

50376
1984
283

50376
1984
283

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Automatique

par

Michel EDEL

Maître ès-Sciences



CONTRIBUTION A L'ELABORATION DE NIVEAUX DE STRATEGIES DE
COMMANDE HIERARCHISEE POUR ROBOTS DANS UN CONTEXTE DE
PREHENSION DE DEUXIEME GENERATION.

Soutenue le 21 Novembre 1984 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury: MM.	P. VIDAL	Président et Rapporteur
	J.G. POSTAIRE	Examineur
	C. PAVLIN	Invité
	Ph. BIANCHI	Invité
	D. JOLLY	Invité

A V A N T - P R O P O S

=====

Notre vive reconnaissance s'adresse avant tout à Monsieur le Professeur VIDAL, Directeur du Centre d'Automatique de LILLE, pour avoir soutenu et dirigé notre travail et pour l'honneur qu'il nous fait en présidant notre jury. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde considération.

Nous tenons à souligner l'attention que nous a manifesté Monsieur POSTAIRE, Professeur à l'Université de LILLE I, en acceptant de participer à notre jury. Qu'il veuille bien recevoir nos vifs remerciements.

Que Monsieur PAVLIN, Ingénieur en Chef de la Société BERTIN, trouve ici l'expression de notre reconnaissance pour avoir permis par son dynamisme d'élaborer notre site expérimental de préhension, point de départ de nos travaux.

Nous tenons à remercier Monsieur JOLLY, Assistant au Centre d'Automatique de LILLE, pour sa précieuse contribution à notre étude.

Nous sommes également très honorés de la présence dans ce jury de thèse, de Monsieur BIANCHI, Président de la Société Nord Machine Spéciale, dont la compétence en matière de mécanique permet un regard nouveau sur notre travail.

Enfin, nous ne saurions terminer cet avant-propos, sans exprimer notre reconnaissance à toute l'équipe du Centre d'Automatique dont les multiples compétences suscitent une dynamique de travail enrichissante.

Un dernier mot de remerciement à Mademoiselle Marie-Christine D'HALLUIN et à Monsieur Jean HOUZE, pour leur précieuse collaboration à la réalisation de cet ouvrage.

TABLE DES MATIERES

=====

CHAPITRE D'INTRODUCTION

O-1-	ACTIVITES DE PREHENSION CHEZ L'HOMME	2
O-2-	LA FONCTION PREHENSION D'UN ROBOT MANIPULATEUR	6
O-2-1-	Principe	
O-2-2-	Description de l'interaction bras manipulateur/organe terminal	
O-3-	PRESENTATION DU PLAN DU MEMOIRE	14

CHAPITRE I PRINCIPES DE COMMANDES DU VECTEUR ET DE L'EFFECTEUR

I-1-	LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE GEOMETRIQUE	20
I-2-	LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE CINEMATIQUE	24
I-3-	LA GENERATION DE TRAJECTOIRES	26
I-4-	PREHENSION DE PREMIERE GENERATION	31
I-4-1-	Par effet superficiel	
I-4-2-	Par serrage rigide	
I-4-3-	Par serrage déformant	
I-5-	STRUCTURE DE COMMANDE D'UN EFFECTEUR DE DEUXIEME GENERATION	40
I-5-1-	Introduction	
I-5-2-	Les structures de commande hiérarchisées	
I-5-3-	La structure de commande retenue	
I-6-	DESCRIPTION GENERALE DE LA STRUCTURE DE COMMANDE DE L'EFFECTEUR	46
I-7-	CONCLUSIONS	56
	BIBLIOGRAPHIE	59

CHAPITRE II PERCEPTION ET PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT

II-1-	LA PERCEPTION TACTILE CHEZ L'HOMME	63
II-2-	ELEMENTS DE PERCEPTION D'UN ROBOT MANIPULATEUR	65
II-2-1-	Perception proprioceptive	
II-2-2-	Perception extéroceptive locale	
II-2-3-	Perception extéroceptive globale	

II-3-	ANALYSE DE L'INFORMATION LOCALE D'UN ROBOT MANIPULATEUR	68
II-3-1-	Détection de présence	
II-3-2-	Estimation de distance par filtrage	
II-3-3-	Reconnaissance de caractéristiques simples liées à l'objet	
II-4-	NATURE DES INTERACTIONS ROBOT MANIPULATEUR/ENVIRONNEMENT	75
II-4-1-	Au niveau du vecteur	
II-4-2-	Interactions effecteur/environnement	
II-5-	PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DU ROBOT MANIPULATEUR	81
II-5-1-	Au niveau du vecteur	
II-5-2-	Au niveau de l'effecteur	
II-6-	CONCLUSIONS	89
	BIBLIOGRAPHIE	93
	ANNEXES 1 ET 2	94

CHAPITRE III APPLICATION : ETUDE ET REALISATION D'UN ORGANE DE PREHENSION
DE DEUXIEME GENERATION

III-1-	DESCRIPTION DE LA MAQUETTE	113
III-1-1-	Structure mécanique	
III-1-2-	Nature des informations	
III-1-3-	Commande des actionneurs	
III-1-4-	Choix de la structure matérielle de commande de l'effecteur	
1-4-1	Commande intégrée de l'effecteur	
1-4-2	Commande à distance	
III-2-	MISE EN OEUVRE DE LA MAQUETTE	135
III-2-1-	Essais préliminaires et commande à partir d'un monochip	
III-2-2-	Commande monoprocesseur	
III-3-	ANALYSES ET INTERPRETATIONS	147
III-3-1-	Principes mécaniques	
III-3-2-	La commande	
III-3-3-	Conclusions.	
	BIBLIOGRAPHIE	156
	ANNEXES 3 ET 4	157

CHAPITRE IV - CONCLUSIONS GENERALES	164
---	-----

RESUME GENERAL

L'étude des performances de la manipulation chez l'homme fait apparaître une propriété essentielle concernant la structure de la commande utilisée : il s'agit d'une commande répartie ou dualisée, l'une associée aux activités de la main, l'autre aux activités de l'ensemble des segments corporels supportant la main. Ainsi toute activité gestuelle et manuelle est la résultante d'une collaboration horizontale et bidirectionnelle de ces deux entités de commande dont l'aboutissement se concrétise à travers une structure mécanique redondante mais médiocre, dotée d'un sensorium complexe et sophistiqué.

A partir de cette remarque développée au chapitre d'introduction, nous nous proposons dans un deuxième temps, par l'intermédiaire d'une description formelle des activités d'un robot manipulateur, de présenter clairement les activités spécifiques du vecteur et de l'effecteur, tant au niveau technologique que fonctionnel, ce qui nous conduira à proposer une structure générale de commande d'un robot manipulateur intégrant les différents modes de fonctionnement possibles : manuel, automatique, mixte ...

Cette structure générale sera ensuite développée dans les deux premiers chapitres de ce mémoire :

- le premier abordera les aspects spécifiques à la commande du vecteur et de l'effecteur,
- le second traitera dans un premier temps le problème de l'interaction avec l'environnement pour aboutir dans un deuxième temps à une structure de commande de robot manipulateur autorisant cette symbiose environnement-commande.

Enfin, en troisième partie, nous présenterons le résultat de nos travaux, à la base de ces développements, concernant l'étude et la réalisation d'un organe de préhension doté de facultés de perception et de commande permettant une intégration structurelle et fonctionnelle dans un schéma général de commande tel qu'il est défini ici.

CHAPITRE D'INTRODUCTION

O - 1 - ACTIVITES DE PREHENSION CHEZ L'HOMME

O - 2 - LA FONCTION PREHENSION D'UN ROBOT MANIPULATEUR

O - 2 - 1 - Principe

O - 2 - 2 - Description de l'interaction bras manipulateur/organe terminal

O - 3 - PRESENTATION DU PLAN DU MEMOIRE

O - 1 - ACTIVITES DE PREHENSION CHEZ L'HOMME

L'étude des performances de la manipulation chez l'homme (PEC 77) montre clairement que le manipulateur humain est capable d'effectuer un très grand nombre d'opérations avec des performances exceptionnelles, en dépit des caractéristiques mécaniques médiocres de ses composantes : faible raideur de ses segments, jeux articulaires, inerties importantes et variables... De plus, le membre supérieur de l'homme, avec son organe terminal de préhension, la main, constitue un système polyarticulé complexe, avec redondance des degrés de liberté ce qui le rend exceptionnellement adaptable et versatile. Les degrés de liberté de l'ensemble main-poignet de l'homme sont les suivants :

- trois rotations pour le poignet,
- trois degrés de liberté pour le pouce (deux à la base et une articulation),
- quatre degrés de liberté pour les autres doigts (deux à la base et deux articulations),

soit un total de vingt-deux degrés de libertés.

La main de l'homme est capable d'exécuter d'innombrables actions grâce à sa fonction essentielle de préhension multiple. De la pince de homard à la main du singe, cette faculté de préhension se retrouve, mais chez aucun autre que l'homme elle n'atteint ce degré de perfection. Elle le doit à une disposition particulière du pouce, qui peut s'opposer à tous les autres doigts.

La préhension peut se faire de différentes façons :



prise digitale



prise en anneau



prise latérale

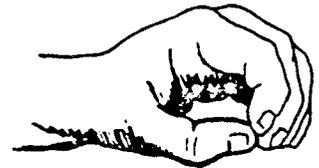
.../...



prise en crochet



prise sphérique



prise unguéale

Ces modes de préhension dépendent de plusieurs facteurs (LEV 70) :

- les caractéristiques de l'objet,
- les possibilités anatomiques et fonctionnelles de la main,
- les intentions du sujet quant au but qu'il s'assigne,
- les attitudes particulières à l'individu.

L'intelligence qui commande cette main est remarquable comparée aux divers essais de commandes de prothèses effectués de par le monde, et surtout possède plusieurs systèmes de rétroactions qui, même si elles apparaissent comme des fonctions réflexes, n'en sont pas moins continuellement prises en compte. Signalons quelques réalisations de prothèses de main : (JAK 69), (STE 77), (UME 78).

C'est au niveau de la main que sont sommés les efforts résultant de la mise en jeu des membres et du tronc ; c'est aussi à ce niveau que force et vitesse sont appliquées aux outils, objets ou matériaux. Deux modalités de mouvements manuels peuvent être dégagées :

- la main est entraînée dans des activités non spécifiques mettant en jeu un certain nombre d'autres segments corporels ; par exemple la main est déplacée en conséquence d'un mouvement généralisé du

.../...

.../...

membre supérieur qui peut être facilité par un mouvement d'accompagnement du tronc,

- la main effectue des activités spécifiques de manipulation dont l'exécution convenable nécessite l'immobilisation dans une posture rigide d'une partie au moins du membre supérieur.

Pour chacune de ces deux modalités de mouvements, les activités sont plus spécialement dirigées vers un groupe préférentiel de segments corporels, tant pour ce qui est de la perception de l'environnement qu'en ce qui concerne la définition et l'application des commandes :

- lever le bras, pointer du doigt, ramener la main vers le corps, se baisser en vue de ramasser un objet : activation des degrés de liberté et des capteurs des segments corporels autres que la main,
- saisir, tenir, assembler des pièces de dimension réduite, couper avec des ciseaux : sollicitation des capteurs et actionneurs de la main.

Signalons également l'importance de l'apprentissage ou éducation manuelle indispensable à une mise en valeur de l'ensemble des possibilités d'un outil aussi performant. La vie courante s'accommodant d'une éducation manuelle très sommaire, les nombreuses potentialités d'action que recèle la main sont souvent largement sous-employées. Et lorsque l'une d'entre elle est intentionnellement développée, il y a lieu de maintenir une activité régulière à son sujet pour conserver une certaine dextérité.

Il résulte de ces remarques que les performances remarquables enregistrées chez l'homme dans l'exécution de tâches manuelles ne peuvent être que le produit de l'importance et de l'intelligence de la structure de contrôle, capable d'une part de traiter une infinité d'informations provenant de capteurs biologiques nombreux et variés, et douée d'autre part de possibilités de commande distribuant judicieusement les rôles et pouvoirs de décision selon les spécificités des tâches à accomplir.

.../...

.../...

Dans le cas général, la fonction de préhension chez l'homme comprend deux phases principales : l'approche et la saisie de l'objet.

L'oeil ayant repéré dans l'espace la position de l'objet, l'approche de la main s'effectue suivant un mode semi-automatique, contrôlée par les capteurs responsables de la coordination motrice du système articulaire (PER 79). La reconnaissance de la forme, de la position précise et de l'état d'équilibre de l'objet s'effectue visuellement pendant la phase d'approche, et détermine le positionnement et l'orientation de la main en vue de la saisie.

