temps de localiser le coin en utilisant les informations de changement de teinte. La direction du coin étant alors évaluée, il peut, après un déplacement conséquent utiliser le télémètre pour "percevoir" le coin par une analyse circulaire. Un déplacement le long de celui-ci doit enfin permettre au robot d'en déterminer les coordonnées.

I.2.2.7. ANU Mobile Robot [54]

i) Présentation du robot

Le robot mobile ANU (Australian National University) développé à l'Université Australienne de Canberra apparaît essentiellement comme un support pour les recherches en vision. Celles-ci sont principalement orientées vers l'interprétation automatique des scènes.

Le robot est bâti autour d'une structure mécanique à étages supportée par deux roues motrices. Il possède deux bras manipulateurs à six degrés de liberté sur l'avant du véhicule de part et d'autre de l'axe médian.

Le système de perception embarqué est composé d'une caméra vidéo couleur et d'un télémètre ultrasonore. Ce système est complété par une caméra vidéo noir et blanc extérieure au robot. Vu par cette caméra, le robot est apparenté à un objet de la scène. La combinaison des informations issues des deux caméras permet de simplifier les problèmes de localisation et de navigation du robot.

ii) Contrôle des déplacements

Il fait appel à une méthode dite d' "une chaîne". Elle consiste à relier par un câble, le robot et un point fixe de référence. Une potence verticale rotative, centrée au point milieu de l'axe des deux roues motrices permet de maintenir le câble hors du champ de la caméra embarquée. Un point intermédiaire entre le robot et la référence fixe permet par une méthode de triangulation de calculer la position et l'orientation du robot. Les informations d'angle (câble/axe de référence)

sont fournies par des potentiomètres associés aux trois points de guidage du câble (robot, point intermédiaire, point de référence).

iii) Le système de perception

Tous les traitements concernant la vision sont exécutés localement. Un microprocesseur du type Z80 assure l'acquisition en temps réel des informations vidéo délivrées par les deux caméras. Les données vidéo sont ensuite traitées par un processeur spécialisé de vision. Celui-ci possède une unité arithmétique propre, un module de mémoire graphique composé de 12 plans images de 256 x 256 bits chacun, une mémoire de 4096 x 16 bits pour le contrôle vidéo, et offre la possibilité de travailler en pseudo couleurs.

L'ensemble du système est organisé autour d'un ordinateur central Data General NOVA 2/10 et d'une unité de disques.

Les mouvements de la caméra embarquée sont également contrôlés par le ordinateur central via une interface hybride. La caméra est pilotée horizontalement et verticalement par des moteurs à courant continu. Les paramètres de l'objectif (zoom, ouverture et netteté) sont commandés par des petits moteurs pas à pas.

Un télémètre ultrasonore de type Polaroid est monté sur une plateforme rotative qui permet de balayer, tout comme la caméra, un angle solide de 60 degrés vers l'avant du véhicule. Le télémètre est placé sur le même plan vertical que l'axe central de l'objectif de la caméra. Les informations du télémètre peuvent être utilisées pour régler la netteté de l'image.

Tous les câbles de contrôle et de données sont guidés vers le haut du robot pour ne pas obstruer son champ de vision.

I.2.2.8. YAMABIKO 3.1 (1978 ...) de l'université de Tsukuba (JAPON) [55] [56]

i) Présentation du robot

YAMABIKO 3.1 est de petite taille (35 x 35 x 55 cm) et pèse 7,5 kg. Il possède deux roues motrices (moteurs à courant continu) et une roue folle qui lui permettent de se déplacer à 50 cm/sec (maxi).

Son système de vision est constitué par quatre paires de capteurs ultrasonores.

Le système informatique est composé de deux microprocesseurs (MC 6800 et MC 6802) embarqués.

ii) Le système de vision

Le système ultrasonore se compose de quatre paires d'émetteur-récepteur. Chacune de ces paires fait avec ses deux voisines un angle de 90 degrés.

L'ensemble des capteurs peut tourner autour d'un axes de rotation vertical qui surmonte le véhicule.

L'évaluation de la distance est basée sur le principe classique de la mesure de l'intervalle de temps s'écoulant entre l'émission et la réception du signal.

Le signal d'écho n'est cependant reçu que si le faisceau émis et l'obstacle forment un angle approximativement droit. Un objet incliné ne peut donc pas être observé.

Pour reconnaître l'environnement avec ce système, le robot doit effectuer une scrutation avec ses capteurs rotatifs ou bien bouger lui-même.

Chacune de ces méthodes donne des informations différentes qui lui permettent de comprendre le monde d'évolution.

iii) Sélection d'obstacle

Lorsque la vision rotative est employée dans le cas d'un mur par exemple, celui-ci n'est vu que partiellement. Seule la partie centrale est observée. Les zones latérales balayées par le faisceau avec une certaine inclinaison ne sont pas détectées.

Les formes cylindriques peuvent par contre être facilement détectées sous n'importe quel angle compte tenu de leur symétrie.

Le robot ne peut cependant pas faire la distinction entre un obstacle plan et un obstacle cylindrique par une simple analyse rotative. Son identification n'est possible que si le robot se déplace le long de l'obstacle, les capteurs restant fixes.

Pour effectuer le suivi de mur YAMABIKO utilise une méthode des moindres carrés appliquée aux N dernières mesures. Cette méthode lui permet de connaître la distance le séparant du mur ainsi que son orientation relative (angle entre sa direction et le mur). Elle lui permet le cas échéant de savoir si l'obstacle qui s'est intercalé entre lui et le mur est plan ou non.

I.2.2.9. Le "LOCOMOTIVE ROBOT" de l'université de Tokyo (JAPON) [57]

i) Présentation du robot

Ce robot mobile est constitué d'un châssis supporté par deux roues motrices de chaque côté, et de deux roues folles à l'avant et à l'arrière. Les deux roues motrices sont commandées par deux servo-moteurs et leurs rotations sont mesurées par des codeurs incrémentaux.

Le robot se déplace en effectuant des trajectoires rectilignes et des rotations autour d'un point.

Le véhicule qui n'est pas de grandes dimension, porte tout de même un bras manipulateur à six degrés de liberté muni d'une pince.

Le module de vision est constitué par deux caméras montées symétriquement de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot.

Le système informatique embarqué est constitué d'un mini-calculateur et de quatre microprocesseurs. L'un de ces derniers est notamment réservé au traitement des données vidéo.

Le "Locomotive Robot" possède un programme d'évitement d'obstacles (pour des environnements de configuration simple) qui lui permet, sous surveillance de la vision, de rallier son objectif et même de le suivre si celui-ci bouge lentement.

ii) Le système de vision

* Le signal vidéo est prétraité par des circuits classiques et uniquement certains points de haute brillance sont transmis au microprocesseur sous forme de coordonnées dans l'image. Le système effectue cette opération pour les deux caméras.

La correspondance entre les deux images est ensuite recherchée.

Pour un objet donné, localisé sur les deux images, il est ensuite évalué sa position angulaire, définie par rapport à l'axe optique des deux caméras.

Finalement les coordonnées de l'objet sont calculées à partir de relations d'optique et de géométrie faisant intervenir l'angle d'ouverture du champ des caméras ainsi que leur position relative.

Ce système de vision guide la prise d'objets par le manipulateur. la poursuite d'une cible se déplaçant lentement, et l'évitement d'obstacles dans des situations simples. Dans ce dernier cas, le robot analyse l'environnement par une recherche rotative. Les informations de vision sont prises toutes les 200 ms.

I.2.2.10. MEL-DEIC du Mechanical Engineering Laboratory (JAPON) [58]

i) Présentation du robot

MEL-DEIC (Mechanical Engineering Laboratory's robot with a Dynamic Eye and Intelligent Control) est un robot de dimension plus importante que ses deux homologues Japonais.

Il possède deux roues motrices latérales et une roue folle à l'arrière. Il est composé de trois sous-systèmes :

- . Un sous-système superviseur destiné à gérer la communication homme machine, la navigation et la modélisation de l'univers d'évolution ;

- . Un sous système de "matching" (correspondance) qui intègre le système de vision et dont le rôle est de réaliser la correspondance entre les informations visuelles et le modèle du monde qu'il possède en mémoire.

- . Un sous système de contrôle qui régit la propulsion (deux roues motrices) de manière à suivre un itinéraire sous le contrôle de la vision ou bien par odométrie.

L'approche actuellement choisie pour doter MEL - DEIC de la flexibilité qui caractérise les robots mobiles est basée sur l'utilisation d'informations visuelles, mais également d'un modèle du monde pré-établi

et limité à une seule pièce où typiquement des bords verticaux apparaissent fréquemment. Ces bords peuvent être détectés par un balayage horizontal d'une caméra sur tout un secteur de la pièce.

ii) Système de vision panoramique

Deux types de moyens sont employés pour obtenir une image panoramique. Le véhicule est paré de deux caméras ; l'une possède un périscope tandis que l'autre est montée sur une platine tournante.

L'utilisation du périscope permet d'obtenir, après numérisation, des images panoramiques de 1200 x 240 pixels. L'intervalle d'échantillonnage est de 6 minutes dans la direction verticale et de 1,8 minute dans la direction horizontale. Le système ne possédant pas de mécanisme d'autofocus, le réglage de la netteté est résolu par le biais du télémètre ultrasonore.

a) Détection des bords

La méthode choisie a été suggérée par la constatation expérimentale que les bords peuvent être classés en fonction de leur distribution de l'intensité lumineuse. Les bords verticaux ont notamment une faible variance de l'intensité lumineuse dans la direction verticale. Sur cette base le processus génère un graphe de répartition des bords verticaux dans l'image panoramique.

b) Identification d'objets

Le modèle du monde de MEL-DEIC est bien déterminé. La localisation de la plupart des blocs est en conséquence presque toujours connue. Les chercheurs du MEL ont donc pensé qu'il était possible de faire de l'identification d'objets sans faire pour autant de l'analyse de scène. Ils ont fait appel pour cela à une méthode basée sur le calcul d'invariants. Celle-ci autorise une reconnaissance de blocs d'objets décrits par leurs bords verticaux, indépendamment de la position du robot.

I.2.2.11. Le CMU ROVER de l'Université de Carnegie Mellon [59].

Le robot CMU (Carnegie Mellon University) est actuellement en cours d'étude. Il fait suite aux travaux sur la navigation par vision

effectués sur le robot CART et complétés au laboratoire d'Intelligence Artificielle de Stanford en 1981.

Le robot est cylindrique, 1 m de haut et 30 cm de diamètre, et possède trois roues motrices qui lui donnent trois degrés de liberté dans le plan (deux translations et une rotation).

Il doit être muni d'une caméra, de plusieurs proximètres en infrarouge, de détecteurs ultrasonores et de capteurs de contact.

Il devrait posséder une douzaine de microprocesseurs embarqués dont une moitié constituée par des 16 bits MC 68000 S serait destinée aux modèles rapides de décision et de communication.

Il est également envisagé de le doter d'un bras manipulateur.

L'accent sera mis sur les recherches en intelligence artificielle et en vision.

Les problèmes importants et complexes comme la vision seront traités sous le contrôle externe de calculateurs et processeurs spécialisés locaux.

Seul un système de vision minimal sera embarqué de manière à pouvoir exécuter de petites tâches lorsque le robot sera hors de contrôle du calculateur local.

I.2.3 - CONCLUSION

La perception exteroceptive des robots en général, et celle des robots mobiles en particulier est une technique encore nouvelle et nous venons de voir au travers des principales réalisations qu'il n'y a aucune théorie générale.

Il existe diverses approches plus ou moins pertinentes qui aspirent toutes néanmoins à accroître la flexibilité et l'adaptativité des robots mobiles complets. On peut retenir deux groupes d'approches :

- les unes font appel à des techniques très complexes comme la stéréovision et la télémétrie laser (assimilée à la cartographie ou bien à l'analyse d'images) et requièrent des temps de calcul importants et de grandes capacités mémoire. Souvent ces techniques nécessitent l'uti-

lisation de calculateurs locaux externes au robot ce qui réduit son degré d'autonomie.

Ces approches ont cependant l'avantage de fournir des informations sur une large vue de la scène observée et offrent la possibilité de réaliser des analyses de scène au sens d'identification d'objets.

- les autres approches, moins générales, ont un champ d'application plus réduit dans la scène observée et se limitent la plupart du temps à assurer la sécurité et parfois la localisation du véhicule. On rangera dans ce groupe, les méthodes de triangulation (laser, optique...) et de proximétrie (tactile, optique, ultrasonore ...)

Dans certains cas, ces capteurs autorisent l'exécution de tâches simples comme la détection et le contournement d'un obstacle par des modules spécialisés de navigation.

Nous allons maintenant nous tourner à nouveau vers les approches du premier groupe afin d'essayer de dégager pour chacune d'entre elles quelques points positifs et négatifs :

- Les inconvénients majeurs de la stéréovision paraissent être la complexité de mise en oeuvre (difficulté de sélectionner les caractéristiques et de rechercher les bonnes correspondances) ainsi que sa gourmandise en temps de calcul et en volume mémoire (rangement de deux ou plusieurs images).

Un autre handicap peut être l'absence de point caractéristique devant une scène uniforme ou homogène (un grand mur par exemple. On notera également qu'une ligne horizontale couvrant toute l'image est un problème très délicat à traiter en stéréovision).

Enfin un problème inhérent, celui-ci, à tous les systèmes utilisant des caméras vidéo est la variation de l'éclairage dans la scène observée. En contre partie, les caméras offrent des avantages notoires : acquisition de l'image 2D rapide, champ de vue important, bonne résolution...

- Au contraire des caméras, les télémètres laser permettent rapidement d'évaluer ponctuellement une distance. Mais pour acquérir des informations correctes sur une scène réelle, il est nécessaire de réaliser un

compromis entre le temps d'acquisition et la résolution recherchée qui peut être très bonne. Ouvrons une parenthèse pour souligner la mauvaise résolution des télémètres à ultrasons (cône d'émission important). L'avantage primordial du télémètre laser est sa totale indépendance vis à vis de l'éclairage ambiant : il peut fonctionner dans l'obscurité.

Une telle propriété associée au développement actuel des traitements, encore très complexes, d'images de distance et de "reflectance" générées par un télémètre laser peut être un atout favorable à son développement futur en robotique.

Sans pour autant adopter cette dernière orientation, l'approche suivie pour le système de perception du robot mobile HILARE vise à réaliser un compromis entre les différents points précités.

Il est à ce titre composé d'une caméra vidéo et d'un télémètre laser. La solution retenue consiste à utiliser le télémètre en complément de la caméra afin de fournir des informations (3D) sur des zones ou régions significatives préalablement définies par le traitement d'images. Ce choix corrobore la stratégie de recherche pour le développement des systèmes multisenseurs et multiniveaux de décision pour le robot HILARE. Elle permet notamment, dans le cadre de ce système de perception 3D, d'utiliser au mieux les performances propres à chacun des deux capteurs.

Précisons toutefois que le système de perception complet comporte également un ensemble de proximètres ultrasonores (§.I.3.3) qui assure entre autres fonctions, la sécurité de bas niveau du véhicule.

I.3 - LE ROBOT MOBILE HILARE

Le projet HILARE a démarré en Septembre 1977 dans le cadre des recherches en robotique sur la conception et la réalisation de systèmes multisenseurs et multiniveaux de décision pour robots mobiles autonomes.

Le robot est essentiellement un support expérimental pour les études théoriques effectuées en robotique avancée. Son architecture qui se décompose suivant cinq volets n'est donc nullement figée et peut changer suivant l'évolution des recherches. Une vue générale du robot est montrée sur la figure (I.1).

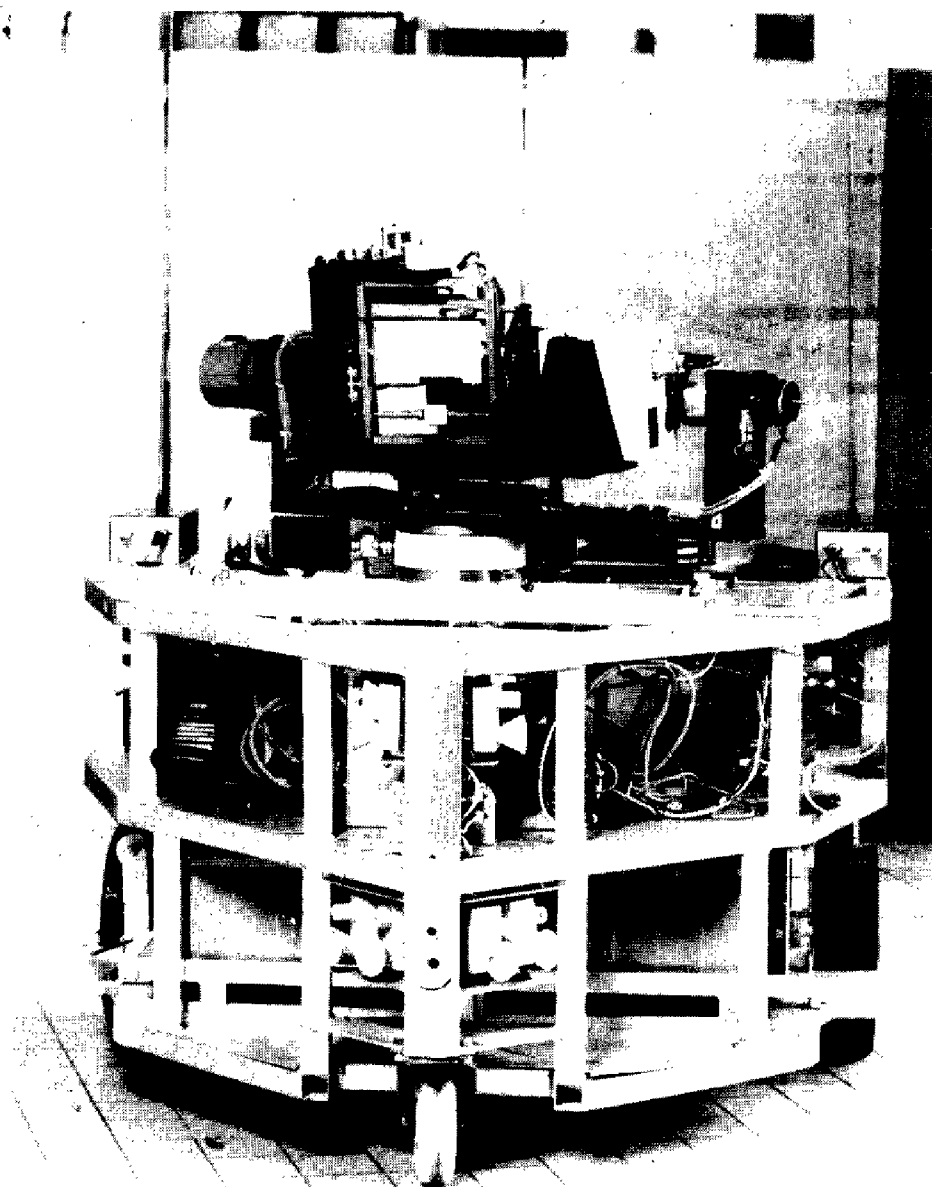


Figure I.1 - Vue générale d'HILARE

Il se compose :

- d'une structure mécanique
- d'un système de locomotion
- d'un système de perception
- d'une structure informatique
- d'une structure décisionnelle

Le robot physique a été entièrement développé au L.A.A.S avec l'aide du service MITRI (Micro-Informatique, Temps Reel et Instrumentation) sous la responsabilité de G. BAUZIL.

1.3.1 - LA STRUCTURE MECANIQUE

HILARE est physiquement constitué par un châssis métallique de trois étages dont la trace au sol est heptagonale, figure(I.2).

Le premier étage comporte d'une part des batteries qui confèrent au robot son autonomie énergétique et d'autre part le système de propulsion.

Le deuxième étage est principalement occupé par le système informatique embarqué.

Le troisième et dernier étage supporte le système de perception 3D. Un manipulateur est également prévu.

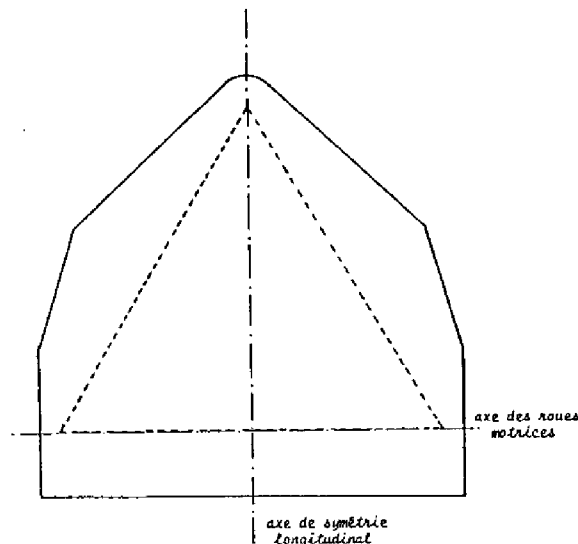


Figure I.2 - Trace au sol d'HILARE -

I.3.2 - LE SYSTEME DE LOCOMOTION

Il est constitué de deux roues motrices indépendantes actionnées par des moteurs pas à pas, et d'une roue folle. L'algorithme de commande de ces moteurs qui permet de contrôler la vitesse et la trajectoire du véhicule est implanté sur un des microcalculateurs embarqués [60], [61].

I.3.3 - LE SYSTEME DE PERCEPTION

Il est composé de deux sous-systèmes :

- le système à ultrasons
- le système de perception 3D

i) Le système à ultrasons

Le robot est doté de 14 modules émetteur-récepteur, (figure I.3) [62], répartis sur ses deux étages inférieurs. Ces modules qui constituent le système à ultrasons assurent une couverture totale de l'environnement immédiat du robot.

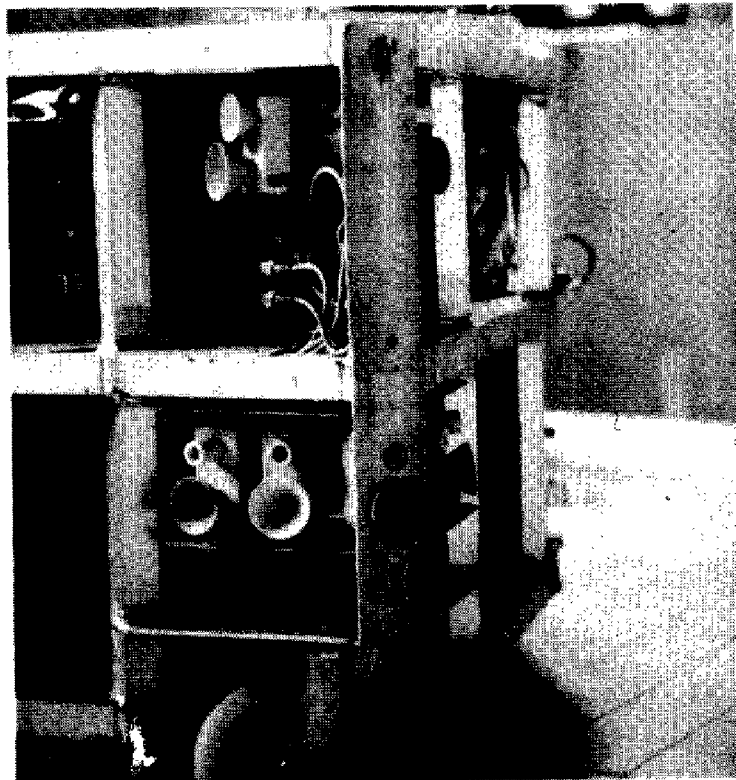


Figure I.3 - Capteurs ultrasonores

De nouveaux modules, plus performants, doivent être montés sur HILARE. Ils sont constitués par une cellule ultrasonique mécanique (transducteur électromécanique) qui assure l'émission et la réception d'un signal ultrasonore. Ce signal est codé en fréquence de manière à rester insensible aux réceptions parasites. La portée de ces nouveaux modules en fonctionnement normal est de deux mètres.

Le système à ultrasons assure deux fonctions distinctes :

- La première est une fonction de surveillance destinée à détecter tout obstacle imprévu en deçà d'un certain seuil programmable, c'est la sécurité de premier niveau.

La seconde est une fonction de navigation en "boucle fermée" qui permet au robot d'évoluer sans avoir recours au système de perception. Il peut ainsi se déplacer dans un couloir, longer un mur, contourner un obstacle etc...

Deux nouvelles fonctions sont actuellement en étude [63] :

- La première doit assurer la réalisation de trajectoires lissées parcourues sans point d'arrêt ;

- La seconde doit permettre le contrôle de l'exécution de la navigation pour parer à toute déviation de trajectoire due à des imprécisions mécaniques (sauts, dérapages ...) ou à la présence d'obstacles inconnus.

Toutes ces fonctions doivent permettre de décharger le niveau supérieur qui peut être affecté à une autre tâche.

ii) Le système de perception 3D

Il est composé d'une structure mécanique supportant une caméra (§.III.4) et un télémètre laser (§.IV.2). Cet ensemble doit permettre une exploration en azimut et en site de l'environnement du robot.

Le télémètre laser est couplé à la caméra par l'intermédiaire d'un système de miroirs déflecteurs de sorte qu'il puisse balayer tout le champ de la caméra (§.IV.3 , IV.4).

L'image issue de la caméra est traitée par des algorithmes de traitement d'images multiniveaux (§.II.3). Le laser peut alors être utilisé selon diverses stratégies ; conjointement avec la caméra (mesure de certains points définis par l'analyse et l'image) ou bien seul (balayage d'une zone) (§.V.1).

Le système de perception doit finalement permettre :

- de trouver la position et l'orientation des obstacles assimilés à des polyèdres ;
- de reconnaître éventuellement certains objets dans une pièce (analyse de scène).
- de repérer le robot (position et orientation) dans une pièce balisée (§.V.2)

I.3.4 - LA STRUCTURE INFORMATIQUE

I.3.4.1. Le Matériel

La structure informatique est organisée en trois niveaux de calculateurs (Figure I.4) :

- un ensemble de microcalculateurs embarqués (1)
- un minicalcuteur local (2)
- un calculateur puissant (3)

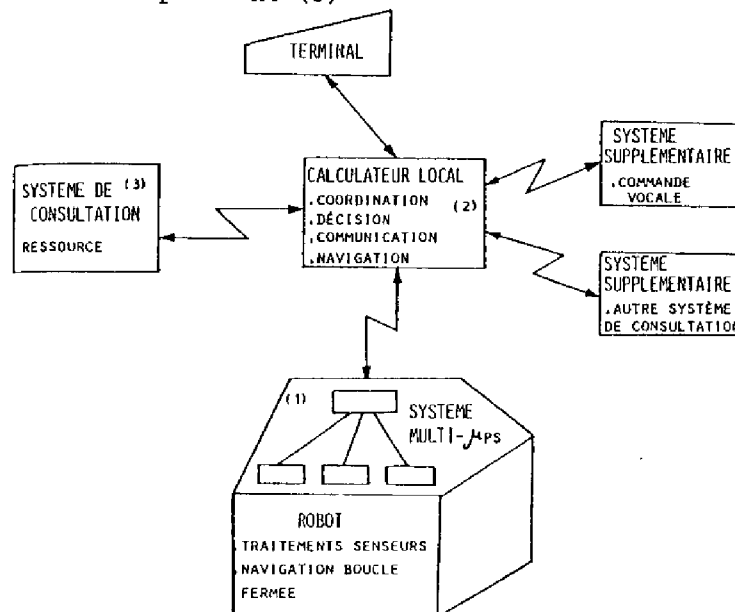


Figure I.4 - Structure Informatique

i) Les microcalculateurs embarqués sur HILARE sont construits autour d'une unité centrale du type 8085 INTEL. Ils sont actuellement au nombre de cinq et constituent des modules spécialisés dans la gestion et la commande des senseurs et des effecteurs du robot. Leurs fonctions se répartissent de la façon suivante :

- commande des moteurs des roues
- gestion du système à ultrasons
- commande des moteurs de la tourelle de vision
- gestion du système de perception 3D
- gestion et contrôle des communications

Le rôle de ce dernier module est distinct des quatre autres dans la mesure où il assure le transit et l'aiguillage des ordres ou messages d'un module à un autre. Il réalise également la communication avec le minicalculateur local.

ii) Le minicalculateur local SEL SYSTEMS 32/7780 est relié au robot mobile par voie hertzienne. Ce calculateur est le centre du système informatique, il élabore les tâches relatives à la navigation et gère un certain nombre de périphériques nécessaires à la communication.

iii) Le calculateur puissant IBM 30/33 du CNUSC (Centre National Universitaire Sud de Calcul) est connecté au SEL par le réseau TRANSPAC. Ce calculateur puissant est considéré comme un périphérique du minicalculateur et n'intervient que sur des périodes courtes ou particulières du fonctionnement du robot (apprentissage, élaboration d'une décision complexe...)

I.3.4.2. Le Logiciel

La structure logicielle est actuellement simple mais elle est en train d'évoluer pour répondre aux exigences du système informatique distribué [63].

Dans la version opérationnelle, il existe deux moniteurs. Le premier résidant sur le SEL permet la communication entre l'utilisateur, le CNUSC et le robot mobile. Le second, implanté sur l'un des microprocesseurs embarqués sur HILARE réalise la distribution des messages entre les divers modules de bord mais également vers le SEL.

D'autres solutions possibles pour la structure décisionnelle d'HILARE sont à l'étude [63], [66]. Une solution qui semble offrir le meilleur compromis généralité/chance de réussite, et non fondamentalement différente de la précédente consiste à séparer les fonctions de gestion de la planification et de contrôle temps réel, et à rendre le contrôle d'exécution moins centralisé, Figure(I.6).

Le module de gestion de la planification coordonne les activités des modules experts de niveau intermédiaire et maintient une base de données d'utilité générale qui vient en supplément des bases de données spécifiques à chaque module expert.

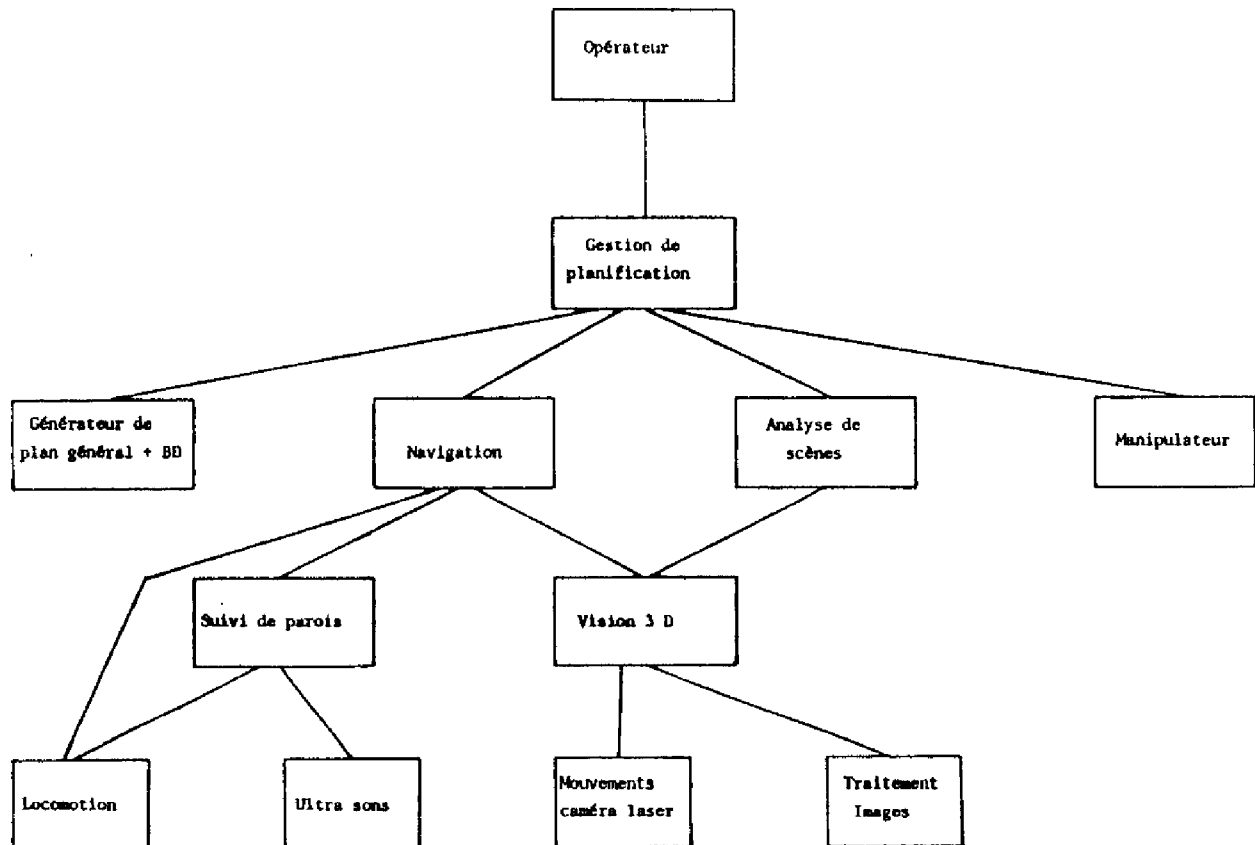


Figure I.6 - Exemple de structure décisionnelle en étude

I.3.6 - STRUCTURE D'APPRENTISSAGE

Cette structure n'est pas encore développée sur le robot HILARE. Elle apparaît néanmoins nécessaire dès l'instant où l'on admet que le robot puisse acquérir ses informations progressivement au cours des expérimentations. Cette idée est notamment conforme à la construction des systèmes décisionnels. Une telle capacité d'apprentissage peut en outre être étendue au niveau de chaque module du robot grâce à sa structure distribuée.

I.3.7 - HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES DE TRAVAIL

L'hypothèse restrictive majeure est que tous les objets de l'univers soient ou puissent être approximés par des polyèdres. Il est supposé d'autre part que le robot ne se déplace que sur un sol plan. Ce qui n'exclue pas la présence de rampes. Ces hypothèses sont prises en compte pour la modélisation de l'univers. L'expert de navigation [36] utilise d'abord un modèle géométrique qui est ensuite transformé en un modèle topologique. Il est ainsi amené à résoudre un problème plan où la trace et la projection des objets est significative pour la navigation.

Le système de perception doit respecter de telles considérations pour la localisation d'objets. Il doit fournir en conséquence au système de navigation les coordonnées polaires robot-centriques, des extrémités des projections au sol, ou des traces des objets vus.

I.4 - CONCLUSION

La description du robot HILARE termine le tour d'horizon sur les principaux systèmes de perception en ce domaine.

Nous avons pu constater, tout au long de ce chapitre, que la perception des robots mobiles faisait appel à des techniques très diverses. Le but commun reste cependant l'acquisition des informations sur le relief d'une scène. La conclusion partielle (§ I.2.3) tente de classer les différentes approches selon deux groupes.

On trouve d'une part, des méthodes "locales", dont le champ d'application dans l'environnement du robot est réduit (proximétrie, télémétrie par triangulation, etc...) ; et d'autre part, des méthodes plus "globales" qui

permettent d'explorer des zones importantes (stéréovision, télémétrie laser de tout un secteur, etc...). Ces dernières sont essentiellement exécutées sur des calculateurs locaux et nécessitent des temps d'acquisition ou de traitement très importants.

Les accents mis sur le degré d'autonomie et de multiplicité des senseurs démarquent HILARE des autres projets de robots mobiles. Il est caractérisé par un module de perception composé de deux systèmes embarqués : un système à ultrasons et un système de perception 3D. Ce dernier est constitué par deux capteurs complémentaires, une caméra et un télémètre laser. Cette solution permet d'utiliser au mieux les différents capteurs, chacun dans son domaine d'application propre.

Nous allons maintenant présenter, point par point, les étapes successives qui ont conduit à la mise en place du système de perception 3D.

CHAPITRE II

II.1 - INTRODUCTION

De nombreux domaines scientifiques reposent actuellement sur l'exploitation d'images vidéo. Elles sont généralement inexploitable à l'état brut, aussi bien pour des raisons qualitatives (dégradation de l'image) que quantitatives (très grand nombre d'informations contenues dans l'image et souvent beaucoup d'images à traiter).

La nécessité d'un traitement d'image est alors évidente mais celui-ci diffère selon que l'on s'oriente vers la restauration d'image ou bien vers l'exécution automatique de tâches par un manipulateur.