En l'absence de vision, le processus de saisie est très différent. La reconnaissance de la forme est alors tactile et intervient après la phase d'approche. Celle-ci s'effectue à tâtons, de façon plus ou moins aléatoire, le sujet n'ayant qu'une notion imprécise de la position de l'objet dans l'espace. Le sujet balaye alors l'espace environnant en suivant une stratégie qui lui est propre et qui dépend de la connaissance à priori dont il dispose de l'objet (poids, stabilité, fragilité, volume...). Cette approche dure jusqu'à ce qu'un premier contact s'établisse entre la main et l'objet. Alors commence la phase de reconnaissance de l'objet par palpation afin de positionner et d'orienter correctement la main.

Ainsi, il existe une collaboration étroite entre la main et l'ensemble des segments corporels qui la supporte. La nature de cette collaboration est liée à la spécificité de la tâche à accomplir. Cette dernière impose une prépondérance à certains segments corporels et définit une hiérarchisation des capteurs de perception de l'environnement.

.../...

.../...

O - 2 - LA FONCTION PREHENSION D' UN ROBOT MANIPULATEUR

O - 2 - 1 - Principe

On peut considérer un robot comme une entité agissant selon des objectifs bien précis sur son environnement ; il exécute des transformations de son univers d'évolution. Son activité peut être décrite au moyen de tâches, chacune pouvant être définie comme la différence entre deux états stables de l'univers, l'état final étant l'état désiré, l'état initial étant l'état de départ. L'exécution d'une tâche par ce robot, en mode interactif avec son environnement, va donc se réaliser par une suite de séquences enchevêtrées, perception de l'environnement, exécution d'une sous-tâche, et ce jusqu'à l'aboutissement de la tâche.

On a l'habitude de considérer un robot manipulateur comme un tout, comme une entité aux multiples possibilités, animée par une commande centralisée, localisée dans un unique calculateur. Que l'on fonctionne en mode automatique, en mode semi-automatique ou en téléopération, cet unique calculateur assume l'intégralité des fonctions vitales du système :

- perception de l'environnement,
- traitement des informations,
- prise de décision, génération de plans,
- élaboration des consignes aux actionneurs (avec prise en compte de la cinématique et de la dynamique du système),
- commande de l'ensemble des degrés de liberté.

Qu'il s'agisse d'un positionnement approximatif d'un ensemble de degrés de liberté en vue d'une opération ultérieure, d'une phase terminale de saisie ou d'un assemblage, qu'il s'agisse d'une perception globale de l'environnement (image caméra pour détection d'obstacles) ou d'une perception locale de celui-ci (informations des proximètres intégrés à l'organe terminal), l'exécution des fonctions vitales énumérées ci-dessus se fera toujours selon un même schéma vertical et rigide. Ainsi est-il entré dans les habitudes des concepteurs de procéder à une division verticale d'un processus complexe tel qu'un robot manipulateur selon une direction descendante de l'information. L'on aboutit de la sorte à des niveaux de fonctions de commande, chacun d'eux disposant d'une possibilité d'initiative en rapport direct avec sa place dans la hiérarchie. La concrétisation d'un objectif

.../...

.../..

global se traduit par une différenciation progressive et descendante d'une information de haut niveau, alors que tout retour d'état est intégré de manière ascendante par les étages successifs de la pyramide, constituée d'un ensemble de blocs fonctionnels restant invariablement à leur place respective.

En fait, la démarche qui tend à proposer une commande hiérarchisée pyramidale figée pour un robot manipulateur ne tient pas compte du fait que les activités pourraient être dirigées à partir de plusieurs entités de commandes, ainsi qu'il en va pour les activités de préhension chez l'homme. Les activités de préhension chez l'homme sont issues de la collaboration d'au moins deux entités, animée chacune par des critères d'évolution propre : la main d'une part, et l'ensemble des autres segments corporels mis en jeu lors d'activités manuelles d'autre part. Et la seule façon cohérente de commander un système complexe composé de plusieurs entités de commandes ne peut se réduire en une simple hiérarchisation verticale et rigide des tâches, mais consiste en une allocation dynamique des moyens et pouvoirs de commande et décision.

Dans cette optique, nous proposons de considérer l'ensemble robot manipulateur, non pas comme une entité unique, mais comme un couple de deux fonctions indépendantes, collaborant à un même travail, et pouvant chacune, selon les spécificités et contraintes du moment, prendre en charge la direction des opérations :

- d'une part, il y a le système mécanique articulé chargé de mouvoir l'organe terminal selon des modalités liées à la nature de la tâche à exécuter ;

- d'autre part, il y a un organe terminal qui assure la phase terminale du travail en rapport avec ses possibilités propres (préhension, serrage, peinture,...)

La complexité des tâches manuelles est fonction du nombre d'actions successives que nécessite la réalisation de la tâche et des exigences diverses qui la caractérisent : vitesse, force, précision, ... Cet ensemble est rendu possible par l'intelligence de conception et la fiabilité de l'organe terminal humain.

.../...

.../...

Il en sera de même pour la préhension industrielle. On devra aboutir à la réalisation d'organes terminaux intelligents, dotés d'une capacité à résoudre le problème de la manipulation. Ces outils auront une architecture mécanique autorisant plusieurs types de préhension (digitale, sphérique, ...), un équipement sensoriel permettant un contrôle dynamique des opérations (capteurs tactiles, proximitres, retour d'effort...) et un logiciel de commande pouvant diriger certaines phases du travail :

- d'une part, par l'application de stratégies adaptées aux diverses situations, cette commande locale prendra en charge les activités au niveau de l'effecteur (analyse des informations de perception tactile, décision, commande des degrés de liberté de la pince) ;

- d'autre part, elle aura comme tâche de spécifier au robot manipulateur la séquence de gestes et les contraintes relatives aux mouvements, de manière à aboutir à l'objectif général.

L'intérêt d'une telle structure consiste à accroître le rendement des algorithmes de commande tout en réduisant la complexité et la dimension du matériel informatique mis en oeuvre. La structuration du logiciel de commande nécessite une phase préalable de description formelle du système conforme à la philosophie présentée ci-dessus. Le paragraphe suivant a pour objet de présenter cette description empruntée à (AND 80).

0 - 2 - 2 - Description de l'interaction bras manipulateur / organe terminal

a) Point de vue technologique :

Nous nous plaçons dans le cas le plus fréquent d'une machine présentant un seul organe capable d'agir sur l'environnement. Cette machine se décompose donc en deux parties :

- le vecteur, dont le rôle (purement interne à la machine) est d'assurer le déplacement et l'orientation de l'organe terminal,
- l'effecteur, dont le rôle est d'effectuer un certain nombre d'actions sur l'environnement du robot manipulateur.

.../...

.../...

Nous sommes ainsi amenés à distinguer :

- les k actionneurs de position qui entraînent les différents segments du vecteur,
- les $(m-k)$ actionneurs relatifs aux différentes fonctions de l'effecteurs : préhension, entraînement d'un outil rotatif (vissage, perçage...), activation d'un dispositif de peinture,...

Parallèlement, on associe à chacun des m actionneurs une variable d'action x_i caractérisant la grandeur physique de sortie de l'actionneur \underline{x}_i (position angulaire, force de serrage,...) avec dans tous les cas x_i appartenant à un intervalle fermé I_i de la droite réelle :

$$\forall i : x_i \in I_i ; I_i = [x_{i \text{ min}}, x_{i \text{ max}}] \in \mathbb{R}$$

On appelle situation s de la machine à un instant donné le m -uplet :

$$s = (x_1, \dots, x_m) \quad (0-1)$$

L'ensemble S des situations possibles est ainsi un pavé dans \mathbb{R}^m souvent appelé univers des actions :

$$S = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_m \quad (0-2)$$

On appelle évolution $s(t)$ de la machine une suite continue de situations occupées successivement au cours d'un intervalle de temps donné.

Ainsi, le m -uplet de variables d'actions se décompose de la manière suivante :

$$\underline{s} = (\underline{s}_1, s_2) \quad (0-3)$$

avec :

$$s_1 = (x_1, \dots, x_k) \in S_1$$

$$s_2 = (x_{k+1}, \dots, x_m) \in S_2$$

.../...

.../...

Nous dirons par la suite qu'à toute situation s de la machine correspond une certaine posture s_1 de son vecteur et un certain emploi s_2 de son effecteur.

De même, nous considérons qu'une évolution $s(t)$ consiste en un geste $s_1(t)$ réalisé par le vecteur et en un travail $s_2(t)$ réalisé par l'effecteur.

b) Point de vue fonctionnel

La position dans l'espace physique usuel \mathbb{R}^3 d'un point donné P de l'organe terminal et l'orientation de ce dernier peuvent être décrites par six coordonnées généralisées x_i . Les trois premières coordonnées correspondent à la position X_1 de l'effecteur, les trois autres à son orientation X_2 ; le sextuplet $x = (X_1, X_2)$ sera appelé disposition de l'effecteur.

L'architecture du système relie la disposition de l'effecteur à la posture du vecteur; elle établit donc une application, généralement non linéaire de S_1 dans \mathbb{R}^6 :

$$x = f(s_1) \quad (0-4)$$

A un geste $s_1(t)$ correspond de même un mouvement $x(t)$, constitué d'un déplacement $X_1(t)$ associé à un pointage $X_2(t)$

Nous désignons par X le domaine atteignable par le vecteur, c'est-à-dire l'ensemble des positions de l'effecteur correspondant à toutes les postures possibles du vecteur:

$$X = f(s_1) \quad (0-5)$$

Le fonctionnement de l'effecteur à un instant donné est caractérisé par un n -uplet y de fonctions élémentaires y_i , que nous appelons le rôle de l'effecteur:

$$y = (y_1, \dots, y_n) \quad (0-6)$$

.../...

.../...

y résulte évidemment d'un certain emploi s_2 des actionneurs spécifiques a_i , $i = k+1, \dots, m$; on peut donc écrire :

$$y = g(s_2) \quad (0-7)$$

où g est une application de S_2 dans \mathcal{R}^n .

A un travail $s_2(t)$ correspond de même une opération $y(t)$ de l'effecteur. Si l'on désigne par Y l'ensemble des rôles exécutables par l'effecteur, on a évidemment :

$$y = g(S_2) \quad (0-8)$$

Dans la plupart des cas, g est une application biunivoque de S_2 dans Y , voire l'identité.

Si nous revenons à la machine globale, nous constatons qu'à la notion de situation, définie à partir des différentes variables d'action, nous pouvons associer d'une part la disposition x , d'autre part le rôle y . Nous poserons :

$$z = (x, y) \quad (0-9)$$

et désignerons z sous le vocable de fonction traduisant la réalisation simultanée d'une disposition et d'un rôle.

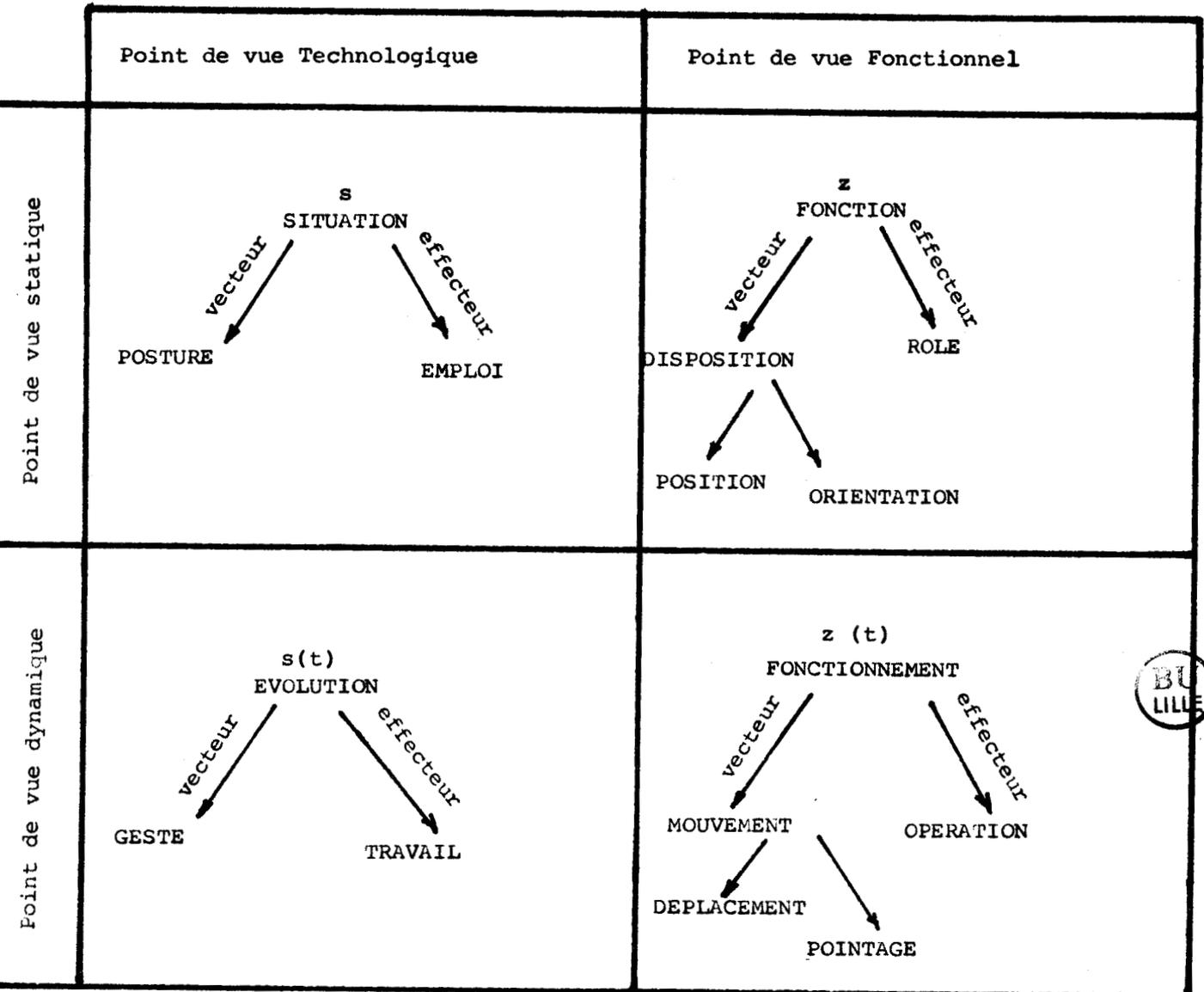
Une situation donnée s des actionneurs correspond donc à la réalisation d'une certaine fonction z du robot manipulateur ; de même, une évolution donnée $s(t)$ correspond à l'exécution d'un certain fonctionnement $z(t)$. On appellera Z l'ensemble des fonctions réalisables :

$$Z = X \times Y \quad (0-10)$$

Ces notations sont résumées dans le tableau ci-après :

.../...

.../...



BU
LILLE

Ce formalisme permet une différenciation non équivoque de la nature des activités relatives au vecteur de celles spécifiques à l'effecteur. Toute activité se traduisant au niveau technologique par une action élémentaire de type posture s_1 et/ou de type emploi s_2 correspondra à une concrétisation d'une étape du fonctionnement $z(t)$ caractérisée par une triple activité de déplacement (positionnement du vecteur), de pointage (orientation de l'effecteur) et d'opération (rôle de l'effecteur).

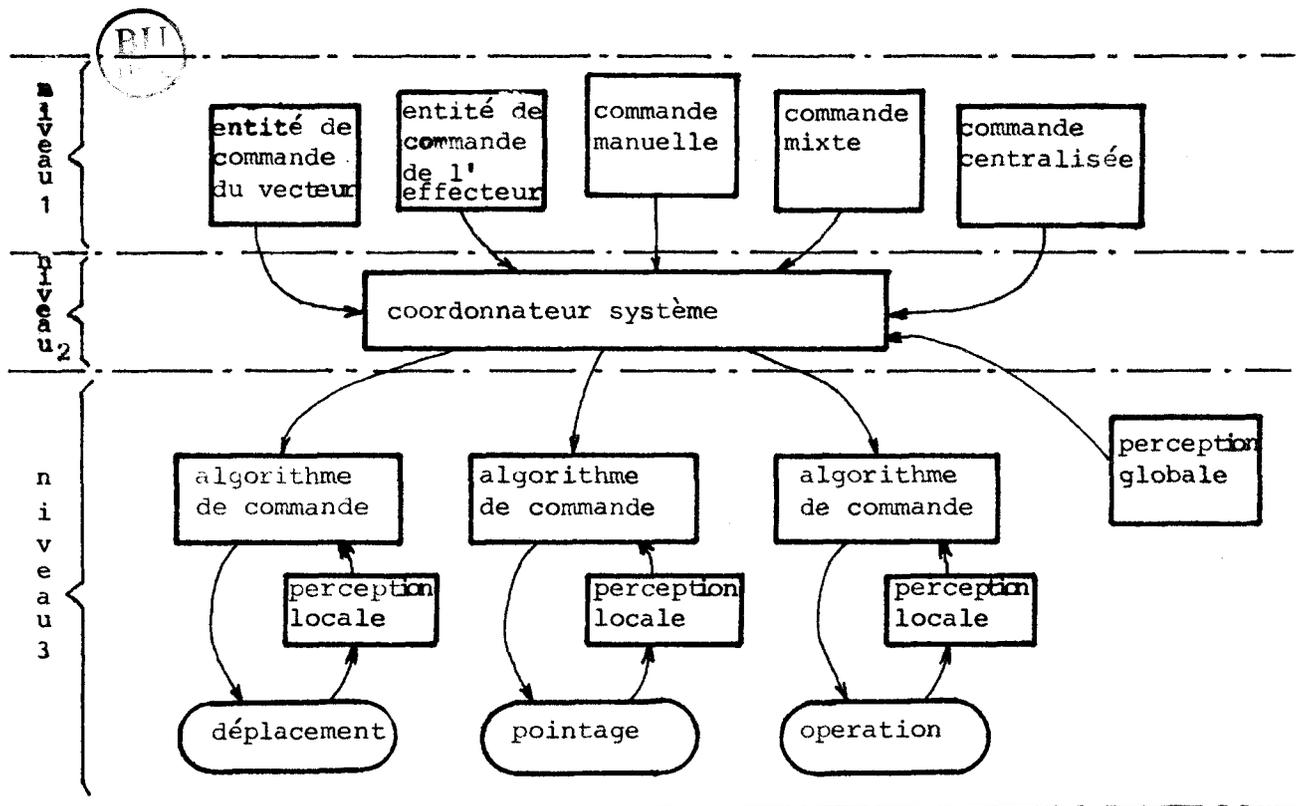
.../...

.../...

L'hypothèse de départ a été de considérer la question de la commande d'un robot manipulateur, par analogie anthropomorphique, comme une collaboration quasi exclusive de deux entités de commande associées respectivement à deux entités opératoires. En fait, les choses sont plus complexes que cela. En effet, chacune des entités de commande ainsi définie, vue globalement, génère, à partir de critères internes, un vecteur de consignes disponibles pour l'ensemble ou tout sous-ensemble des trois activités définies ci-dessus (déplacement, pointage, opération) au même titre que toute autre entité de commande pouvant être présente dans le système, telle qu'une commande manuelle, qu'une commande mixte (telle qu'elle a été définie par (HAB 81)) ou qu'un élément d'une commande centralisée s'occupant à gérer l'ensemble d'un atelier flexible.

En d'autres termes, l'organisation de la commande d'un robot manipulateur consistant d'un vecteur et d'un effecteur, s'articule autour de trois niveaux hiérarchiques, représentés par la figure ci-dessous :

- 1 - génération d'un vecteur de consignes,
- 2 - allocation des ressources, coordination système,
- 3 - exécution de la commande, niveau opératoire.



.../...

Les activités de déplacement, de pointage et d'opération sont affectées à l'une des entités de commande du niveau 1 en fonction de la nature de la tâche :

- dans le cadre d'une commande automatique, l'entité de commande du vecteur sera sollicitée pour des actes non spécifiques caractérisés par une opération quasi passive de l'effecteur, alors que pour des actes spécifiques caractérisés par une opération non triviale, ce sera l'entité de commande de l'effecteur qui dirigera le système ;
- le module de commande manuelle quant à lui, entrera en activité pour transmettre au coordonnateur le geste et le travail ou le mouvement et l'opération du robot manipulateur, et ce à partir de consignes élaborées par l'opérateur humain ;
- le module de commande mixte lorsqu'il sera activé, validera, à partir d'une évaluation des performances de l'opérateur humain et du robot manipulateur, la commande automatique ou la commande manuelle ;
- enfin, la commande centralisée peut être vue comme un élément de synchronisation lorsque le robot manipulateur évolue dans un contexte tel que celui d'un atelier flexible.

O - 3 - PRESENTATION DU PLAN DU MEMOIRE

Cette structure générale étant définie, nous pouvons à présent développer d'une part les aspects spécifiques à la commande automatique, préciser d'autre part l'anatomie et les métabolismes du niveau 3, et troisièmement proposer une structure matérielle et logicielle intégrant la totalité des constituants ainsi présentés.

Ainsi notre travail s'articulera en trois volets :

1 : Aspects de la commande :

- . principes de commande du vecteur : commande géométrique, commande cinématique, génération de trajectoires,

.../...

.../...

- . principe et structure de commande de l'effecteur : effecteurs de première génération, organisation et stratégies de commande

2 : Perception et prise en compte de l'environnement :

- . la perception tactile chez l'homme,
- . notion d'environnement local et global ; critères d'implantation de capteurs,
- . éléments de perception proprioceptive et extéroceptive locale,
- . analyse de l'information sensorielle locale,
- . prise en compte de l'environnement dans la commande du vecteur et de l'effecteur.

3 : Application : mise en oeuvre d'un organe de préhension intelligent :

- . description de la maquette,
- . structures et fonctionnements de commandes associées,
- . interprétation et résultats,

4 : Conclusions générales.

BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE D'INTRODUCTION

- PEC 77 : PECH J, PERUCHON E, "Performances de l'organe terminal de manipulation"
Projet SPARTACUS IRIA n° 760.9 Juillet 1977
- PER 79 : PERUCHON E : "Contribution à la réalisation de fonctions tactiles
artificielles à partir de l'analyse du système humain". Thèse de
troisième cycle USTL MONTPELLIER 1979.
- JAK 69 : JAKSIC D : "Mechanics of the Belgrade Hand". Pro of the 3rd Int.
Symp. on External Control of Human Extremities, DUBROVNIK,
YOUgoslavIE 1969.
- STE 79 : STEPOURJINE R : "Prothèse de membre supérieur à énergie hydraulique"
Journées Robotique IRIA, 21, 23 nov. 1979.
- UME 78 : UMETANI Y : "The development of soft gripper for the versatil robot
hand". Mechanism and machine theory vol 13, 1978,
- AND 80 : ANDRE P. : "Les robots de coopération". Thèse d'Etat 1980,
Université de Franche-Comté. Faculté des Sciences et Techniques.
- HAB 81 : HABCHI A : "Intégration du contrôle d'un robot par un opérateur humain".
Thèse de Docteur-Ingénieur LILLE 1981.
- LEV 70 : LEVAME J. H : "Hiérarchie fonctionnelle d'une main". La presse
médicale, 78, n° 6, 1970.

CHAPITRE 1

Principes de commandes du
vecteur et de l'effecteur

CHAPITRE I PRINCIPES DE COMMANDES DU VECTEUR ET DE L'EFFECTEUR

I-1- LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE GEOMETRIQUE

I-2- LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE CINEMATIQUE

I-3- LA GENERATION DES TRAJECTOIRES

I-4- PREHENSION DE PREMIERE GENERATION

I-4-1- Par effet superficiel

I-4-2- Par serrage rigide

I-4-3- Par serrage déformant

I-5- STRUCTURE DE COMMANDE D'UN EFFECTEUR DE DEUXIEME GENERATION

I-5-1- Introduction

I-5-2- Les structures de commande hiérarchisées

I-5-3- La structure de commande retenue

I-6- DESCRIPTION GENERALE DE LA STRUCTURE DE COMMANDE DE L'EFFECTEUR

I-7- CONCLUSIONS

BIBLIOGRAPHIES

RESUME CHAPITRE 1

Ce premier chapitre aborde, dans un premier temps, les techniques de commande du vecteur à savoir la commande basée sur le modèle géométrique, sur le modèle cinématique et la génération de trajectoires. Ce sont les trois constituants de base de toute commande de vecteur ; aussi avons nous préféré insister sur la nature et les spécificités d'emploi de chacune de ces entités sans présenter toutes les étapes de la formulation mathématique que l'on trouvera abondamment dans la littérature.

La deuxième partie de ce chapitre présente quant à elle un aspect peu développé jusqu'ici concernant la commande d'un effecteur capable de prendre en charge non seulement les opérations liées à sa fonction, mais aussi, dans un contexte de commande automatique, de diriger l'évolution du vecteur lors des phases caractérisées par une activité non triviale de l'effecteur.

Le chapitre d'introduction ayant bien spécifié cette caractéristique, il était important ici de présenter la préhension de première génération pour mettre en évidence la diversité des caractéristiques fonctionnelles et structurelles d'un organe de préhension.

Sur la base de ces remarques, nous nous proposons dans un paragraphe suivant de poser les structures de base d'une commande d'un effecteur que nous baptiserons de deuxième génération, pour enfin décrire les composantes d'une commande type.

En conclusion, sont présentés les avantages et possibilités de ce découpage fonctionnel aussi bien dans le cadre d'une commande automatique que dans un contexte de téléopération.

.../...

.../...