Le traitement d'images en robotique est une technique spécifique qui vise à structurer les informations contenues dans une image vidéo selon un format concis mais néanmoins significatif.

L'objectif avoué est bien plus qu'une étape de reconnaissance des formes puisqu'il vise à donner une interprétation globale de la scène observée.

Quatre étapes permettent généralement d'atteindre ce but. Nous allons ici donner les caractéristiques de chacune d'elles, en nous référant pour les grandes lignes aux supports bibliographiques [67], [68], [69], [70], [71].

A l'issue de cette présentation, qui permet par ailleurs de situer nos travaux, nous exposerons de façon plus détaillée l'approche suivie dans le cas du système de perception du robot mobile HILARE.

II.2 - QUELQUES TECHNIQUES DE TRAITEMENT D'IMAGES

II.2.1. Acquisition, Numérisation et Filtrage de l'Image

Le rôle de cette première étape est la mise en forme des informations vidéo dans le but de rendre possibles les traitements ultérieurs orientés vers la compréhension de la scène observée.

i) L'acquisition de l'image est l'opération qui assure, par l'intermédiaire de capteurs optoélectroniques, la conversion des informations lumineuses en un signal électrique : le signal vidéo. Une partie du chapitre III est consacrée notamment à la description des principaux types de capteurs utilisés en robotique.

ii) Une mise en forme du signal vidéo ainsi obtenu est alors nécessaire afin de l'introduire comme donnée dans un système de traitement (calculateur, processeur de vision ...). C'est la phase dite de "digitalisation" ou de "numérisation". Elle comprend deux volets :

- l'échantillonnage spatial
- la quantification du signal vidéo

Le premier de ces volets permet de structurer les images vidéo en cellules élémentaires (ou pixels) disposées selon un maillage approprié. Celui-ci peut être carré, rectangulaire, hexagonal, etc... Notons que pour les capteurs à semi-conducteurs, la géométrie de la maille (carrée ou rectangulaire) est inhérente à l'organisation des cellules photosensibles constituant la cible.

L'objectif du second volet est la quantification du signal vidéo selon une échelle linéaire ou non de N niveaux de gris. L'image vidéo apparaît alors sous la forme d'une matrice numérique dont chaque élément est représentatif de l'intensité lumineuse du pixel associé.

Le nombre N de niveaux de gris varie généralement de 2 pour les images biniveaux à 256 pour les images multiniveaux. Son choix dépend principalement des impératifs du traitement à effectuer et des possibilités des convertisseurs analogiques-numériques (A/N).

Soulignons qu'en robotique, le nombre de niveaux de gris excède rarement 32.

Le cas le plus fréquemment rencontré reste encore celui des images binaires. Ouvrons une parenthèse pour noter que le problème majeur réside ici dans la détermination d'un seuil optimal permettant de séparer les objets de l'arrière plan.

Diverses techniques de sélection du seuil sont connues [72]. Il peut être unique ou variable dans l'image [73]. Pour asservir le seuil, il est généralement fait appel à un histogramme qui donne la répartition de l'intensité lumineuses dans l'image [74].

iii) Après la phase de numérisation que nous venons d'évoquer, il est souvent nécessaire d'effectuer un pré-traitement afin de réduire les bruits (défauts dus à la discrétisation et au capteur) ou plus généra-

lement les irrégularités de forme dans l'image (trous, coupures, points isolés ou aberrants, distorsions etc...) dans le but de préparer les traitements ultérieurs.

Ce pré-traitement est assuré par l'utilisation de filtres linéaires ou non suivant l'effet recherché [75]. En ce qui concerne les filtres linéaires, les trois principaux groupes sont constitués par les opérateurs de lissage, de correction d'éclairage et de dérivation (gradient, laplacien, Sobel, Mero-Vassy, Prewitt etc...). Pour les filtres non linéaires citons les opérateurs de seuillage, les tables de conversion et les opérateurs d'expansion et d'érosion.

II.2.2. Segmentation de l'Image

Cette deuxième étape qui est en fait le premier pas effectué vers la compréhension de la scène observée, consiste à scinder l'image digitalisée en unités reconnaissables.

La segmentation définit en effet des zones homogènes constituées par des points images (pixels) dont le niveau de gris est identique ou similaire.

Selon que l'on s'attache à la nature (texture) de ces zones ou bien à leurs formes (silhouette), on parle de segmentation en régions homogènes [76], [77], [78], ou bien de segmentation en frontières (extraction de contours). Dans cette seconde approche on distingue encore deux groupes de méthodes :

- les méthodes locales ou régionales
- les méthodes topologiques

i) en ce qui concerne les méthodes du premier groupe précité elles font généralement appel à des opérateurs de dérivation du premier ordre (gradient). Il en existe plusieurs variantes comme par exemple les opérateurs de Roberts, Sobel, Prewitt etc... Leurs performances sont fortement liées à la nature de l'image à traiter [79], [80], [81].

L'inconvénient majeur de ces méthodes locales ou régionales est sans aucun doute la détection de contours épais et non connectés. Ceci impose une étape ultérieure visant à filtrer les contours et à rétablir la connexité .

On distingue essentiellement deux techniques. La première est basée sur l'utilisation de masques spéciaux [82], tandis que la seconde, plus courante, fait appel à des procédés de poursuite de contours [83] suivis généralement d'une phase de squeletisation [75]. La notion de squelette [84], [85] a le souci de conserver le maximum d'informations sémantiques des contours.

ii) Les méthodes topologiques sont fondées sur l'étude de la connexité entre chaque pixel. Il s'en suit que les contours obtenus délimitent des zones homogènes, et sont uniques, connexes et fermés.

Deux procédures récursives d'extraction de contours d'images biniveaux ont été élaborées au LAAS [86], [87].

Sur ces bases nous avons été amenés à développer une procédure d'extraction de contours multiniveaux. Nous la présentons en détail dans ce qui suit, mais nous pouvons noter d'ores et déjà une restriction importante dans l'emploi de telles méthodes. C'est la difficulté d'appréhender la notion de contour réel, et ceci d'autant plus, lorsque le nombre de niveaux de gris croît.

Dans la plupart des applications en robotique, l'information de contour s'avère essentielle, suffisante et déterminante. Néanmoins l'intégration d'opérateurs ponctuels de détection de texture peut être une approche envisageable pour certaines applications complexes (pièces de fonderie, textiles ...).

II.2.3. Modélisation d'une scène

Cette étape est le dernier maillon dans la chaîne de synthétisation des informations contenues dans une image. Elle vise à donner une description concise mais pertinente des unités reconnaissables définies par la segmentation.

A cette fin, on fait appel à des descripteurs locaux ou globaux. Ils sont relatifs à la forme, la position, l'orientation, la taille etc...

Si l'on se place dans le contexte de représentation par contours, ces derniers peuvent alors, être décrits par une suite de descripteurs locaux (coins, courbures, segments de droite ...) et par des descripteurs globaux (périmètre, surface, axes d'inertie ...).

Généralement, les descripteurs globaux suffisent. Néanmoins, dans le cas d'objets partiellement cachés, on fait essentiellement appel aux descripteurs locaux dont les caractéristiques ou primitives permettent malgré les recouvrements, de capter la forme observée et d'autoriser une identification de l'objet [88].

A l'issue de la segmentation, les contours discrets sont constitués par un chaînage de points. Par conséquent, l'utilisation des descripteurs locaux n'est pas immédiate. Une opération de lissage est nécessaire. Outre le filtrage de points parasites et une réduction du format de description du contour, elle doit assurer une bonne approximation des contours discrets.

Il existe plusieurs techniques de lissage. Les principales peuvent se répartir en deux groupes selon que l'on fait référence à des approximations polygonales [89], [90], [91], ou bien à des approximations par arcs de cercle [92], [93].

II.2.4. Identification des objets

Cette ultime étape doit permettre de reconnaître l'objet observé, c'est-à-dire en fait d'attribuer un nom à sa représentation, obtenue par le traitement d'image.

L'identification ou reconnaissance automatique des formes est basée sur la comparaison du modèle de l'objet tiré de l'observation, et ceux servant de référence.

Cependant, le modèle pour un même objet n'étant pas rigoureusement stable (défaut d'aspect, position d'équilibre différente etc ...), l'espace des représentations est divisé en classes. Elles sont obtenues par apprentissage, et chacune d'elles est représentative d'un objet.

Le processus de comparaison par le biais de règles de décision doit alors être capable de déterminer l'appartenance du modèle observé, à l'une ou à l'autre des classes.

Les procédures de comparaison ou de classification peuvent être regroupées en quatre grandes familles [67], [94] :

- les procédures basées sur l'utilisation des fonctions caractéristiques,
- les procédures basées sur l'utilisation des fonctions récursives,
- les procédures adaptatives,
- les procédures multimodèles.

Pour chacune de ces familles, on détermine par apprentissage

- le modèle des objets,
 - les règles de décision,
- propres à la méthode utilisée

Après ce tour d'horizon des techniques principalement utilisées pour analyser une image, nous nous proposons de présenter l'étude du système de traitement d'images multiniveaux, destiné à être embarqué sur le robot mobile HILARE.

La mise en place d'un tel système n'a nullement la prétention de se substituer à l'analyse de scène traditionnelle, exécutée sur de puissants calculateurs. Elle vise essentiellement à doter le robot d'un niveau d'autonomie supplémentaire dans la détection d'obstacles. Le système de perception doit permettre, le cas échéant, de fournir au niveau hiérarchiquement supérieur des informations concises mais significatives de la scène observée en vue d'une analyse plus sophistiquée.

II.3 - ETUDE DU SYSTEME DE TRAITEMENT D'IMAGES MULTINIVEAUX

II.3.1. Introduction

Dans le cadre de l'étude du système de perception de l'univers 3D du robot mobile HILARE, nous avons été amenés à développer des procédures de traitement d'images multiniveaux. Elles font suite aux travaux de J.C TALOU sur l'étude d'un extracteur de contours biniveaux [87] dont une version câblée, très performante, a par ailleurs été réalisée au L.A.A.S [95].

Le système de perception du robot combine les informations délivrées par deux types de capteurs complémentaires :

- i) une caméra vidéo fournissant des informations sur l'espace 2D ;

ii) Un télémètre laser donnant la dimension manquante, i.e, la profondeur.

Le modèle du monde utilisé est d'abord un modèle géométrique qui est ensuite transformé en un modèle topologique pour la représentation de l'espace et des objets [64], [36]. En conséquence, le système de perception du robot doit :

i) être capable de trouver la position et l'orientation des obstacles vus, en les assimilant à des polyèdres. Ce genre d'information n'est pas directement disponible à partir d'une caméra vidéo, c'est pour cette raison que nous utilisons, comme dispositif complémentaire, un télémètre laser destiné à donner des informations sur la dimension manquante, c'est-à-dire la profondeur.

ii) être capable de reconnaître certains objets dans une pièce. Pour cela, il est nécessaire de recourir à des techniques de reconnaissance des formes et d'analyse de scènes plus sophistiquées.

Le signal vidéo issu de la caméra est numérisé sur plusieurs niveaux de gris par un convertisseur A/D (Chapitre III). C'est à partir de cette image numérisée que les procédures de traitement d'images que nous allons présenter, permettent de situer chaque zone dans l'image. Le télémètre laser, utilisé en complément de la caméra vidéo, doit alors permettre grâce à une stratégie de "tirs", de fournir la distance de chacune des zones significatives.

II.3.2. Procédure d'extraction de contours

L'objectif de cette procédure est la segmentation d'une image multiniveaux par le biais d'un algorithme d'extraction de contours fermés.

L'image numérisée sur plusieurs niveaux de gris apparaît comme un maillage de lignes et de colonnes dont les intersections (pixels) constituent l'espace image.

Le traitement de cette image est effectué en ligne par déplacement d'une fenêtre 2 x 2. Cette fenêtre, ou masque, se déplace le long de deux lignes consécutives (la ligne de balayage I et la ligne I.1 retardée) avec un pas d'une colonne correspondant à la période d'échantillonnage.

A chaque cycle, on analyse les informations de luminance des quatre pixels sélectionnés par le masque, de manière à détecter un point caractéristique de changement de contour. La figure II.1 montre la relation physique existant entre les quatre points "image" (P_{i1} , P_{i2} , P_{i5} , P_{i4}) et le point "contour" (P_c) résultant, qui est un point fictif situé au centre de la fenêtre.

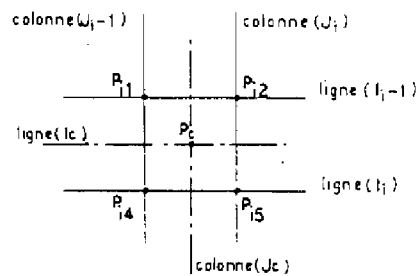


Figure II.1 - Masque de Codage

On remarquera le décalage d'un demi pas d'échantillonnage existant entre l'espace des points image (P_i) et l'espace des points contour (P_c).

Afin de pouvoir traiter tous les pixels limitrophes de l'espace image, celui-ci est dans un premier temps bordé par des niveaux de gris non codés formant le cadre.

La procédure d'extraction de contour réalise une compression des données en ne mémorisant que les informations caractérisant les points de changement de direction des contours.

Les différents types T_i de changement de direction sont au nombre de huit, figure II.2.

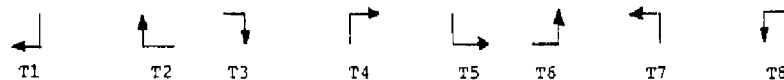


Figure II.2 - Ensemble des différents types T_i , ($i=1,8$) de changement de direction

A chacun de ces types qui déterminent en fait un point significatif de l'espace contour, est associé un traitement particulier qui permet de mémoriser une information de position dans l'image, et une information de chaînage.

Selon la configuration du pavé (masque) observé, la procédure peut faire appel à une combinaison de 1 à 4 types T_i de changement de direction. On dénombre douze cas possibles que l'on peut répartir en trois groupes, (figure II.3), selon le nombre des niveaux de gris différents qui constituent le pavé.

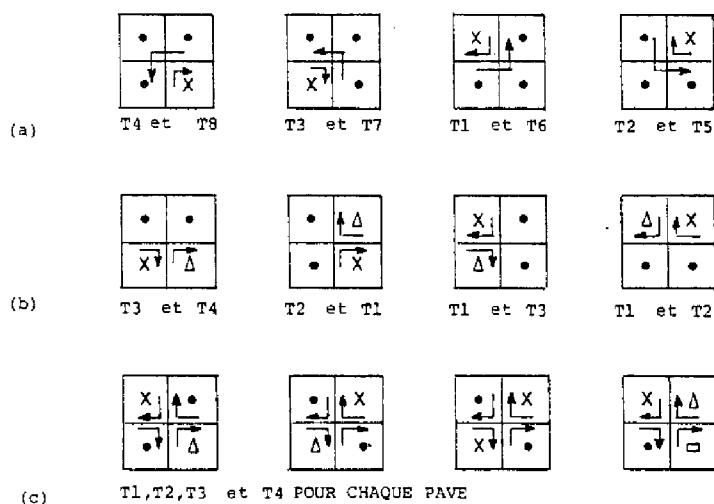


Figure II.3 - Ensemble des combinaisons possibles de changement de direction T_i .

Notons que des pavés ne faisant intervenir aucun changement de direction et traduisant de fait une continuité ne sont pas traités. La configuration de ce genre de pavé est montrée figure II.4.

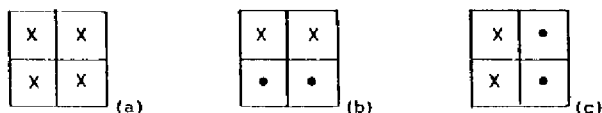


Figure II.4 - Configuration de pavés ne faisant intervenir aucun T_i :

a) représente la zone homogène délimitée par un contour, b) et c) traduisent le suivi d'un contour respectivement à ligne et à colonne constante.

De façon similaire, si dans un pavé appartenant à l'ensemble des douze configurations possibles, (figure II.3), apparaît un niveau de gris non codé (NC), cas du suivi de bord, alors, l'appel au type de changement de direction qui lui correspond est inhibé, Figure II.5.



Figure II.5 - Exemple de traitement dans le cas particulier du cadre :

a) cas général : T4 et T8 sont traités - b) cas de suivi de bord : seul T4 est considéré.

II.3.2.1. Traitement des points caractéristiques

Le principe de fonctionnement de la procédure est induit par le mode de balayage en ligne qui se fait de la gauche vers la droite, et du haut vers le bas.

Tous les contours débutent par la détection de T4 et de fait, le point suivant est détecté sur la même ligne par T3. Le suivant de ce dernier, qui ne peut être que du type T1 ou T5 se trouve nécessairement sur la même colonne mais ne sera détecté que lors du balayage des lignes ultérieures (Figure II.6).

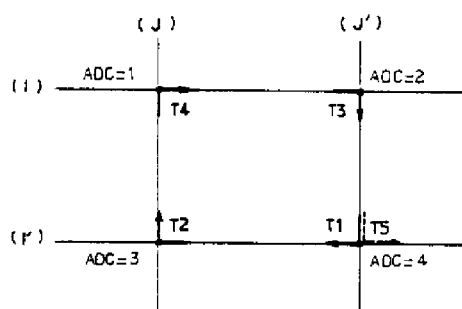


Figure II.6 - Exemple de contour décrit par des points caractéristiques.

Cette technique d'acquisition en ligne rend donc obligatoire pour une restitution ultérieure de contour, la gestion des points de changement de direction (points caractéristiques) afin d'assurer leur chaînage.

Il s'en suit que pour chaque point caractéristique détecté, il est indispensable de mémoriser une information de position et une information de chaînage, de manière à s'affranchir des problèmes liés à la nature horizontale du balayage.

i) information de position : les points caractéristiques déterminent un point de changement de direction, il n'est donc pas nécessaire de mémoriser ses deux coordonnées (I et J) dans la mesure où une information complémentaire de chaînage existe.

une seule coordonnée est effectivement nécessaire pour restituer ultérieurement le contour. Le choix de I ou J est défini par le type T_i de changement de direction :

- Pour un point dont le suivant est sur la même ligne I, c'est le cas des types T_1 , T_4 , T_5 , T_7 , on mémorise son ordonnée I.

- Pour un point dont le suivant est sur la même colonne J, c'est le cas des types T_2 , T_3 , T_6 , T_8 , on mémorise son abscisse J.

Les informations de position (I ou J) sont rangées consécutivement dans une table (TAB) indexée par l'adresse courante des points caractéristiques. Cette adresse (ADC) progresse à chaque détection de points caractéristiques.

Si l'on prend pour exemple le croquis de la figure II.6, l'information de position étant donnée par $TAB [ADC] = I$ ou J , nous avons successivement :

$TAB [1] = I$

$TAB [2] = J'$

$TAB [3] = J$

$TAB [4] = I'$

Soit encore, $TAB = I, J', J, I, \dots$ Il est clair que sans aucune information de chaînage cette table reste inexploitable.

ii) information de chaînage : l'information de chaînage consiste à mémoriser l'adresse à laquelle est rangée l'information de position du point suivant.

A cette fin nous utilisons tout un ensemble de marqueurs particuliers qui permettent de suivre la progression des points caractéristiques d'un contour [96].

Sans trop entrer dans le détail, nous pouvons dans le cadre de ce mémoire mentionner le cas des marqueurs lignes (ML1, ML2) et colonnes (MC1 [J], MC2 [J]). Les premiers sauvegardent l'adresse courante ADC du point traité sur la ligne, et les seconds, l'adresse courante ADC du point traité sur la colonne J.

Ces deux types de marqueurs permettent de concrétiser l'information de chaînage. En effet, pour tout point caractéristique traité, il est possible de mémoriser dans la table de chaînage (SUI) l'adresse de rangement, dans TAB, de l'information de position.

Deux procédures de chaînage sont à envisager selon que le point suivant se trouve sur une ligne ou sur une colonne.

• Chaînage en ligne

Compte tenu du sens du parcours et du mode de balayage en ligne, le point suivant peut être détecté avant, (Figure II.7.a), ou après (figure II.7.b), le point caractéristique traité.

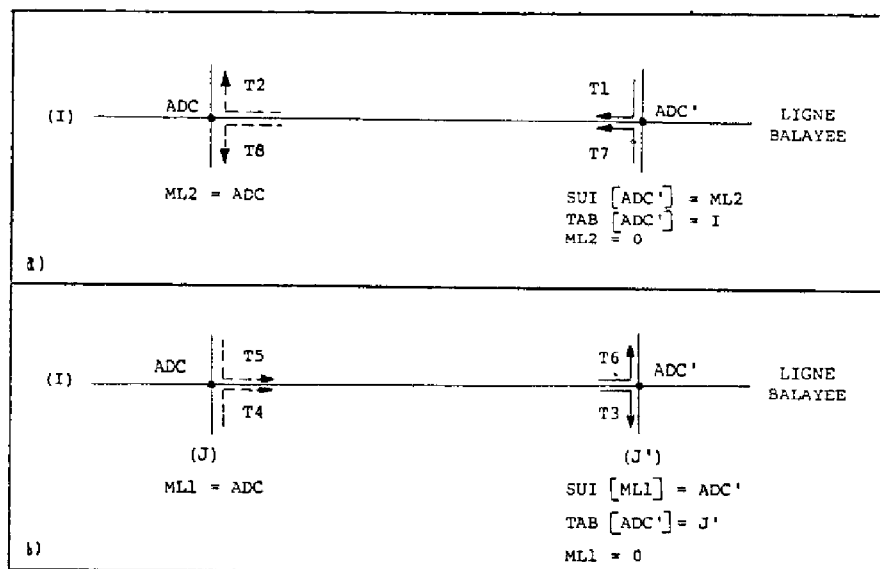


Figure II.7 - Chaînage en ligne.

Dans le premier cas, (a), le point traité (ADC') et le point suivant (ADC) sont respectivement du type (T1 ou T7) et (T2 ou T8). L'information de chaînage est donnée par : $SUI[ADC'] = MC2$.

Dans le second cas, (b), le point traité (ADC') et le point antécédent (ADC) sont respectivement du type (T3 ou T6) et (T4 ou T5). L'information de chaînage est donnée par : $SUI[ML1] = ADC'$

• Chaînage en colonne

La problématique rencontrée dans ce cas de chaînage vertical est similaire à la précédente dans la mesure où le point suivant peut également être détecté avant, (Figure II.8.a), ou après, (figure II.8.b), le point caractéristique traité.

La différence essentielle réside dans la nature des marqueurs colonnes. Ces derniers doivent impérativement couvrir tout le champs vertical de l'image. Ils ont donc pour dimension le nombre de colonnes de l'image et sont indicés par J.

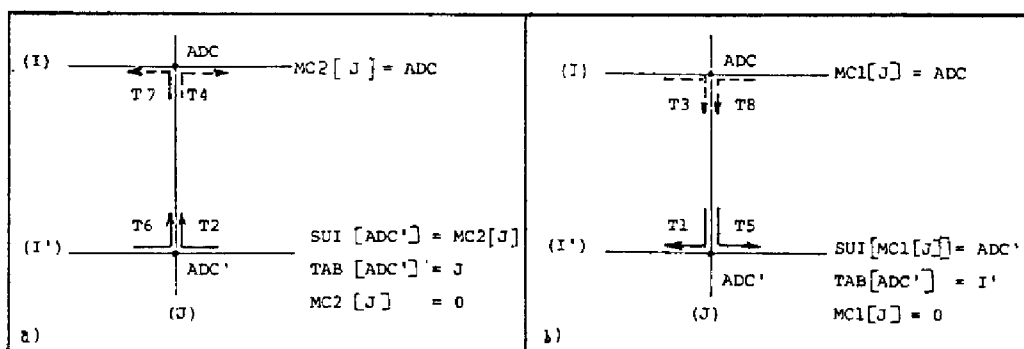


Figure II.8 - Chaînage vertical

Dans le premier cas, (a), le point traité (ADC') et le point suivant (ADC) sont respectivement du type (T2 ou T6) et (T4 ou T7). L'information de chaînage est donnée par : $SUI[ADC'] = MC2[J]$.

Dans le second cas, (b), le point traité (ADC') et le point antécédent (ADC) sont respectivement du type (T1 ou T5) et (T3 ou T8). L'information de chaînage est donnée par : $SUI[MC1[J]] = ADC'$.

II.3.2.2. Traitement des débuts de contour

Les débuts de contours possibles sont détectés par un point de changement de direction du type T4. Le traitement en ligne consiste donc à mémoriser dans un indicateur de début de contour (IDC) l'adresse courante (ADC) du point caractéristique T4.

Néanmoins, avec le mode de balayage en ligne utilisé, il est possible de détecter plusieurs débuts du même contour. La figure II.12 est un exemple de double détection.

De telles détections multiples sont signalées par la présence d'un point caractéristique du type T6. Dans ce cas, une procédure de mise à jour des pointeurs et marqueurs concernés, est activée en fin de balayage ligne. Cette procédure, que nous évoquerons lors de la description de l'algorithme de traitement des adjacences, permet ici de ne valider que le premier début de contour rencontré.

II.3.2.3. Ordonnancement des points.

La procédure d'ordonnancement fait appel aux informations contenues dans IDC, SUI et TAB.

L'adresse de début des contours est donnée par IDC. Rappelons que cette adresse n'est autre que l'adresse courante ADC du point début de contour. Elle permet donc de connaître :

- d'une part l'ordonnée I (du premier point) mémorisée dans TAB [ADC],
- d'autre part l'adresse du point suivant, stockée dans SUI [ADC].

Soit ADC' cette adresse, l'abscisse J du point suivant est fournie par TAB [ADC']. A son tour l'adresse du point suivant est donnée par SUI [ADC'].

Le processus se poursuit ainsi jusqu'à ce que le contour soit bouclé. Il se reproduit de façon identique pour tous les débuts de contour mémorisés dans IDC.

Cette procédure permet de réorganiser et d'isoler un contour, soit tout simplement pour le visualiser, soit encore pour en calculer les

paramètres caractéristiques (périmètre, surface, axes d'inertie, rectangle limitateur etc...).

II.3.3. Procédure de traitement des adjacences

Elle a pour but de situer tout contour de l'image par rapport à des voisins immédiats. Pour cela, on détecte et on traite les adjacences relatives à chaque contour.

La détection est basée sur l'utilisation en ligne des différents types T_i de changement de Direction.

Le traitement consiste à associer à chaque objet (contour) intervenant dans une adjacence, son numéro d'identification. Ce numéro est attribué dès la détection d'un début de contour. Il est donc fonction de l'ordre de mémorisation et du nombre d'objets de l'image. Ce dernier est rangé dans un pointeur d'objet (PO).

L'information d'adjacence est mémorisée dans un tableau résultat binaire (TA) dont la mise à jour en fin de ligne est rendue nécessaire par le mode de traitement de l'image.

Le principe de base, à savoir, la détection en ligne des points caractéristiques est identique à celui de la procédure d'extraction des contours. Cela permet une exécution en parallèle. Précisons cependant, que dans le cas présent, les marqueurs ligne et colonne sont des booléens et qu'ils n'assurent plus le suivi des contours mais participent au traitement des adjacences [97].

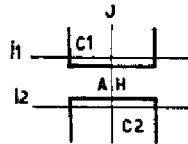
II.3.3.1. Principe

Le maillage (carré) utilisé nous impose de définir deux types d'adjacences, la 4-adjacence et la 8-adjacence.

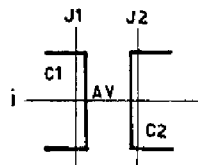
i) Les 4-adjacences

Au sein de ce groupe, nous devons encore distinguer le cas des adjacences horizontales et verticales :

. Une adjacence horizontale (AH) associe deux contours de deux lignes consécutives.



. Une adjacence verticale (AV) associe deux contours de deux colonnes consécutives.



Le traitement des adjacences horizontales n'est évidemment possible que si les informations relatives à la ligne précédemment balayée ont été mémorisées.

Cette condition impose que la détection et le traitement des adjacences se fassent avec un retard d'une ligne. Pour ce faire, durant le balayage de la ligne courante on mémorise le numéro d'identification des contours détectés, mais leurs adjacences respectives ne seront traitées que lors du balayage de la ligne suivante.

ii) les 8-adjacences

Au point de vue traitement, l'extension au cas des 8-adjacences se fait naturellement.

Précisons uniquement un point de vocabulaire, lié à la notion de point double dans le cas des images biniveaux. Lorsque deux contours 8-adjacents délimitent des zones de niveau de gris identique, on parle fréquemment de liaison. Néanmoins, on se trouve devant une alternative. Les deux contours étant diagonalement adjacents, on peut les considérer comme appartenant ou non à un même objet.

La décision d'un tel choix ne peut être prise ici. Elle est souvent repoussée à une phase ultérieure de filtrage (fusion par critère de dimension) ou à une phase plus élaborée d'interprétation d'image.

II.3.3.2 Détection et traitement des adjacences

i) la détection se fait essentiellement par le biais de trois

types T_i de points caractéristiques (Figure II.9).

- T_4 : Début de contour, signale deux adjacences : une adjacence horizontale (1) et une adjacence verticale (2),
- T_3 : Fin de partie supérieure du contour, signale une adjacence verticale (3),
- T_2 : Fin de contour, signale une adjacence horizontale (4)

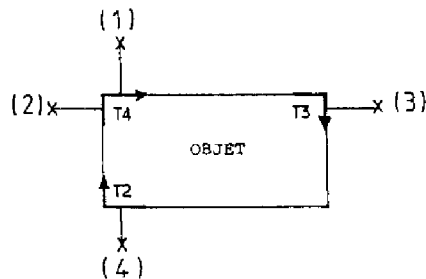


Figure II.9 - Détection des adjacences

ii) Le traitement nécessite la mémorisation des informations relatives à deux lignes "image" consécutives. Cela est fait par l'intermédiaire des marqueurs $PS \llcorner J \lrcorner$, $PS1 \llcorner J \lrcorner$ et $PS2 \llcorner J \lrcorner$, (Figure II.10). Ils doivent couvrir tout le champ vertical de l'image et sont indicés par le numéro J de la colonne traitée.

- $PS \llcorner J \lrcorner$ et $PS1 \llcorner J \lrcorner$ mémorisent les informations relatives aux deux dernières lignes "image" précédemment balayées, I_{i-1} et I_{i-2} ,
- $PS2 \llcorner J \lrcorner$ réalise le pointage successif des différents objets rencontrés sur la ligne "image" courante, I_i .

Les vecteurs $PS \llcorner J \lrcorner$ et $PS1 \llcorner J \lrcorner$ contiennent donc toutes les informations nécessaires pour traiter les 4-adjacences (figure II.10) et les 8-adjacences (figure II.11).

Ces résultats sont consignés dans un tableau binaire TA de dimension $n \times (n+1)$ où n est le nombre de contours présents dans l'image.

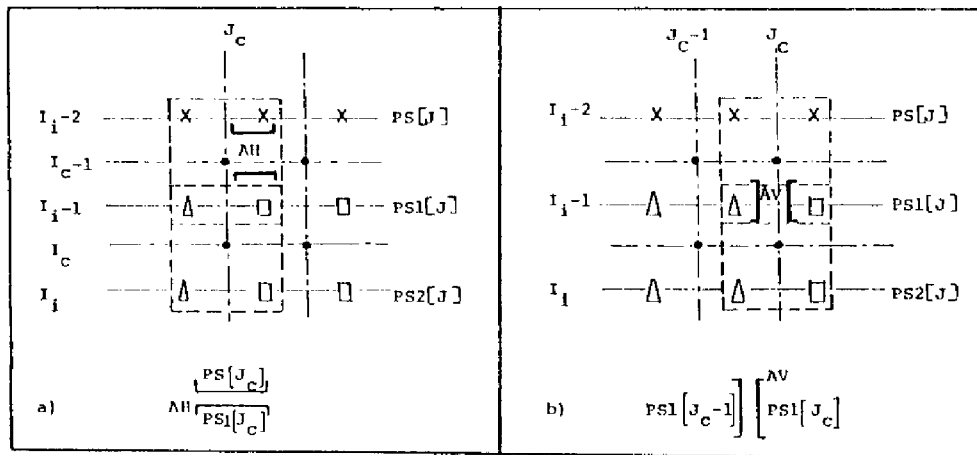


Figure II.10 - Traitement des adjacences

a) horizontales

b) verticales

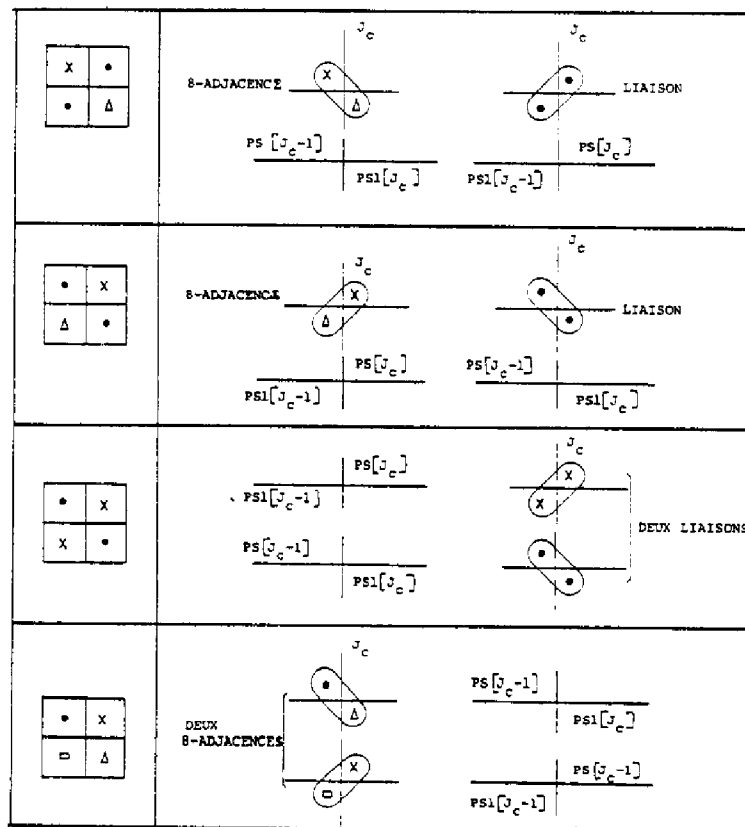


Figure II.11 - Ensemble des différents cas de 8-adjacences

Cas particulier : la liaison associe deux pixels de niveau de gris identique

II.3.3.3. Fausse affectations

C'est le cas d'une détection multiple de débuts de contour que nous avons déjà évoqué lors de la présentation de la procédure d'extraction de contours. Dans le contexte présent cela revient à attribuer plusieurs numéros d'identification au même contour. Ce sont de fausses affectations. Elles sont signalées par la détection du point caractéristique T6.

Un traitement de mise à jour est alors activé en fin de ligne. Il permet d'attribuer un numéro d'identification unique au contour mais il restaure également les informations d'adjacences.

La figure II.12 est un exemple de fausse affectation. Au même contour il a été affecté deux numéros d'identification (PO=3 et PO=6). Après la mise à jour, l'objet (contour) résultant possèdera un numéro unique (PO=3) et toutes les informations d'adjacences (1), (2), (3) et (4) lui seront attribuées.

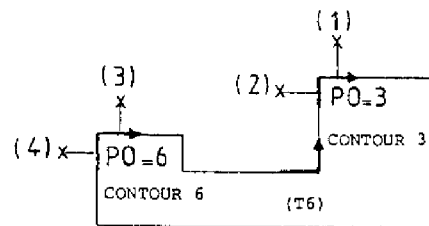


Figure II.12 - Exemple de fausse affectation

II.3.3.4. Traitement de mise à jour

Il est géré par la table de réaffectation TR. Elle représente la suite logique des numéros d'identification des n contours présents dans l'image.