Nous venons de voir que, dans le cadre d'un mode automatique, les activités d'un robot manipulateur résultent de la collaboration de deux entités travaillant à la concrétisation d'un même plan (si l'on considère en plus le porteur chargé de mouvoir le vecteur dans un espace à une, deux ou trois dimensions, il s'agit alors d'une collaboration trilatérale). Ainsi aurait-on naturellement tendance à penser que ces deux entités seraient identiques aussi bien au niveau structurel que fonctionnel. S'il est vrai qu'au niveau architectural on retrouve dans les deux cas un système de perception, un organe de décision et un dispositif d'action physique sur l'environnement, il apparaît rapidement en revanche que les niveaux fonctionnels se caractérisent par des activités bien spécifiques. C'est ce que nous tenterons de montrer dans les différents paragraphes de ce chapitre.

Nous aborderons, dans un premier temps, les aspects de la commande du vecteur en examinant successivement les spécificités de la commande basée sur le modèle géométrique, puis les caractéristiques de la commande basée sur le modèle cinématique pour en arriver au problème de la génération de trajectoire.

Puis, en deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les principes et structures de l'entité de commande associée à l'effecteur de même que les stratégies d'évolution et ce, après une présentation des effecteurs de première génération.

I - 1 - LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE GEOMETRIQUE

Un vecteur est constitué d'une succession de segments solides mobiles les uns par rapport aux autres. Pour commander les mouvements de cette chaîne mécanique articulée, il est indispensable d'en connaître une représentation symbolique telle qu'un modèle mathématique. Un modèle exact est très difficile voire impossible à définir : les pièces mécaniques réelles ont des formes compliquées, elles peuvent plier sous la charge, les articulations peuvent être élastiques, elles présentent de plus des frottements que l'on connaît mal, etc... Ainsi procède-t-on aux hypothèses simplificatrices suivantes :

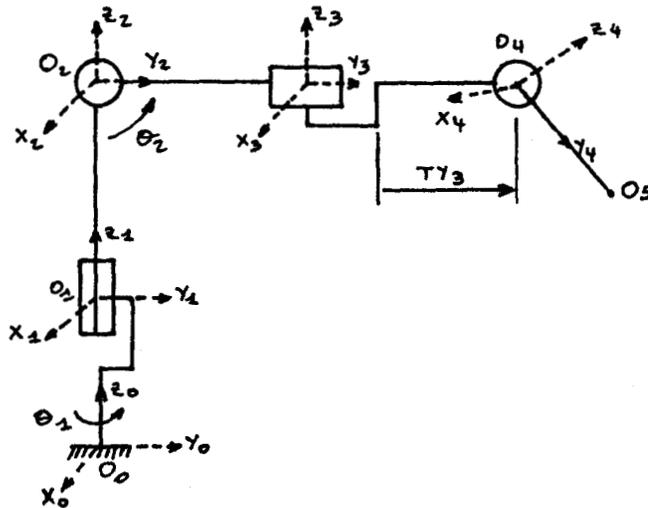
- les segments d'un robot sont infiniment rigides : ce sont des solides indéformables,

.../...

.../...

- toutes les articulations sont parfaites, sans jeux ni frottements,
- la liaison entre deux segments successifs ne met en jeu qu'un seul degré de liberté : soit une rotation parfaite, soit une translation parfaite.

A chaque solide, on associe un repère orthonormé. Pour faciliter les calculs, on choisit de placer leur origine à la jonction des corps que l'on suppose être le centre de rotation ou l'origine de la translation d'un corps par rapport à celui qui le précède. D'autre part, on initialise les repères de manière à ce que chacun d'eux (R_q) se meuve par rapport au précédent (R_{q-1}) par une rotation autour d'un axe de (R_{q-1}) ou par une translation le long d'un des axes de (R_{q-1}). Prenons comme exemple un vecteur à quatre degrés de liberté, correspondant au robot HALL utilisé pour nos essais :



Ce qui nous intéresse ici, c'est de connaître la position et l'orientation de l'effecteur (le segment $O_4 O_5$ suivant Y_4) dans l'espace réel, c'est-à-dire le repère fixe R_0 appelé repère de la tâche. Connaissant l'expression de la position et de l'orientation du segment $O_4 O_5$ dans son repère ($O_4 X_4 Y_4 Z_4$) et en procédant à des changements de repères, l'on arrive à exprimer la position et l'orientation de l'effecteur dans le repère de la tâche en fonction des quatre variables d'actions. On se référera à (BON 83) pour le détail des calculs concernant le robot HALL qui constitue notre site expérimental.

.../...

.../...

L'expression générale d'un tel modèle géométrique est de la forme :

$$x = f(s_1) \quad (1-1)$$

avec :

* les composantes du sextuplet x (dans le repère R_0) des coordonnées généralisées de l'effecteur

- x_1, x_2, x_3 définissent la position dans R_0 de l'extrémité de l'effecteur,
- x_4, x_5, x_6 représentent l'orientation de l'effecteur dans R_0 pour un vecteur non redondant.

* les composantes de k -uplet s_1 des variables d'action relatives aux actionneurs du vecteur.

Avant de développer une méthode de calcul de s_1 à partir de x , il est utile de considérer la faisabilité des calculs. Le problème qui se pose est le suivant :

Etant donné une disposition x désirée de l'effecteur, peut-on déterminer une posture s correspondante du vecteur, c'est à dire résoudre l'équation :

$$s_1 = f^{-1}(x) \quad (1-2)$$

Si l'on spécifie un point quelconque x de \mathbb{R}^6 , l'équation n'admet pas nécessairement une solution, en raison d'une part des limitations dimensionnelles des organes du vecteur, d'autre part en raison d'éventuelles limitations structurales : on dit alors que le robot n'est pas résolvable.

D'autre part, si k est supérieur à 6, le vecteur est généralement redondant, c'est-à-dire qu'une disposition atteignable de l'effecteur peut généralement être obtenue par diverses postures du vecteur. L'unicité, nécessaire à l'exécution par un automate déterministe, peut être obtenu par diverses méthodes (AND 80) :

.../...

.../...

- lier arbitrairement certaines variables d'action,
- ajouter des équations exprimant l'extrémalisation d'une fonctionnelle représentant un critère d'optimalité auquel doit satisfaire le vecteur au cours de son fonctionnement (minimiser l'énergie dispensée, ..),
- ajouter $k-6$ contraintes égalités fixant certaines coordonnées de points remarquables n'appartenant pas au corps terminal. Cette possibilité permet de contourner d'éventuels obstacles apparaissant dans l'univers de travail sans modifier la position de l'effecteur.

Supposons à présent que le robot soit résolvable ; il s'agit alors de résoudre le système (1-2) formé de 6 équations non linéaires à k inconnues que l'on doit ramener à un système de k équations à k inconnues, puis résoudre analytiquement et retenir la bonne solution (la non linéarité entraîne plusieurs solutions).

Ainsi apparaissent les intérêts et les problèmes liés à la commande basée sur le modèle géométrique (ou commande en position) dont les différentes étapes dans l'établissement d'une telle commande sont :

- il faut, dans un premier temps, calculer les valeurs des variables d'action relatives aux actionneurs du vecteur (tous les robots ne sont pas résolvables) (COI 82),
- il y a lieu ensuite de mesurer les valeurs courantes de ces variables d'action,
- pour enfin traduire les différences entre valeurs courantes et valeurs finales calculées en signaux de puissance à envoyer aux actionneurs correspondants.

Ceci pose les problèmes suivants :

- la trajectoire suivie par l'effecteur va dépendre de l'ordre d'excitation des moteurs,
- on ne maîtrise pas la vitesse de déplacement des différents segments du vecteur,

.../...

- comme on ne tient pas compte des inerties et des frottements, en se déplaçant à grande vitesse, on risque des oscillations et des dépassements autour de la position finale.

Cette commande est malgré tout très utilisée sur les robots industriels parce qu'elle ne nécessite pas de moyens de calculs importants par rapport à d'autres types de commande. En fait, le modèle géométrique ne suffit pas pour satisfaire les contraintes géométriques et cinématiques définissant un mouvement ; il sera toujours accompagné, comme nous le verrons au paragraphe 3 de ce chapitre, par un module d'interpolation ou de génération de trajectoire.

I - 2 - LA COMMANDE BASEE SUR LE MODELE CINEMATIQUE

Nous venons de voir que le modèle géométrique n'était pas toujours utilisable (robot non résolvable) et que de plus ce modèle n'est qu'une approximation très lointaine de la réalité, ce qui pose quelquefois des problèmes de commande (contrôle de vitesse, précision, oscillations,...)

Pour palier ces inconvénients, l'on a été amené à définir un modèle que l'on appelle invariablement modèle cinématique, modèle variationnel ou modèle pour la commande en vitesse, qui consiste à remplacer le modèle géométrique, dont une difficulté essentielle est la non-linéarité vis à vis des variables d'actions, par une approximation linéaire qui sera valide si on se déplace par petits accroissements.

On va donc remplacer le modèle :

$$x = f(s_1) \quad (1-1)$$

par ses accroissements :

$$\Delta x = \frac{\partial f}{\partial s_1} \Delta s_1 \quad (1-3)$$

qui rend linéaires les variations de x en fonction de s_1 .

.../...

.../...

En introduisant dans la notation (1-3) le jacobien de la fonction f ou matrice des dérivées partielles de f par rapport à s_1 , on aura comme expression du modèle cinématique :

$$\Delta x = [J] \Delta s_1 \quad (1-4)$$

avec Δx : matrice colonne des coordonnées généralisées.

$$[J] = \frac{\partial f}{\partial s_1} = \text{jacobien de } f$$

Δs_1 : matrice colonne des variables d'action du vecteur.

Ce modèle variationnel $\Delta x = [J] \Delta s_1$ nous permet, partant d'une configuration où l'on connaît x et s_1 , de connaître la nouvelle disposition $x + \Delta x$ de l'effecteur si l'on s'impose à partir de la posture courante s_1 un Δs_1 . Par ailleurs, il est tout aussi important de savoir déterminer une nouvelle posture lorsque l'on s'impose une évolution de disposition. Cela s'obtient par l'inversion de la relation (1-4) à savoir :

$$\Delta s_1 = [J]^{-1} \Delta x$$

Le modèle cinématique étant linéaire vis à vis de s_1 , l'inversion semble plus aisée que pour le modèle géométrique. En fait, cette inversion est souvent moins simple qu'il n'y paraît et nous pouvons nous trouver devant plusieurs cas de figure :

- $[J]$ n'est pas carrée : les méthodes "classiques" ne permettent pas l'inversion ; il faut alors faire appel à la théorie des inverses généralisés ;
- $[J]$ est carré et le déterminant est nul pour certaines valeurs des variables d'action : l'on a affaire à des dispositions singulières. Cela se présente par exemple pour certaines dispositions dans lesquelles certains degrés de liberté perdent localement leur indépendance, les axes de plusieurs rotations pures venant en alignement, ou les directions de plusieurs translations pures devenant parallèles ; ces degrés de libertés ont alors le même effet sur le mouvement de l'

.../...

.../...

organe terminal.

Pour inverser le jacobien, on affecte arbitrairement une valeur aux variations des variables d'action non calculables (dans le cas de la méthode des variables principales : voir (COI 82)).

- $[J]$ est carrée et le déterminant est non nul : il y a unicité de la solution.

La caractéristique essentielle de la commande en vitesse est qu'elle permet de calculer les petits accroissements successifs des angles moteurs correspondant aux petits accroissements de position et d'orientation de l'effecteur. L'on maîtrise ainsi mieux la vitesse de déplacement puisque chaque accroissement Δs_1 de posture va se faire pendant un temps T qui conditionne les vitesses articulaires (T étant la période de la commande). Pour faire varier la vitesse, on peut agir soit sur T , soit sur l'amplitude des consignes de commande (ce qui est plus facile). Mais pour que le modèle reste valable, il faut que Δs_1 reste assez petit ce qui implique une fréquence élevée de calcul de $[J]^{-1}$.

Cette commande est utilisée en priorité sur les robots non résolubles. Ceci dit, comme pour le modèle géométrique, on ne tient pas compte des masses, inerties, frottements qui vont modifier le comportement dynamique du robot et réduire considérablement le domaine de validité du modèle. Il existe un mode de commande appelé commande dynamique qui essaie de prendre en compte les facteurs dynamiques de la structure : nous en présenterons son principe au chapitre 2, paragraphe 5-1.

I - 3 - LA GENERATION DE TRAJECTOIRE

Toute tâche est décomposée par l'opérateur, ou tout autre générateur de plans, en une succession de fonctionnements élémentaires. L'exécution de chacun d'eux nécessite la mise en oeuvre coordonnée des différents actionneurs afin que l'évolution temporelle $s(t)$ du m -uplet des variables d'action x_i engendre le fonctionnement $z(t)$ souhaité.

.../...

.../...

Le robot manipulateur doit comporter à cet effet un générateur de trajectoires dont la fonction consiste à déterminer dans $S = S_1 \times S_2$ la trajectoire du point représentatif de s correspondant à la mission définie dans Z , (cf 0-10) et ce en tenant compte d'un environnement évolutif.