Lorsqu'il n'y a pas de fausse affectation, $TR[k] = k$
 $\forall k \in [1, n]$

Dans le cas contraire, lorsque T6 a été activé, $\exists k \in [1, n]$ à partir duquel $TR[k] \neq k$. Cela signifie qu'un contour a été traité sous deux numéros d'identification différents. Dans ce cas, en fin de ligne, est réalisée la mise à jour des différents marqueurs et tableaux.

i) Mise à jour du tableau TA

TA, tableau binaire, regroupe toutes les informations d'adjacences. Sa mise à jour est faite en fin de ligne lorsqu'une fausse affectation est détectée : Elle permet :

- a/ de regrouper les informations d'adjacences
- b/ de les associer au numéro d'identification choisi,
- c/ de libérer les numéros faussement affectés

ii) Mise à jour des PSI

Elle se fait en deux temps :

a/ tant que $TR \llbracket k \rrbracket = k$, les marqueurs $PS \llbracket J \rrbracket$ et $PS1 \llbracket J \rrbracket$ sont simplement réactualisés :

$$\begin{aligned} PS \llbracket J \rrbracket &\longleftarrow PS1 \llbracket J \rrbracket \\ PS1 \llbracket J \rrbracket &\longleftarrow PS2 \llbracket J \rrbracket \end{aligned}$$

b/ dès que l'on trouve k tel que $TR \llbracket k \rrbracket \neq k$, alors la mise à jour des PSI est fonction de la table de réaffectation TR :

$$\begin{aligned} PS \llbracket J \rrbracket &\longleftarrow TR \llbracket PS1 \llbracket J \rrbracket \rrbracket \\ PS1 \llbracket J \rrbracket &\longleftarrow TR \llbracket PS2 \llbracket J \rrbracket \rrbracket \end{aligned}$$

De cette façon, les numéros d'identification restent compatibles avec la numérotation de TA.

iii) Reprise de la numérotation

La mise à jour du pointeur d'objets PO permet de reprendre une numérotation correcte sans trou.

II.3.4. Procédure de structuration des adjacences

Elle traite des informations d'adjacences mémorisées dans TA. Le but recherché est la répartition des différents contours de l'image en plusieurs niveaux ou vagues. On obtient ainsi un graphe des adjacences.

Le premier niveau ou racine est généralement le fond de l'image. Les niveaux successifs sont déduits par étude des adjacences de la vague en cours.

Notons que conjointement à ces vagues, la procédure spécifie les inclusions simples et multiples.

II.3.4.1. Principe

Il est basé sur l'analyse du tableau TA. Dans une première étape, on recherche les inclusions simples (une seule adjacence avec un quelconque objet ou contour) que l'on stocke dans un vecteur VINS.

Au cours d'une deuxième étape, on construit la première vague d'adjacence. Elle est constituée par tous les numéros d'identification des objets adjacents au fond de l'image (ou au bord si aucun fond ne se détache de l'image).

L'étape trois consiste à rechercher les inclusions multiples (groupement d'objets ne possédant qu'une adjacence unique avec un quelconque élément de la vague en cours) liées aux objets de la vague en cours, et à les mémoriser dans un vecteur VINM. Au sein des groupes d'objets ainsi sélectionnés on détermine également les adjacences respectives de chacun des constituants. Elles sont stockées dans un vecteur VAINM.

La dernière étape permet de générer une nouvelle vague tout en consignnant les informations d'adjacences (numéros d'identification) de chacun des éléments qui la constituent dans une matrice MAD.

Le processus se poursuit par un branchement à l'étape trois et boucle ainsi jusqu'à la détection d'une vague vide qui signale la fin du traitement.

II.3.4.2. Exemples de simulation

Au cours d'une première phase de mise au point, nous avons expérimenté les procédures sur des images simulées. Afin de simplifier la compréhension des résultats, nous avons construit ces images en prenant garde que la valeur du niveau de gris des pixels qui constituent un objet symbolise également son numéro d'identification. Ainsi par exemple, 1 symbolisera à la fois le niveau gris du fond de l'image (lorsqu'il existe) ainsi que son numéro d'identification.

La procédure de structuration des adjacences appliquée à l'image simulée de la figure II.13 permet de mettre en évidence 7 niveaux ou vagues d'adjacences (STAD).

Une interprétation de ces résultats peut être donnée sous la forme d'un graphe d'adjacences, figure II.14.

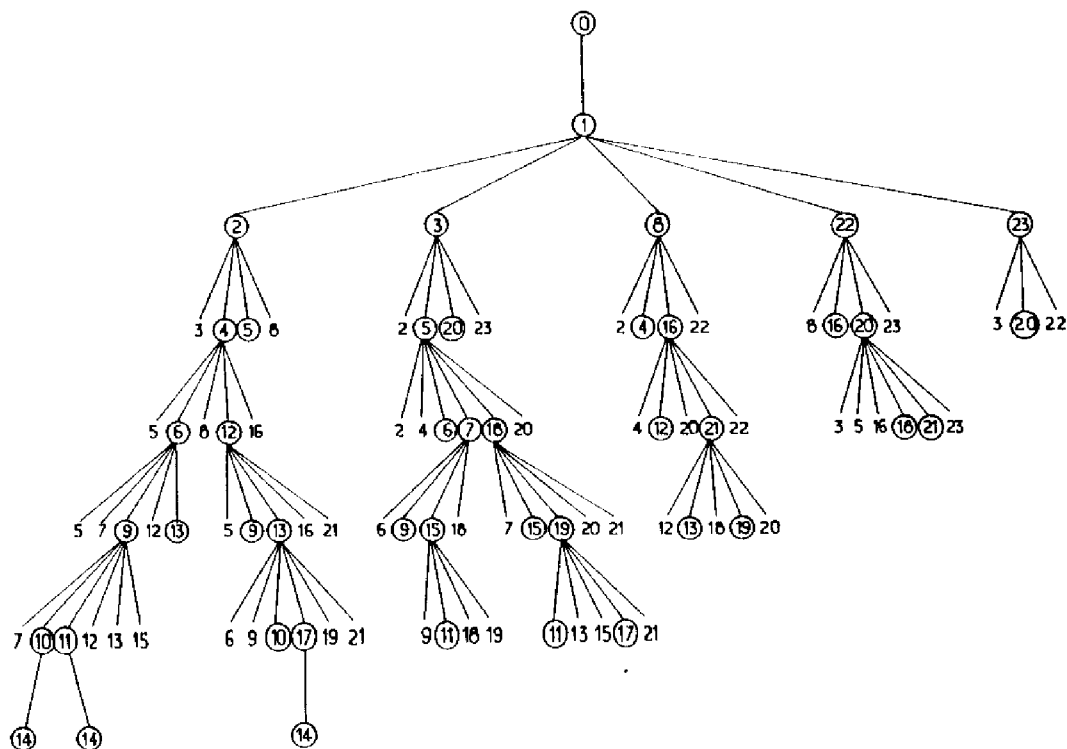


Figure II.14 - Graphe d'adjacences partiellement construit
associé à l'image simulée de l'exemple 1, (figure II.13)

Ce graphe contient les informations d'adjacences associées à chaque contour mais il traduit surtout leur position relative dans l'image.

La racine est l'image elle-même (cadre $\blacksquare$ contour 0)

Les noeuds ($\bigcirc$) sont des contours :

- leurs frères sont des contours qui ont le même niveau d'adjacence ($\textcircled{6}$ et $\textcircled{12}$ par exemple).
- leurs descendants sont des contours qui ont un niveau d'adjacence plus élevé ($\textcircled{9}$ et $\textcircled{13}$ par exemple).

L'exemple de la figure II.15 est différent du précédent dans la mesure où il regroupe plusieurs inclusions simples et multiples.

On peut remarquer notamment en regardant la colonne 2 de VINS (objet 1) que les objets 3, 4 et 7 sont des inclusions simples de l'objet 1. De la même façon 22 et 26 sont inclus dans 17 (colonne 18 de VINS).

Les informations relatives aux inclusions multiples sont consignées dans VINM et VAINM. La colonne 18 de VINM indique par exemple, que les objets 19, 20, 21, 24 et 25 sont inclus dans l'objet 17. Au sein de ce groupement d'objets (19, 20, 21, 24 et 25) on définit également des relations d'adjacences. Elles sont consignées dans VAINM. La colonne 20 stipule par exemple, que l'objet 19 est adjacent aux objets 20, 24 et 25.

Par ailleurs, toutes les informations d'adjacences sont mémorisées dans MAD.

(a)

(b)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

- b) résultats :

VINM et VAINM : vecteurs des inclusions multiples

MAD : matrice des adjacences simples

II.3.5. Réduction du graphe des adjacences

La réduction se fait principalement selon quatre critères. Les trois premiers sont d'une utilisation fréquente [76] alors que le quatrième est spécifique à notre problématique.

i) Critère de dimension

C'est le plus simple à formuler, on se fixe un seuil de dimension en dessous duquel on décide d'éliminer les contours.

ii) Critère de suppression

C'est le cas de l'inclusion simple. L'objet inclus est intégré à la zone homogène qui le contient.

iii) Critère de contraste

Celui-ci est relatif aux niveaux de gris des zones délimitées par un contour. On fixe un seuil de contraste tel que l'on ne souhaite pas garder tout couple de contours adjacents dont la différence des niveaux de gris serait inférieure à ce seuil.

iiii) critère de profondeur

On fait appel ici au capteur complémentaire de la caméra vidéo : le télémètre laser. La stratégie des "tirs laser" doit permettre une dernière réduction du graphe en opérant une fusion des zones adjacentes situées à des distances similaires (par rapport au repère robotcentrique) dans la zone observée. Notons encore une fois que notre objectif premier est la détection et la localisation d'obstacles polyédriques.

II.3.6. Procédure de fusion

Une conséquence de la mise en place de telles méthodes qui visent à éliminer ou à agglomérer des régions élémentaires est sans aucun doute la modification (simplification) de l'espace des contours. Cela a pour effet de remettre localement en cause la description de l'image établie par la segmentation. En d'autres termes, cela signifie qu'il y a création (transformation) de nouveaux contours par fusion de zones élémentaires.

Cette opération est réalisée par une procédure spécifique de fusion que l'on peut diviser en trois séquences :

- recherche des éléments de contour communs aux 2 zones adjacentes à fusionner ;
- élimination de la portion de contour commune ;
- restitution du nouveau chaînage de points correspondant au contour résultant.

Bien évidemment, corrélativement à cette procédure il doit être effectué un réajustement des caractéristiques globales (périmètre, surface etc...).

II.3.7. Paramètres d'un contour

La modélisation d'un objet repose sur l'extraction des caractéristiques paramétriques ou structurelles.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes essentiellement orientés vers l'étude des propriétés métriques (paramètres) des contours. Il existe en effet un très grand nombre de caractéristiques simples (coordonnées, longueurs etc...) ou composites (surface, centre de gravité, axes d'inertie etc...) [75] qui permettent de décrire de façon plus ou moins pertinente un objet.

Nous disposons actuellement d'un ensemble de sous programmes permettant le calcul de paramètres du type suivant :

- périmètre
- moments d'inertie (aire, centre de gravité, etc...)
- rayon maximum et minimum
- et d'un certain nombre de combinaisons des paramètres précédents sous forme de rapport (nombre de lignes/nombre de colonnes, surface du rectangle limitateur/surface du contour réel, etc.

I.4 - CONCLUSION

L'ensemble de ces procédures ont été dans un premier temps écrites en langage APL. Son aspect interactif est un avantage important au niveau de la mise au point. D'autre part, la puissance de ses opérateurs qui travaillent sur des tableaux en font un langage très adapté à la simulation.

A l'issue de cette phase de simulation, nous avons été amenés à transcrire une partie de ces procédures en vue de leur intégration dans le système informatique, à base de microprocesseurs INTEL 8085, embarqué sur le robot mobile HILARE.

Cette étape de transcription en langage Assembleur 80-85 et PLM 80 a été réalisée sur un système de développement du type INTELLEC.

A l'heure actuelle, le système expérimental est doté des procédures d'extraction de contours, de traitement des adjacences, de fusion de contours et de calcul de caractéristiques. Une application directe est la reconnaissance et la localisation de balises lumineuses en vue d'obtenir un repérage absolu du robot mobile HILARE dans une pièce (cf. Chapitre V).

Une étape ultérieure serait donc l'intégration de la procédure générant le graphe d'adjacence afin d'opérer une analyse plus complexe de l'image.

L'ordre de grandeur du temps de calcul et de la place mémoire occupée seront discutés au niveau du chapitre expérimental.

CHAPITRE III

III.1 - INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les algorithmes de traitement d'images multiniveaux sans nous préoccuper de la mise en forme de l'information lumineuse.

Il convient donc de dire un mot sur les transformations nécessaires de cette information lumineuse, afin de pouvoir l'introduire comme donnée dans un système de traitement adapté (ordinateur, processeur de vision).

La première étape est réalisée par les capteurs optoélectroniques qui convertissent l'information lumineuse en signal électrique. En robotique deux types de capteurs sont principalement utilisés. Les caméras "Vidicon" et les caméras "solides". La première partie de ce chapitre est donc consacrée à la présentation rapide de ces capteurs dans le but essentiel d'en dégager pour chacun les avantages et les inconvénients.

La seconde étape peut se scinder suivant deux volets

. Le premier concerne la digitalisation de l'image sans laquelle aucun traitement n'est envisageable. L'image est ainsi échantillonnée en niveaux de gris et apparaît alors sous la forme d'une matrice de $m \times n$ points élémentaires (pixels).

. Quant au second, il n'apparaît pas systématiquement dans tous les traitements de mise en forme. Mais lorsqu'il est présent, il permet d'effectuer un pré-traitement numérique en réalisant une certaine compression des données digitalisées.

En ce qui nous concerne, ces deux niveaux sont présents dans la chaîne des transformations. Ils font l'objet de la seconde partie du chapitre, ce qui donne lieu à une description détaillée du matériel utilisé.

III.2 - LES CAPTEURS OPTOELECTRONIQUES

Deux types de capteurs optoélectroniques sont essentiellement utilisés en robotique.

On trouve en premier lieu les caméras de télévision classiques (tube vidicon) très répandues et d'un coût modique, mais on s'oriente

également pour des applications plus ou moins spécialisées vers l'emploi de caméras à semi-conducteur, plus compactes et plus légères.

III.2.1. Les caméras de télévision classiques.

Le type le plus répandu des caméras utilise un tube de prise de vue Vidicon. Un objectif forme l'image de la scène observée, à l'intérieur d'un tube à vide, sur un écran ou cible photoconductrice qui prend en chacun de ses points une charge électrique proportionnelle à l'éclairement.

Un faisceau électronique, convenablement dévié, explore successivement ces points, créant sur l'électrode de sortie un courant variant avec la luminance du point analysé. C'est le signal vidéo. L'exploration se fait de gauche à droite à la fréquence de 15 625 Hz et de haut en bas à la fréquence trame de 50 Hz. Deux trames entrelacées (312,5 lignes) constituent une image complète (625 lignes).

La figure III.1 montre le schéma d'un tube Vidicon.

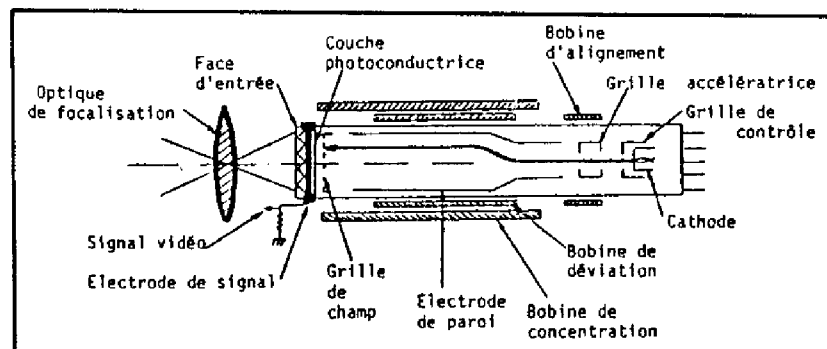


Figure III.1 - Tube Vidicon

Notons que le type d'un tube est en fait déterminé par la nature de sa cible. On trouvera pour exemple, dans le tableau ci-après, le cas des trois principaux tubes ayant un spectre dans le visible.

Type	Nature de la cible	Utilisation
Standard	trisulfure d'antimoine	caméras N et B
Newicon	hétérojonction au sulfure de cadmium	caméras N et B performantes
Plumbicon	oxyde de plomb	caméras couleurs

Il existe bien sûr d'autres procédés, notamment celui d'Orthicon, moins employé, où les fonctions de détection et d'accumulation sont assurées par deux éléments disjoints : une photocathode, et une cible multiplicatrice d'électrons.

Pour de plus amples renseignements concernant ces capteurs, dits classiques, car très usités, on pourra éventuellement se reporter aux ouvrages suivants : [98], [99], [100].

III.2.2. Les caméras à semi-conducteur

Le développement de ce type de caméra est concomitant à l'évolution considérable de la technologie "Solid State". La maîtrise des matériaux semi-conducteurs a en effet permis la mise au point de cibles "solides" matricielles ou unilignes. Selon la nature des éléments photosensibles (photo-MOS, photodiodes) qui les constituent on détermine deux catégories de caméras "solides".

Fonctionnellement elles sont cependant similaires. L'image formée sur la cible est balayée électroniquement afin de fournir une sortie vidéo échantillonnée bloquée. L'amplitude de ce signal pour chaque pixel, est proportionnelle à l'intensité de la lumière incidente intégrée pendant la période de scrutation de l'image.

III.2.2.1. Les caméras à photo-Mos

Le principe de ces premières caméras dites à cible solide est basé sur le concept de transfert de charges dans les semi-conducteurs ou dispositif à Charge Couplée (CCD : Charge Coupled Device) énoncé en 1970 par W.S. BOYLE et G.E SMITH aux Bells Telephone Laboratories [101].

La cible, matricielle ou uniligne, est constituée d'éléments photosensibles, les photo -Mos, qui sont des transistors à grille transparente, (figure III.2).

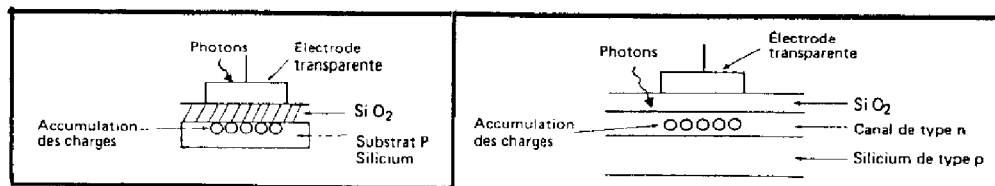


Figure III.2 - Structures de transistors.

Les informations de provenance optiques sont converties, au niveau de chaque grille, en des paquets de charges électroniques par effet optoélectronique

Les propriétés de transfert du dispositif CCD, qui repose sur l'utilisation de registres à décalage analogique à transfert de charges, permettent alors d'effectuer une lecture en extrémité de ligne, ou bien par multiplexage, la lecture de la matrice entière [102], [103], [104].

Parallèlement à ces premiers dispositifs CCD, il a été développé, plus récemment, un procédé CID (Charge Injection Device) pour la réalisation des registres à décalage [105].

Selon la technologie utilisée, on trouvera donc les vocables caméra CCD ou caméra CID.

III.2.2.2. Les caméras à photodiodes

Le capteur est ici remplacé par un réseau monolithique de photodiodes, (figure III.3).

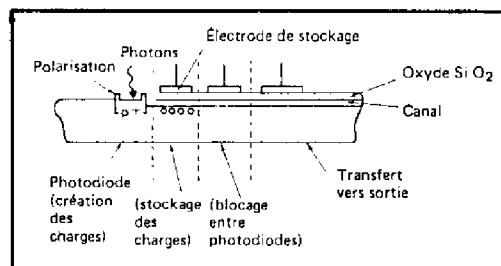


Figure III.3 - Structure de photodiode

Selon la configuration du réseau de photodiodes, on parle de cible matricielle ou uniligne. Chacune des photodiodes constituant la cible peut être accessible par l'intermédiaire d'un transistor MOS qui joue le rôle d'interrupteur.

Dans un premier temps la commutation des transistors MOS permet l'application d'une tension inverse aux bornes des photodiodes, ce qui entraîne le chargement de leur capacité de transition.

Dans un deuxième temps, soit entre deux balayages, la capacité est déchargée d'une valeur égale à la charge instantanée créée par photosensibilité.

A chaque échantillonnage de la diode, la charge intégrée ainsi perdue doit être remplacée au travers de la ligne vidéo. Le signal vidéo résultant est un train d'impulsions de charges proportionnelles en amplitude à l'intensité lumineuse manquant à la diode correspondante.

Le transfert de ces charges s'effectue la plupart du temps par l'intermédiaire de registres à décalage du type BBD (Bucket Brigade Device) dont le principe a été proposé en 1969 par FLJ. SAUGSTER et K. TEER aux laboratoires PHILIPS [106], [107], [108].

Ils peuvent cependant être du type CCD. On trouvera donc, en l'occurrence, les appellations caméra à photodiodes BBD ou caméra à photodiodesCCPD (Charge Coupled Photo-Diode).

III.2.2.3. Les caméras matricielles

Nous allons présenter dans ce paragraphe le processus d'acquisition des informations stockées dans une matrice d'éléments photosensibles, en prenant pour exemple les cas d'une caméra CCD puis d'une caméra à photodiodesBBD.

Notre attention se portera plus particulièrement sur le processus de fonctionnement de la caméra à photodiode puisque c'est cette technologie qui a été choisie pour réaliser le système de vision du robot mobile HILARE.

i) Une caméra matricielle CCD

La figure III.4 représente la structure interne d'une caméra matricielle CCD de résolution $M \times N$.

A chacune des N colonnes est associé un registre à décalage analogique. Ces N registres de transfert vertical sont du type chargement parallèle (M entrées) et sortiesérie. Les N sorties séries qui en découlent sont connectées sur un autre registre à décalage analogique. Ce registre de transfert horizontal est également du type chargement parallèle (N entrées) et sortie série.

L'acquisition de l'image totale se fait par récupération successive des différentes charges électriques accumulées par chaque élément photosensible. Ces charges sont finalement converties en tension par un amplificateur, c'est le signal vidéo.

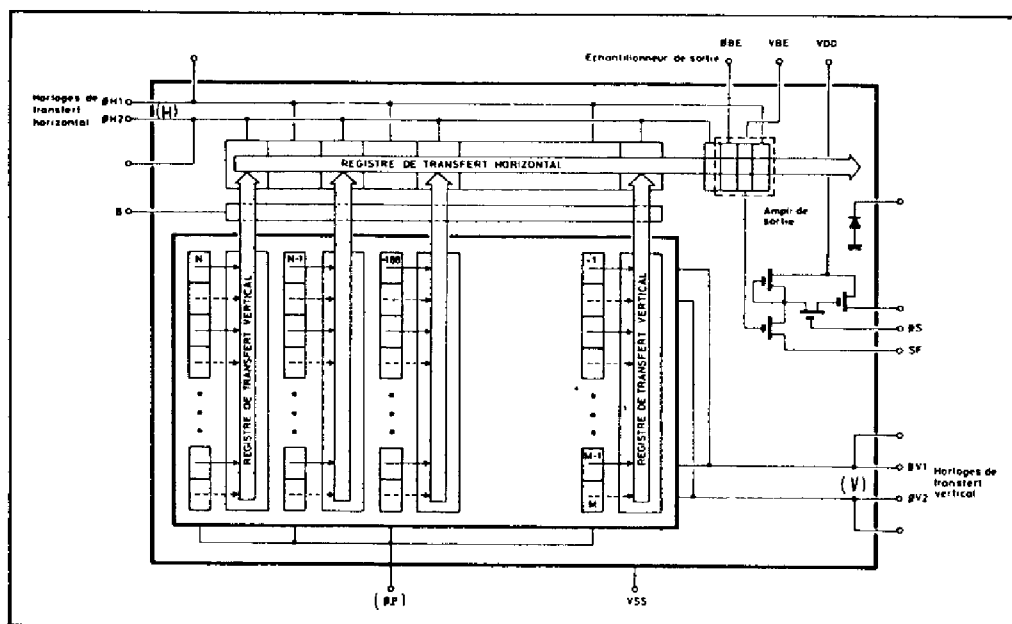


Figure III.4 - Structure interne d'une caméra matricielle CCD

Le séquençement d'acquisition de la matrice entière est le suivant :

- une impulsion de décalage point-photosensible (P) transfère les charges des M x N points dans les N registres colonnes.
- une autre impulsion de décalage vertical (V) assure le transfert des N premières charges dans le registre ligne.
- enfin, N impulsions successives de décalage horizontal (H) permettent la lecture de la première ligne.

L'extraction de l'image totale, se fait en recommençant M fois le cycle : une impulsion de décalage V suivie de N impulsions de décalage H.

ii) Une caméra à photodiode BBD

La figure III.5 représente une matrice de photodiode constituée d'un réseau de lignes vidéo, horizontales et verticales, et de tout un ensemble de signaux de synchronisation.

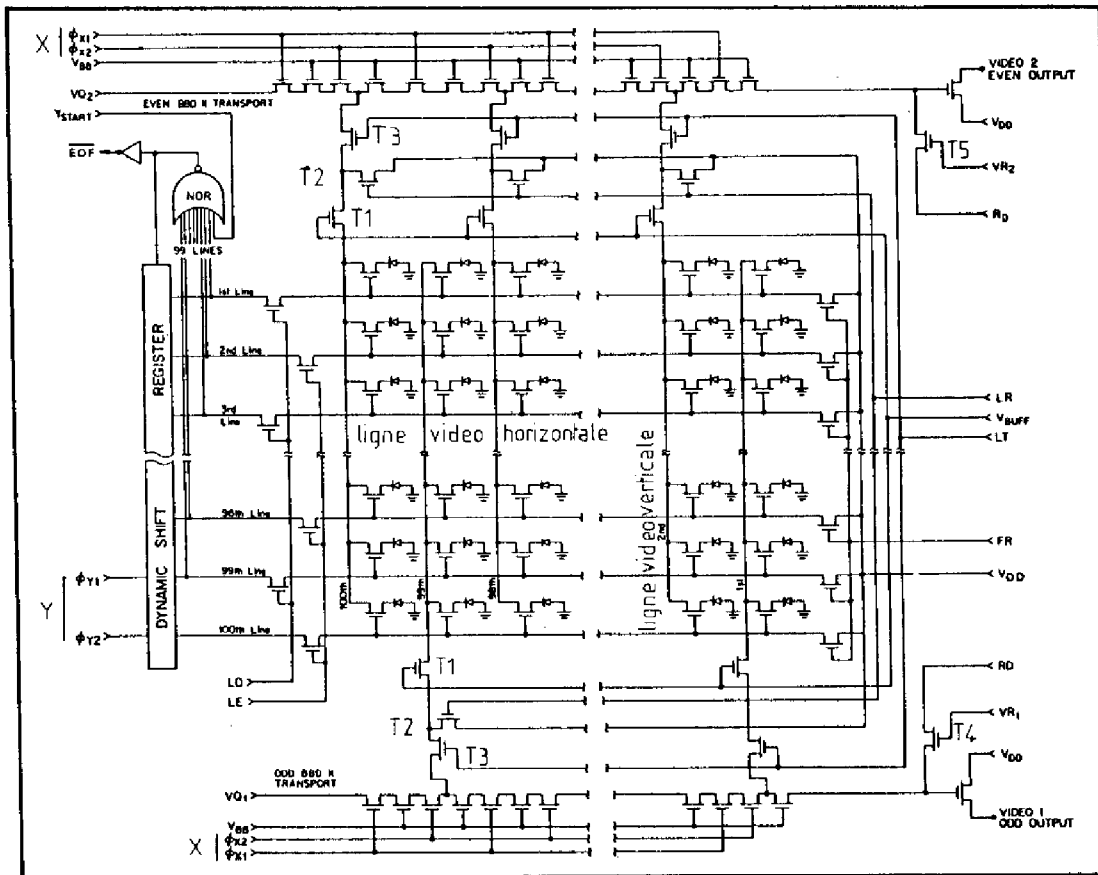


Figure III.5 - Matrice de photodiodes

Chaque pixel est constitué par un transistor MOS et une photodiode. Le transistor joue le rôle d'un interrupteur et assure la connexion entre la photodiode et une ligne vidéo verticale. La validation de cette connexion est déterminée par l'état de la ligne vidéo horizontale correspondante reliée à la gachette du transistor MOS.

Toutes les lignes vidéo verticales sont connectées à une structure de registres à décalage du type BBD.

L'acquisition des informations relatives à une ligne vidéo horizontale se fait en trois étapes.

- la sélection de la ligne proprement dite à l'aide des signaux de synchronisation Y. Cela entraîne la commutation des transistors MOS de la ligne sollicitée. Ainsi que la disponibilité sur les lignes vidéo verticales

des informations de nature analogique associées aux pixels de la ligne horizontale.

- le transfert de ces informations sur les entrées parallèles de la ligne BBD. Cette opération est réalisée par l'intermédiaire des trois transistors MOS: T1, T2 et T3.

T1 permet d'éliminer les bruits dus aux inégalités de seuil des transistors ;

T2 assure la remise à zéro en fin de ligne (LR ; Line Reset)

T3 commande le transfert ligne (L T : Line Transfer)

- enfin, l'acheminement des informations des pixels de la ligne horizontale vers la sortie vidéo. Le transfert d'étage en étage se faisant au rythme des signaux de synchronisation X. L'utilisation du signal VBB permet d'assurer un transfert efficace des charges entre chaque étage.

Le cycle est ainsi renouvelé pour chaque ligne horizontale jusqu'à l'extraction totale de l'image.

Notons qu'il existe en fait deux lignes BBD. L'une traitant les lignes vidéo verticales impaires, l'autre les paires.

Cette technique permet de minimiser les couplages entre cellules de transfert vertical, et par conséquent, d'améliorer la résolution. Précisons qu'elle est également employée sur les caméras CCD.

Les transistors T4 et T5 assurent alternativement le rafraîchissement des sorties vidéo 1 et 2. Ces sorties seront finalement mixées par échantillonnage d'une voie puis de l'autre de manière à reproduire un signal série unique et continu.

La détection de la dernière ligne permet de générer un signal fin de trame, EOF, (End of Frame) permettant de ré-initialiser le cycle et de synchroniser la caméra. La remise à zéro de l'image est effectuée par le signal FR (Frame Reset).

III.2.2.4. Les caméras unilignes

A l'heure actuelle, ces caméras unilignes ou barrettes sont une des solutions les plus développées industriellement.

Leur cible n'est constituée que d'une seule rangée d'éléments photosensibles mais elles possèdent généralement un très grand nombre de pixels. Il s'en suit une définition très bonne pour un coût relativement faible.

Les caméras linéaires sont particulièrement adaptées à l'observation de scènes défilant à vitesse continue. Notons cependant que pour former une image continue par lecture cyclique de la barrette, celle-ci doit être disposée selon un axe perpendiculaire au défilement. D'où leur emploi spécifique pour le contrôle d'objets sur tapis roulant (Figure III.6)

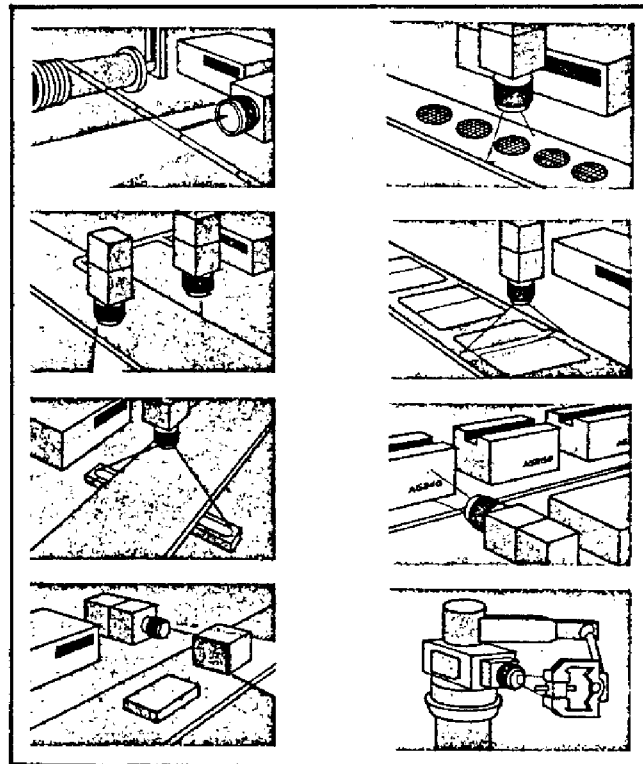


Figure III.6 - Mesure et contrôle par barrettes

III.3 - BILAN SUR LES CAPTEURS D'IMAGES

De plus en plus, les applications industrielles utilisant des caméras à semi-conducteurs, unilignes ou bidimensionnelles, tendent à se multiplier. La limitation à ce développement est aujourd'hui principalement due à ce que les caméras à tube possèdent encore une meilleure définition et une meilleure qualité d'image.

Le nombre d'éléments des matrices photosensibles est effectivement limité, ce qui entraîne des définitions très modestes pour un prix somme toute élevé. Cette limitation, pour les mosaïques carrées, se situe autour de 100 x 100 pour les photodiodes et 512 x 512 pour les photo-Mos. Le taux d'intégration plus élevé des caméras utilisant la technologie CCD est sans aucun doute un atout important.

Pour certaines applications qui requièrent une haute définition, l'utilisation de barrettes comportant un grand nombre de pixels (2048 éléments photosensibles pour la CCD 142 de FAIRCHILD ou la RETICON H) peut être une solution originale.

Un inconvénient quant à la qualité de l'image est souvent le manque d'homogénéité des cibles. Il faut faire appel à du matériel haut de gamme pour disposer de capteurs sans "points noirs" dus à certaines cellules défectueuses.

La qualité de l'image des caméras solides est finalement dépendante de la résolution des cibles. Celle-ci est liée physiquement au pas d'implantation des éléments photosensibles qui varie suivant le cas de 15 à 104 μm .

Les principaux avantages qu'offrent les caméras à semi-conducteurs sont incontestablement un encombrement réduit, une consommation et un échauffement faible, et surtout, une très bonne linéarité de l'image.

Soulignons comme particularité essentielle, l'échantillonnage optique de l'image par le capteur, et les problèmes de synchronismes que cela entraîne lors du traitement numérique. Afin d'éviter une dégradation des informations optiques, l'échantillonnage du pixel puis sa numérisation, doivent être synchrones.

Une caractéristique particulière au CCD, et dont il faut impérativement tenir compte en traitement des images, est que les éléments photosensibles du capteur ne sont pas carrés. Cela se traduit au niveau de l'image par une différence de résolution en X et Y. Cet inconvénient n'apparaît généralement pas sur les matrices de photodiodes qui génèrent des images isotropes.

Enfin, si l'on accorde aux photo-Mos un avantage certain dans l'infrarouge (Imagerie Infrarouge Thermique), il est de bon ton de noter la légère dégradation du signal due aux transferts de charges successifs qui ont lieu un très grand nombre de fois.

Une légère préférence semble donc être accordée aux photodiodes qui présentent généralement un très faible effet d'irradiation, peu d'interférence entre diodes et un "Blooming" (Diminution de la définition spatiale au dessus d'une valeur maximale de l'intensité lumineuse : éblouissement) moins important que pour les CCD.

L'ensemble des critères et remarques que nous venons d'évoquer a présidé au choix de la technologie à photodiode pour le système de vision d'HILARE.

Quoi qu'il en soit, il ne fait aucun doute que dans un proche avenir, grâce aux progrès de la technologie solide, les caméras à semi-conducteurs vont égaler, sinon supplanter les caméras classiques.

III.4 - LE SYSTEME D'ACQUISITION D'IMAGE

III.4.1. Présentation

Le système d'acquisition d'images utilisé fait appel à l'ensemble Caméra/Controller, (MC 520/RS 520), de chez Reticon, [109].

Le réseau sensible RA 100 x 100 de la caméra MC 520 est composé d'une matrice monolithique de photodiodes organisée en 100 lignes de 100 diodes. Les 10 000 diodes qui constituent le capteur sont espacées de 60 μm , centre à centre, et ne présentent aucun défaut.

La caméra est connectée au contrôleur RS 520 qui fournit : l'alimentation continue ; la génération de l'horloge de base ; le traitement du signal vidéo (quantification de l'image) ; un signal de seuil variable qui permet éventuellement d'extraire une image numérique binaire ; et enfin les signaux X, Y, Z nécessaires au pilotage d'un moniteur vidéo.

La carte RSB 6020 joue le rôle d'interface entre la caméra RS 520 et le système SBC/Multibus d'INTEL. Elle effectue un pré-traitement du signal vidéo (formatage et compression des données) qui permet de condenser les informations contenues dans l'image traitée.

Une application typique est présentée Figure III.8 . La détection successive (a, b, c) des transitions en association avec le nombre ou l'adresse de chaque groupe de diodes L ou D (Light = 1, Dark = 0) permet par exemple de déterminer la position de la rondelle ou bien de calculer ses dimensions

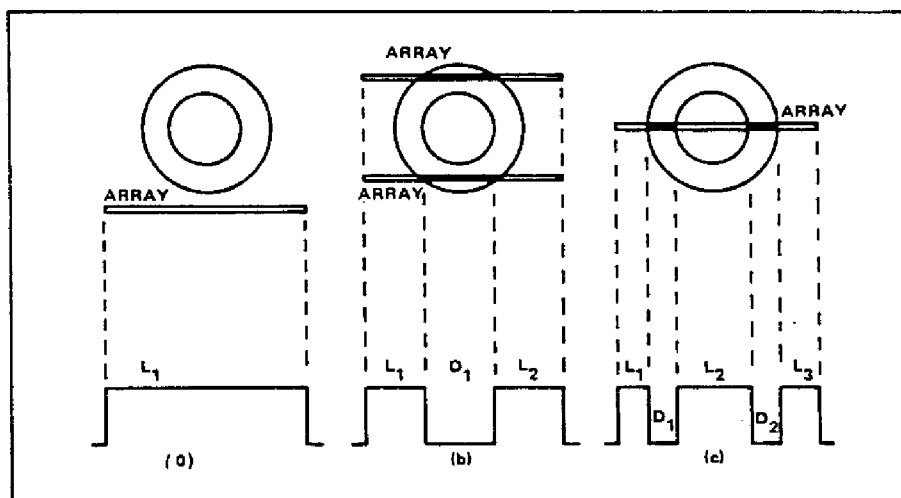


Figure III.8 - exemple d'application

Dans ce genre d'application où la luminosité est discrétisée à deux niveaux (blanc = 1, noir = 0), l'influence de l'éclairage est considérable. Il n'y a pas de règle générale concernant l'éclairage. Cependant, diverses techniques (figure III.9) permettent, selon le type des pièces observées, d'améliorer le contraste.

Pour certaines applications (pièces légères, petites) il peut être souhaitable d'utiliser un fond lumineux (diascopie) de façon à limiter les reflets et les ombres.

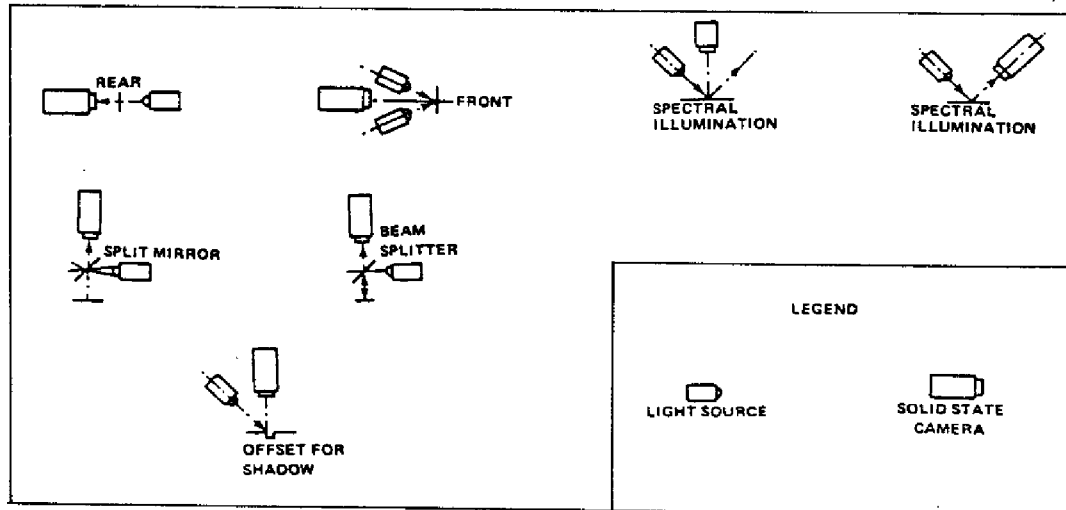


Figure III.9 - Techniques d'éclairage

Il va sans dire que ces méthodes ne sont pas applicables dans le cadre de l'étude de l'univers d'évolution d'un robot mobile.

III.4.3. Le numériseur vidéo

Le système Reticon offre également la possibilité d'utiliser un convertisseur analogique digital (A/D) distribué par la firme TRW. Le TDC 1014 J utilisé est un convertisseur A/D, six bits, fonctionnant selon le principe de conversion . parallèle ou "flash". Il n'utilise pas de circuit échantillonneur-bloqueur. Le TDC 1014 J s'insère dans la plaque "numériseur vidéo" contenue dans le contrôleur RS 520, selon le schéma simplifié de la figure III.10.

Le signal vidéo est converti au rythme des impulsions d'horloge ECLK. Les informations numériques correspondant à la conversion du pixel N sont disponibles sur les sorties du convertisseur pendant la conversion du pixel N + 1.

Ces informations sont ensuite dirigées sur deux registres à entrées parallèles (ODD et EVEN BYTE REGISTERS) qui assurent leur transfert synchrone vers la sortie. Selon la longueur des mots sélectionnée (8 ou 16 bits), le formatage des informations diffère. Quand des mots de 16 bits ont été sélectionnés, la conversion des pixels impairs est dirigée vers le registre de transfert impair (ODD), et celle des pixels pairs vers le registre de transfert pair (EVEN). Quand ce sont des mots de 8 bits qui ont été sélectionnés, alors la même conversion est dirigée sur les deux registres de transfert.

L'utilisation du convertisseur A/D 6 bits, laisse libre 2 bits par byte. Ces deux bits sont alors utilisés pour le transit de l'information binaire, Digital Data et Light Level (Figure III.7). La conversion A/D introduit un retard d'une impulsion d'horloge. Donc pour que les informations binaires apparaissent dans le même byte de sortie, il faut également les retarder. Cela est fait par les deux registres LDAT et DDAT qui assurent la synchronisation avec l'horloge de conversion.

La gestion de cette plaque est faite principalement par le biais des trois signaux logiques suivants :

- FEN : signal synchro trame
- LEN : signal synchro ligne
- CCLKD : horloge d'échantillonnage pixel

Notons que selon l'option choisie (INT ou EXT), la conversion peut être interne ou externe. Dans les deux cas, la commande de conversion autorise la numérisation des 10 000 pixels de l'image (matrice 100 x 100), et leur transfert jusqu'au connecteur de sortie. On peut ainsi quantifier une seule image ou bien plusieurs en se synchronisant sur le signal FEN.

La validation de transfert des pixels en sortie est réalisée par les signaux STATUS et DATA READY.

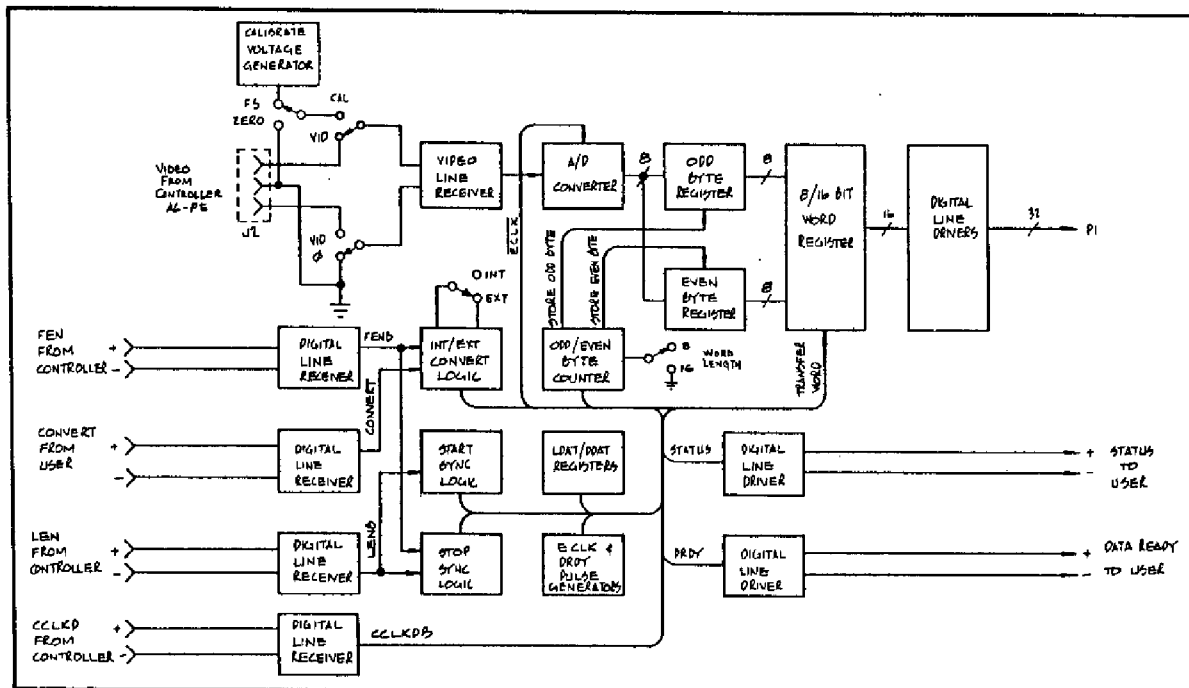


Figure III.10 - Schéma-bloc simplifié de la carte
"numériseur vidéo"

III.4.4. - La carte RSB 6020

Les informations délivrées par la caméra, selon une cadence somme toute importante, sont très nombreuses et le plus souvent redondantes. Il y avait donc une certaine incompatibilité (temps de rangement, place mémoire) avec l'utilisation d'un micro-processeur. Afin de pallier cet inconvénient, Reticon a mis au point une carte qui joue le rôle d'interface entre la caméra et le microprocesseur. Cette carte RSB 6020 est bâtie autour d'une configuration INTEL SBC. Son diagramme de fonctionnement est présenté figure III.11. Cette carte permet le formatage et la compression des données.

Les signaux issus de la caméra sont dirigés sur un comparateur qui compare l'intensité lumineuse de chaque photodiode avec la précédente, de manière à détecter une transition.

Lorsqu'une transition est détectée, l'adresse de la dernière photodiode (ou le nombre de photodiodes) du groupe, qui est donnée

par le comparateur, et la valeur quantifiée de l'intensité lumineuse du groupe de photodiodes, sont mémorisées.

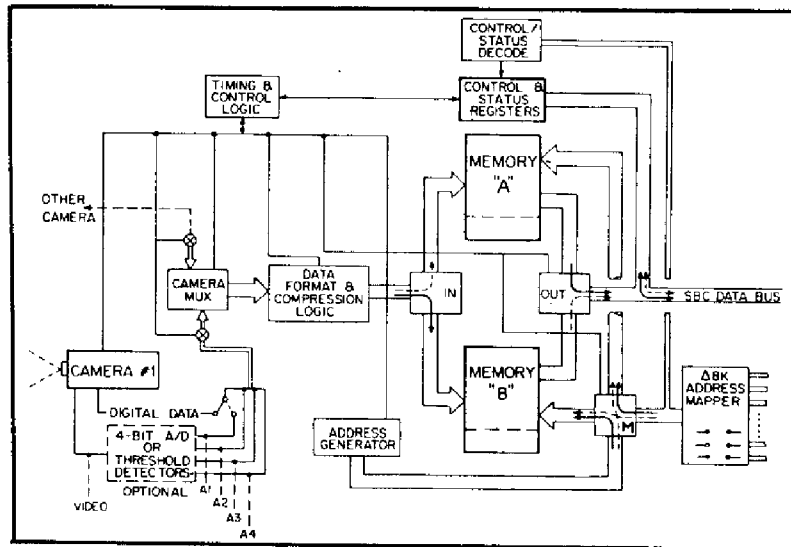


Figure III.11 - Schéma bloc de la carte RSB 6020

Les informations relatives à chaque transition occupent deux bytes (Figure III.12.a). 12 bits sont réservés au codage de la position du groupe (adresse ou nombre). L'état du groupe est indiqué par le bit 15 dans le cas binaire, ou bien par les bits A1, A2, A3 et A4 lors de l'utilisation d'un convertisseur A/D.

Ces opérations de compression et de formatage sont regroupées dans le bloc DATA FORMAT AND COMPRESSION LOGIC de la figure III.11.

Pour chaque transition, les deux bytes ainsi définis sont dirigés vers le démultiplexeur (IN) pour être rangés en mémoire. La zone mémoire de la carte RSB 6020 est divisée en deux moitiés "A" et "B" indépendantes, de 512 bytes chacune. L'adresse mémoire ainsi que le choix de la demi-mémoire recevant les informations sont contrôlés par le compteur d'adresse (ADDRESS GENERATOR) et le multiplexeur d'adresse mémoire (M).

Les transitions sont donc empilées dans une demi-mémoire, "A" par exemple, au fur et à mesure de leur détection. A la fin du balayage ligne, le nombre total des transitions stocké pour chaque caméra est mémorisé dans les deux octets réservés à cet effet. (Figure III.12.b). Lorsqu'une seule caméra est utilisée, le contenu des deux bytes est identique.

A cet instant les deux multiplexeurs (IN) et (OUT) sont commutés et les données du balayage suivant sont alors mémorisées dans la demi-mémoire "B", tandis que la demi-mémoire "A" est connectée au multibus du système SBC. Le bloc TIMING AND CONTROL LOGIC réalise le cadencement et le contrôle de toutes ces opérations.

La carte RSB6020 utilise une zone de 528 octets dans l'espace mémoire du SCB. Sa localisation est permise grâce aux clés du "localiseur" d'adresse (ADDRESS HAPPER).

La répartition des 528 bytes (figure III.13) se fait de la façon suivante :

- 512 de ces bytes reçoivent alternativement le contenu des deux demi-mémoires "A" et "B". Rappelons que 510 octets sont réservés au stockage des transitions (SCAN DATA), et 2 octets au rangement du nombre de transitions (SUMMARY). Le formatage et la taille des demi-mémoires autorise donc un stockage maximum de 255 transitions.

- les 16 bytes restant sont employés à la mémorisation des registres d'état, de commande et de contrôle.

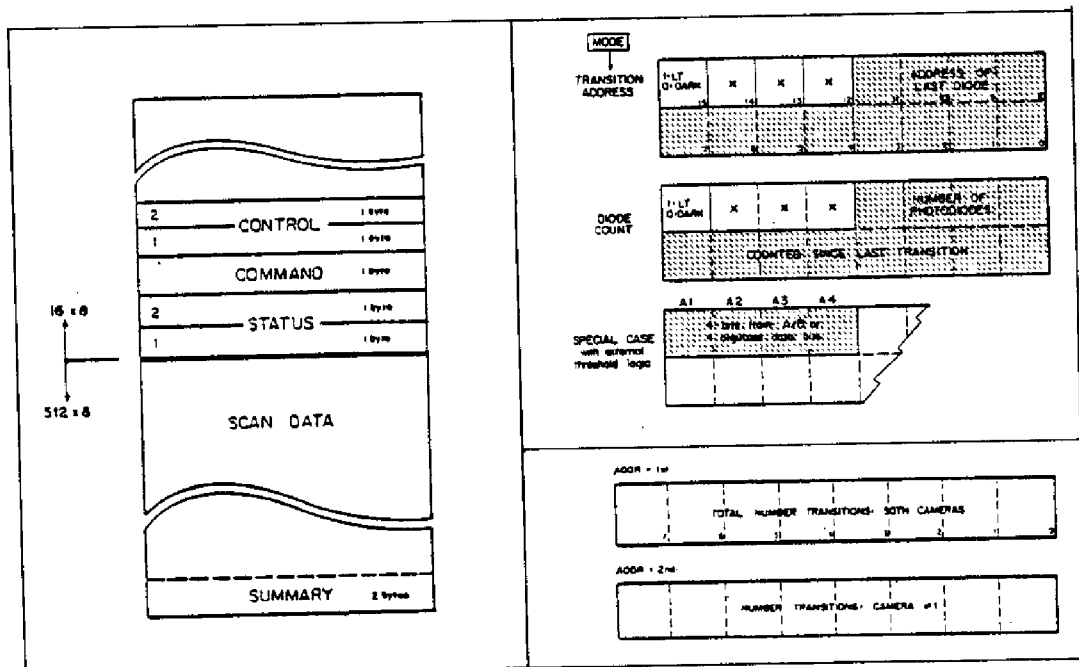


Figure III.13 - Organisation mémoire.

Figure III.12 - Formatage des données.

III.5 - CONCLUSION

Le critère qui a prévalu au choix de ce système d'acquisition d'image a été incontestablement le gain de place mémoire qu'il autorise. Ce critère, généralement très important pour tout système informatique, l'est d'autant plus lorsque celui-ci est embarqué.

Au lieu de mémoriser systématiquement des 10 000 points de la matrice de photodiode, le système RETICON ne mémorise que les points significatifs (transitions) de chaque ligne de l'image.

Notons cependant que le temps de rangement des informations d'une ligne est lié au nombre de transitions. En d'autres termes cela signifie que le temps de transfert des données stockées dans la zone SCAN DATA vers la mémoire du microprocesseur, peut être supérieur à celui du balayage de la ligne en cours. La conséquence de cet état est que toutes les lignes balayées durant cet intervalle de temps (fin du balayage de la ligne courante - fin de transfert des données de la ligne précédente) seront ignorées.

Ce phénomène apparaît lorsque l'on traite des images binaires complexes ou plus généralement des images multiniveaux.

Précisons d'autre part que le balayage de la matrice de photodiode est continu. Cela signifie que l'on ne peut pas accéder à une ligne particulière autrement que par un balayage cyclique de la matrice.

Un problème se pose donc pour faire l'acquisition d'une image de complexité quelconque, sans perte d'information.

Afin de résoudre le problème évoqué ci-dessus, nous avons développé un programme d'acquisition et de rangement des données de chaque ligne selon un pas adaptatif. Dans le cas d'une image simple, une seule passe image est nécessaire. Dans le cas contraire, le pas (nombre de passe image) s'incrémente dès qu'il y a perte d'informations. Le nombre de passe image est donc indéterminé a priori.

Dans le cas, par exemple, d'une acquisition en deux passes "image" (pas = 2), on mémorisera toutes les informations des lignes impaires lors de la première passe puis toutes celles des lignes paires lors de la seconde passe.

Une contrainte évidente requise par ce mode de fonctionnement est l'immobilité de la caméra et des obstacles, durant tout le temps d'acquisition de la scène.

Au regard de nos hypothèses de travail, on ne relève cependant aucune incompatibilité notoire à appliquer une telle procédure. En effet, les prises de vue se font à l'arrêt, les obstacles étant fixes.

On notera enfin que le gain de place mémoire se fait sensiblement au détriment du facteur temps.

.

CHAPITRE IV

IV.1. INTRODUCTION

Le système de vision du robot HILARE est doté d'un ensemble caméra, télémètre qui doit lui permettre de percevoir l'univers 3D environnant. Le télémètre laser, principalement utilisé en tant que capteur complémentaire de la caméra, doit fournir des informations sur la distance séparant le robot des obstacles se trouvant dans son univers d'évolution.

Dans ce cas, la stratégie de tir laser doit être directement induite par les résultats obtenus par les algorithmes de traitement d'images. De fait, l'espace d'évolution du robot ne sera exploré par le télémètre que de façon ponctuelle (mesure de certains points significatifs de chaque zone). Ceci a pour but de réduire le nombre de téléméasures et, a fortiori, le temps des traitements qui en découlent.

Néanmoins, le télémètre reste un capteur autonome, en ce sens qu'il lui est possible d'opérer selon diverses stratégies (balayage systématique de l'image, d'une zone, etc...). Notons, cependant, qu'une exploration complète (azimut + site) de l'environnement du robot, par le seul biais du télémètre, s'avère très pénalisante au point de vue temps./121/

Toutefois, si l'on se restreint à un univers d'évolution idéalisé où les obstacles sont des polyèdres droits, il peut être intéressant d'utiliser ce type de capteur pour la détection d'obstacles. (CHAP. V.1)

Ce procédé d'analyse de l'environnement du robot suppose évidemment la mise en place d'une structure mécanique susceptible de recevoir les deux capteurs complémentaires.

L'étude d'une telle structure est proposée dans la seconde partie de ce chapitre. La première étant réservée à une description du télémètre laser.

IV.2. LE TELEMETRE LASER

IV.2.1. Rappels sur le fonctionnement d'un laser

A l'origine, le LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, était considéré comme un amplificateur de lumière. T.H. MAIMAN obtint le premier, en Juillet 1960, l'effet laser avec un rubis synthétique. Aujourd'hui, c'est plutôt en tant qu'oscillateur qu'il est universellement connu.

Un laser est principalement constitué de trois éléments indispensables à son fonctionnement, [110], [111]:

- le corps actif (source de l'effet laser) ;
- la source de pompage (inversion de population) ;
- la cavité (caisse de résonance).

Il existe une grande diversité des lasers, liée notamment au corps actif utilisé. Celui-ci peut être solide (les atomes du chrome dans le rubis, les atomes du néodyme dans le grenat, les semiconducteurs comme par exemple l'arséniure de gallium), gazeux (neutre comme le néon, ou ionisé comme l'argon), ou bien liquide (des colorants organiques).

Les propriétés du rayonnement laser sont remarquables. Il est :

- monochromatique (longueur d'onde ("couleur") bien définie) ;
- directif (divergence très faible) ;
- cohérent (onde lumineuse régulière) ;
- et possède, enfin, une très grande brillance.

Ces propriétés ont contribué au succès que l'on connaît, tant dans le domaine de la recherche, que celui de l'industrie.

Les applications de l'effet laser, [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118] couvrent, en effet, les domaines aussi nombreux que variés, comme la

physique des plasmas, les télécommunications, le soudage, l'usinage, la métrologie, la biologie et la microchirurgie, ou bien la vision.

IV.2.2. Le principe du télémètre laser

La source laser utilisée par le télémètre EUMIG LD 151HS est un semiconducteur Ga-As (Arséniure de Gallium), figure (IV.1).

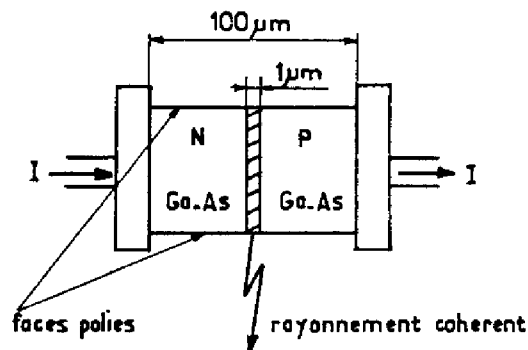


Figure IV.1. - Principe du laser à semiconducteur

Les lasers à semiconducteurs ont fait leur apparition en 1962 ; l'élément actif est constitué par une population dense d'électrons dans un cristal semiconducteur.

- Le milieu amplificateur est une jonction P.N dont la zone active a une épaisseur très faible (1 µm).

- Le pompage est assuré par le passage d'un courant électrique de forte intensité (quelques centaines à quelques milliers d'ampères par cm²).

- La cavité résonante est constituée par deux faces polies du matériau semiconducteur.

Le schéma de principe du fonctionnement du télémètre est donné figure (IV. 2). La diode laser Ga-As est activée par un générateur d'impulsions électriques. Elle émet des rayons infra-rouge qui sont focalisés par une optique émettrice. Une partie du rayon reflété par l'objet visé traverse l'optique

réceptrice et atteint, ensuite, une photodiode qui fournit un signal électrique de réception.

L'intervalle de temps s'écoulant entre l'émission et la réception est intégré électriquement ; la valeur maximale de la tension électrique obtenue constitue une grandeur proportionnelle à la distance mesurée.

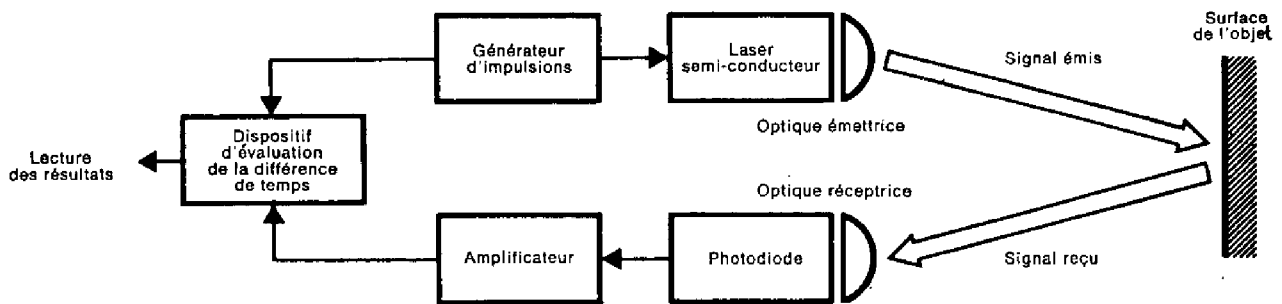


Figure IV.2. - Schéma du principe de fonctionnement

IV.2.3. Caractéristiques du télémètre

Le télémètre laser est constitué physiquement par deux blocs dissociés :

- la tête de mesure, qui assure l'émission et la réception des rayons infra-rouge, fournit un signal électrique à l'image de la distance mesurée ;

- l'appareil de commande convertit ce signal, de manière à disposer finalement de la mesure de distance sous forme décimale (afficheurs LED 7 segments) ou BCD. Ce bloc permet, en outre, d'accéder aux différents signaux de commande et de synchronisation.

i) la tête de mesure

dimensions 200 x 160 x 90 mm

poids 3 Kg

Emetteur :

diode laser Ga-As

longueur d'onde 904 nm

surface rayonnante 0,23 x 0,23 mm²

largeur de la valeur moyenne d'impulsion 20 ns

fréquence des impulsions 250 Hz

Optique Emettrice :

fente d'émergence 68 mm

distance focale 168 mm

divergence minimale du faisceau 1,4 mrad (0,08°)

Récepteur :

diode PIN au silicium

préamplificateur FET

Optique Réceptrice :

fente d'incidence 68 mm

distance focale 53 mm

ii) l'appareil de commande

dimensions 320 x 220 x 90 mm

poids 3,7 Kg

tension d'alimentation 220 VAC ou 12 VDC

consommation d'énergie 22 W

Ce bloc contient, en outre, toute la logique de commande du télémètre. On peut distinguer trois fonctions particulières :

- la séquence de comptage ;
- la séquence de tir ;
- la séquence de saturation.

Une étude plus approfondie du fonctionnement du bloc de contrôle nous a permis de dégager un schéma synoptique (figure IV.3), ainsi qu'un diagramme temporel (figure IV.4), auxquels nous nous référons pour expliquer le rôle de ces trois séquences. Celles-ci ont été détaillées dans notre rapport de stage DEA-EEA 119 ; aussi, dans le cadre de ce mémoire, nous nous bornerons à une présentation succincte de chacune d'elles.

Séquence de comptage, figure (IV.4.a)

Elle permet l'estimation de la distance à partir des deux signaux, (1) et (2), délivrés par la tête de mesure.

- La durée t du signal (2) est liée à l'éloignement de la cible (par exemple, $t = 35 \mu s$ pour 50 m).

- Les deux signaux (1) et (2) permettent de déclencher et d'arrêter une séquence de comptage "élémentaire" toutes les 1,64 ms.

- A chacune de ces séquences, une mesure élémentaire est évaluée. Compte-tenu des différents paramètres du laser (période des signaux (1), (2) et du quartz (70 ns)), cette mesure correspond à un certain nombre d'impulsions du quartz.

- Une mesure de la distance réelle est présentée toutes les 16,4 ms. Elle correspond à la somme de 10 mesures élémentaires consécutives. Pour une distance de 50 m, le nombre d'impulsions (somme des mesures élémentaires) du quartz pris en compte est de 5000, ce qui correspond à une échelle de 1 cm/impulsion.

- En conséquence, l'erreur sur la mesure de distance peut varier de 1 à 10 cm.

- Notons que cette erreur s'avère inférieure à celle avancée par le constructeur. Expérimentalement (§ IV.2.3), nous avons trouvé une erreur maximum de l'ordre de 6 cm.

Séquence de tir, figure (IV.4.b)

Elle consiste, en fait, à générer à partir de (3) des impulsions périodiques (12) qui assurent, d'une part le transfert des informations sur les sorties BCD par (18) et, d'autre part, la remise à zéro des compteurs par (15) avant l'évaluation d'une nouvelle mesure.

Séquence de saturation, figure (IV.4.c)

Lorsque le signal capté par le récepteur est trop faible ou nul (cible trop éloignée par exemple), un dispositif électronique simple permet la génération d'un signal de détection de saturation (20) appelé Sat, figure (IV.3). Ce signal, Sat, est à l'origine de la remise à zéro (R.A.Z.) des compteurs par (15) et de l'affichage d'un zéro sur les sorties BCD par (18).

Les signaux logiques externes de commande sont au nombre de trois. Une sortie Ready et deux entrées Speicher et Reply. Ces signaux autorisent le pilotage du télémètre par un calculateur. Leurs fonctions sont spécifiées sur la figure (IV.5).

IV.2.4. Performances du télémètre

Afin d'adapter le télémètre aux contraintes imposées par notre utilisation, nous avons été amenés à effectuer des modifications relatives, d'une part à la mesure de distance et, d'autre part, à la dimension du faisceau laser à l'émission.

. Sur le système initial, les compteurs, qui permettent d'évaluer la mesure de distance, ne prenaient en compte qu'une impulsion sur dix du signal d'horloge de base (15 MHz).

Ceci avait pour conséquence de présenter à l'utilisateur des mesures dont l'unité était le décimètre (1 dm/10 impulsions du signal de base). Pour accéder aux centimètres, nous avons attaqué les compteurs directement avec le signal de base (Cf. séquence de comptage).

. Le diamètre du faisceau laser émetteur est de 75 mm. Ce qui pose, l'on s'en doute, certains problèmes pour une analyse ponctuelle. Pour pallier cet inconvénient, nous utilisons un cache muni d'un trou concentrique permettant de réduire le diamètre du faisceau à 16 mm [119].

De manière à tenir compte des éventuelles variations de performance du télémètre (perte de puissance due au cache, etc...), nous avons procédé à son étalonnage.