Rappelons dès maintenant que l'application g reliant le rôle de l'effecteur à l'emploi de ses $m-k$ actionneurs (cf 0-7) est la plupart du temps très simple (souvent l'identité) ; son inversion pour déterminer le travail $s_2(t)$ correspondant à l'opération $y(t)$ que l'on désire faire réaliser est généralement aisée (pour une préhension de première génération).

Le problème est fort différent lorsqu'un fonctionnement élémentaire fait intervenir un mouvement du vecteur combiné ou non à une opération ; plusieurs cas peuvent alors se présenter :

- a) la mission correspond à une trajectoire fixe dans Z : actes spécifiques tels qu'usinages parfaitement définis et répétitifs. Le problème de la génération de trajectoires ne se pose pas à proprement parler : il suffit comme pour les automates, d'enregistrer l'évolution de s préalablement à l'exécution.
- b) la mission correspond à une trajectoire translatable dans Z : c'est le cas d'actes spécifiques ou usuels qui ont un caractère relatif et peuvent être exécutés à partir d'une origine quelconque. Pour de telles missions, on ne peut plus enregistrer toutes les évolutions possibles de s : les valeurs des a_i doivent alors être calculées par le générateur de trajectoires en fonction de z au fur et à mesure du déroulement du fonctionnement. L'exécution de ce calcul en temps réel est en général difficile essentiellement en raison de la complexité et du caractère non linéaire de l'application f (cf 1-4) exprimant la disposition x du vecteur en fonction de sa posture s_1 .

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à l'étude des gestes $s_1(t)$ du vecteur sans nous préoccuper du travail $s_2(t)$ de l'effecteur qui dépend des

.../...

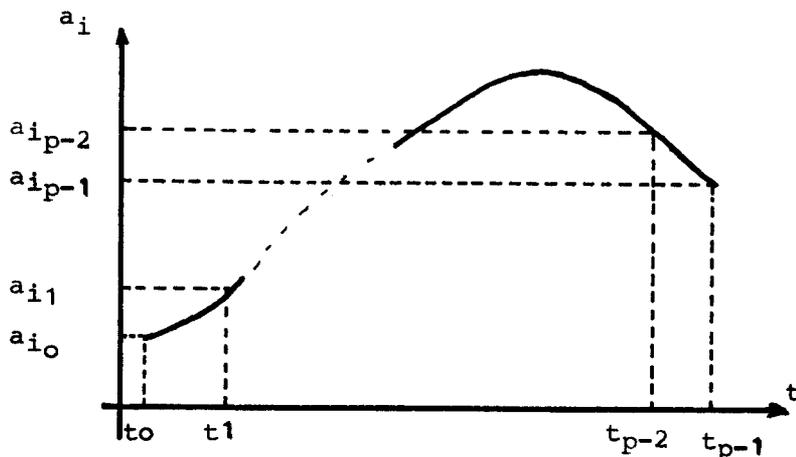
.../...

opérations $y(t)$ à réaliser et dont il est difficile de parler de façon générale. Le rôle du générateur de trajectoire sera donc de traduire la demande $\vec{x}(t)$ en une demande de $\vec{s}_1(t)$.

L'exécution d'un geste $s_1(t)$ correspondant à un mouvement $x(t)$ nécessite une synchronisation dans l'activation des variables d'actions de posture sélectionnées au terme d'une commande basée sur le modèle géométrique ou cinématique. Chaque itération de l'une de ces deux commandes génère à un instant donné une posture s_1 du vecteur dont l'enchaînement, caractérisé par un ensemble de contraintes géométriques et cinématiques, constitue le geste $s_1(t)$ ou le mouvement ou trajectoire $x(t)$. Le problème de la génération de trajectoire consiste à rythmer la production de postures ou de variations de postures en respectant les contraintes géométriques (ensemble de dispositions intermédiaires x à adopter) et cinématiques (passage d'une disposition à l'autre à vitesse et/ou accélération donnée).

A partir de l'ensemble des p dispositions intermédiaires à adopter, et au moyen de la transformation de coordonnées, on établit les p postures correspondantes du vecteur, ce qui définit pour chaque degré de liberté du vecteur un enchaînement chronologique de p états de leur variable d'action. La génération de la trajectoire correspondante consiste à définir en temps réel les lois de variations des variables d'actions, différentes pour chaque variable et pour chaque transition de posture, et ce en respectant les contraintes de vitesse et d'accélération.

Pour la variable d'action a_i on aura par exemple :



.../...

Comme fonction d'interpolation entre les états $a_{i,i}$ et $a_{i,i+1}$, on choisira des fonctions de type polynomiales, pour être bien adaptées à un outil informatique, et de formalisation explicite.

Les contraintes cinématiques sur une trajectoire sont de deux types :

- contraintes sur l'amplitude de la vitesse instantanée de transition aux instants t_0 à t_{p-1} ; la vitesse de transition t_{p-1} , correspondant au point d'arrivée de la trajectoire, étant nulle,
- contrainte sur la continuité de l'accélération aux points de passage pour éviter les a-coups et les oscillations intempestives.

Ainsi la loi de commande de forme polynomiale devra satisfaire aux conditions suivantes :

- on connaît, à l'instant présent t_c , la position courante x_c sur la portion de trajectoire comprise entre les postures P_i et P_{i+1} (première contrainte),
- on désire atteindre, au bout d'un temps t_{i+1} , le point P_{i+1} caractérisé par une position x_{i+1} (deuxième contrainte), une vitesse \dot{x}_{i+1} (troisième contrainte) et une accélération \ddot{x}_{i+1} (quatrième contrainte),
- on s'impose à tout moment une continuité de l'accélération (cinquième contrainte), et notamment aux passages des postures intermédiaires P_i ($i=0 \rightarrow n-1$)

Les cinq contraintes définissent une équation de la position de degré 4, d'où le système de cinq équations à cinq inconnues suivant :

.../...

.../...

$$x_c = at_c^4 + bt_c^3 + ct_c^2 + dt_c + e$$

$$x_{i+1} = at_{i+1}^4 + bt_{i+1}^3 + ct_{i+1}^2 + dt_{i+1} + e$$

$$\dot{x}_{i+1} = 4 at_{i+1}^3 + 3 bt_{i+1}^2 + 2 ct_{i+1} + d$$

$$\ddot{x}_{i+1} = 12 at_{i+1}^2 + 6 bt_{i+1} + 2 c$$

$$\ddot{x}_{c-1} = \ddot{x}_c \Leftrightarrow 12 \bar{a} t_c^2 + 6 \bar{b} t_c + 2 \bar{c} = 12 at_c^2 + 6 bt_c + 2 c$$

avec $(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c})$ paramètres du polynome de l'accélération à l'instant $t_{c-1} = t_c - t_e$ avec $t_e =$ période d'échantillonnage.

La résolution de ce système définit les paramètres de la loi de commande polynomiale, on remarquera que le retour d'état est un retour en position (prise en compte de x_c), alors que la commande peut être soit une commande en position ($x(t) = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e$), soit une commande en vitesse ($\dot{x}(t) = 4 at^3 + 3 bt^2 + 2 ct + d$).

On remarquera aussi que l'inversion de ce système nécessite 31 additions, 137 soustractions, 258 multiplications et 25 divisions, soit pour un processeur arithmétique ayant un temps de calcul typique de 40 ns un temps total de calcul de l'ordre de 18 ms par degré de liberté, et donc à une vitesse de 1m/s correspondra une résolution de 2cm.

.../...

I - 4 - PREHENSION DE PREMIERE GENERATION

Parce qu'elles sont moins adaptables que les mains humaines, les mains du robot doivent être choisies ou conçues spécialement pour une application industrielle précise. Alors que les robots ont acquis la réputation d'être des machines automatiques à utilisation générale, leurs mains ne sont pas tout à fait aussi flexibles et il se peut qu'on doive les commander en même temps que l'outillage spécial prévu pour le travail à effectuer.

En pratique, ceci ne représente pas un énorme désavantage. En effet, dans telle chaîne de montagne, tel type de main se révélera apte à une vaste sélection des tâches qu'on y effectue. C'est seulement lorsque le robot devra être affecté ailleurs pour travailler sur un procédé entièrement différent, que l'outillage de la main devra être changé, et comparé aux coûts totaux de l'équipement d'une chaîne de production, les mains du robot se révèlent particulièrement peu coûteuses.

Pour être capable de saisir une pièce dans une position et orientation quelconque dans l'espace, le robot devra posséder au moins six degrés de liberté indépendants. Les degrés de liberté de la pince quant à eux interviendront pour la phase de saisie proprement dite et leur nombre sera fonction de la technologie retenue.

On distingue essentiellement trois modes de préhension :

- préhension par effet superficiel : ventouse à vide, ventouse à turbine, ventouse magnétique,
- préhension par serrage rigide : pince à mors,
- préhension par serrage déformant : main artificielle, serrage déformant fluïdique.

I - 4 - 1 - Préhension par effet superficiel

Ce type de préhension est préconisé pour la manipulation d'objets plan de grande taille et de faible épaisseur (feuilles de tôles, panneaux de

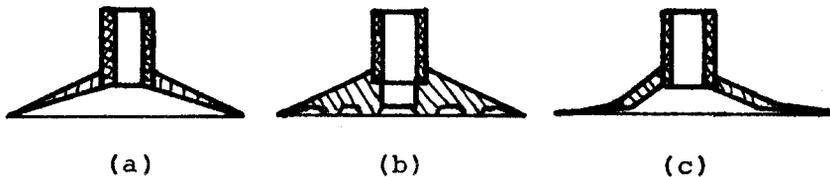
.../...

.../...

bois,...) ou pièces fragiles, susceptibles d'être endommagées par un serrage mécanique (poste de télévision,...).

a) la technique du vide

L'élément actif d'un tel système est une "coupe" d'un matériau élastique qui prend la forme de la surface de la pièce à manipuler, y adhérant de façon étanche ; plusieurs modèles sont utilisés :



- (a) : coupe simple
- (b) : coupe à alvéoles
- (c) : coupe à lèvres saillantes.

Il est d'autres dessins dont le principe diffère de celui de la coupe habituelle. Certaines coupes, ou tampons à faire le vide, sont faits d'un matériau cellulaire à travers lequel l'air est inspiré. Ils ont l'avantage d'être efficaces même sur des surfaces inégales et poreuses, par exemple la brique ordinaire, parce que chaque cellule y constitue une coupe à faire le vide et si l'une d'entre elles n'adhère pas de façon étanche, les cellules voisines s'agglutinent, formant à elles toutes une coupe plus grande.

La force préhensile d'une coupe à faire le vide est le résultat de la surface effective multipliée par la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la coupe. La surface effective d'une coupe est souvent différente de sa surface géométrique. Parce que la coupe se déforme souvent lorsque soumise au service. Si le fond de la coupe touche l'objet à soulever, la surface effective en est réduite d'autant. Pour optimiser l'utilisation de la coupe, il faudrait obtenir soit un vide soit une différence de pression la plus grande possible. Dans la plupart des cas, il vaut mieux utiliser une coupe plus grande et un vide moins intense pour obtenir un système plus rapide.

.../...

.../...

Le vide ne se formera pas jusqu'à ce que l'élément actif ait adhéré de façon étanche à la pièce. Pour rendre plus rapide un système par le vide, il y a donc intérêt à monter les coupes sur des tiges à ressort et à programmer le robot de telle sorte que la coupe touche la pièce longtemps avant que le bras n'atteigne sa position finale de ramassage. Ceci aura pour effet d'éliminer du cycle une grande partie du temps de décélération. L'effet ressort des coupes permettra de compenser toute variation de hauteur ou de niveau de la pièce. S'il y a des variations entre les pièces à manipuler, comme par exemple dans une série de tôles distordues, on pourra les compenser en montant les coupes sur des joints à rotules en plus des tiges à ressorts. Pour des pièces coulissantes, la même règle s'appliquera : force multipliée par coefficient de friction entre les coupes et le matériau.

Les coupes à faire le vide ont une durée de vie tout à fait satisfaisante, surtout lorsqu'on considère leur prix. Les coupes de polyuréthane semblent avoir une durée de vie plus longue que celles faites de caoutchouc naturel ou synthétique. On trouve des catalogues de coupes à vide, avec une sélection de configurations et de tailles.

Pour créer du vide, on a le choix entre deux appareils : la pompe à vide ou le venturi. Une pompe à vide est soit une pompe à piston, soit une pompe rotative à ailette, commandée par un moteur électrique. Le venturi est un appareil où l'on crée le vide en faisant se heurter un débit secondaire à haute énergie au débit primaire qui transforme la pression en vide. Les avantages de la pompe sont :

- elle peut créer un vide intense,
- le coût d'opération est bas,
- elle est relativement silencieuse.

Ses désavantages sont :

- son coût de départ est élevé,
- elle demande un système plus complexe : une cuve sous vide et une soupape de vidange.

.../...

.../...