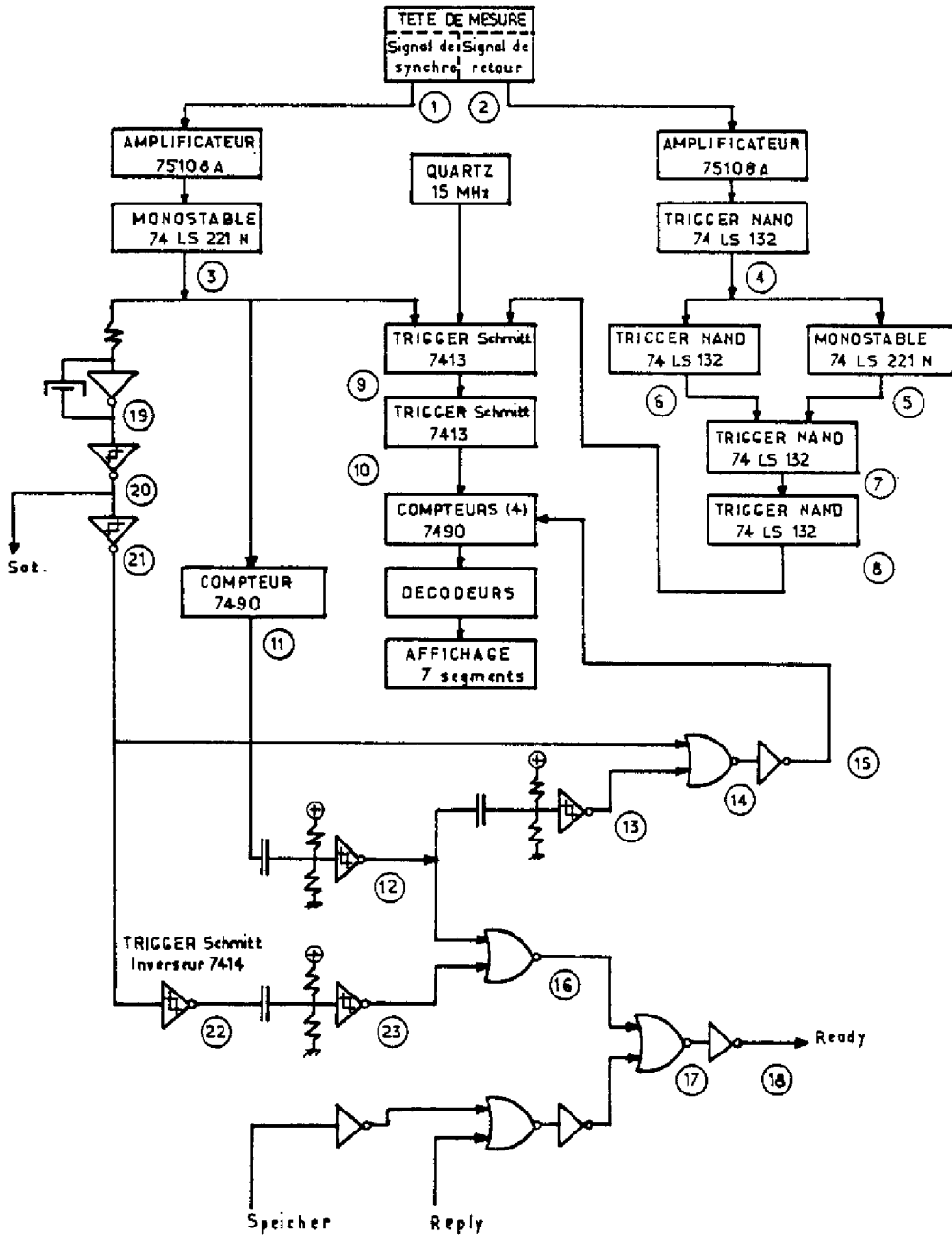


Figure IV.3. - Schéma synoptique du télémètre laser

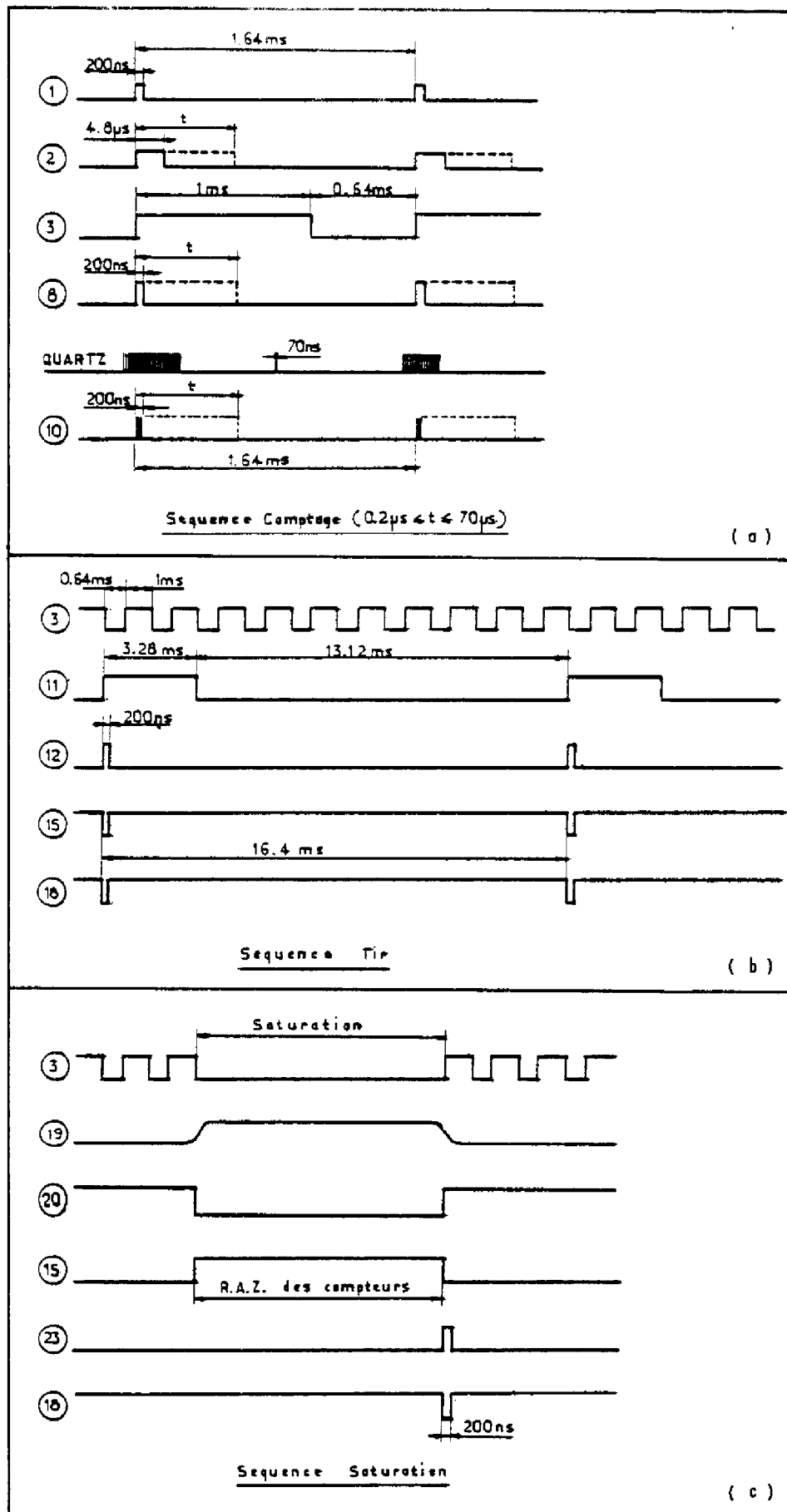


Figure IV.4. - Diagramme temporel

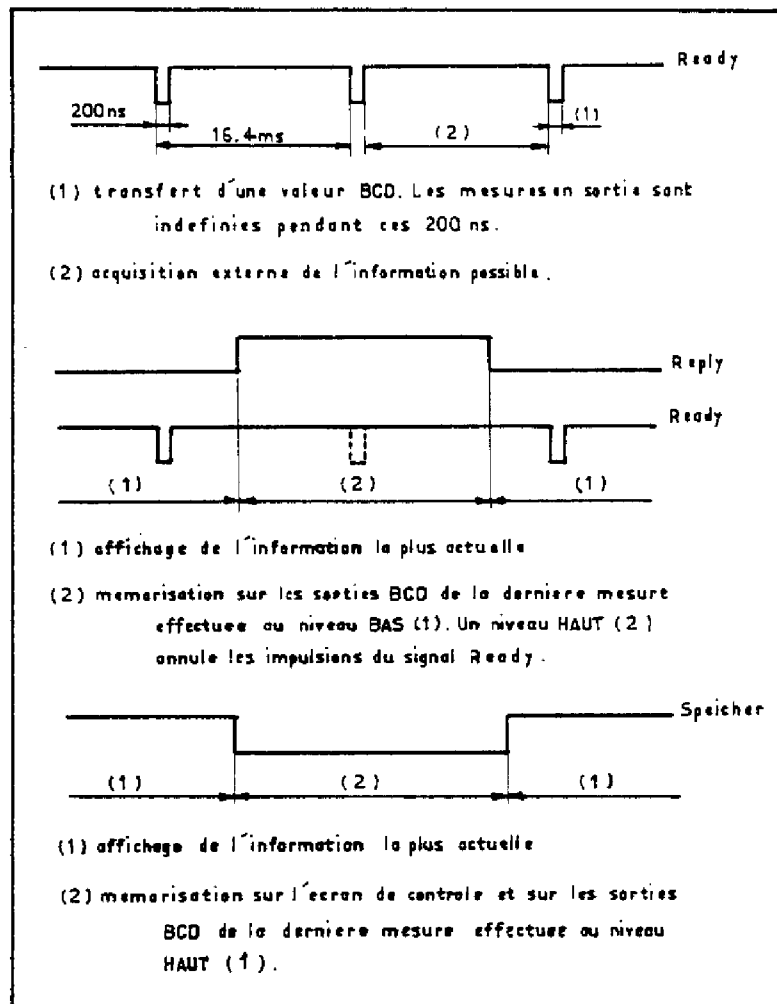


Figure IV.5. - Signaux de synchronisation

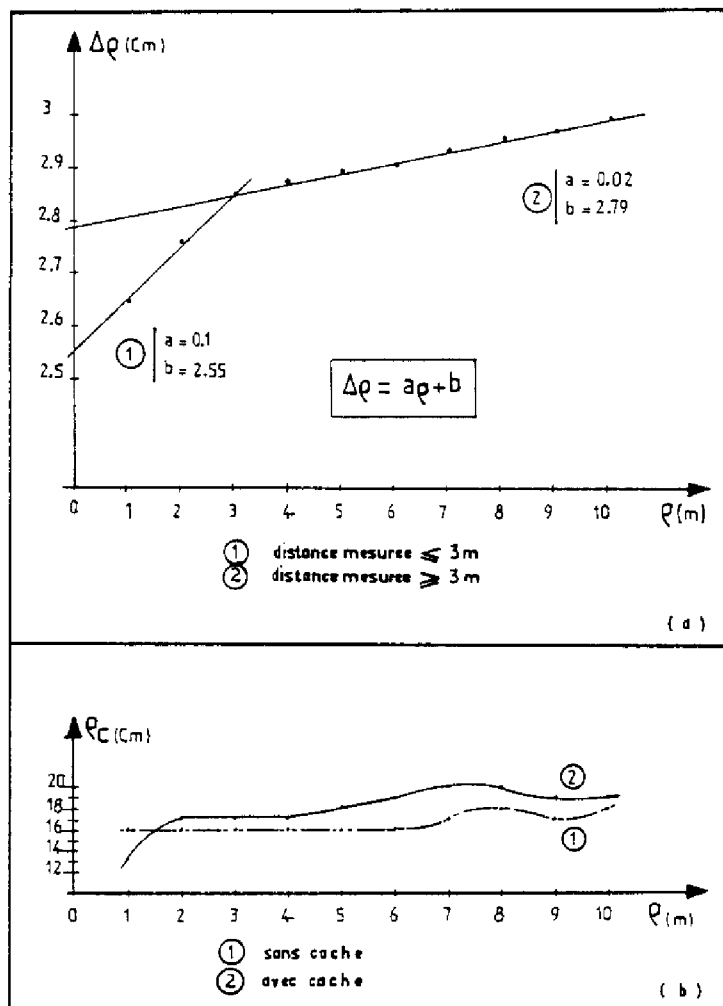


Figure IV.6. - Précision du télémètre laser

a) erreur absolue

b) facteur de correction

Il apparaît une erreur pratiquement constante ρ_c , à laquelle vient s'ajouter une erreur absolue $\Delta\rho$. Pour cette dernière, si on réalise une approximation linéaire par partie, on observe deux zones de variations de part et d'autre de la distance $\rho = 3$ m.

Ces résultats sont consignés sur les graphiques de la figure (IV.6). Finalement, pour une valeur mesurée ρ_i , la valeur à considérer compte-tenu du facteur de correction (ρ_{ci}) et de l'erreur absolue ($\Delta\rho_i$) est :

$$\rho = (\rho_i \pm \Delta\rho_i) - \rho_{ci}$$

Notons que l'on peut s'affranchir de l'erreur ρ_c en reculant l'origine choisie durant l'expérimentation. La nouvelle origine ($\rho_c = 0$) correspond au fond du laser.

IV.3. LE SYSTEME CAMERA/LASER

IV.3.1. Position du problème

Le télémètre laser doit être capable d'explorer toute la scène observée par le champ de la caméra. Il doit, en particulier, pouvoir pointer sur tout point de la scène.

Rappelons que la caméra utilisée est une caméra dite à "cible solide". La cible est composée d'une matrice de 100 x 100 photodiodes qui représentent les "pixels" de l'image. Il y a donc une correspondance directe entre un point de la scène observée et l'élément sensibilisé sur la matrice.

Connaissant la position de ce pixel sur la matrice de photodiodes, le télémètre doit être capable de pointer sur le point correspondant dans la scène observée, et cela, indépendamment de la distance.

Pour s'affranchir de cette contrainte, il apparaît impératif de confondre les axes optiques de la caméra et de la cellule émettrice du télémètre.

Le problème à résoudre reste cependant celui de la déflexion du faisceau laser. Il existe, bien sûr, plusieurs méthodes de déflexion des rayons lumineux. On peut, cependant, les classer dans les trois catégories suivantes :

- déflexion mécanique ;
- déflexion ultrasonore par effet Bragg ou Raman-Nath ;

- déflexion électrooptique par action d'un champ électrique sur l'indice d'un solide ou d'un liquide. /120/

Compte-tenu des facilités relatives de mise en oeuvre, c'est le principe de déflexion mécanique qui a été adopté. Plusieurs solutions ont, bien sûr, été envisagées.

IV.3.2. Solutions envisagées

Parmi les solutions étudiées, nous citerons en premier lieu celle utilisant la permutation de la caméra et du télémètre après chaque prise de vue, figure (IV.7). Dans ce cas, le télémètre et la caméra doivent, en sus, être articulés autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal pour assurer respectivement le balayage en azimut et en site.

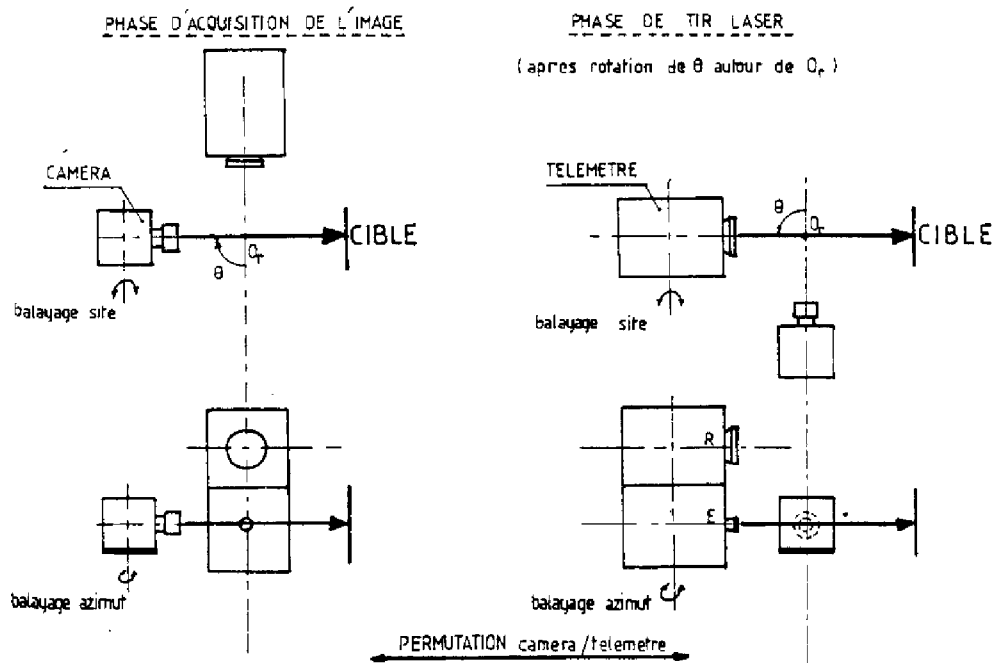


Figure IV.7. - Solution avec permutation CAMERA/TELEMETRE

Nous pouvons également mentionner la solution faisant appel à un miroir escamotable, figure (IV.8). Celui-ci est retiré avant chaque prise de vue, de manière à ne pas rester dans le champ de la caméra. Lorsqu'il est en place, le miroir escamotable doit, en plus, assurer la déflexion en azimuth et en site du faisceau laser.

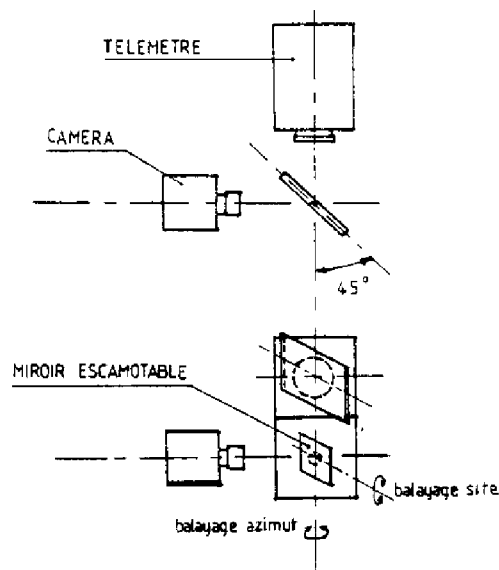


Figure IV.8. - Solution utilisant un miroir escamotable

Toutes ces solutions qui nécessitent un déplacement mécanique, avec somme toute un recalage précis, sont très pénalisantes en temps. De plus, les difficultés liées à la conception, ainsi qu'aux problèmes d'inertie, sont très importantes.

Ces solutions ont donc été momentanément abandonnées et notre choix s'est porté sur une structure mécanique de conception plus simple, assurant un compromis entre la nécessité de confondre les axes optiques, le facteur temps et la nature de l'univers d'évolution du robot. La structure

retenue est schématisée sur la figure (IV.9). La caméra et le télémètre sont disposés selon deux plans verticaux et orthogonaux. A l'intersection de ces deux plans, deux miroirs permettent la déflexion des faisceaux émission et réception du télémètre vers la scène observée par la caméra. Cette dernière est placée entre les deux miroirs, de telle façon que ceux-ci ne fassent pas obstacle au champ de la caméra. En position de repos, les miroirs font un angle de 45° avec les axes de la caméra et du télémètre.

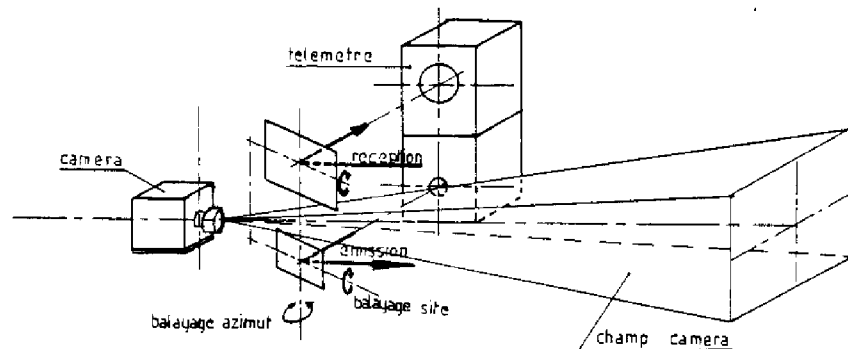


Figure IV.9. - Solution adoptée utilisant deux miroirs mobiles non escamotables

IV.4. MISE EN PLACE DE LA STRUCTURE DEFLECTRICE

IV.4.1. Modélisation de la structure

Le choix de la structure ayant été arrêté, nous nous sommes attachés à définir les positions relatives des différents éléments, qu'ils soient fixes (caméra, télémètre), ou mobiles (miroirs), ainsi que la surface utile de réflexion de chacun des deux déflecteurs.

Pour cela, nous avons simulé la structure, en associant à chaque élément un repère orthonormé, figure (IV.10).

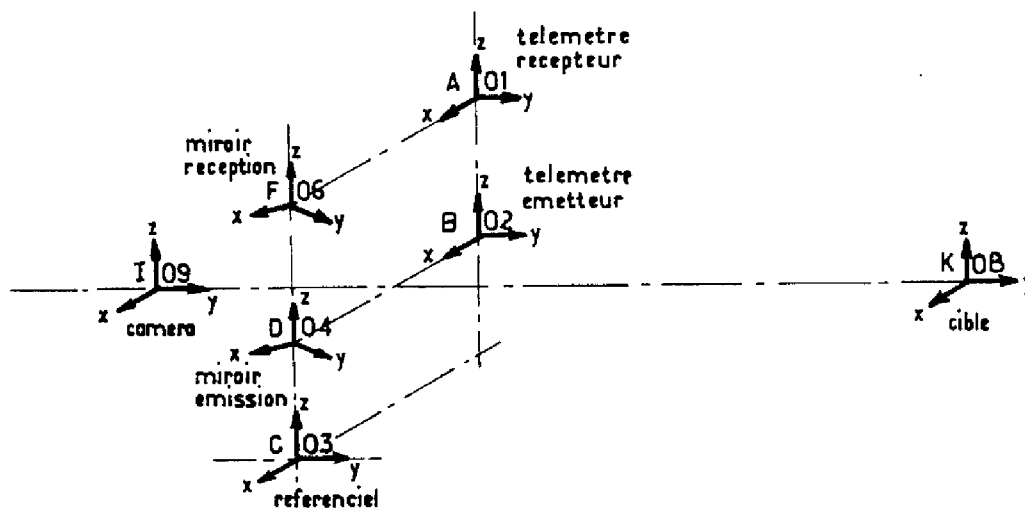


Figure IV.10. - Simulation de la structure

L'ensemble des positions relatives de chaque élément est modélisé par une chaîne de repères représentée par le descriptif de la figure (IV.11.).

Tous les éléments sont référencés par rapport au repère C 03 associé au socle de la structure.

La position finale des miroirs émission (H 08) et réception (L 0C) est définie par rapport à leur référence de repos respective, D 04 et F 06.

Une vue schématique de la structure ainsi modélisée est donnée figure (IV.12.).

Du point de vue informatique, cette modélisation est basée sur l'utilisation de Fonctions Primitives Spécialisées (F.P.S.) pour l'analyse structurale.

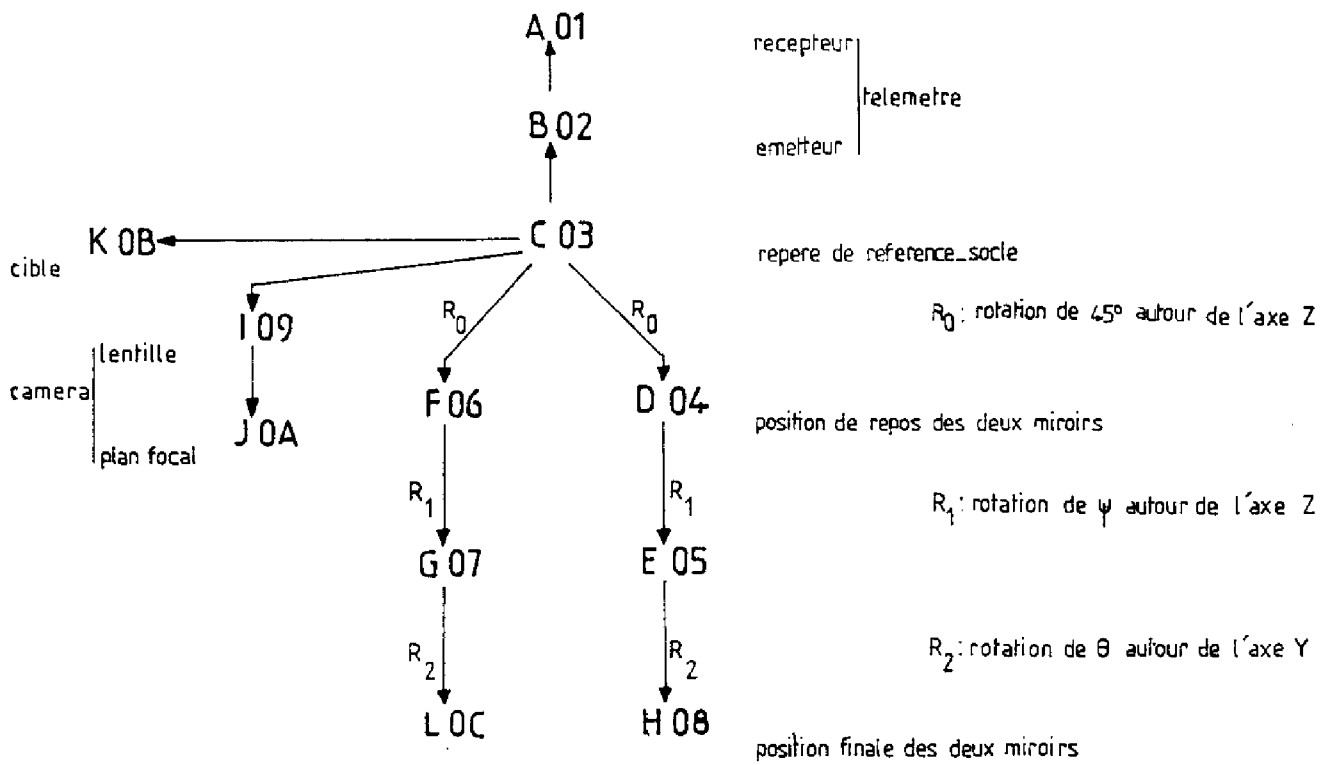


Figure IV.11 - Descriptif de la modélisation de la structure



2

Ces F.P.S. ont été développées sous l'instigation de A. GIRAUD, responsable de l'opération CAR (Commande et Architecture des Robots) au LAAS. Elles sont écrites en langage A.P.L. et viennent s'ajouter aux fonctions primitives de base du système A.P.L.. Les F.P.S. sont relatives à la transformation des repères orthonormés et à leur gestion, afin de faciliter la programmation des modules.

Nous n'allons pas ici détailler toutes les F.P.S. créées, mais seulement rappeler les conventions utilisées et énumérer, sous forme de tableau, celles ayant servi à la modélisation de notre structure.

Pour de plus amples renseignements quant à l'utilisation des F.P.S. pour une programmation modulaire et aux applications en robotique d'assemblage, on pourra consulter les travaux de P. BARAONA[3] et G. CHAOUI[4].

CONVENTIONS :

V	: Vecteur libre
V_i	: Vecteur exprimé dans le repère R_i
P	: Point P
P_i	: Point P exprimé dans le repère R_i
R_{ij}	: Repère R_j exprimé dans le repère R_i ($R_{ij} \leftarrow S_{ij}, O_{ij}$)
S_{ij}	: Tableau définissant l'orientation de R_j par rapport à R_i dans les coordonnées cartésiennes
O_{ij}	: Position de l'origine de R_j par rapport à R_i

Enumération des F.P.S. utilisées

Les F.P.S. ci-dessous sont écrites en langage A.P.L.

$R_{ij} \leftarrow \text{DFRE } x, y, z, \theta, \psi, \varphi$	Définition d'un repère
$x, y, z, \theta, \psi, \varphi \leftarrow \text{DFRI } R_{ij}$	Définition inverse d'un repère
$R_{ij} \leftarrow O_{ij} \quad \text{DFRY } V_z, V_y$	Définition d'un repère en connaissant le support V_z de Z_j et le plan (V_z, V_y) qui est le plan (z_j, y_j)
$R_{ij} \leftarrow O_{ij} \quad \text{DFRX } V_z, V_x$	Définition d'un repère par son support V_z de z_j et le plan (z_j, x_j)
$R_{ij} \leftarrow \text{REPI } R_{ji}$	Définition du repère de référence par rapport au nouveau repère connu
$R_{ij} \leftarrow R_{ik} \quad \text{PRDE } R_{kj}$	Produit de repères (Noter la règle sur les indices)
$R_{ij} \leftarrow R_{ji} \quad \text{PRDI } R_{jk}$	Produit de repère (Noter le non-respect de la règle des indices)
$V_j \leftarrow R_{ji} \quad \text{CHRV } V_i$	Changement de repère d'un vecteur libre
$P_j \leftarrow R_{ji} \quad \text{CHRP } P_i$	Changement de repère d'un point
$z \leftarrow x \text{ PRV } y$	Produit vectoriel (non commutatif)
$S \leftarrow V \text{ PRS } w$	Produit scalaire
$VU \leftarrow \text{TVU } V$	Transformation d'un vecteur en son vecteur unitaire

A partir des fonctions primitives de base A.P.L. et des fonctions primitives spécialisées F.P.S., il est possible de générer des modules.

Cette modélisation axée sur l'utilisation des F.P.S., nous permet de décrire l'espace enveloppant la structure. C'est-à-dire, en fait, d'avoir la possibilité à tout moment :

- de localiser les éléments les uns par rapport aux autres ;
- de traduire les rotations des miroirs ;
- d'exprimer l'un quelconque des éléments par rapport aux autres ;
- d'exprimer tous les éléments de la structure par rapport à une référence.

IV.4.2. Formulation du problème

Tout au long de ce sous-paragraphe, nous ferons appel aux notations de la figure (IV.13).

Toute la scène observée par la caméra (IO9) doit pouvoir être "éclairée" par le faisceau laser issu de l'optique émettrice (BO2).

Cela est rendu possible grâce au miroir émission (plan YZ de HO8) qui assure la déflexion du faisceau vers la cible, (KOB).

Après réflexion sur l'obstacle, c'est le miroir réception (plan YZ de LOC) qui permet de dévier le faisceau vers l'optique réceptrice (AO1).

Bien sûr, le champ de la caméra ne doit pas être occulté par les deux miroirs lors de la prise de vue.

Le but de la simulation, compte-tenu des impératifs physiques (dimension des optiques émettrice et réceptrice du télémètre, nature de l'objectif de la caméra), est donc de déterminer la surface utile des miroirs, ainsi que les positions relatives des différents éléments (télémètre, caméra, miroirs), afin de satisfaire les contraintes signalées ci-dessus.

Pour ce faire, nous avons simulé le balayage de la scène par le télémètre selon la méthode itérative présentée ci-dessous, et cela pour diverses positions des différents éléments constituant la structure.

i) Détermination de la surface utile des miroirs

• Un point fictif P_c décrit le contour de la matrice de photodiodes (JOA) :

a) pour chaque point P_{c_i} , on définit un vecteur $\vec{Nc}_i = \vec{IPc}_i$;

b) on calcule les valeurs angulaires ψ et θ tels que les vecteurs $\vec{Nr}_j$ et $\vec{Nc}_i$ soient collinéaires, (Cf. ii).
 $\vec{Nr}_j$ est le vecteur associé au faisceau laser résultant de la réflexion de $\vec{Ni}_j$ sur le plan YZ de H08 (miroir émission).

• Un point fictif P_e décrit la circonférence de l'optique émettrice (BO2):

c) pour chaque point P_{e_j} , on définit un vecteur $\vec{Ni}_j$ de coordonnées $(1, P_{e_{jY}}, P_{e_{jZ}})^T$ représentatif du faisceau laser émission.

• Un point fictif P_{re} décrit la circonférence de l'optique réceptrice (AO1):

d) pour chaque point P_{re_j} , on définit un vecteur $\vec{Nre}_j$ de coordonnées $(1, P_{re_{jY}}, P_{re_{jZ}})^T$ représentatif du faisceau laser réception.

(On suppose, ici, que le faisceau de retour est parallèle au faisceau émission. Compte-tenu du rapport cible, miroir/miroir, télémètre (KH/HB) qui est très grand, cette hypothèse reste vraisemblable).

e) indépendamment du a), on fait décrire le contour de la matrice de photodiode par un point P_{c_j} et on définit de la même façon un vecteur $\vec{Nc}_j = \vec{IPc}_j$;

- f) on mémorise les coordonnées des points d'impact des vecteurs incident $\vec{Ni}_j$ et caméra $\vec{Nc}_j$ sur le plan YZ de H08 (miroir émission). De même pour le vecteur retour $\vec{Nre}_j$ sur le plan YZ de LOC (miroir réception) ;
- g) on retourne en c) tant que les circonférences des cellules émission et réception, ainsi que la matrice de photodiodes n'ont pas été entièrement décrites ;
- h) sinon, on mémorise à son tour le point d'impact du vecteur réfléchi $\vec{Nr}_i$ sur le plan ZX de K08 (cible).
On reboucle en a) tant que le contour de la matrice n'a pas été entièrement décrit.

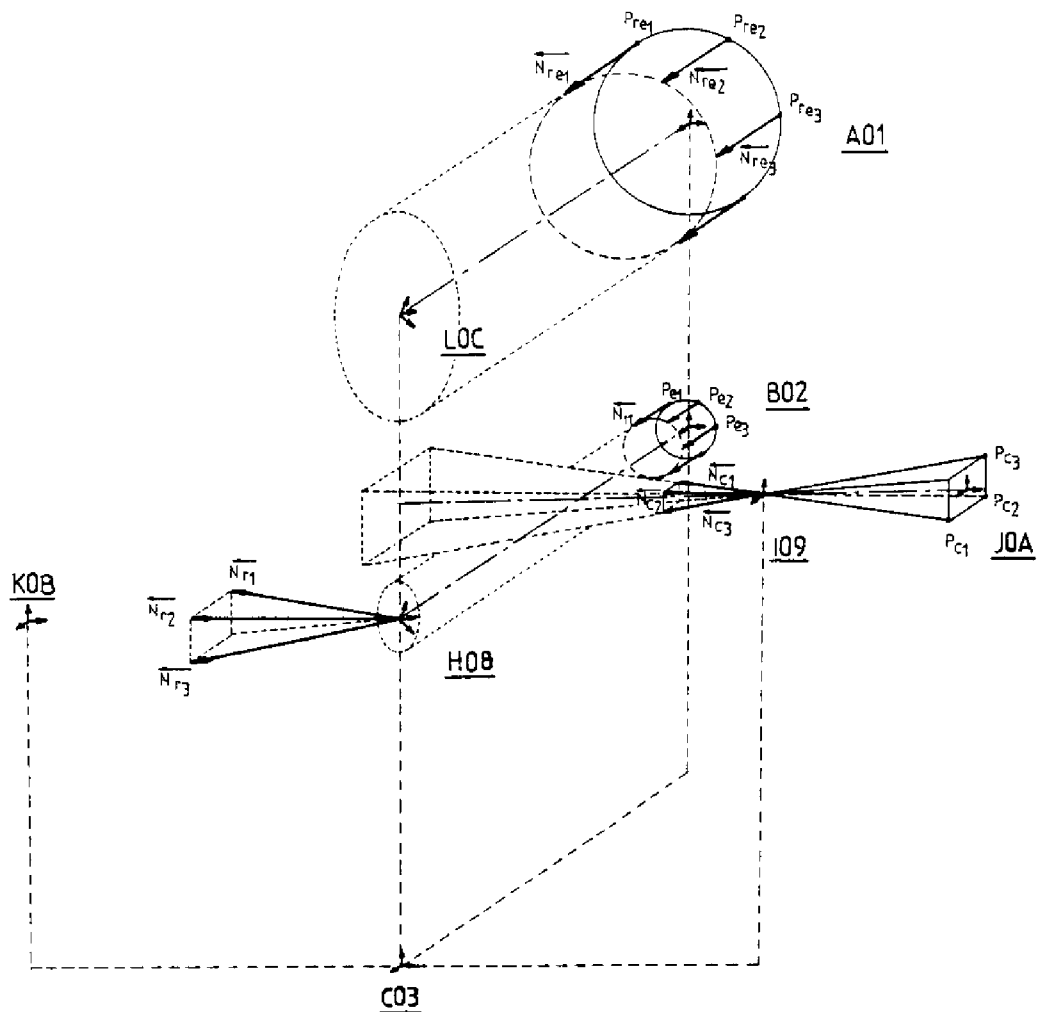


Figure IV.13. - Recherche des points d'impact

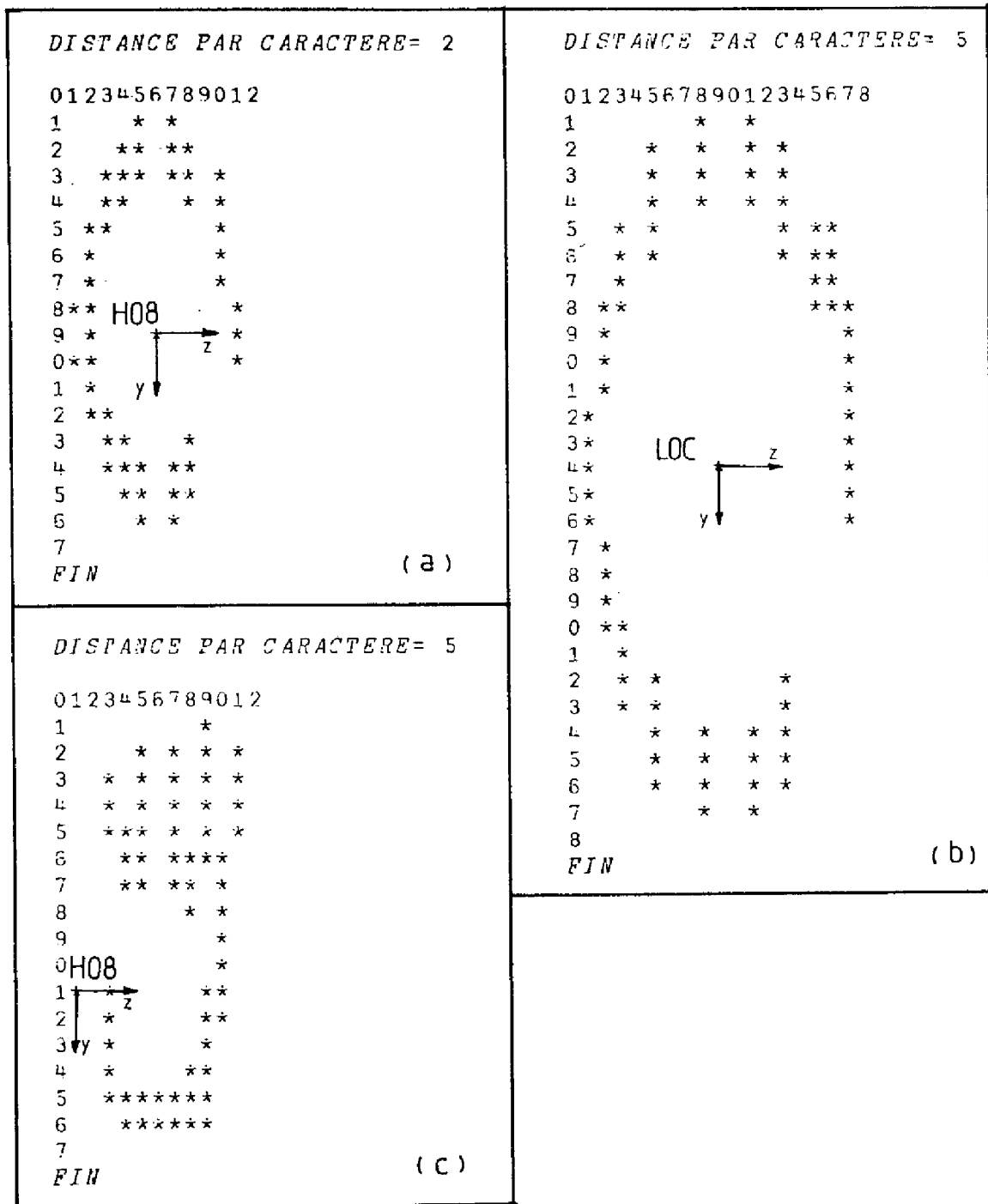


Figure IV.14. - Impact des faisceaux Emission (a) et Réception (b)
Trace du champ de la caméra sur le plan miroir (c)
(la distance par caractère est donnée en mm)

Tous les points d'impact ainsi mémorisés permettent de déterminer la surface utile des miroirs, ainsi que la zone réservée au passage du champ de la caméra.

Ces résultats sont visualisés sur la figure (IV.14).

Les figures (IV.14.a) et (IV.14.b) représentent la dispersion des points d'impact sur les miroirs émission et réception du faisceau laser. Ces points déterminent la surface utile de chaque miroir. La figure (IV.14.c) représente, elle, l'impact du champ de la caméra sur le plan miroir. On détermine ainsi la zone à laisser libre entre les deux miroirs (HO8 et LOC), afin de ne pas occulter le champ de la caméra.

ii) Calcul des rotations des miroirs

La déflexion du faisceau laser est assurée, nous l'avons vu, par l'intermédiaire de miroirs, de telle sorte que toute la scène observée par la caméra puisse être explorée. La rotation des miroirs doit, par conséquent, être asservie par la position du point image dont on désire connaître la distance dans la scène observée.

A cette fin, nous proposons ici le calcul des valeurs angulaires ψ et θ permettant le positionnement adéquat des miroirs.

Considérons le vecteur $\vec{Nc}$ associé à un point P excité de la matrice de photodiodes, figure (IV.15). Pour pouvoir effectuer un tir laser sur la partie de la cible dont le point P est l'image, les vecteurs $\vec{Nc}$ et $\vec{Nr}$ doivent être collinéaires. Rappelons que $\vec{Nr}$ est le vecteur représentatif du faisceau laser $\vec{Ni}$ après réflexion sur le miroir émission. La collinéarité de $\vec{Nc}$ et de $\vec{Nr}$ découle du calcul des rotations ψ et θ , figure (IV.16), que nous allons détailler ci-dessous.

a) calcul des angles α_H et α_V :

Soient P un point de coordonnées $(a, 0, c)^T$ et f la distance focale, figure (IV.15), alors :

$$\alpha_H = \arctg \frac{a}{f}$$

$$\alpha_V = \arctg \frac{c \cdot \cos \alpha_H}{f}$$

b) calcul des cosinus directeurs de $\vec{N}_c$ dans le repère IO9 :

$$\alpha_c = \cos(\vec{x}, \vec{N}_c) = -\cos \alpha_v \cdot \sin \alpha_H$$

$$\beta_c = \cos(\vec{y}, \vec{N}_c) = \cos \alpha_v \cdot \cos \alpha_H$$

$$\gamma_c = \cos(\vec{z}, \vec{N}_c) = -\sin \alpha_v$$

c) calcul des cosinus directeurs de $\vec{N}$ dans le repère CO3 :

Le vecteur $\vec{N} = \vec{X}_h$ est normal au plan de réflexion (plan YZ de H08) du miroir, figure (IV.16).

$$\alpha = \cos(\vec{x}, \vec{N}) = \cos \psi \cdot \cos \theta$$

$$\beta = \cos(\vec{y}, \vec{N}) = \sin \psi \cdot \cos \theta$$

$$\gamma = \cos(\vec{z}, \vec{N}) = -\sin \theta$$

d) loi de réflexion :

$\vec{N}_r$ devant être collinéaire à $\vec{N}_c$, on peut écrire la loi de réflexion sous la forme vectorielle suivante :

$$\vec{N} \wedge \vec{N}_i = \vec{N} \wedge \vec{N}_r$$

ou bien sous sa forme matricielle ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \cos \psi & \cos \theta \\ \sin \psi & \cos \theta \\ -\sin \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos \theta \\ \sin \psi & \cos \theta \\ -\sin \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_c \\ \beta_c \\ \gamma_c \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système d'équation nous permet d'obtenir les valeurs des angles ψ et θ recherchées :

$$\psi = \tan^{-1} \frac{\beta_c}{\alpha_c + 1}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{\gamma_c}{1 + \alpha_c} \cos \psi \right)$$

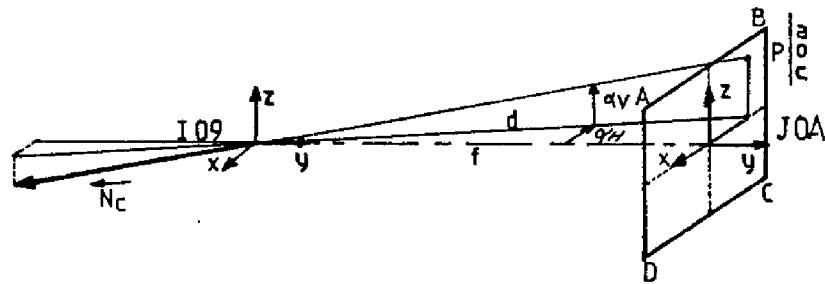


Figure IV.15. - Vecteur image $\vec{N}_c$ associé à une cellule élémentaire P de la matrice de photodiode ABCD

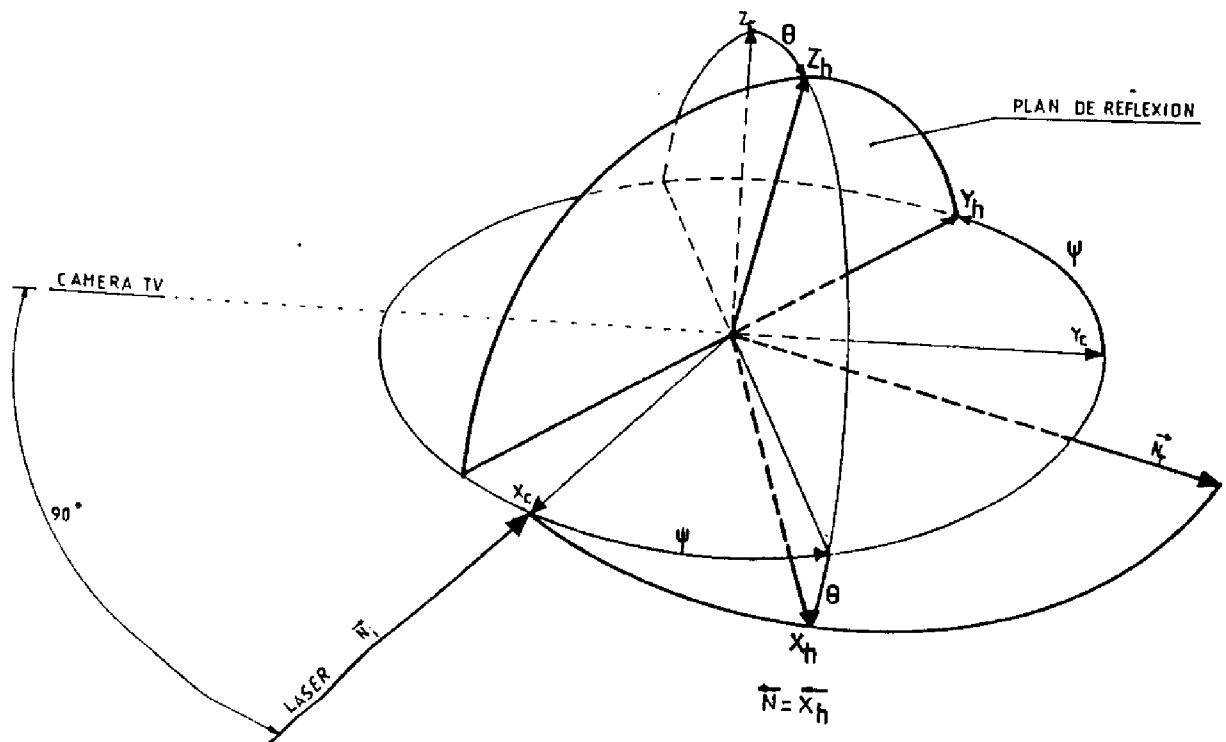


Figure IV.16. - Déflexion du faisceau laser sur le plan de réflexion $Y_h Z_h$

θ : déviation verticale (site)

ψ : déviation horizontale (azimut)

IV.4.3. La tourelle

La tourelle, figure (IV.17), est l'ensemble mécanique qui assure finalement la couverture totale de l'environnement du robot mobile HILARE.

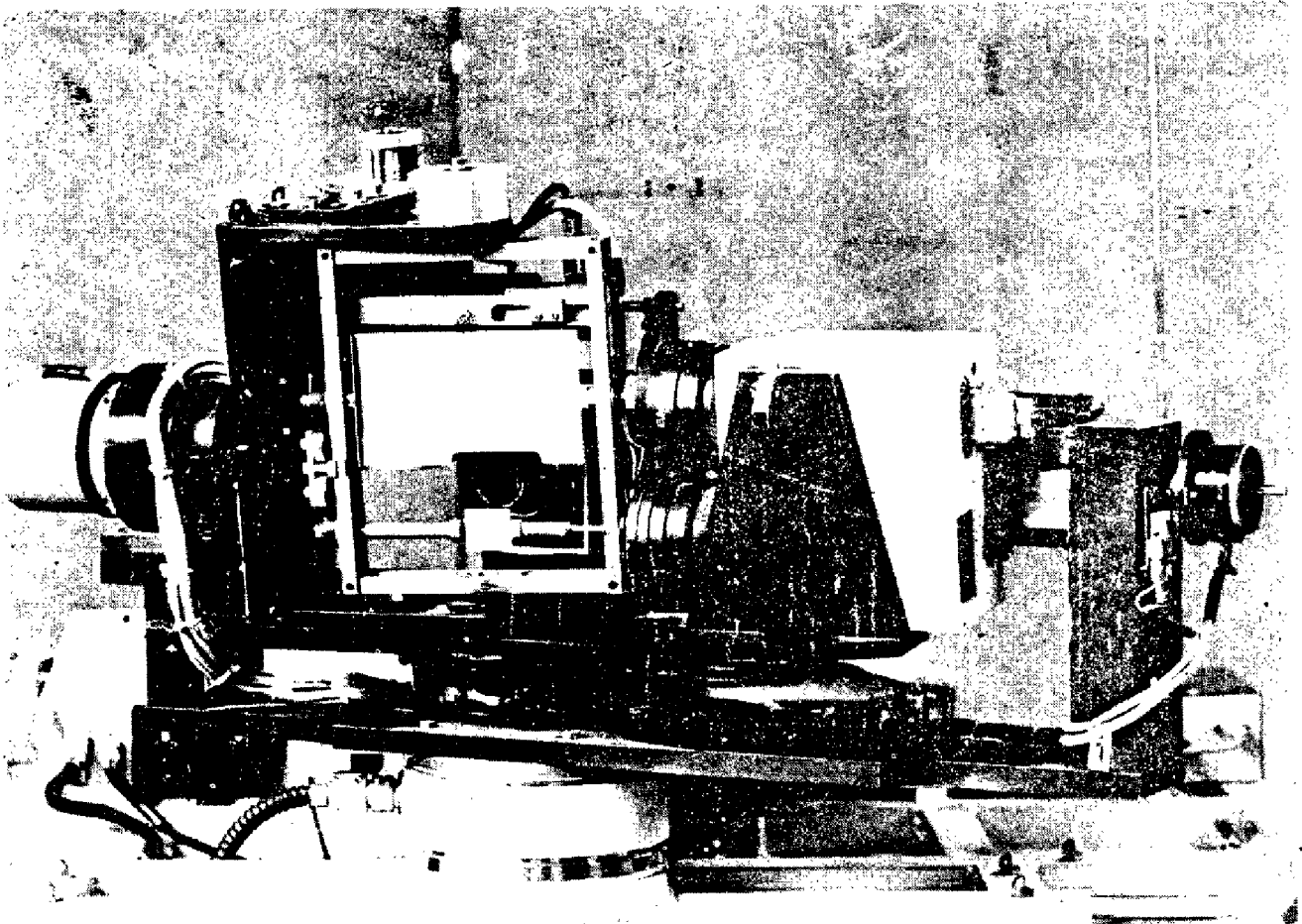


Figure IV.17. - Vue détaillée de la tourelle

C'est elle qui supporte la structure mécanique précédemment décrite (miroirs défecteurs + caméra + télémètre laser). Elle permet donc, par l'intermédiaire des rotations ψ et θ des miroirs, de réaliser une scrutation télémétrique en azimuth (X), en site (Y), ou bien selon une combinaison des deux. Mais également de mouvoir tout l'ensemble caméra, télémètre, miroirs en azimuth (A) et en site (S).

La tourelle a été réalisée avec l'aide du service M.I.T.R.I. (MicroInformatique - Temps Réel - Instrumentation) du L.A.A.S. Tous les mouvements X, Y, A et S sont assurés par les moteurs pas à pas. Leur référence, ainsi que leur résolution sont données dans le tableau ci-dessous :

X	Moteur type RD 62 [200 pas/tour] + Red $\frac{1}{5}$ + Red $\frac{1}{4}$ (poulies) $\longrightarrow$ 4000 pas/tour $\implies$ 0,09 degré/pas
Y	Moteur réducteur μ c RD 57 [1000 pas/tour] + Red $\frac{1}{4}$ (pignons) $\longrightarrow$ 4000 pas/tour $\implies$ 0,09 degré/pas
A	Platine tournante μ c RT 160 [36 000 pas/tour] $\longrightarrow$ 30 000 pas/tour $\implies$ 0,01 degré/pas
S	Moteur type MO92FD09E [200 pas/tour] + $\begin{cases} \text{Red } 1/10 \\ \text{Red } 1/50 \end{cases}$ $\longrightarrow$ 2 000 pas/tour $\implies$ 0,18 degré/pas $\longrightarrow$ 10 000 pas/tour $\implies$ 0,036 degré/pas

Les divers ordres de commande relatifs aux différents mouvements exécutables sont répertoriés en annexe II.

IV.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit la structure mécanique mise en place pour assurer la déflexion du faisceau laser dans le champ de la caméra. Il y a lieu de noter, cependant, que la méthode qui utilise la collinéarité des deux vecteurs $\vec{N}_c$ et $\vec{N}_r$, en faisant appel au calcul des angles de rotation ψ et θ des miroirs, ne permet effectivement de "tirer" sur le point visé que si les axes optiques de la caméra et du télémètre sont confondus.

Or, cette structure pour des raisons que nous avons explicité plus haut, ne permet pas de confondre exactement les axes optiques. Il s'en suit un décalage des zones observées par la caméra ($A_c B_c C_c D_c$), d'une part, et par le

laser après réflexion sur le miroir ($A_m B_m C_m D_m$), d'autre part. La figure (IV.18) donne une idée de ce décalage et permet de constater l'erreur de parallaxe.

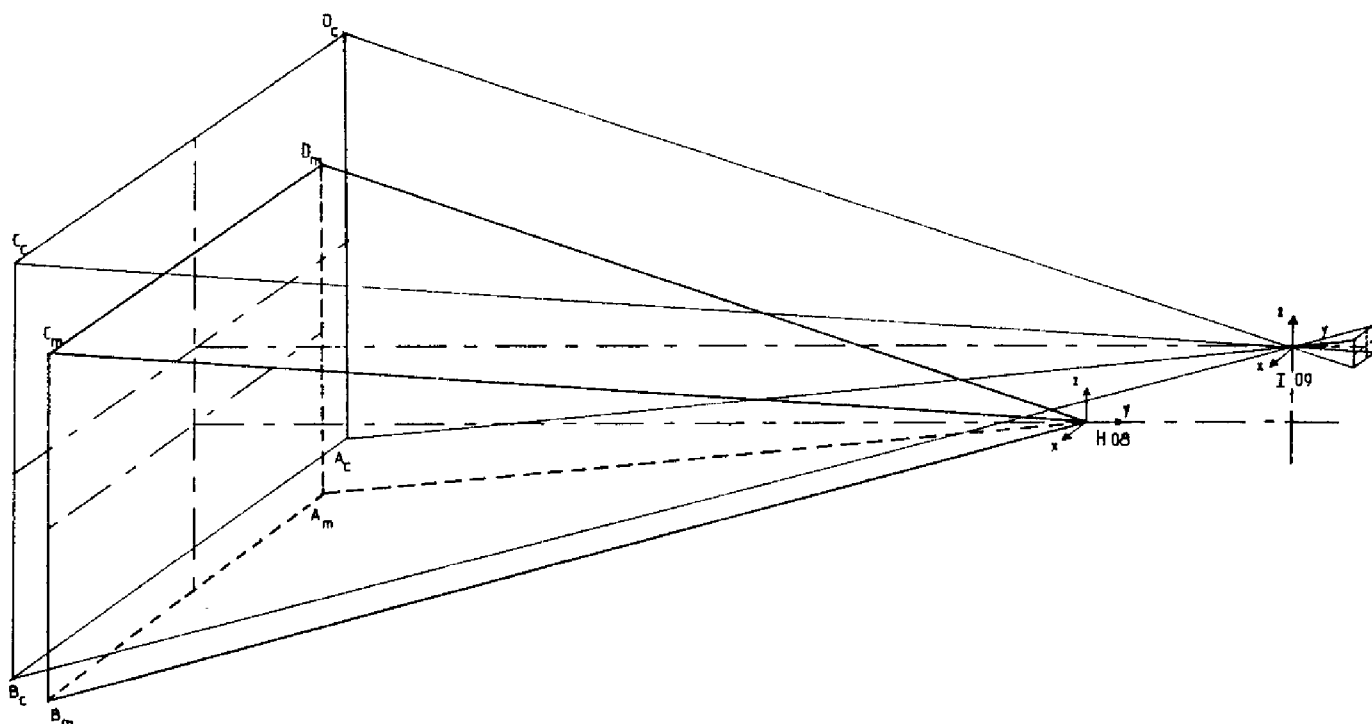


Figure IV.18. - Erreur de parallaxe induite par la structure mécanique

Pour un objectif de distance focale $f = 16$ mm, par exemple, nous avons une erreur de parallaxe verticale de 3,9 cm et horizontale de 1,5 cm.

Précisons, toutefois, que dans le cadre de notre expérimentation, les obstacles sont idéalisés, c'est-à-dire assimilés à des polyèdres droits de hauteur suffisante et que, par conséquent, l'erreur de parallaxe verticale n'entre pas en jeu.

Quant à l'erreur de parallaxe horizontale, bien moindre et liée uniquement au recul de la caméra par rapport à l'axe de rotation du miroir émission (H08), on peut s'en affranchir aisément si l'on considère la

dimension de la tâche du faisceau laser à l'émission (Cf. tableau ci-dessous) :

DISTANCE (m)	DIAMETRE DU FAISCEAU (cm)
1	1,9
2	2,2
3	2,4
5	3
10	4,4

Dans le contexte expérimental qui était le nôtre, cette structure à somme toute permis de mettre en place toute la problématique de la vision d'un robot mobile, telle qu'elle a été définie (caméra + télémètre laser). Mais il n'en reste pas moins certain que dans le cadre d'un univers plus complexe, voire réel, la structure mécanique doit évoluer dans le sens des remarques précitées.

CHAPITRE V

V.1 - EXPERIMENTATION I : Exploration de l'environnement du robot HILARE par télémétrie laser

V.1.1. Introduction

Le robot mobile HILARE, nous l'avons vu, est doté d'un système de perception (caméra + télémètre laser) qui doit lui permettre l'exploration en site et en azimuth de son environnement.

Au cours de notre première approche expérimentale, nous nous sommes placés dans un contexte d'univers d'évolution idéalisée.

L'hypothèse restrictive prédominante est l'assimilation des obstacles à des polyèdres droits.

Dans la mesure où ces obstacles ont une hauteur suffisante (supérieure à l'axe de rotation en site de la tourelle (885 mm)), il était séduisant d'explorer l'environnement du robot par le seul biais du télémètre laser. En effet, dans ce contexte là, un seul balayage en azimuth s'avère suffisant.

Précisons, d'ores et déjà, qu'une telle solution est peu envisageable si l'on se place dans un univers d'évolution réel. Car la connaissance de l'environnement, nécessiterait alors, plusieurs balayages azimuthaux successifs pour des sites différents. Solution que l'on imagine sans peine très pénalisante au point de vue temps de scrutation. Cela nous est, par ailleurs, confirmé par THOMPSON A.M. /121/.

V.1.2. Balayage azimuthal d'un secteur

V.1.2.1. Présentation

Dans sa phase latente, le système de perception est dans l'expectative d'une demande de "vision" émanant du module de Navigation.

Sur réception d'une telle demande, dont le format est défini en Annexe (§ A.II.2.1), le télémètre va assurer l'exploration du secteur délimité par les consignes angulaires paramétrées θ_d et θ_f . Figure (V.1)

En fonction de cet ordre, le système de perception va lancer les directives de positionnement de la tourelle (§ A.II.1), afin de se placer en début de secteur (θ_d). Les rotations de la tourelle s'exécutent autour de l'axe O_r .

Notons que, par convention, l'analyse d'un secteur s'effectue dans le sens rétrograde de θ_d vers θ_f . Son but est de traiter les différentes mesures effectuées lors du balayage, afin de ne fournir au module de navigation que les coordonnées robocentriques (ρ, θ) des points de discontinuité de ρ (ou points significatifs).

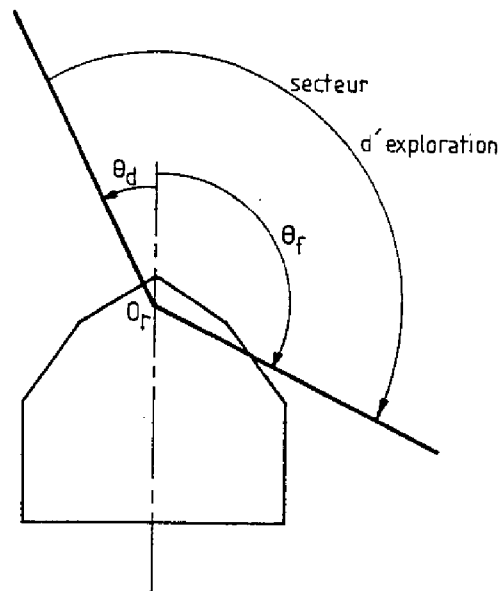


Figure V.1 - Configuration d'un secteur d'exploration

V.1.2.2. Les points significatifs

Il existe deux cas typiques de discontinuité de ρ . L'un est relatif aux changements d'obstacles (discontinuité franche), l'autre correspond aux changements de plans (discontinuité progressive).

. Dans le premier cas, le module de Navigation reçoit deux couples de valeurs ρ et θ . Sur la figure (V.2), nous avons par exemple (ρ_{2p}, θ_2) et (ρ_{2s}, θ_2) ou bien (ρ_{3s}, θ_3) et (ρ_{3p}, θ_3).

Pour chacun des couples (ρ, θ) , il est spécifié s'il s'agit d'un sommet (S), ou bien d'une projection (P).

Les sommets de type S désignent les sommets réels, délimitant les côtés entiers des obstacles.

Les sommets de type P indiquent les sommets apparents, qui sont la projection des sommets de type S sur une paroi d'obstacle le long des lignes de visées.

Ces informations (S et P) sont très importantes pour le système de Navigation, car elles sont à la base de la modélisation et de la structuration de l'espace d'évolution du robot [36]

. Dans le second cas, le système de perception ne transmet qu'un seul couple de valeurs ρ et θ . C'est le cas par exemple de (ρ_{1S}, θ_1) , soit encore de (ρ_{4S}, θ_4) .

Tous les sommets appartenant à cette seconde catégorie sont des sommets réels, donc, nantis de l'attribut S. Par extension, les bornes du secteur à explorer sont associées à cette même classe. (ρ_{dS}, θ_d) et (ρ_{fS}, θ_f) sont respectivement le premier et le dernier des couples (ρ, θ) reçus par le module de Navigation.

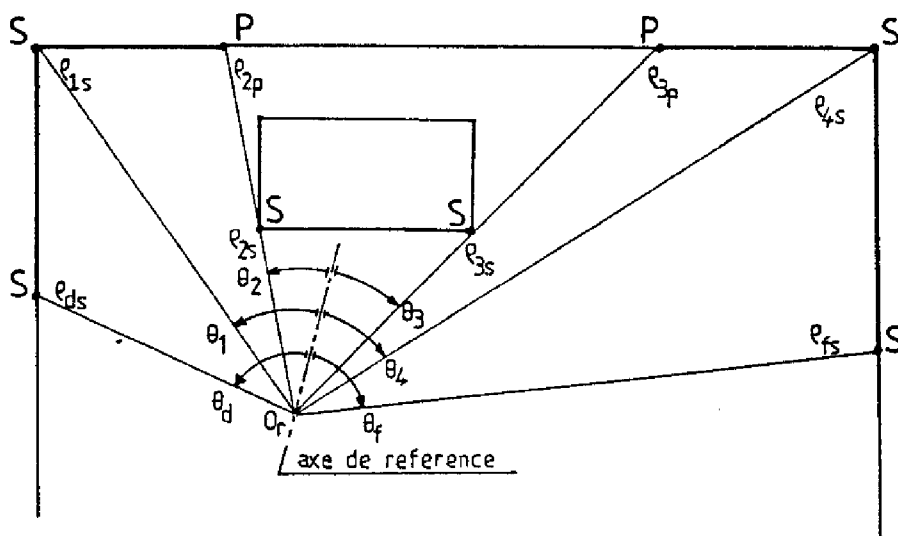


Figure V.2 - Exemple de détection de points significatifs

V.1.3. Recherche des points significatifs

V.1.3.1. Le principe de base

L'idée de base est de balayer un secteur angulaire (θ_d , θ_f) en effectuant une série de tirs laser. Chacune des mesures du télémètre est traitée de manière à détecter un point significatif éventuel.

Afin de conserver une résolution homogène quelle que soit la distance de la cible, on s'impose un pas linéaire constant, δ , entre deux tirs consécutifs. (Figure V.3)

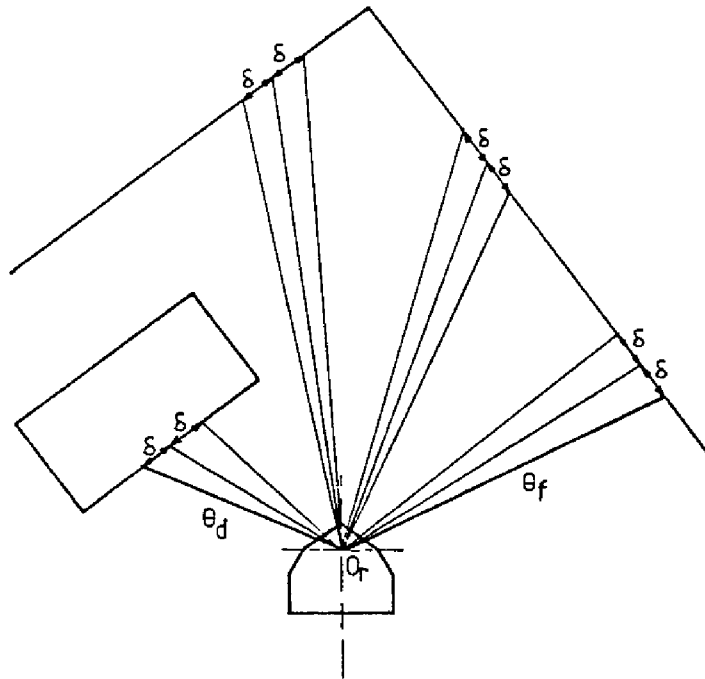
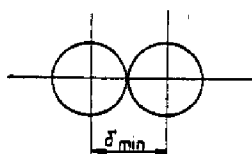


Figure V.3 - Balayage à pas constant

Il est évident que la valeur de δ a une influence directe sur la résolution. En effet, plus le pas est faible, plus la résolution est fine. Nous noterons, cependant, deux limitations à cette évolution.

- La première est directement liée à la nature du télémètre laser. Le diamètre du faisceau émission est de 16 mm et sa divergence de 0,08 degré (Cf. CHAP.IV).

De fait, la dimension de la tâche formée par le faisceau au point d'impact, est variable suivant la distance de la cible. Et si l'on veut éviter le recouvrement du faisceau sur l'obstacle (information redondante), il apparaît souhaitable de définir un pas minimum, $\delta_{\min}$, fonction de la distance, au-dessous duquel on ne descendra pas. La résolution maximale est donc tributaire du pas $\delta_{\min}$.



- La seconde limitation est d'un tout autre ordre. Elle prend en considération le temps de scrutation qui s'avère d'autant plus grand que le pas de balayage est petit.

V.1.3.2. La solution retenue

La stratégie finalement adoptée traduit le souci permanent de réaliser un compromis entre la résolution recherchée et le temps de scrutation.

On procède, à cette fin, à l'exploration du secteur (θ_d, θ_f) en exécutant un balayage à pas large, δ , jusqu'à la localisation d'une zone de discontinuité de ρ .

Le système de Perception génère alors les ordres nécessaires pour opérer un retour en arrière de la tourelle, afin de réitérer un balayage de la zone précédemment localisée. L'analyse s'effectue, cette fois, avec un pas réduit, $\delta_{\min}$, jusqu'à ce que le point de discontinuité de ρ soit décelé.

L'analyse fine terminée, le balayage à pas large, δ , reprend jusqu'à la détection d'une nouvelle zone de discontinuité.

Le processus se poursuit ainsi jusqu'à la borne θ_f du secteur à explorer.

Le pas de balayage rapide, δ , intervient comme troisième paramètre dans la commande d'exploration par laser (§ A.II.2.1). Sa valeur est donc spécifiée par le module de Navigation au même titre que θ_d et θ_f .

V.1.3.3. Choix du pas δ de balayage rapide

Un point important subsiste cependant : c'est le choix de la valeur, δ , du pas de balayage rapide.

Cette valeur doit permettre une exploration rapide de l'environnement par échantillonnage, sans toutefois "sauter" des zones significatives pour le robot (obstacles ou passages éventuels).

La restriction majeure qui découle de cette remarque est qu'impérativement, δ , doit être inférieur à l'empattement du robot.

Cela dit, il faut encore une fois prendre en considération le facteur temps. En effet, plus le pas, δ , est grand, plus la régression (retour en arrière du point B au point A) associée au balayage à pas réduit est importante, figure (V.4). Et de fait, l'analyse fine qui permet finalement de déceler le point significatif (C) prendra plus de temps.

Expérimentalement, nous avons pu déterminer une fourchette de valeurs de δ satisfaisant au mieux les remarques précitées.

Pour réaliser ces mesures et afin de conserver un caractère général quant à la nature de l'univers, nous nous sommes placés successivement dans trois environnements de complexité différente. La figure (V.5) en donne une représentation schématique.

Les résultats obtenus ont été consignés sur un même graphique, figure (V.6), représentant l'évolution du temps de scrutation en fonction du pas, δ , de balayage rapide.

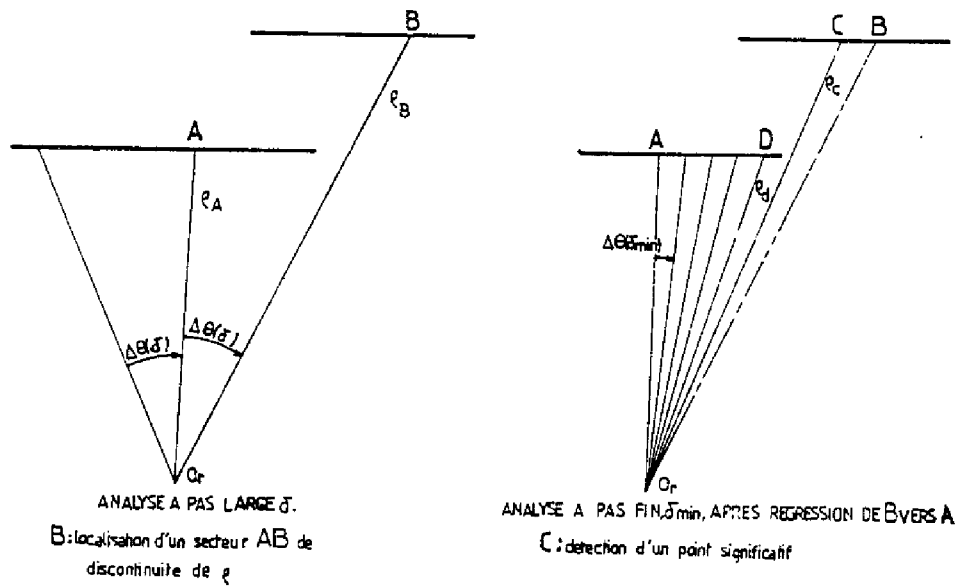


Figure V.4 - Principe de localisation et de détection d'un point de discontinuité de ρ

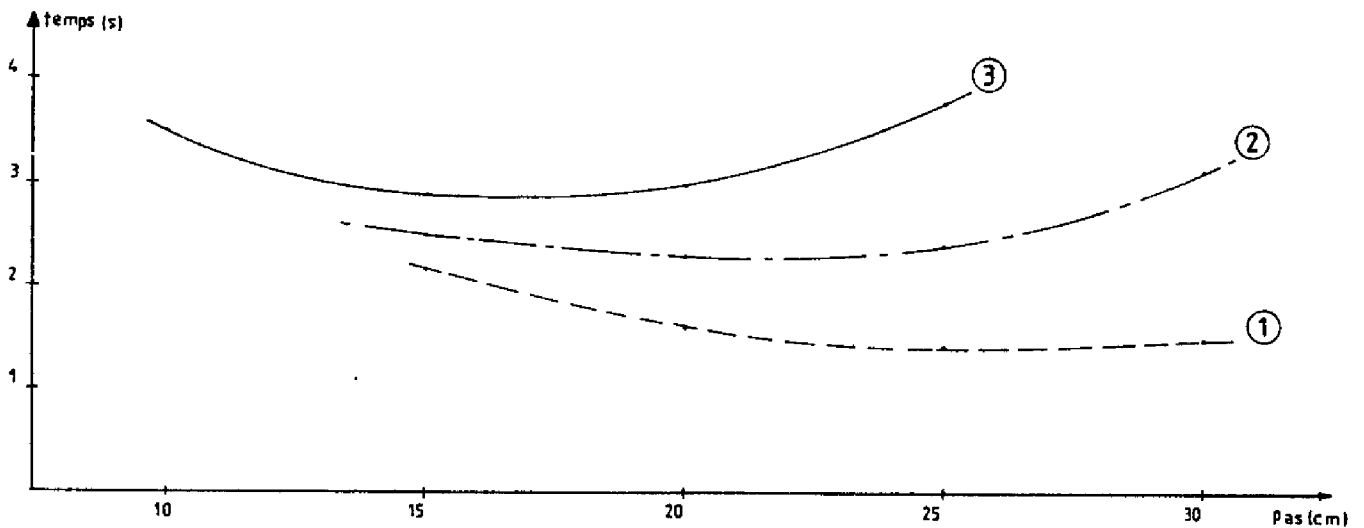


Figure V.6 - Evolution du temps de scrutation en fonction du pas δ , pour trois environnements (Fig. V.5) de complexité croissante (1), (2) et (3)

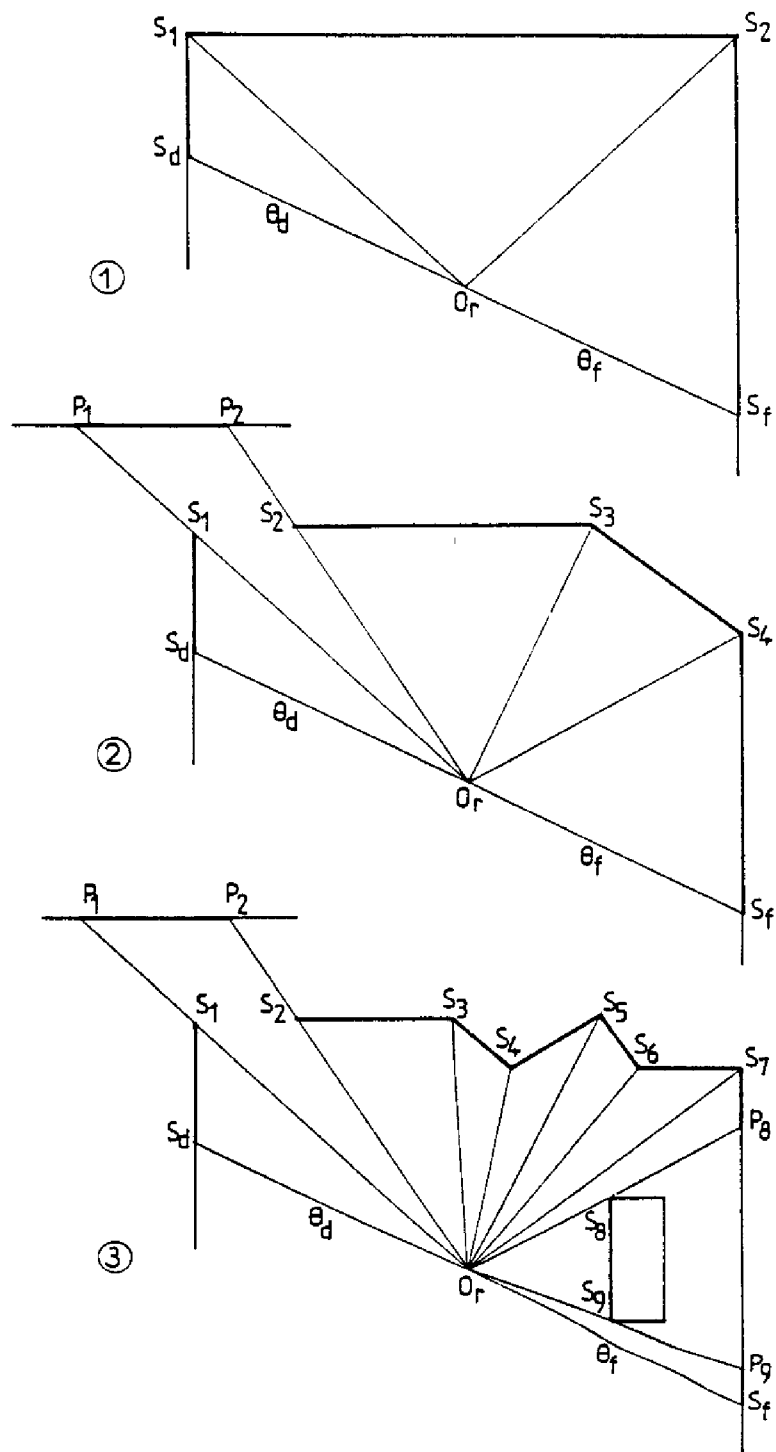


Figure V.5 - Trois configurations de l'univers expérimental

Pour chacun des tracés, on peut relever une valeur typique de δ qui correspond à la meilleure optimisation du temps de scrutation.