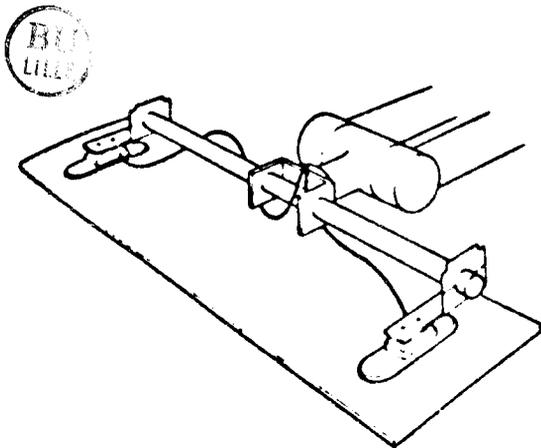
Les avantages du venturi sont :

- son coût initial bas,
- le fait qu'il ne demande normalement pas de cuve sous vide ni de soupape de vidange,
- sa haute fiabilité.

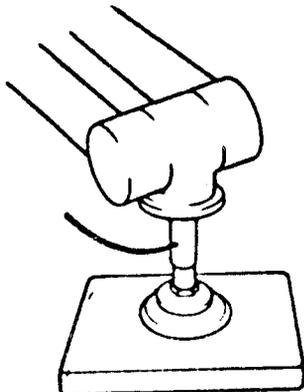
Ses désavantages sont :

- qu'il est très bruyant,
- que son coût opérationnel est très élevé.

Les schémas ci-dessous illustrent l'utilisation de cette technique par combinaison d'éléments actifs :



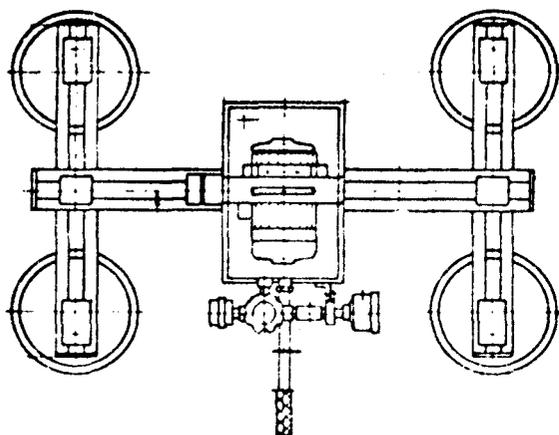
Main équipée d'une coupe à vide. Le capteur par le vide a les qualités du capteur magnétique mais est beaucoup moins susceptible de laisser une pièce glisser sur le côté. Pour du verre, du plastique, des pièces ferreuses et non ferreuses, de poids léger à modéré, le capteur par le vide est souvent un excellent choix.



Main équipée d'une coupe à vide simple. Des pièces fragiles, telles que les plateaux de tubes à rayons cathodiques (notre dessin) sont manipulées facilement par un capteur à vide simple. Le capteur à vide possède une fiabilité plus grande que le capteur magnétique.

.../...

.../...



Main équipée de 4 coupes à vide simple.

b) l'effet magnétique

Les électro-aimants sont bien adaptés au contrôle à distance aussi bien qu'au ramassage à une vitesse modérément haute, et à la décharge de pièces. Une source d'énergie à courant direct est nécessaire, en liaison avec un matériel de contrôle choisi en fonction de l'application spécifique. Afin que la décharge des pièces se fasse sans hésitation, on incorpore au circuit un appareil connu sous le nom de "contrôleur de lâchage". Fondamentalement, il s'agit là d'une manette multi-fonctions qui distribue de la puissance à l'aimant et qui, lorsqu'elle interrompt le passage de l'énergie, renverse la polarité et fournit de la puissance à un voltage très bas pendant un court moment avant de déconnecter complètement l'aimant du circuit. Cette polarité renversée tend à annuler tout magnétisme résiduel dans la pièce, ce qui assure qu'elle est relâchée immédiatement.

Les aimants permanents n'ont pas besoin, pour opérer, d'une source d'énergie, ce qui les rend particulièrement bien adaptés aux atmosphères à haut risque qui demandent un matériel électrique protégé contre les risques d'explosion. Ils nécessitent néanmoins un moyen de séparer la pièce de l'aimant. A cette fin, on peut utiliser un appareil d'éjection, ou bien, si la pièce est en position d'accrochage, ou soudée, ou fixée de quelque autre façon, on peut retirer l'aimant de la pièce. On peut concevoir un aimant magnétique qui produise une pénétration magnétique extrêmement peu profonde, procédé qui présente une certaine valeur lorsque, par exemple, il est nécessaire de retirer

.../...

.../...

d'un tas de minces feuilles de métal ferreux.

I - 4 - 2 - Préhension par serrage rigide

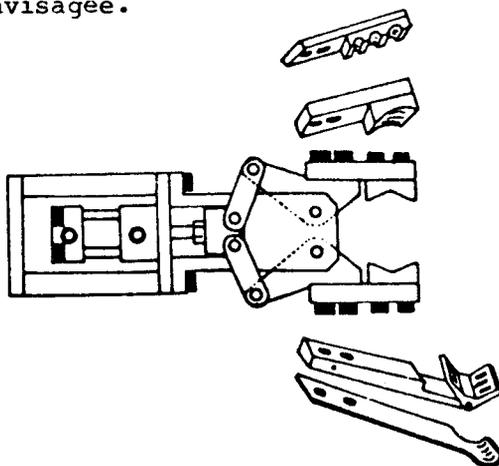
Ceux qui ont réalisé de tels systèmes se sont aperçus qu'il fallait presque à chaque fois adapter le mode de serrage à la pièce à prendre. Un compromis pourrait être trouvé en utilisant un système de type "pince à sucre", mais, comme tout compromis, l'efficacité à s'adapter à un problème n'est pas totale.

Ainsi se pose le problème concernant le choix d'un système de pré-
hension par serrage rigide :

- soit on recherche un appareillage pouvant couvrir 50 % des cas de façon satisfaisante, constitué en général d'une structure de base autour de laquelle sont disponibles un certain nombre d'éléments interchangeables,
- soit on envisage le problème de préhension comme un problème technique spécifique à l'application envisagée et l'on recherche le meilleur appareil exactement adapté au problème posé.

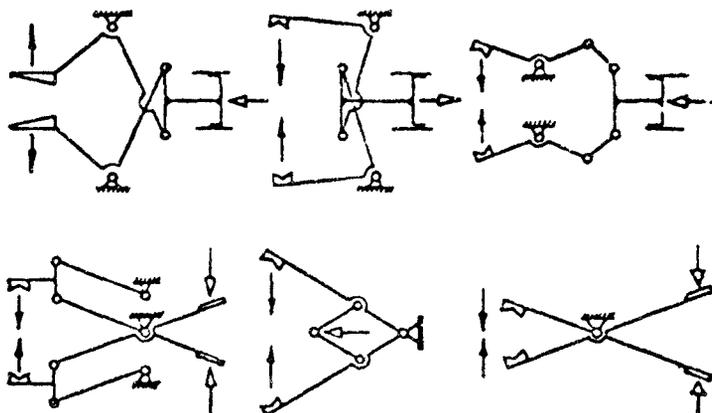
Le choix se ramène finalement à la recherche d'un compromis entre une fonction coût et une fonction performance : un outil très spécifique nécessitant une étude ponctuelle sera plus performant et plus cher qu'un outil conçu pour une grande variété d'application mais ne donnant pas forcément entière satisfaction à l'application spécifique envisagée.

Ceci dit, les systèmes à serrage rigide sont de loin les plus employés à l'heure actuelle ; ils sont en général dotés de deux doigts de serrage équipés d'embouts interchangeables comme le montre la figure ci-contre.



.../...

Pour déterminer les paramètres mécaniques d'un tel organe (force de serrage, vitesse de déplacement, ...) ainsi que la nature de la transmission de mouvements, l'organe peut être représenté à l'aide de schémas suivants :



Des méthodes classiques utilisant une représentation vectorielle des forces et vitesses, permettent d'aboutir rapidement aux résultats désirés.

La motorisation des organes de préhension industrielle est essentiellement constituée d'éléments de translation et de rotation pneumatique, hydraulique ou électrique avec les pourcentages suivants :

- actionneurs pneumatiques : 66 %,
- actionneurs hydrauliques : 26 %,
- moteurs électriques : 7 %.

Les actionneurs hydrauliques sont sélectionnés lorsque le robot lui-même est équipé de verrins hydrauliques. Ainsi des forces importantes peuvent être développées pour un encombrement faible mais par rapport à des pinces à actionneurs pneumatiques, il est plus délicat d'ajuster la force de serrage. Un simple régulateur de pression est suffisant dans le cas de pinces pneumatiques, alors que l'effecteur hydraulique nécessite à la fois un contrôle de débit et un clapet de surpression ; de plus il faut prévoir un conduit de retour.

.../...

.../...

Exemples de réalisation : (JOL 82), (CRO 77), (KON 75)

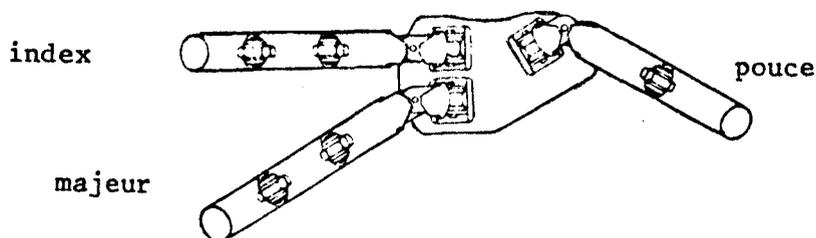
I - 4 - 3 - Préhension par serrage déformant

Ce type de préhension est encore peu utilisé et n'en est en fait qu'au niveau de la recherche, mais il y a de grandes chances que c'est vers ce type de préhension que l'on s'oriente. L'idée consiste à concevoir des outils capables de s'adapter à une grande variété de pièces par une déformation liée à la taille, la forme et le volume de l'objet à saisir : on complique un tant soit par la fonction serrage proprement dite pour simplifier à l'extrême le problème du dessin du mors de manière à s'affranchir de la forme de la pièce.

Parmi les travaux en cours, on peut citer les réalisations suivantes :

Pinces à tendance anthropomorphique

Ce fut la première approche de ce type de préhension par analogie avec la main humaine. On peut citer les travaux de T. OKADA (OKA 79) (figure ci-après)



Il s'agit d'un outil destiné à la télé-manipulation, capable d'effectuer des préhensions multiples. Chacun des trois doigts possède plusieurs phalanges ; l'ensemble est conçu de manière à permettre non seulement des prises digitales, mais aussi des déplacements et serrages latéraux et unguéaux. La coordination entre les mouvements est réalisée au moyen de servomoteurs de commandes associés aux articulations.

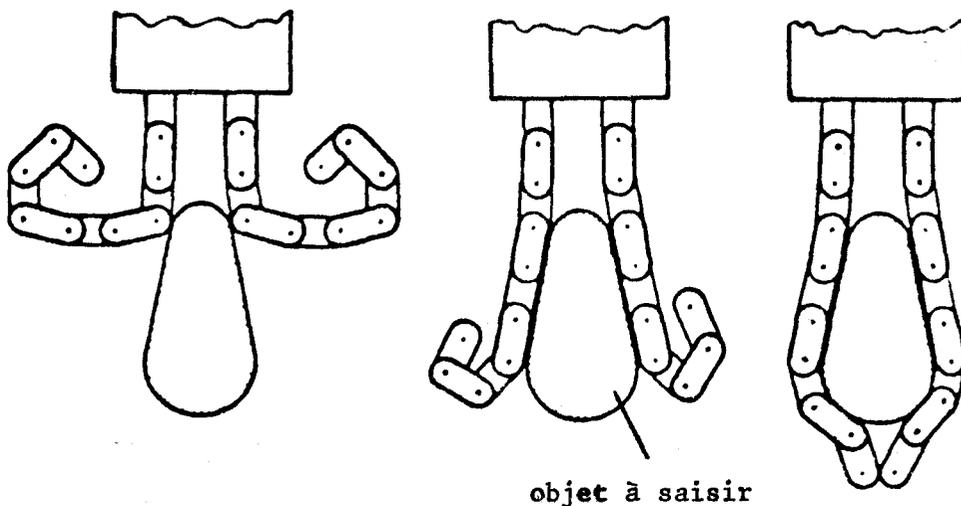
.../...

.../...

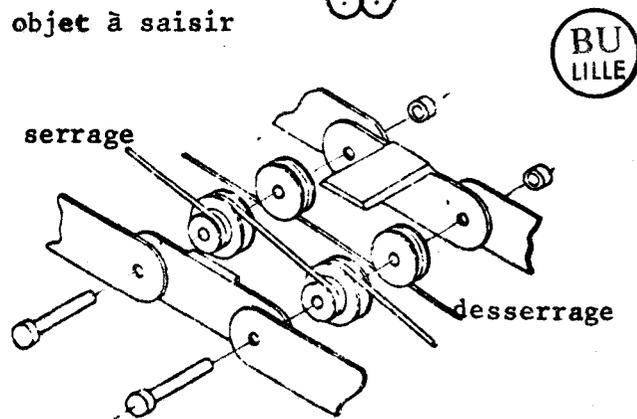
Préhension par "enroulement" (UME 78)

L'idée consiste à utiliser un dispositif analogue à une chaîne capable d'épouser le contour d'une pièce de forme quelconque, concave ou non, et d'exercer à tout point de contact une pression uniforme et ajustable.