Globalement, ce bilan nous permet de sélectionner le créneau des valeurs de δ , utilisable pour un environnement inconnu : $\delta \in (15 \text{ cm}, 25 \text{ cm})$. En ce qui nous concerne, notre choix s'est porté sur la valeur intermédiaire : $\delta = 20 \text{ cm}$.

V.1.4. Les algorithmes

Les deux points essentiels de notre analyse de l'environnement par télémétrie laser sont d'une part, le balayage à pas linéaire constant sur l'obstacle et, d'autre part, la détection de ce que nous avons appelé : les points significatifs.

V.1.4.1. Algorithme de balayage à pas constant

Il permet le suivi des obstacles, en imposant entre chaque tir une distance constante δ . Cette méthode assure une résolution homogène, quelle que soit la distance de l'obstacle. Cela paraît primordial dans la mesure où l'on évolue dans un univers totalement inconnu.

Le principe d'un tel algorithme est basé sur l'évaluation de la rotation à donner au télémètre, de façon à conserver la consigne δ . Cette évaluation est, bien sûr, fonction des tirs précédents et une correction est apportée après chaque tir.

Nous allons, dans ce qui suit, noter les différentes étapes de cet algorithme. On se référera à la figure (V.7).

i) Phase préliminaire

- a) positionnement du télémètre laser en début de secteur, θ_d ;
- b) tir et acquisition de la mesure, ρ_0 ;
- c) évaluation de la rotation $\Delta\theta_1$ à effectuer par le télémètre pour que la consigne du pas $\delta = \overline{t_0, e_1}$ soit respectée.

(Pour ce premier tir, t_0 , on suppose que l'obstacle est perpendiculaire au faisceau laser. e_1 est associé au point ainsi évalué).

$$\Delta \theta_1 = t_g^{-1} (\delta / \rho_0)$$

ii) Phase récursive

Au premier passage $n = 1$

a) positionnement du télémètre pour effectuer le $n^{\text{ième}}$ tir, t_n .
(rotation de $\Delta \theta_n$ précédemment évalué) ;

b) tir et acquisition de la mesure, ρ_n ;

c) évaluation du pas linéaire réel ($L_n = \overline{t_n, t_{n-1}}$)

$$L_n = (\rho_{n-1}^2 + \rho_n^2 - 2 \rho_{n-1} \rho_n \cos \Delta \theta_n)^{1/2}$$

d) évaluation de l'angle d'incidence ($\alpha_n = \widehat{(O_r, t_{n-1}, t_n)}$)

$$\alpha_n = \cos^{-1} \left(\frac{\rho_{n-1} - \rho_n \cos \Delta \theta_n}{L_n} \right)$$

e) prédiction de l'angle d'incidence ($\beta_{n+1} = \widehat{(O_r, t_n, e_{n+1})}$)
associé à l'évaluation du point suivant, e_{n+1} , à partir des
mesures antérieures ρ_{n-1} et ρ_n .

$$\beta_{n+1} = \alpha_n + \Delta \theta_n$$

f) prédiction de la valeur angulaire, $\Delta \theta_{n+1}$, nécessaire pour
conserver le pas linéaire constant, $\delta = \overline{t_n, e_{n+1}}$, entre le
point associé au tir précédent, t_n , et le point évalué, e_{n+1} .

$$\Delta \theta_{n+1} = t_g^{-1} \left(\frac{\delta \sin \beta_{n+1}}{\rho_n - \delta \cos \beta_{n+1}} \right)$$

g) tant que la borne θ_f , de fin de secteur, n'est pas atteinte,
on reboucle au niveau ii - a), avec $n = n+1$.

Le principe de cet algorithme est basé sur la recherche des variations d'amplitude de la distance, ce qui se traduit au niveau algorithme par l'évaluation des écarts ε_i existant entre les points réels et fictifs.

Si les points Source et But appartiennent au même plan-obstacle, figures (V.8.a, b et c), alors :

$$\forall i \in [1, n] , \quad \varepsilon_i \leq \varepsilon$$

Dans le cas contraire, figure (V.8. d) :

$$\exists i \in [1, n] \text{ tq } \varepsilon_i > \varepsilon$$

Notons que n est le nombre de points intermédiaires constituant le segment de droite (Source, But) et que ε est un seuil fixé a priori, compte-tenu de la précision des mesures du télémètre (CHAP. IV).

Il y a lieu de noter également, qu'après chaque détection d'un point significatif, le point Source est redéfini.

D'autre part, si aucune discontinuité n'est relevée, et que le nombre de points à traiter, qui s'accroît sans cesse, s'avère trop important, il y a élimination de la première partie des données. Dans ce cas-là, le point Source est également redéfini et le processus se poursuit avec un passé (points mémorisés) réduit. Inversement, précisons qu'un minimum de trois points est nécessaire à l'exécution de l'algorithme.

Nous allons maintenant décrire les différentes étapes de cet algorithme. On pourra se référer successivement aux figures (V.8. a, b, c et d).

1) phase d'initialisation

a) tir et acquisition des deux premières mesures :

. $n = 0$, premier point : Source = P_0

. $n = 1$, deuxième point : $\overline{P_{r1}, O_r} = P_1$

ii) phase préliminaire

Au premier passage $n = 2$, figure (V.8.a) :

a) tir et acquisition de la nouvelle mesure :

$$\cdot \text{But} = \rho_n$$

b) calcul de la valeur angulaire $\Delta\theta_S = \widehat{(\text{Source}, O_r, \text{But})}$ associée à la rotation totale, menant du point Source au point

But :

$$\cdot \Delta\theta_S = \sum_{i=1, n} \Delta\theta_i$$

c) évaluation de l'angle d'incidence $\beta = \widehat{(O_r, \text{Source}, \text{But})}$:

$$\cdot \beta = t_g^{-1} \left(\frac{\text{But} \times \sin(\Delta\theta_S)}{\text{Source-But} \times \cos(\Delta\theta_S)} \right)$$

d) mise en place de l'indice k relatif au point intermédiaire courant à traiter :

$$\cdot k = n-1$$

e) évaluation de la valeur angulaire $\Delta\theta_C = \widehat{(P_k, O_r, \text{But})}$ associée au point courant traité :

$$\cdot \Delta\theta_C = \Delta\theta_{k+1}$$

(Dans ce cas particulier, $\Delta\theta_C = \Delta\theta_n$).

iii) phase récursive

a) calcul de la mesure $d_k = \overline{P_{fk}, O_r}$ adjointe au point fictif courant d'indice k :

$$\cdot d_k = \frac{\text{But} + \sin(\Delta\theta_C)}{t_g(\beta + \Delta\theta_S - \Delta\theta_C)} + (\text{But} \times \cos(\Delta\theta_C))$$

b) évaluation de l'écart $\mathcal{E}_k = |\rho_k - d_k|$ existant entre les points courants réel, P_{rk} , et fictif, P_{fk} :

• si $\mathcal{E}_k \geq \mathcal{E}$, détection d'un point significatif. C'est le cas de la figure (V.8.d). Le point But en changeant de plan, a engendré un accroissement des écarts $\mathcal{E}_k$. Notons que l'on s'arrête au premier test positif. C'est-à-dire que, dans ce

cas, tous les écarts associés aux autres points intermédiaires non traités ne sont pas évalués.

Après étude du point significatif ainsi décelé, le processus reprend en i) ;

- . sinon, préparation au traitement du point courant P_{rk} suivant.
(Compte-tenu, bien sûr, que les points intermédiaires sont traités successivement à partir du point But jusqu'au point Source) :
 - . $k = k-1$

c) test d'arrêt du processus :

- . si $k > 1$, le traitement du point courant P_k peut s'exécuter.

On calcule sa valeur angulaire $\Delta\theta_c = \widehat{(P_k, O_r, But)}$:

$$\Delta\theta_c = \Delta\theta_c + \Delta\theta_{k+1}$$

puis, on reboucle en iii-a) ;

- . sinon, tous les points intermédiaires ayant été traités, sans détection de point significatif, on étend l'analyse à une nouvelle mesure. On passera ainsi successivement du cas de figure (V.8.a) aux cas de figure (V.8.b), puis (V.8.C).
On reboucle en ii-a), avec $n = n+1$.

Remarque : Conjointement aux deux algorithmes, il existe évidemment un test d'arrêt qui permet de respecter la consigne θ_f , fin du secteur à explorer.

V.1.5. Les résultats

Afin de permettre une visualisation des résultats, nous avons développé un programme de représentation graphique qui réalise l'affichage des données sur un Plotter Tecktronix 4662 (papier), ou sur une console SECAPA, type 4014, (écran).

Cela a permis de visualiser, donc de vérifier le fonctionnement des diverses séquences de localisation et de détection des points de discontinuité de ρ .

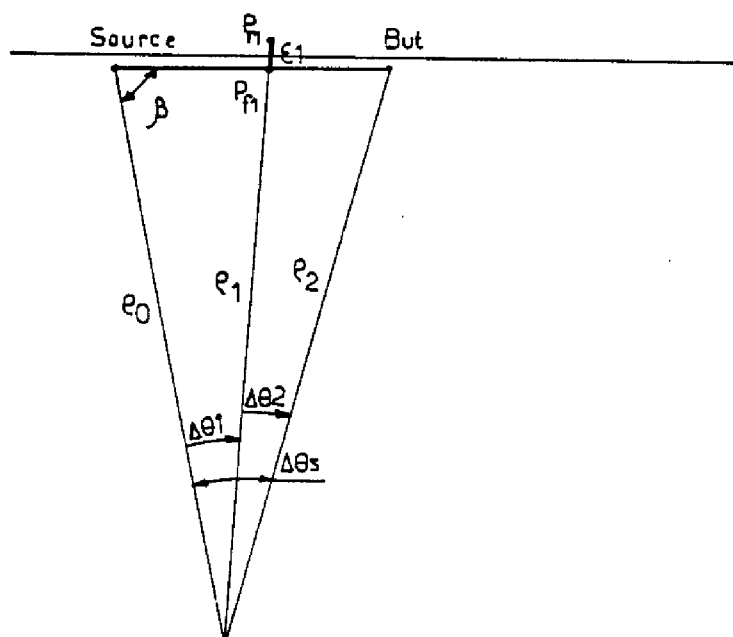


Figure V.8.a

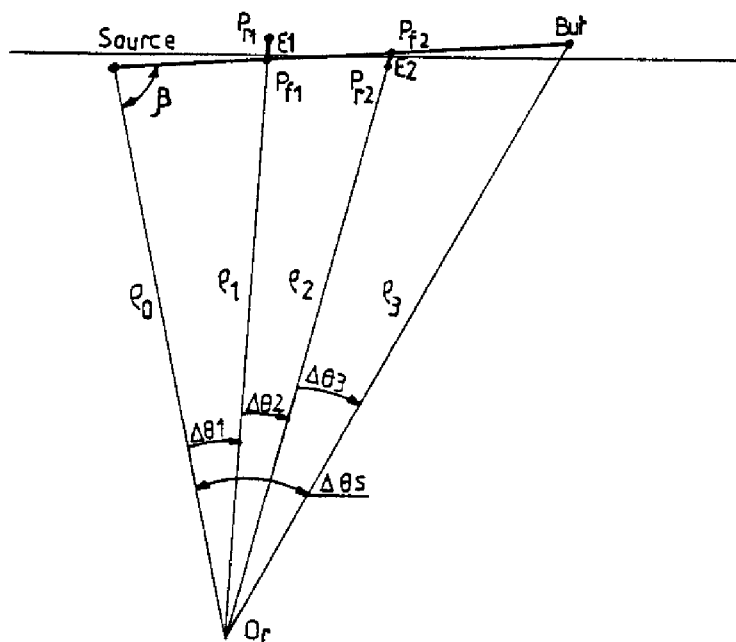


Figure V.8.b

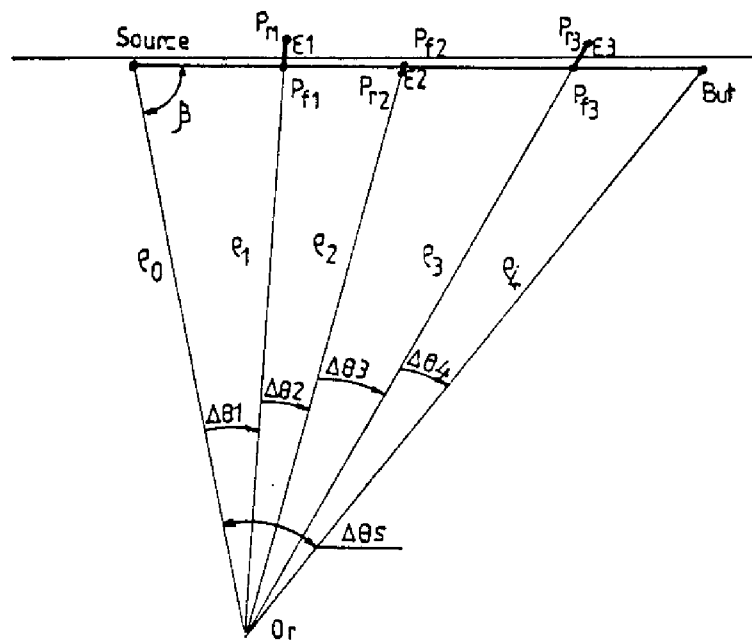


Figure V.8.c

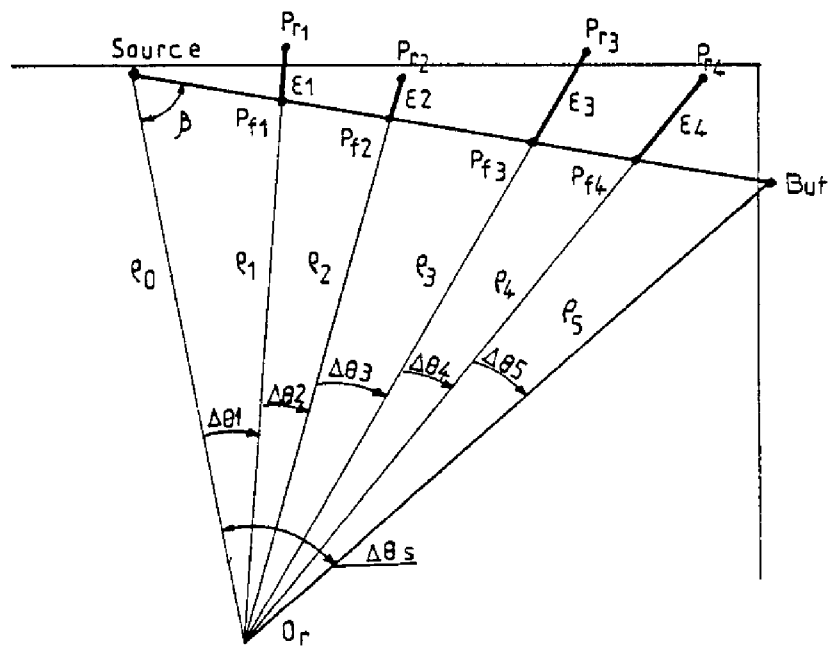


Figure V.8.d

Figure V.8 - Principe de détection des points significatifs

Nous pouvons visualiser, à dessein, tous les points traités par le télémètre, ou bien uniquement les points significatifs répertoriés durant la scrutation (§ A.II.2.5).

Sur la figure (V.9), nous présentons un exemple d'une telle représentation. Nous allons décrire, point par point, les étapes successives de l'analyse du secteur considéré (θ_d , θ_f).

- Positionnement de la tourelle (télémètre laser) en début de secteur, (θ_d).

- Le balayage à pas large (δ) débute au point 1 et se poursuit jusqu'au point e : 1-a-b-c-d-e.

- Détection en, e, d'une première discontinuité de ρ .

- Régression du point e au point c.

- Analyse à pas réduit ($\delta_{\min}$) depuis c jusqu'en f, et détection du point significatif 2.

- Reprise du balayage rapide à partir du point f jusqu'au point k : f-g-h-i-j-k.

- Détection au point k d'une seconde discontinuité de ρ .

- Régression de k en i.

- Analyse fine du point i au point l et détection du point significatif 3.

- Reprise en l du balayage rapide qui se poursuit jusqu'au point 4 : l-m-4.

- La consigne, fin de secteur (θ_f), est atteinte. Le système de perception transmet les résultats ($\rho_1, \theta_d, S - \rho_2, \theta_2, S - \rho_3, \theta_3, S - \rho_4, \theta_f, S$) au module de Navigation selon le format décrit au § A.II.2.2 et se met en attente d'une autre commande.

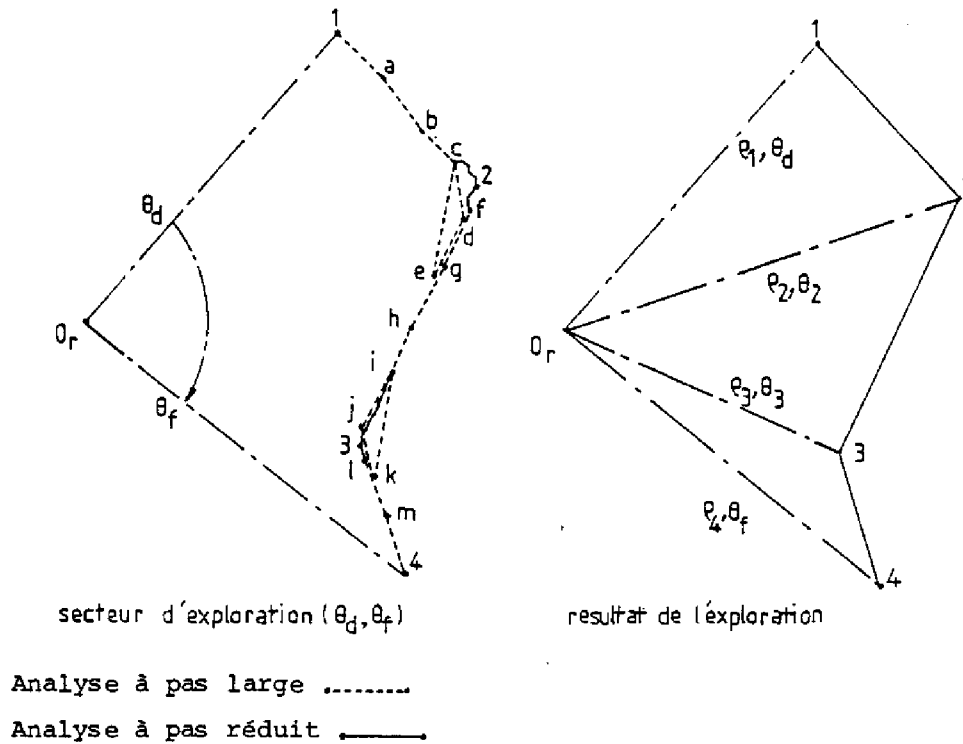


Figure V.9 - Visualisation des étapes successives associées à l'analyse d'un secteur

La représentation détaillée de la figure (V.9) donne une certaine idée de la précision du processus de détection des points de discontinuité de ρ . Mais, en vue d'en apprécier le caractère répétitif, nous avons effectué plusieurs scrutations successives du même environnement.

Il s'agit de l'exploration d'un secteur de 180° . Pour chacune des scrutations, nous avons visualisé les points significatifs détectés. La figure (V.10) représente le tracé de trois de ces balayages et le tableau ci-dessous, les mesures correspondantes qui sont transmises au système de Navigation.

Points Trace	A _s	B _s	C _p	D _p	E _s	F _s	G _s	H _s	I _s	J _s	K _s
①	I70/90	274/64	386/64	345/45	228/45	233/12	200/356	205/344	I57/335	I87/309	2I7/270
②	I67/90	267/64	382/64	347/46	229/46	230/13	204/354	209/343	I56/333	I88/309	2I8/270
③	I67/90	267/64	386/64	344/45	228/45	233/12	203/355	207/344	I59/334	I87/310	2I8/270

On remarquera que les points B et C sont respectivement du type S (sommet) et P(projection). Cela signifie que nous avons là, un changement d'obstacle possible. Le segment de droite BC est donc ici représentatif de la ligne de visée du télémètre, et non d'une paroi d'obstacle.

Au niveau du module de Navigation, la zone BC sera interprétée comme un passage éventuel pour le robot. (Compte-tenu, bien sûr, des dimensions relatives du robot et du passage). Une confirmation sera cependant demandée si le robot doit effectivement transiter par le passage BC. Cette confirmation prendra l'aspect d'une nouvelle scrutation du secteur considéré (B, O'_r , C) pour une position différente du robot (O'_r).

Ces remarques sont également valables pour les points E et D. Tous les autres points, qui sont des sommets (S), délimitent les côtés entiers des obstacles. Les points F, G, H, I, J correspondent donc aux cinq changements de plan successifs. A et K sont les points associés au début et à la fin du secteur d'exploration.

La figure (V.10) permet d'évaluer qualitativement la stabilité des mesures d'une analyse à l'autre. Quantitativement, sur une série de dix scrutations du même environnement, nous avons relevé un écart maximum de deux degrés sur les positions angulaires et de trois centimètres sur les mesures des distances.

Ce résultat est, somme toute, satisfaisant, compte-tenu des caractéristiques du faisceau laser émission et de la précision du télémètre. (CHAP. IV)

V.1.6. CONCLUSION

La procédure de détection et de localisation des obstacles par utilisation d'un capteur de distance, telle que nous venons de la décrire, s'avère satisfaisante. En effet, elle permet de façon fiable la "perception" azimutale d'obstacles pour des distances très variables.

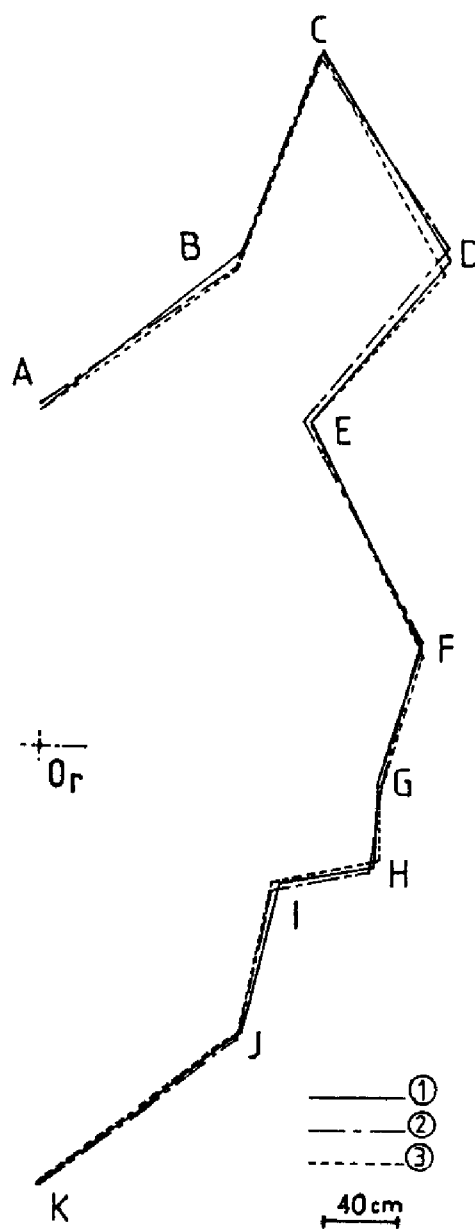


Figure V.10 - Visualisation de trois scrutations successives
du même environnement

Néanmoins, dans le but d'en améliorer les performances tant au point de vue précision (localisation des points significatifs), qu'au point de vue rapidité (réduction des temps de scrutation), on peut envisager d'y apporter quelques modifications.

On aura pu remarquer, notamment, le caractère prépondérant des points SOURCE et BUT dans l'algorithme d'approximation polygonale. Il peut être intéressant, afin de rendre plus précise la localisation des points de discontinuité de ρ , de réduire cette prépondérance. Ceci peut être fait en tenant compte, par exemple, de leur passé immédiat.

Le critère temps étant très important, on peut penser également réduire le temps de scrutation. Une solution peut être la recherche dichotomique des points significatifs dans la phase d'analyse fine.

Quoi qu'il en soit, l'utilisation de cette méthode seule, impose d'assimiler les obstacles à des polyèdres droits, sous peine de réaliser plusieurs scrutations pour des sites différents. Solution, nous l'avons vu, très coûteuse en temps. La caméra apparaît donc indispensable pour assurer une perception 3D de l'environnement du robot. Elle peut, en outre, permettre la localisation absolue du robot par référence à des balises reconnues. C'est en l'occurrence l'objet de la deuxième partie de l'expérimentation.

V.2. EXPERIMENTATION II : Localisation du robot HILARE par détection de balises lumineuses

V.2.1. Introduction

Nous nous proposons, dans cette seconde phase expérimentale, de localiser le robot HILARE dans une pièce délimitée par des balises lumineuses. La détection des balises est réalisée par l'intermédiaire de la caméra. Cette expérimentation offre un double intérêt. Elle permet, outre la détermination de la position et de l'orientation du véhicule, de concrétiser divers aspects du traitement d'images (acquisition d'images, extraction de contours, calcul de paramètres caractéristiques, identification) que nous avons développé dans le chapitre II. La localisation des balises lumineuses ne motive pas un trai-

tement d'images multiniveaux. Au niveau de cette expérimentation, nous avons, en conséquence, apporté une restriction vis-à-vis de la généralité des algorithmes : les images traitées sont binaires.

V.2.2. Acquisition des images

Dans cette première étape, nous faisons appel au système d'acquisition d'images et de compression des données, que nous avons présenté précédemment (§ III.4). Rappelons que les informations (position, niveau de gris) délivrées par ce système sont relatives à des transitions d'intensités lumineuses sur une ligne de la matrice de photodiode. Un programme d'acquisition et de rangement de ces informations, selon un pas adaptatif (§ III.5), permet de stocker l'image "compressée" dans une zone mémoire du microprocesseur. Un programme de représentation graphique spécialisé, initialement développé pour la mise au point du système, permet de restituer (décompresser) et de visualiser (sur deux niveaux) les informations contenues dans la matrice de photodiode.

V.2.3. Traitement des images

Les procédures utilisées pour le traitement des images multiniveaux ont été décrites au paragraphe (II.3). Dans ce contexte expérimental, les images traitées sont binaires et de fait, la procédure de traitement des adjacences n'est pas activée.

On notera, ici, que la procédure de calcul des paramètres caractéristiques fait appel à un programme spécialisé de calcul flottant. Bien que celui-ci soit lourd d'utilisation et pénalisant au point de vue temps de calcul, il permet toutefois de disposer des fonctions trigonométriques et d'accroître la précision des calculs. Rappelons également que la matrice de photodiodes étant isotrope, aucune correction ne doit être apportée au niveau des valeurs des paramètres caractéristiques.

Un programme de représentation graphique permet de visualiser les contours, ainsi que leurs principaux axes d'inertie.

V.2.4. Identification des balises

Un modèle des objets (balises) à identifier doit être préalablement défini. Dans notre cas, ce modèle est construit à partir de caractéristiques paramétriques indépendantes de la distance (axes principaux d'inertie, rapports de similitude (I/J), de compacité, etc...). Il a été bâti sur la base de plusieurs expérimentations (apprentissage manuel).

La phase d'identification de l'objet observé est ensuite basée sur la comparaison entre le modèle tiré de l'observation et celui servant de référence.

V.2.5. Recherche des balises

Sur réception d'une demande de repérage absolu dont le format est défini au (§ A.II.2.3), le système de perception opère une exploration azimutale de l'environnement à la recherche des balises.

Lorsqu'une balise est identifiée, le système réalise, quand cela est nécessaire, un recalage afin de la centrer dans l'image. Cette opération effectuée, il mémorise la position angulaire de la caméra. L'exploration se termine dès que les trois balises ont été identifiées. Notons que si une identification a échoué (balise non reconnue pour une raison quelconque : balise éteinte par exemple), la recherche s'arrête lorsque tout l'environnement azimutal du robot a été exploré.

Dans le meilleur des cas, à la fin de la recherche, le système dispose des trois positions angulaires des balises et détermine, par une méthode de triangulation, la position et l'orientation du robot.

V.2.6. Position et orientation du robot

A la fin de la recherche des balises, le système dispose des positions angulaires (θ_1 , θ_2 , θ_3) relatives aux trois balises (B1, B2, B3), figure (V.11). Il en déduit aussitôt les valeurs α , β et γ qui vont lui servir à localiser le robot.

$$\begin{aligned}\alpha &= \theta_3 \\ \beta &= \theta_3 - \theta_2 \\ \gamma &= \theta_2 - \theta_1\end{aligned}$$

a) Position du robot

Si l est la largeur (B_1, B_2) de la pièce et L sa longueur (B_2, B_3), alors les relations déduites des deux triangles (B_1, B_2, O_r) et (B_2, B_3, O_r) sont respectivement :

$$\frac{l}{\sin \gamma} = \frac{a}{\sin \theta} = \frac{b}{\sin(\gamma + \theta)} \quad (1)$$

$$\frac{L}{\sin \beta} = \frac{c}{\cos \theta} = \frac{b}{\cos(\theta - \beta)} \quad (2)$$

Des relations (1) et (2), nous déduisons :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta} \cdot \frac{1 \operatorname{tg} \beta - L}{L \operatorname{tg} \gamma - 1} \quad (3)$$

D'autre part, la position du robot (X_o, Y_o) est liée à la valeur θ par les relations suivantes :

$$\sin \theta = \frac{X_o}{b} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X_o}{Y_o} \quad (5)$$

Finalement, les relations (1), (3) et (4) permettent d'obtenir l'abscisse X_o de la position du robot :

$$X_o = l \frac{\operatorname{tg} \theta}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \gamma} \right)$$

et les relations (3) et (5) son ordonnée Y_o :

$$Y_o = l \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \gamma} \right)$$

b) Orientation du robot

L'orientation δ du robot, par rapport à l'axe de référence Y_{ref} , est donnée par la relation suivante :

$$\delta = \beta - \theta - \alpha$$

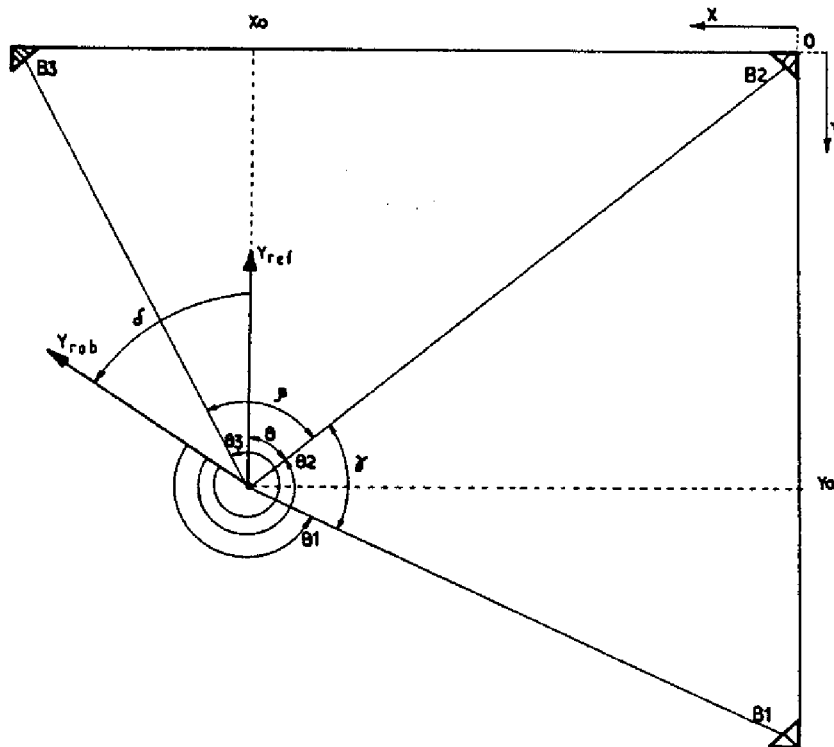


Figure (V.11) - Localisation (X_0, Y_0, δ) du robot HILARE

V.2.7. Conclusion

La localisation terminée, le système de vision transmet la position (X_0, Y_0) et l'orientation (δ) du robot au module de Navigation selon le format décrit au § A.II.2.4.

La précision des résultats obtenus est satisfaisante. La position du robot par rapport à l'axe vertical du système de perception est donnée avec une précision de quelques centimètres (5 cm). Il y a lieu de noter que cette

précision est fortement liée à la position du robot vis-à-vis des balises (balises proches, éloignées, inclinées, etc...). La précision sur l'orientation du robot est de l'ordre de quelques degrés (3°).

Une autre solution, non implémentée sur HILARE à ce jour, est la localisation du robot par une utilisation conjointe de la caméra (localisation des balises) et du télémètre laser (évaluation de la distance séparant les balises du véhicule). Dans ce cas, deux balises suffisent pour déterminer sa position et son orientation dans la pièce balisée.

V.3. CONCLUSION

L'expérimentation que nous venons de décrire dans ce chapitre a permis d'utiliser divers aspects du robot HILARE, en mettant en oeuvre notamment le système informatique réparti, le système de Navigation et le système de perception.

Elle a permis également de poser clairement le problème de l'intégration du système de vision multisenseur (caméra/laser), tant au niveau matériel, que logiciel.

L'ensemble des logiciels (écrits en Assembleur 80-85 et en PLM 80) occupe une zone mémoire (RAM) importante (code : 15 Koctets, données : 17 K_O, utilitaires : 0,5 K_O). Le système actuel possède 48 Koctets (16 K_O de la carte μ P 8085 INTEL et 32 K_O de la carte extension mémoire).

On voit ici apparaître un des problèmes posés par les systèmes embarqués : la place mémoire. Mais, on est également confronté à des problèmes de communication et de coordination de tâches, qui suscitent l'utilisation de techniques plus rapides.

L'utilisation d'un μ P 8086 INTEL devrait permettre, dans un proche avenir, d'évoluer dans ce sens. L'utilisation conjointe du processeur de calcul arithmétique 8087, en remplacement du flottant actuel, permettra de conforter cette évolution.

CONCLUSION

Le projet HILARE s'insère dans le cadre des recherches sur le développement de systèmes multisenseurs et multiniveaux de décision pour robots mobiles autonomes.

Nous avons présenté dans ce mémoire la mise en place du système de perception (3D) du robot mobile HILARE. Ce système est composé d'une caméra vidéo matricielle à semi-conducteur, d'un télémètre laser et d'un logiciel de traitement des données.

Afin de situer nos travaux, nous avons exposé dans le premier chapitre quelques réalisations notoires en essayant de souligner les particularités de leurs systèmes de perception.

Pour évaluer la troisième dimension, certains d'entre eux font appel à des techniques de stéréovision encore peu répandues. Nous avons donc, dans un premier temps, tenté de broser les principales directives en ce domaine de manière à constituer un support théorique de référence auquel le lecteur pourra éventuellement se reporter. Ce support est consigné en Annexe I.

Le chapitre se termine par une description du robot HILARE qui permet de fixer le contexte de travail.

Le deuxième chapitre a été focalisé sur les techniques de traitement des images vidéo (2D).

Après une introduction rapide des approches plus ou moins classiques généralement employées en robotique, nous avons décrit le logiciel de traitement des images multiniveaux que nous avons implanté sur HILARE.

Ce logiciel a été élaboré à partir d'une méthode de segmentation topologique qui génère des contours fermés, et d'une étude des connexités qui structure l'image en "vagues d'adjacences". Il intègre également des procédures de calcul de paramètres caractéristiques élémentaires des contours (distances, moments, ...) ainsi que des procédures de filtrage basées sur l'exploitation de critères paramétriques (de dimension, de suppression, de contrôle et de profondeur).

Une partie, non négligeable, de notre travail a été consacrée à la mise en oeuvre du système physique (et électronique) de perception.

A cet égard, nous avons proposé dans le troisième chapitre un tour d'horizon des capteurs vidéo les plus usités en robotique, suivi de la description du système d'acquisition d'images et de compression des données que nous avons utilisé.

Le quatrième chapitre a été consacré à l'intégration du télémètre laser dans le système de perception du robot. Le but du télémètre, en tant que capteur complémentaire de la vision (2D), est de pouvoir balayer toute la scène observée par le champ de la caméra. Après un survol des propriétés intrinsèques des lasers et des caractéristiques du télémètre employé, nous avons évoqué la définition de la structure mécanique qui assure la déflexion du faisceau laser.

Le télémètre laser peut néanmoins être considéré comme un capteur autonome. Dans cette hypothèse, il peut, pour un univers d'évolution du robot adéquat, détecter et localiser des obstacles. Une telle illustration expérimentale a été donnée dans la première partie du cinquième chapitre.

Dans la seconde partie du chapitre nous avons présenté le système de localisation absolu du robot HILARE dans une pièce délimitée par des balises lumineuses. Bien qu'adaptée au problème spécifique des balises, cette phase expérimentale a permis de mettre en oeuvre les concepts généraux (extraction de contours, calcul de paramètres caractéristiques, identification ...) développés dans le cadre de nos travaux sur la vision artificielle.

L'expérimentation bien que guidée par quelques hypothèses simplificatrices (obstacles assimilés à des polyèdres droits) a sans aucun doute contribué à mettre en place la problématique de la perception (3D) sur le robot mobile HILARE. Elle a permis notamment de souligner certaines améliorations pouvant être introduites tant au niveau matériel que logiciel et qui définissent finalement les perspectives à court et moyen terme.

. Les performances des algorithmes de traitement d'images en général, sont fortement liées aux conditions d'éclairage. Dans le cas particulier des robots mobiles, les variations de la luminance et de la distance des objets dans la scène observée sont souvent la cause de certaines ambiguïtés dans la localisation et l'identification des objets.

. On doit donc envisager pour un fonctionnement correct dans un environnement réel, l'intégration d'un système de contrôle automatique du diaphragme (luminance) et de la netteté (distance focale).

. On doit considérer également les problèmes de couplage mécanique des capteurs laser et caméra, et prévoir une phase d'étalonnage de la structure défectrice (recalage des miroirs par logiciel) en début d'expérimentation.

. D'autre part, afin d'accroître les performances du système de vision, le microprocesseur 8 bits du type 8085 INTEL devrait dans un proche avenir céder sa place à un module plus puissant constitué d'un microprocesseur 16 bits du type INTEL et d'un processeur de calcul 8087 de la même famille. Cette substitution, déjà en étude, devrait pouvoir améliorer le temps d'exécution d'un facteur cinquante et augmenter la place mémoire disponible.

..Compte tenu de ces améliorations, il sera alors possible d'affiner les traitements du module de vision. Actuellement pour chaque demande d'exploration émanant du système de Navigation, la Vision lui retourne tous les points significatifs (sommets S ou projection P délimitant les obstacles) sans se préoccuper des redondances d'une demande à l'autre. On peut envisager une solution plus élégante (mais plus complexe pour la vision) visant à ne fournir, lors de deux ou plusieurs demandes consécutives, que les points significatifs nouveaux (non définis lors des demandes précédentes).

Comme nous venons de le voir tout au long de ce mémoire, le projet HILARE est un support expérimental pour les recherches en robotique. HILARE est voué à évoluer au rythme du progrès des techniques et de la recherche scientifique. Nos travaux sont une modeste contribution à cette évolution que nous souhaitons sans fin.

ANNEXE 1

A.I. NOTIONS DE STEREOVISION

A.I.1. - Introduction

L'objectif de la stéréovision est la localisation d'un point de la scène tridimensionnelle observée en utilisant des informations visuelles. Ces informations apparaissent sous forme d'images vidéo. Généralement deux images sont nécessaires.

La clé du problème en stéréoscopie est la recherche des points correspondants entre deux images d'une même scène. Ces points sont les projections d'un point unique de la scène tridimensionnelle.

La différence de position des deux points correspondants dans leur image respective qui est due à la parallaxe est appelée disparité ("disparity").

La disparité est une fonction de la position des deux points dans les deux images, mais également de la position, de l'orientation et des caractéristiques physiques de la caméra.

Quand tous ces paramètres sont connus, le point réel peut alors être localisé dans la scène 3D.

La connaissance de ces paramètres découle de l'étalonnage des caméras.

A.I.2. - Modèle de la caméra

L'étalonnage d'une caméra est réalisée par l'intermédiaire d'un modèle. Celui-ci est en fait une représentation des caractéristiques géométriques et physiques de la caméra, mais il peut être étendu à la prise en compte des distorsions géométriques.

Il existe essentiellement deux modèles :

i/ Le modèle "pin-hole" [30] , [31], qui est la méthode la plus classique, s'appuie sur l'optique géométrique. Ce modèle suppose que tous les rayons incidents passent par le centre de la lentille de l'objectif de la caméra. Un tel modèle est illustré lors de la présentation du robot MARS ROVER du JPL (§I.2.2.3.).

ii/ Le modèle des "deux-plans", [32] qui est le plus récent ne prend en compte que la correspondance de deux plans de travail auxquels sont associées des formules d'interpolation linéaire ou quadratique.

Aucune hypothèse n'est formulée sur le trajet des rayons obliques.

Pratiquement, l'étalonnage des caméras se fait par une ou plusieurs prises de vue de points, d'objets ou de grilles de référence qui permettent d'évaluer tous les paramètres intervenant dans la transformation liant un point du plan objet à un point du plan image.

Afin de déterminer avec plus de précision ces paramètres, des procédures de minimisation d'erreur sont généralement introduites dans la phase d'étalonnage [33].

A.I.3. - Choix des caractéristiques

Nous avons vu dans l'introduction (§A.I.1) que le principe de la stéréovision est basé sur la recherche de points correspondants sur deux images différentes d'une même scène.

Le problème est ici de choisir des points spécifiques qui puissent être localisés sans ambiguïté sur les deux images. De tels points sont appelés caractéristiques, "features", dans la littérature anglosaxonne.

Une caractéristique est conceptuellement un point dans la scène 3D mais elle est généralement trouvée en examinant des zones locales autour des points dans l'image.

Une caractéristique est bonne si elle peut être localisée sans ambiguïté dans différentes vues de la scène. De fait, une région uniforme ou un simple bord ne sont pas de bonnes caractéristiques. Au contraire, des régions comme des angles (coins d'objets) ou des intersections de bords, qui sont toujours des zones locales de haut contraste constituent de meilleures caractéristiques.

Il est souvent utilisé un opérateur spécialisé qui permet de détecter ces caractéristiques. Fréquemment cet opérateur sélectionne des

zones possédant une variance de luminance élevée. C'est le cas de l'opérateur de Moravec que nous présentons lors de la description du système de vision du robot CART de l'université de Stanford (§ 1.2.2.5).

A.I.4. - Correspondance des caractéristiques

L'étape qui fait suite au choix des caractéristiques est sûrement la plus importante dans l'analyse stéréoscopique et sans aucun doute la plus décisive quant à l'obtention du but qui est la recherche de la troisième dimension : la profondeur.

Cette étape doit permettre de déterminer pour une caractéristique donnée sur une image, la meilleure correspondance sur une ou plusieurs autres images différentes mais similaires. Cela revient en fait à rechercher sur une ou plusieurs images, la projection d'un point objet de la scène 3D.

La recherche des correspondances ou "matching" est une procédure qui apparaît très complexe dans son mode d'investigation d'une part, mais également de par l'existence de nombreuses sources d'erreurs, notamment celles dépendant directement de la géométrie de la scène observée. Certaines zones peuvent être visibles sur une image et non sur l'autre et cela entraîne des correspondances ambiguës, voire incorrectes.

Les techniques de correspondance diffèrent selon le type de caractéristique utilisé (points, bords, coins, surfaces ...). La méthode la plus classique est la corrélation de petites surfaces. Elle est généralement utilisée dans le cas de scènes extérieures.

Quoiqu'il en soit, devant la complexité des méthodes en général, il est courant, lorsque cela est possible de faire appel à quelques astuces techniques afin notamment de faciliter la recherche des correspondances.

i) Une des solutions généralement utilisée tient compte de la nature du balayage vidéo et des propriétés géométriques de base de la stéréovision. Tout point de l'espace tridimensionnel définit avec ses projections sur les plans images de deux caméras, un plan appelé plan "epipolar" dans la littérature anglosaxonne. L'intersection de ce plan avec les deux plans images détermine deux lignes "epipolar" (Nous traduirons ce terme par épipolaire). Ainsi, à tout point d'une ligne épipolaire correspond un point de la ligne épipolaire de l'autre image. De fait, la recherche des

correspondances est réduite à une recherche unidimensionnelle, ce qui entraîne une réduction considérable de la complexité de calcul.

Si d'autre part les deux caméras sont situées et orientées de telle sorte qu'il n'existe qu'un seul déplacement horizontal entre elles, alors :

- les disparités ne se présentent que suivant une direction horizontale ;

- les lignes "épipolar" sont parallèles et horizontales, et coïncident avec le balayage vidéo ;

Il s'en suit que la recherche des correspondances s'en trouve grandement simplifiée.

Ce type de simplification n'est bien sûr pas envisageable dans toutes les applications, notamment dans le cas des photos aériennes, mais elle est néanmoins très souvent employée en robotique.

ii) Parallèlement à ces solutions, diverses méthodes visant à porter une aide au choix et à la décision de la meilleure correspondance ont été développées, [34] , [12] .

Elles ne seront pas abordées dans le cadre de ce mémoire. On notera cependant qu'une procédure de recherche des correspondances, élaborée par H.P. MORAVEC, est décrite à l'occasion de la présentation du robot CART de l'université de Stanford (§.I.2.2.5).

A.I.5. - Détermination de la troisième dimension

Lorsqu'on dispose d'une correspondance précise et correcte, le problème de la détermination de la distance est résolu relativement simplement par des méthodes de triangulation. Dans le cas contraire, cette étape présente certaines difficultés. Les erreurs dans l'évaluation de la distance sont principalement liées aux imprécisions dans la localisation des caractéristiques et bien sûr au modèle de la caméra.

ANNEXE 2

A.II.1 - ORDRES DE COMMANDES DE LA TOURELLE CAMERA/LASER

A.II.1.1. Positionnement des miroirs et tir laser

(T)	LT	N	NP _x	NP _y
	2 octets	1 octet	2 octets	2 octets

N fois

T : destinataire tourelle

LT : ordre de Tir Laser

N : 2 symboles hexadécimaux représentant le nombre de tirs à effectuer ;

NP_x, NP_y : 4 symboles hexadécimaux chacun, représentant le nombre de pas à effectuer pour positionner les miroirs à la position (x, y) de tir laser, à partir de sa position courante.

Tir laser sans déplacement

(T) LT 00

cas particulier du précédent : N = 00

A.II.1.2. Déplacements mixtes

Ils combinent les déplacements élémentaires selon deux axes ; x et y pour les miroirs, Site et Azimut pour la platine.

i) Mouvement des miroirs

(T)	MM	NP _x	NP _y
	2 octets	2 octets	2 octets

MM : ordre de Mouvement Miroir

NP_x, NP_y : 4 symboles hexadécimaux chacun, représentant le nombre de pas à effectuer pour positionner les miroirs à la position (x, y) à partir de la position courante.

ii) Mouvement de la Platine

(T)	PM	NP _S	NP _A
	2 octets	2 octets	2 octets

PM : ordre de Mouvement Platine

NP_S, NP_A : 4 symboles hexadécimaux chacun, représentant le nombre de pas à effectuer pour positionner la platine en Azimut (A) et en Site (S) à partir de sa position courante.

A.II.1.3. Déplacements élémentaires

i) Mouvement des miroirs selon les axes x et y

(T)	XM	NP _x	et	(T)	YM	NP _y
	2 octets	2 octets			2 octets	2 octets

XM : ordre de Mouvement selon X

YM : ordre de Mouvement selon Y

ii) Mouvement de la platine en Azimut et en Site

(T)	AM	NP _A	et	(T)	SM	NP _S
	2 octets	2 octets			2 octets	2 octets

AM : ordre de Mouvement en Azimut

SM : ordre de Mouvement en Site

A.II.1.4. Remise à zéro ("RAZ")

Une initialisation partielle ou totale peut être demandée à tout moment. Chacun des ordres de RAZ suivant s'écrit sur 2 octets.

(T) GR : ordre de RAZ Générale (miroirs et platine)
 (T) MR : ordre de RAZ des Miroirs (X et Y)
 (T) PR : ordre de RAZ de la Platine (Azimut et Site)
 (T) XR : ordre de RAZ des Miroirs selon l'axe X

- (T) YR : ordre de RAZ des Miroirs selon l'axe Y
- (T) AR : ordre de RAZ de la platine en Azimut
- (T) SR : ordre de RAZ de la platine en Site

A.II.1.5. Arrêt d'urgence ("STOP")

Ces ordres permettent d'arrêter la commande en cours d'exécution. Chacun des ordres STOP s'écrit sur 2 octets :

- (T) GS : ordre STOP Général (miroirs et platine)
- (T) MS : ordre STOP relatif aux commandes des Miroirs (X et Y)
- (T) PS : ordre STOP relatif aux commandes de la Platine (A et S)

A.II.2 - ORDRES DE COMMANDE DU SYSTEME DE PERCEPTION (3D)

A.II.2.1. Commande d'exploration laser

(V)	EA	θ_D	θ_F	δ
	2 octets	2 Octets	2 octets	1 octet

- V : destinaire vision
- EA : Exploration Azimutale
- θ_D : Début du secteur d'exploration (degrés)
- θ_F : Fin de secteur d'exploration (degrés)
- δ : Pas de linéaire de balayage

A.II.2.2. Format du message émis en réponse à la commande E.A

(C)	EA	$\emptyset$	N	ρ	θ
	2 octets	1 octet	1 octet	2 octets	2 octets

- C : destinataire navigation
- EA : Exploration azimutale
- $\emptyset$: vaut F ou O selon que le message est terminé ou non
- N : nombre total de valeurs transmises
- ρ, θ : distance et position angulaire d'un poids significatif en cm et degrés.

A.II.2.3. Commande de localisation du robot

(V) PR

2 octets

V : destinaire vision

PR : Position Robot

A.II.2.4. Format du message émis en réponse à la commande PR

(C) PR Xo Yo δ

2 octets 2 octets 2 octets 2 octets

C : destination navigation

Xo : abscisse de la position du robot (cm)

Yo : ordonnée de la position du robot (cm)

δ : orientation du robot (degrés)

A.II.2.5. Choix de la représentation graphique pour la commande EA

(V) RG n m

2 octets 1 octet 1 octet

V : destinaire vision

RG : Représentation Graphique

n = 2 : pas de représentation graphique des points significatifs
(S et P)

n = 1 : représentation graphique sur écran (2400 bds) des points
significatifs

n = 0 : représentation graphique sur plotter (300 bds) des points
significatifs

m = 0 : pas de représentation graphique des points courants

m = 1 : représentation graphique des points courants (63 maximum)

BIBLIOGRAPHIE

1. M. BRIOT, "La stéréognosie en robotique - Application au tri de solides" Thèse d'Etat n°780 U.P.S, Toulouse Novembre 1977.
2. A. GIRAUD, "La problématique de l'assemblage automatique en robotique", 3ème Journées Scientifiques et Techniques de la Production automatisée ADEPA, Toulouse Octobre 1981.
3. P. BARAONA, "Contribution à la réalisation d'un robot manipulant des objets en contact. Commande par retour d'efforts", Thèse de 3ème cycle n°2510 U.P.S, Toulouse Juillet 1981.
4. G. CHAOUÏ, "Robotique d'assemblage. Conception d'un capteur d'efforts et son utilisation dans des procédures générales d'Insertion", Thèse de D.I Université Paul Sabatier, Mai 1982.
5. R.O. DUDA, P.E. MART, "Pattern Classification and Scene Analysis" A Wiley - Interscience Publication, 1973.
6. F. ROCKER, A. KIESSLING, "Methods for Analysing Three Dimensional Scenes" Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence, VOL.2, TBILISI - GEORGIA - URSS, Septembre 1975
7. G.G. DODD, L. ROSSOL, "Computer Vision on Sensor-Based Robots" Plenum Press, 1979.
8. H.G. BARROW, J.M. TENENBAUM, "Computational Vision" Proceedings of the IEEE, VOL 69, n°5, May 1981.
9. D. GENNERY, R. CUNNINGHAM, E. SAUND, J. HIGH, C. RUOFF, "Computer Vision" NASA-CR-165012 JPL-PUB-81-92, Novembre 1981.
10. S.T. BARNARD, M.A. FISCHLER, "Computational Stereo" SRI Technical note 261, March 1982.
11. T.O. BINFORD, "Survey of Stereo Mapping Systems and Related and Supporting Technics and Literature" Computer Science Departement Stanford University, April 1982.
12. H.H. BAKER, "Depth from Edge And Intensity Based Stereo" Stanford University 14305 CA, September 1982.

13. R.B.KELLEY, A. IZAGUIRRE, R. KIM, "Etude de la dérive temporelle" Note interne LAAS, 1982
14. M. DE BARROS CORREIA, "Localisation d'objets tridimensionnels par stereovision", Thèse de 3ème cycle U.P.S - à paraître -
15. R. NEVATIA, "Depth mesurement by motion stereo", Computer Graphics and Image Processing, May 1976.
16. T.D WILLIAMS, "Depth from Camera Motion in a Real World Scene" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, VOL PAMI.2 n°6, November 1980.
17. L. DRESCHLER, H.H NAGEL, "Volumetric Model and 3D Trajectory of a moving Car Derived from Monocular TV Frame .Sequence of a street scene" Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence - Vancouver Canada August 1981.
18. K. IKEUCHI, "Determining Surfaces Orientations of Specular Surfaces by using the Photometric Stereo Method" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, VOL. PAMI-3 NO.6, November 1981
19. H.G. BARROW, J.M. TENENBAUM, "Interpretating Line Drawings as Three Dimensional Surfaces", First Annual National Conference on Artificial Intelligence .The American Association for Artificial Intelligence, Stanford University,USA, August 1980.
20. Y. SHIRAI, M. SUVA, "Recognition of Polyhedrous with a range finder" Second IJCAI LONDON, September 1971.
21. G.J. AGAIN, T.O. BINFORD "Computer description of curved objects" Third IJCAI Stanford, August 1973.
22. M. ISHII, T. NAGATA, "Feature Extraction of three Dimensional Objetscs and Visual Processing in a Hand-Eye System Using Laser Tracker"Pattern Recognition ,Pergamon Press 1976, Vol.8.
23. H.J. CAULFIELD, T. HIRSCHFELD, J.M WEINBERG, R.E HERRON, "Laser Stereometry" Proceedings of the IEEE, January 1977.
24. M. OSHIMA, Y. SHIRAI, "Object Recognition Using Three Dimensional Information" Seventh International Joint conference on Artificial Intelligence - Vancouver, Canada, August 1981.

25. J. MONGE, C. SONREL, Ph. LEMARQUAND, J.F PIQUARD, "Capteur de Vision 3D pour la robotique", Premières Journées Annuelles du Programme Automatisation et Robotique Avancées, Poitiers Septembre 1982
26. N. AYACHE, J.D. BOISSONAT, O. FAUGERAS, F. GERMAIN, M. HEBERT, E. PAUCHON, J. PONCE, "Vers un système de Vision Flexible", Premières Journées Annuelles du Programme Automatisation et Robotiques Avancées, Poitiers Septembre 1982.
27. T.D. GARVEY "Perceptual Strategies for Purposive Vision" SRI Artificial Intelligence Center, Technical Note 117 - SRI PROJECT 3805 - September 1976.
28. D. NITZAN, A.E. BRAIN, R.O. DUDA, "The measurement and use of Registered Reflectance and Range Data in Scene Analysis", Proceedings of the IEEE, February 1977.
29. R.O. DUDA, D.NITZAN, P. BARRETT, "Use of Range And reflectance Data to find Planar Surface Regions" IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence, VOL. PAMI-1, n°3, July 1979.
30. E.A. PARRISH, J.R. and A.K. GOKSEL, "A camera Model for Natural Scene" Processing Pattern Recognition, Vol.9, 1977.
31. A.M. THOMPSON, "Camera Geometry For Robot Vision" Robotics Age Mar/Apr 1981.
32. H.A. MARTINS, J.K BIRK, R.B. KELLEY "Camera Models Based on Data from Two Calibration Planes", Computer Graphic and Image Processing n°17 1981.
33. D.B. GENNERY "A stereo Vision System for an Autonomous Vehicle" Proceedings of the 5th IJCAI, Massachussets USA, 1977.
34. S.T. BARNARD, W.B. THOMPSON "Disparity Analysis of Image" IEEE Transaction, VOL PAMI-2, n°4, July 1980.
35. W.M. BULKELEY, "The first Intelligent Mobile Robots Soon May Serve as Plant Sentries", Wall Street Journal 16 August 1982 U.S.A
36. R. CHATILA, "Systeme de Navigation pour un Robot Mobile Autonome : Modélisation et Processus Decisionnels" Thèse de Docteur Ingénieur U.P.S Toulouse, Juillet 1981.

37. N.J. NILSON, "A mobile Automation : An application of Artificial Intelligence Techniques" First International Joint Conference On Artificial Intelligence, Washington, D.C, USA, May 1969.
38. M.H. SMITH, L.S. COLES, "Design of a Low Cost, General Purpose Robot" Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, Stanford, California, USA, August 1973.
39. L.S. COLES, A.M. ROBB, P.L. SINCLAIR, M.H. SMITH, R.P. SOBEK "Decision Analysis for an Experimental Robot with Unreliable Sensors". Proc. 4 th International Joint Conference on Artificial Intelligence Tbilisi Georgia URSS, September 1975.
40. M.A. SMITH, R.P. SOBEK, L.S. COLES, D.A HODGES, A.M ROBB, P.L SINCLAIR "The system design of JASON, a computer-controlled mobile robot" Proc. IEEE SMC Conference on Cybernetics and Society San Francisco California, USA, September 1975.
41. P.J. BLATMAN "Environnent Modeling and Model Pre-Processing for a Self Contained Mobile Robot". Proceedings from IEEE Systems, Man and Cybernetics, Conference on Cybernetics ans Society, San Francisco CA, Sept.1975
42. R.A. LEWIS, A.K BEJCZY, "Planning considerations for a Roving Robot with Arm", Third International Joint Conference on Artificial Intelligence, California, August 1973.
43. R. ESKENAZI, R. CUNNINGHAM "A random Access Picture Digitizer Display, and Memory System", 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge Massachussetts, USA, 1977.
44. M.D. LEVINE, D.A O'HANDLEY; G.M YAGI "Computer Determination Of Depth Maps" Computer Graphics And Image Processing, Vol.2, 1973
45. Y. YAKIMOVSKY, R. CUNNINGHAM, "A system for Extracting Three-Dimensional Measurements from a stereo pair of TV Camera" Computer Graphics and Image Processing, Vol 7, 1978,

46. R.A. LEWIS, A.R. JOHNSTON, "A Scanning Laser Rangefinder for a Robotic Vehicule". 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge Massachussetts, U.S.A., 1977.
47. J.P. ODENTHAL, "A Linear Photodiode Array Employed in a Short Range Laser Triangulation Obstacle Avoidance Sensor". M.S. Thesis Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New-York, December 1980.
48. S. ALLAND, C.N. SHEN, "Obstacle Detection for the Mars Rover by a Two Dimensional Rapid Estimation Scheme". Modeling and Simulation, Vol. 8, Part. 1. Proceeding of the Eighth Annual Pittsburgh Conference 1977.
49. H.P. MORAVEC, "Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover". Ph. D Thesis Stanford University, U.S.A., May 1980.
50. H.P. MORAVEC, "Rover Visual Obstacle Avoidance". International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Aug. 1981.
51. M. JULLIERE, L. MARCE, H. PLACE, "Capteur de Navigation pour un Robot Mobile". Congrès AFCET, Nantes, Octobre 1981.
52. M. JULLIERE, J. LEFLECHER, L. MARCE, H. PERRICHOT, H. PLACE, "Détection Simple d'Obstacles : Bras Tactile pour Robot Mobile". Le Nouvel Automatisme, Avril 1981.
53. S. MONCHAUD, R. PRAT, "Coupled Colour and Distance Sensor for a Mobile Robot". ISIR, Paris, Juin 1982.
54. R.A. JARVIS, "A Mobile Robot for Computer Vision Research". Australian Computer Scientific Communication. Vol. 2, n° 1. Janv. 1980, pp. 39-51.
55. Y. KANAYAMA, J. IJIMA, S. YUTA, "How does a Mobil Robot understand its world ?". Technical Report, Institute of Information Sciences and Electronics. Université de Tsukuba, Japon, Décembre 1979.

56. J. IIJIMA, S. YUTA, Y. KANAYAMA, "Elementary fonctions of a self-contained Robot "YAMABICO 3.1". 11th International Symposium on Industrial Robot, Tokyo, Japan, October 1981.
57. S. FUJII, K. YOSHIMOTO, H. OHTSUKI, H. KIKUCHI, H. MATSUMOTO, K. YAMADA, "Computer Control of a Locomotive Robot". 11th International Symposium on Industrial Robot, Tokyo, Japan, October 1981.
58. T. NAKAMURA, "Edge Distribution Understanding for Locating a Mobile Robot". 11th International Symposium on Industrial Robots, Tokyo, Japan, October 1981.
59. H.P. MORAVEC, "The CMU ROVER". Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Technical Report 1982.
60. G. BAUZIL, P. RIBES, "Projet HILARE : réalisation d'un robot mobile". Note Interne LAAS-CNRS, 1979.
61. M. BRIOT, G. BAUZIL, R. CHATILA, "Présentation d'HILARE, un robot mobile". Journées d'Automatique de l'IRISA, Rennes 1979.
62. G. BAUZIL, M. BRIOT, P. RIBES, M. VAISSET, "Le sous-système de navigation par ultrason du robot mobile HILARE". AFCET 3^{ième} Congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle. Nancy, Sept. 81.
63. M. VAISSET, Thèse de Docteur-Ingénieur à paraître.
64. G. GIRALT, R. SOBEK, R. CHATILA, "A multi-level planning and navigation système for a mobil robot, A first approach to HILARE". 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Tokyo, Août 1979.
65. R. CHATILA, G. GIRALT, "A task-oriented navigation system for the mobile robot HILARE". 2nd International Meeting of Artificial Intelligence, Leningrad, Octobre 1980.

66. "Conception d'un système décisionnel distribué à modules experts pour robot mobile à grande autonomie." A.T.P. Intelligence Artificielle 1982. Thème C Robotique.
67. M. BRIOT, "Notions sur la perception de l'environnement d'un robot". Publication LAAS 2475, 1981.
68. P.H. WINSTON, "The Psychology of Computer Vision". Mc Gray. Hill Book Company, 1975.
69. A. ROSENFELD, A.C. KAK, "Digital Image Processing". Academic Press, Inc. 1976.
70. R.C. GONZALEZ, P. WINTZ, "Digital Image Processing". Addison - Wesley Publishing Company, Inc. 1977.
71. W.K. PRATT, "Digital Image Processing". A Wiley-Interscience Publication, 1978.
72. J.S. WESKA, "A Survey of Threshold Selection Techniques". Computer Graphics Image Processing. 5. 1976.
73. Y. NAKAGAVA, A. ROSENFELD, "Some experiments on variable thresholding". Pattern Recognition, 1979.
74. J.S. WESKA, R.N. NAGEL, A. ROSENFELD, "A threshold selection technique". IEEE Computers 23, 1974.
75. J.D. DESSIMOZ, "Traitement des Contours en Reconnaissance des Formes Visuelles : Application en Robotique". Thèse de Docteur-ès-Sciences Techniques, Lausanne, Suisse, 1980.
76. B. PORCHER LABREUILLE, "Contribution à la modélisation d'une image en reconnaissance des formes". Thèse de 3^{ième} cycle, Nantes, 1979.
77. C. BIGUEREAU, "Tri Automatique de Pièces de Fonderie". Thèse de Docteur-Ingénieur, Rennes, 1978.

78. M. BASSEVILLE, B. ESPIAU, J. GASNIER, "Détection Séquentielle de Contours pour Capteurs d'Images Linéaires et Applications". 2^{ième} Congrès AFCET-IRIA, Tome II. Toulouse 12-13-14 Sept. 1979.
79. P. BORGNA, "Comparaisons de méthodes locales ou régionales de détection de contours". Note Technique LAAS, 1982.
80. CH. CHEN, "Note on a modified gradient method for image analysis". Pattern Recognition 10, 1978.
81. GB. SHAW, "Local and Regional Edge Detectors : Some Comparisons". Computer Graphics Image Processing, 9. 1979.
82. L. MERO, Z. VASSY, "A simplified and fast version of the hueckel algorithm for finding optimal edges in a picture". 4th Conference on Artificial Intelligence, Sept. 75.
83. P.R. HORAUD, PYCOULON, "Un algorithme pour détecter des objets à forme complexe dans une image". 3^{ième} Congrès AFCET, Sept. 1981.
84. A. CHECROUN, C. ROCHE, "La notion de squelette dans les problèmes de reconnaissance des formes. Automatismes, tome 15, Avril 1970.
85. P. MARTHON, A. BRUEL, G. BIGUET, "Squelétisation par calcul d'une fonction discriminante sur un voisinage de 8 points". 2^{ième} Congrès AFCET-IRIA, Tome II, Sept. 1979.
86. F. STUCK, "Réalisation d'un système adaptatif de traitement d'images pour l'identification et la localisation de pièces en robotique". Thèse de 3^{ième} cycle, n° 2419, U.P.S. Toulouse, Dec. 1980.
87. J.C. TALOU, "Contribution au traitement d'images pour la robotique. Réalisation d'un extracteur rapide de contours". Thèse de 3^{ième} cycle, U.P.S., à paraître.

88. A. RIAD, "Identification et localisation d'objets partiellement observés en vue de leur manipulation en robotique". Thèse de 3^{ième} cycle, U.P.S., à paraître.
89. U. RAMER, "An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Planes Curves". Computer Graphics and Image Processing. 1. 1972.
90. T. PAVLIDIS, "A review of algorithms for shape analysis". Computer Graphics and Image Processing. 7. 1978.
91. J. SKLANSKY, V. GONZALEZ, "Fast Polygonal Approximation of Digitized Curves". Pattern Recognition, Vol. 12, 1980.
92. A. GIRAUD, "Une méthode d'approximation de contours par droites et arcs de cercle". Note interne LAAS, 1981, Toulouse.
93. W.A. PERKINS, "A model-based vision system for industrial parts". IEEE Trans. on Computer, Vol. C.27, n° 2, Feb. 1978.
94. M. BRIOT, "La Stéréognosie en robotique. Application au tri de solides". Thèse de Docteur d'Etat, U.P.S. Toulouse, Nov. 1977.
95. C. BOURDEAU, M. BRIOT, J.M. PONS, J.C. TALOU, "Etude et réalisation d'un extracteur rapide de contours fermés d'une image binarisée". Troisième Congrès de Reconnaissance des Formes et d'Intelligence Artificielle. AFCET, Nancy, Sept. 81.
96. M. FERRER, G. BAUZIL, M. BRIOT, "Etude d'un système de traitement d'images destiné au robot mobile HILARE". Huitième Colloque sur le traitement du signal et ses applications, GRETSI, Nice, Juin 1981.
97. M. FERRER, M. BRIOT, J.C. TALOU, "Study of a video image treatment system for the mobil robot HILARE". 1st International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. Stratford, Upon-Avon, U.K., April 1981.

98. J. BAJON, "Cours de télévision et de visualisation de données".
ENAC Toulouse, 1973.
99. Y. THAON, "Localisation et mesures dynamiques par caméra Vidicon".
Thèse de D.I., I.N.P. Grenoble, Mai 1979.
100. J.P. CHARRAS, "Système interactif d'acquisition et de traitement
d'image. Applications au cinéma". Thèse de D.I., I.N.P. Grenoble,
Juil. 1980.
101. W.S. BOYLE, G.E. SMITH, "Charge coupled semiconductor devices". Bell
Syst. Tech. J., Vol. 49, pp 587-593, 1970.
102. G.F. AMELIO, "Physics and Applications of Charge-Coupled Devices".
Fairchild Camera and Instrument Corporation, 1974.
103. FAIRCHILD, "Charge Coupled Devices". Documentation Technique, 1976.
104. Y. THORAVAL, "CCD : des registres à transfert de charges". Micro-
Systèmes n° 19. Sept/Oct. 1981.
105. J.FARRE, "Photodétecteurs MIS sur Semiconducteurs Intrinsèques pour
Imagerie Infrarouge Thermique. Aide à la Conception de Matrices dans
le plan focal". Thèse d'Etat n° 939, U.P.S. Toulouse, Juil. 1980.
106. F.L.J. SANGSTER, K. TEER, "Bucket-Brigade Electronics. New Possibili-
ties for Delay, Time-Axis, Conversion and Scanning". IEEE, Journal of
Solid State Circuits, Vol. Sc.4, N° 3, June 1969.
107. P.K. WEIMER, M.G. KOVAC, F.V. SHALLCROSS, W.S. PIKE, "Self-Scanned
Image Sensors Based on Charge Transfer by the Bucket-Brigade Method".
IEEE, Transactions Electron Devices, Vol. ED. 18, N° 11, November 1971.
108. RETICON, "Solid State Image Sensors". Documentation Technique, 1977.
109. RETICON, "Camera/Controller System (MC 520/RS 520)". Operation and
Maintenance Manual, 1978.

110. J. LE HIR, "Cours de Physique". Ecole Nationale Ingénieur de Brest.
111. M. CALZADA TORRES, Note Interne LAAS, 1978.
112. A. ORSZAG, "Les lasers : Principes, réalisations, applications". Masson et Cie, Paris, 1968.
113. M. BROTHERTON, "Fonctionnement et applications des lasers et masers". Dunod 1970.
114. L. GOLDMAN, "Applications of the Laser". C.R.C. Press-Cleveland (Ohio), 1973.
115. M.J. BEESLEY, "Laser and their applications". Halsted Press, New-York, 1976.
116. M. STERU, "Exploitation des nouvelles découvertes de la physique et de la technologie dans le contrôle industriel". Automatismes n° 1-2, Janvier-Février 1972, pp 37-42.
117. R. MARTI, "Les applications métrologiques du laser se multiplient". Automatique et Informatique Industrielles n° 71, Novembre 1978, pp 37-41.
118. T.R. PRYOR, R.K. ERF, A.D. GARA, "Applications of Lasers to Production Metrology, Control, and Machine "Vision". Proceedings of IEE, Vol. 70, n° 6, June 1982.
119. M. FERRER, "Rapport de stage DEA-EEA Automatique 1978-1979". Système de Perception - Contribution à l'utilisation en complément de la vision d'un télémètre laser.
120. G. HEPNER, G. PIRCHER, "Déflexion Electrooptique de la lumière". Revue technique Thomson-CSF, Vol. 1, n° 1, Mars 1969.
121. A.M. THOMPSON, "The Navigation System of the J.P.L. Robot". Proc. 5th IJCAI. Cambridge, Mass. U.S.A., Août 1977.

Thèse de Monsieur FERRER Michel

« Système multisenseurs de perception 3D pour le robot mobile HILARE »

RESUME

L'étude présentée s'insère dans le vaste domaine de la vision artificielle. Elle concerne plus particulièrement l'intégration du système de perception trois dimensions (3D) du robot mobile autonome HILARE. Ce système est composé d'une caméra matricielle à semiconducteurs, d'un télémètre laser et d'une structure mécanique assurant la déflexion du faisceau laser.

Dans ce mémoire sont décrits : la conception de la structure déflexrice ; le logiciel de traitement des images vidéo multiniveaux basé sur l'utilisation d'un opérateur topologique ; le logiciel d'analyse des données télémétriques. Ces logiciels permettent respectivement de localiser le robot par détection de balises lumineuses, et de déterminer la projection au sol des obstacles présents dans le secteur exploré. Ces informations sont transmises au niveau supérieur par voie hertzienne.

MOTS CLES : Robotique, robot mobile, perception 3D, multisenseurs, télémètre-laser.

ABSTRACT

The thesis work herein presented contributes to the domain of computer vision. It concerns the integration of a three dimension (3D) perception system on board the autonomous Mobile Robot HILARE. The perception system is composed of a solid state video camera, a laser rangefinder and a laser beam deflector.

This memoir describes the beam deflector, the software for treatment of multilevel video images using a topologic operator and the software for analysing distance range data. The system has two objectives. Situate the robot by detecting light emitted from beacons of known location, and to calculate floor projections of the obstacles in the region being explored. This information is sent by radio to higher level processes.

KEY WORDS : Robotics, Mobile Robot, 3D perception, Multiple sensors, Video camera, Laser rangefinder.