Le principe de fonctionnement est résumé sur la figure suivante :



L'articulation de deux maillons est représentée par la figure ci-contre. Il est à noter que l'ensemble des segments de chaque doigt n'est pas actionné séparément mais au moyen de poulies et de courroies.



Serrage déformant fluide

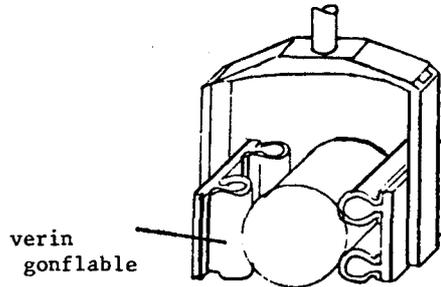
L'élément actif est ici une enveloppe souple mais résistante dans laquelle est injecté le fluide sous pression : la souplesse de l'enveloppe permet à celle-ci de se déformer en épousant le contour du volume à prendre. La force de serrage est alors fonction de la pression du fluide à l'intérieur de l'enveloppe et de la surface de contact de celle-ci avec la pièce. Il est dès lors

.../...

.../...

compréhensible qu'avec un système déformant, les surfaces de contact soient nettement plus importantes ; par conséquent, les pressions de serrage en sont d'autant diminuées.

Plusieurs systèmes de ce type sont actuellement sur le marché et donnent satisfaction pour leur emploi. Cependant, il existe là aussi certains problèmes dus essentiellement à l'usure.



I - 5 - STRUCTURE DE COMMANDE D'UN EFFECTEUR DE DEUXIEME GENERATION

Il est bien clair, et le paragraphe précédent l'a laissé entendre par la présentation des différents modes de préhension, que l'outil universel de préhension n'existe pas. La géométrie, l'état de surface, la structure mécanique, le poids de la pièce ainsi que les conditions de manipulation sont autant de paramètres qui déterminent le choix du mode de préhension utilisé : l'effet superficiel, le serrage rigide, le serrage déformant.

Néanmoins, la préhension de deuxième génération se caractérise par une possibilité de prise en compte de l'environnement et d'interaction dynamique avec celui-ci, et ce quels que soient le type de perception et le mode de préhension utilisés. Il ne s'agit donc pas ici de spéculer autour de la définition d'un outil universel de préhension, mais de poser les bases logicielles destinées à exploiter les ressources sensorielles, implantées sur un organe de préhension de première génération, ainsi qu'au dialogue de coopération vecteur-effecteur.

I - 5 - 1 - Introduction

Un ensemble de procédures destiné à contrôler un processus physique doit tenir compte de la structure et des besoins de ce dernier. Ceci implique une inclusion explicite dans la structure de contrôle des notions de continuité et de parallélisme :

.../...

.../...

- continuité dans l'évaluation de l'état du système ainsi que dans l'application des procédures de correction,
- parallélisme dans l'exécution simultanée d'un certain nombre d'objectifs locaux liés aux différents modules du système.

L'évaluation de l'état du système de même que l'exécution des fonctions de correction devra tenir compte des rythmes internes du processus à contrôler. Cela ne veut pas dire que la continuité doit être absolue mais que tout schéma qui est suffisamment général et adapté à décrire des stratégies de contrôle doit inclure et reconnaître cette notion de continuité.

L'implantation d'une telle structure est étroitement liée à celle du processus à contrôler. Comme un objectif global se décompose généralement en un certain nombre de fonctions de contrôle locales, il est intéressant de décomposer le processus en un certain nombre de sous-processus parallèles à évolution continue, chacun de ces sous-processus s'appuyant sur un ensemble de capteurs et d'actionneurs.

Un certain nombre de problèmes se poseront lors de l'élaboration d'une telle structure de commande ; ces différentes questions seront abordées dans ce paragraphe. On distinguera les étapes suivantes :

- structure de commandes hiérarchisées,
- description générale de la structure retenue,
- implantation de la structure de commande.

I - 5 - 2 - Les structures de commandes hiérarchisées

Tenir compte des rythmes internes du processus à contrôler nous amène à définir un système de commande à plusieurs niveaux - plusieurs objectifs.

Ce système de commande est constitué d'unités disposées suivant une hiérarchie, une structure pyramidale, sur le processus à commander composés de sous-système interconnectés.

.../...

.../...

Ces unités de commande sont réparties sur deux niveaux ou plus d'où la désignation "plusieurs niveaux". Ces unités reçoivent des informations du niveau supérieur et les traitent pour commander ensuite d'autres unités qui leur sont inférieures dans la hiérarchie.

Ce système est appelé à "objectifs multiples" parce que les unités de commande composant l'organisation ont des objectifs différents, parfois même en conflit ; mais il existe ici des unités pouvant jouer le rôle de médiateur, de coordonnateur, pour les niveaux inférieurs, ce qui permettra de résoudre ces conflits pour arriver à la solution globale.

Deux notions fondamentales sont donc à la base de l'élaboration des structures à plusieurs niveaux : ce sont "la répartition des tâches" (division du travail) et la "coordination".

I - 5 - 2 - 1 - Division du travail

Division horizontale :

Afin de diminuer les difficultés de calcul, et après définition d'un système de couplage, on décompose le processus en sous-processus, ce qui permet de formuler le problème global à partir d'un certain nombre de problèmes séparables et plus petits, pouvant être traité en un temps convenable. Chaque sous-problème est alors sous la responsabilité d'une unité de commande locale (placée au niveau le plus bas de la hiérarchie) dont les actions sont coordonnées par une unité supérieure.

Division verticale :

La tâche de commande est divisée cette fois-ci verticalement, en tâches de commande élémentaire, en niveaux de fonction de commande. On distingue couramment à ce sujet les niveaux suivants (de bas en haut) :

- régulation,
- optimisation (détermination des points de consignes des régulateurs),
- adaptation (auto-adaptation du modèle ou de la loi de commande),
- auto-organisation (choix des structures de modèle, de commande en fonction de l'environnement).

.../...

.../...

Le principe de la commande hiérarchisée consiste donc à décomposer un problème général P , dont le but est d'extrémaliser un critère global associé au système global, en un certain nombre de sous-problèmes P_i dont on recherche la solution localement de façon à satisfaire :

solution $P_1, P_2, \dots, P_n =$ solution P .

En fait une telle relation ne peut être en général satisfaite à cause de l'existence de l'interaction liant ces P_i , des conflits éventuels entre les P_i , et il est nécessaire d'introduire un "vecteur d'intervention" ou "paramètre de coordination", de remplacer chaque P_i par $P_i(\lambda)$ de façon à satisfaire la relation :

solution $P_1(\lambda), P_2(\lambda), \dots, P_n(\lambda) =$ solution P

Choisir λ et le faire évoluer d'une valeur initiale λ_0 à une valeur finale λ_f conduisant à la solution du problème global, c'est résoudre le problème de la coordination en commande hiérarchisée.

I - 5 - 2 - 2 - Coordination

De nombreuses méthodes de coordination ont été proposées, distinguons cependant schématiquement deux modes essentiels de coordination :

- coordination par le modèle : (par action sur les modèles des sous-systèmes)

à chaque problème i on associe deux fonctions

$y_i = P_i(m_i, \alpha_i)$ fonction modèle,

$v_i = F_i(m_i, y_i)$ fonction critère

avec m_i : commande

α_i : paramètre de coordination (n'agit que sur la fonction modèle)

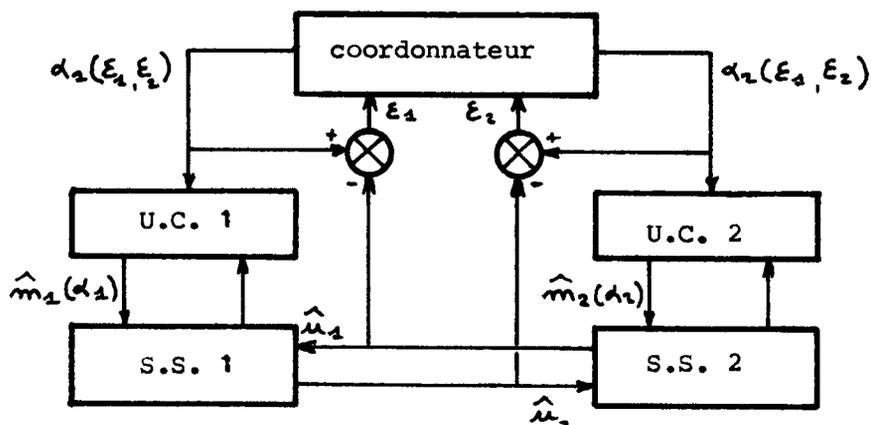
. le coordonnateur prédit l'interaction u_i en donnant à α_i une valeur présumée exacte,

. la commande locale exacte $\hat{m}_i(\alpha_i)$ donne l'interaction exacte \hat{u}_i à

.../...

.../...

- laquelle correspond l'erreur $\epsilon_i = \alpha_i - \hat{u}_i$
- le coordonnateur modifie α_i jusqu'à obtenir l'optimum global ($\epsilon_i = 0 \forall i$)



- coordination par le critère (par intervention sur les critères locaux des sous-systèmes)

à chaque sous-problème i on associe deux fonctions :

$$y_i = P_i(m_i, u_i) \text{ fonction modèle}$$

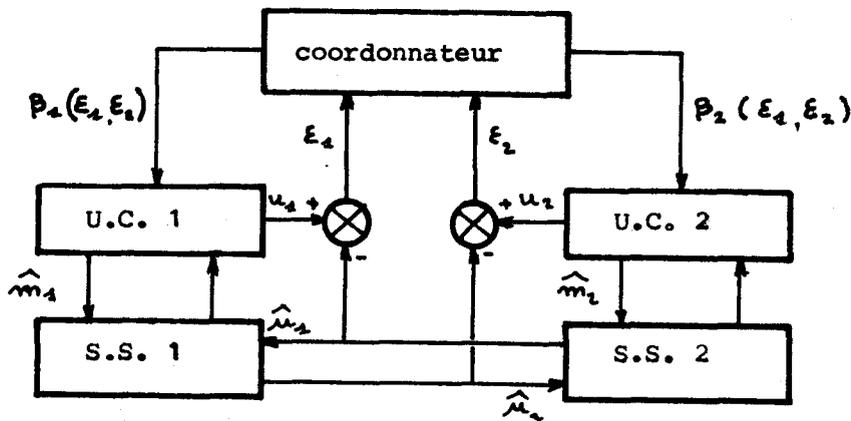
$$v_i = F_i(m_i, y_i, \beta_i, u_i) \text{ fonction critère}$$

avec β_i : paramètre de coordination (n'agit que sur la fonction critère)

- le coordonnateur modifie β jusqu'à satisfaire le principe de l'égalité de l'action réelle et de l'interaction calculée par l'unité de commande i : pour la valeur β_i , l'unité de commande détermine \hat{m}_i et u_i telle que l'optimum local soit atteint ; \hat{m}_i génère \hat{u}_i réelle et l'erreur $\epsilon_i = u_i - \hat{u}_i$; l'optimum global vérifie $\epsilon_i = 0 \forall i$, ce que réalise le coordonnateur en modifiant β_i .

.../...

.../...



Il existe un troisième mode de coordination ou "méthode mixte" qui se rapproche de la coordination par le modèle mais qui agit également sur le critère ; à chaque sous-problème i est alors associé deux fonctions :

$$y_i = P_i(m_i, \alpha_i) \text{ fonction modèle}$$
$$v_i = F_i(m_i, y_i, \alpha_i) \text{ fonction critère.}$$

Remarque :

La poursuite des objectifs sans contraintes peut conduire la commande d'un processus à des valeurs exagérées des grandeurs de sortie. Il est alors nécessaire de "brider" le processus par des contraintes du type égalité et/ou du type inégalité, afin que les différents paramètres intervenant dans le fonctionnement du processus évoluent de manière acceptable.

I - 5 - 3 - Principe de la structure de commande retenue

Suite aux considérations du paragraphe précédent et étant donné la nature du problème à résoudre, nous avons abouti à une structure de commande à trois niveaux :

- le niveau stratégique, constitué par un ensemble de stratégies de saisie, correspondant chacune à un type de pièces donné,

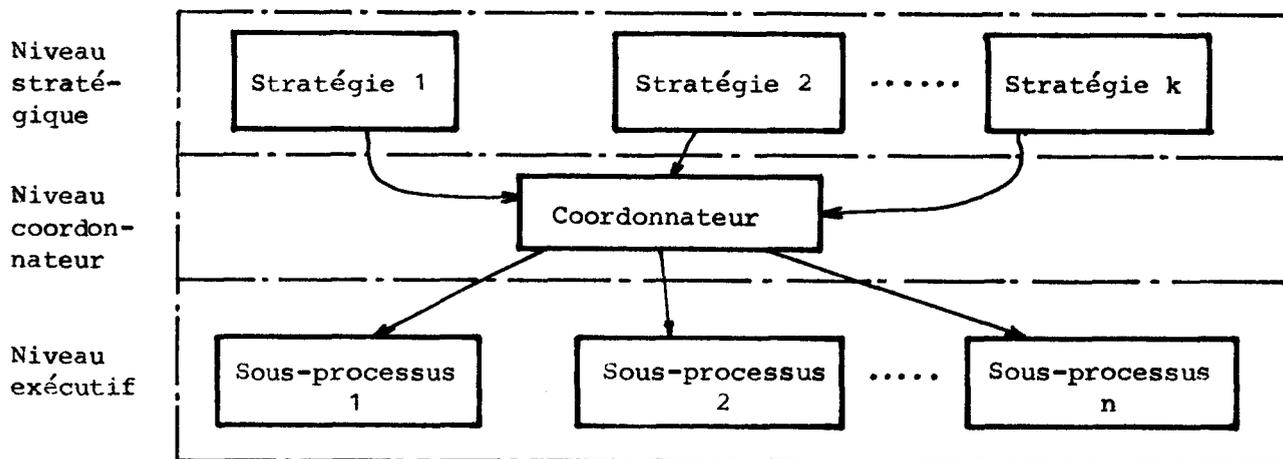
.../...

.../...

- le niveau coordonnateur, chargé de choisir et d'exécuter la stratégie la mieux adaptée à la situation précisée par le système robotisé en amont de l'organe de préhension, et responsable du dialogue de coopération vecteur-effecteur,
- un niveau exécutif, formé d'un ensemble d'agents locaux ou observateurs; à chacun de ces observateurs est transmis par le coordonnateur un objectif local associé à des contraintes spécifiant la nature et les conditions dans lesquelles la tâche demandée à chacun d'entre eux devra être exécutée de manière à ce que la juxtaposition des solutions locales conduise à la solution générale.

Cette approche, bien que n'utilisant pas explicitement le formalisme mathématique spécifique de la commande hiérarchisée, procède d'une manière évidente de la méthode de coordination mixte.

La figure ci-dessous représente cette structure de commande :



Examinons dans le paragraphe suivant les différents éléments de cette structure.

I - 6 - DESCRIPTION GENERALE DE LA STRUCTURE DE COMMANDE DE L'EFFECTEUR

I - 6 - 1 - Le niveau stratégique

Une stratégie se compose à la fois d'objectifs locaux, destinés à être exécutés par l'ensemble des sous-processus de l'effecteur, et d'opérations de

.../...

.../...

positionnement et d'orientation concernant le vecteur lorsque l'amplitude des degrés de liberté correspondant de l'effecteur est limitée. La solution globale, c'est-à-dire la saisie, sera obtenue lorsque le dernier ensemble d'objectifs locaux sera atteint.

La description d'une stratégie peut se faire au moyen d'un jeu de huit instructions suivantes :

- OUVERTURE : l'écartement partiel d'un ensemble de doigts,
- FERMETURE : rapprochement partiel d'un ensemble de doigts,
- POSITION : positionnement dans l'espace de l'effecteur par action sur les degrés de liberté du vecteur,
- ORIENTATION : orientation dans l'espace de l'effecteur par action sur les degrés de liberté du vecteur,
- TANT QUE ... FIN : possibilité d'actions répétitives,
- SI ... ALORS ... SINON ... : possibilité d'actions conditionnées,
- PREHENSION : saisie de l'objet,
- CALL : appel de procédure spécifique.

A chacune de ces instructions est associé un vecteur paramètre caractérisant la nature des opérations :

- OUVERTURE : doigts concernés, trajectoires associées, condition(s) de fin d'ouverture,
avec :
 - * doigts concernés : identification des n doigts concernés par l'ouverture,
 - * trajectoires associées : ensemble de trajectoires d'évolution asso-

.../...

.../...

ciées respectivement aux doigts concernés. A cet effet existe un jeu de trajectoires possibles, par exemple :



Une trajectoire sera codée sous forme de tableau associant une consigne ou incrément pour passer d'une position à une autre.

* condition(s) de fin d'ouverture :

- » si la condition est unique, sa validation conditionne l'arrêt des n doigts actifs et fait passer à l'étape suivante ;
- sinon il y a n conditions associées respectivement aux n doigts actifs et conditionnant leur évolution respective. Le passage à l'étape suivante n'a lieu que lorsque les n doigts concernés sont à l'arrêt. Il existe une liste finie de conditions constituées d'équations logiques d'états de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs de l'effecteur et le cas échéant de capteurs de l'environnement local du vecteur,

- FERMETURE : doigts concernés, trajectoires associées, condition de fin de fermeture

Ces paramètres sont identiques à ceux de l'instruction précédente,

- POSITION : coordonnées du point d'arrivée, trajectoire, condition de fin de position,

* coordonnées du point d'arrivée : coordonnée absolue ou incrémentale, dans le repère fixe associé au robot manipulateur, de l'origine du repère associé au vecteur,

* trajectoire : trajectoire de positionnement pouvant concerner à la fois les degrés de liberté du vecteur et de l'effecteur,

* condition de fin de position : permet d'interrompre le positionnement avant d'atteindre le point d'arrivée

.../...

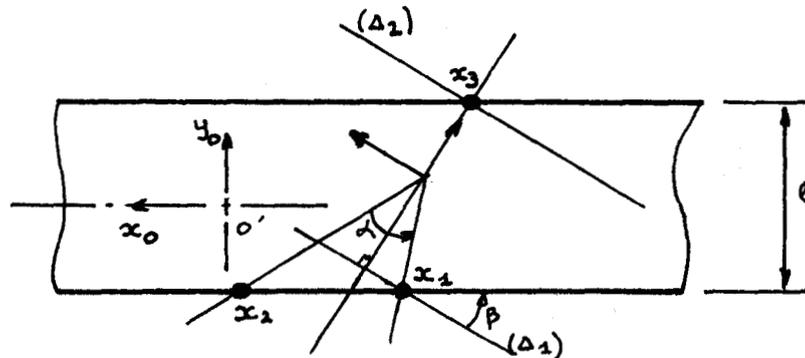
.../...

- ORIENTATION : coordonnées angulaires d'orientation de l'effecteur dans le repère fixe associé au robot manipulateur,
- TANT QUE - condition - ACTION - FIN : exécuter l'action aussi longtemps que la condition n'est pas vérifiée,
- SI - conditions - ALORS - action 1 - SINON - action 2 : exécuter l'action 1 si la condition est vérifiée, sinon exécuter l'action 2,
- PREHENSION : paramètres de préhension.
Ces paramètres dépendent des possibilités de contrôle de la préhension et peuvent être : force de serrage, temps de serrage maximum quand il n'y a pas de retour d'effort mais un serrage autobloquant,
- CALL procédure, vecteur paramètre.

Exemple de stratégie pour pince à trois doigts

L'effecteur prend la commande à charge dès que le vecteur a positionné et orienté celui-ci à la verticale de l'objet à saisir.

a) cas de pièces parallélépipédiques :



1. - Initialisation de la posture de la pince : il s'agit d'amener la pince en contact visuel avec la pièce (pince fermée) (le plan (D) formé par l'extrémité des 3 doigts étant parallèle à la face supérieure ou plan (P) de la pièce à saisir).

.../...

.../...

2. - Détermination de l'orientation de la pièce : pour connaître cette orientation dans le référentiel de la pince (x_p, y_p) il y a lieu d'écartier les trois doigts dans le plan (P) et mémoriser les trois points x_1, x_2, x_3 pour lesquels les trois doigts perdent respectivement la pièce de vue.

L'orientation de la pièce est définie par l'angle β . Des relations géométriques simples connaissant $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha$ permettent de déterminer β ainsi que l.

3. - Positionnement de la pince : il s'agit de déplacer la pince de manière à amener le centre de la pince sur l'axe $O'x_0$ et d'aligner les axes Ox_p et $O'x_0$. A ce niveau la connaissance de l permettra de positionner les axes Δ_1 et Δ_2 légèrement au delà des arêtes de la pièce.

4. - Approche finale et saisie : il suffit maintenant d'une translation verticale de la pince pour l'amener en position de saisie.

b) Description de cette stratégie au moyen du jeu d'instruction défini ci-dessus

1. - Initialisation de la posture de la pince :

FERMETURE : doigts 1, 2, 3 ; Trajectoire 1 = Trajectoire 2 = Trajectoire 3 = \curvearrowright ; butée fermeture

POSITION : $x_{n+1} = x_n, y_{n+1} = y_n, z_{n+1} = 0$;
trajectoire = \downarrow ; contact visuel avec la pièce

2. - Détermination de l'orientation de la pièce :

OUVERTURE : doigts 1, 2 et 3 ; Trajectoire 1 = trajectoire 3 = Trajectoire 3 = \rightarrow ;

état du capteur d'extrémité du doigt 1 = \emptyset , état du capteur d'extrémité du doigt 2 = \emptyset , état du capteur d'extrémité du doigt 3 = 0,

CALL : procédure de calcul d'orientation, α .

.../...

.../...

3. - Positionnement de la pince

. ORIENTATION : β

. Si $Ox_3 > 1/2$

alors fermeture : doigt 3, \leftarrow , $x_3 = 1/2 + \xi$

sinon ouverture : doigt 3, \rightarrow , $x_3 = 1/2 + \xi$

. Si $Ox_2 > 1/2$

alors fermeture : doigt 2, \leftarrow , $x_2 = 1/2 + \xi$

sinon ouverture : doigt 2, \rightarrow , $x_2 = 1/2 + \xi$

. Si $Ox_1 > 1/2$

alors fermeture : doigt 1, \leftarrow , $x_1 = 1/2 + \xi$

sinon ouverture : doigt 1, \rightarrow , $x_1 = 1/2 + \xi$

avec $\xi =$ quelques millimètres.

4. - Approche finale et saisie

. Position : $x_{n+1} = x_n$, $y_{n+1} = y_n$, $z_{n+1} = z_n + \Delta z$; ; $z_{n+1} = z_n + \Delta z$

. Préhension : temps de serrage = 3 secondes

Remarque : On peut envisager de mettre ce jeu d'instruction de description de stratégie à la disposition de l'utilisateur de manière à ce qu'il puisse lui-même générer des stratégies de préhension propres à son utilisation.

I - 6 - 2 - Le niveau coordinateur

Le coordinateur assure essentiellement l'exécution de deux fonctions :

- il coordonne les activités des observateurs en leur transmettant les objectifs locaux accompagnés des contraintes correspondantes (suite à l'interprétation de la stratégie de saisie) puis en modifiant, le cas échéant, ces objectifs locaux en fonction des interactions entre sous-processus pilotés par les observateurs,
- il spécifie au calculateur associé au vecteur les positions et orien-

.../...

.../...

tations successives à adopter (avec, le cas échéant, les contraintes égalités) au cours d'activités spécifiques, alors que pour les activités non spécifiques les ordres sont transmis à partir du vecteur et concernent alors l'exécution de fonctions courantes telles que ouverture de la pince, rotation, ...

Le premier aspect de ce travail, dans sa version la plus simple, consisterait à activer, pour une étape de la stratégie, le sous-ensemble de fonctions correspondant (ouverture, orientation, ...) inclus dans l'ensemble des fonctions possibles, en précisant à ces sous-programmes ou tâches élémentaires les contraintes correspondantes. La notion d'observateur correspondrait alors à la notion de fonction élémentaire dont le nombre serait directement lié à celui des instructions de description d'une stratégie.

Cette activation se ferait de façon séquentielle dans la mesure où une telle correspondance observateur/fonction élémentaire serait retenue dans un contexte monoprocesseur. Le coordonnateur, toujours pour l'aspect activation des observateurs, aurait alors une structure de type moniteur temps réel, c'est-à-dire capable de "faire plusieurs choses à la fois". Il s'agit ici d'un logiciel dont le but est d'associer le processeur unique à l'une des tâches activées. A chacune de ces tâches est affecté un niveau de priorité qui définit l'ordre d'activation. Lorsque la tâche la plus prioritaire est en attente d'un évènement, le processeur est alors attribué à la tâche de priorité inférieure le temps de cette attente et ainsi de proche en proche (de niveau à niveau).

En revanche, dans un contexte multiprocesseur, on pourrait par exemple décomposer le processus effecteur en fonction de sa structure physique et l'on affecterait ainsi un processeur (de type monochip) par doigt. Il y aurait alors un parallélisme réel dans l'exécution de fonctions élémentaires, et l'activation d'un observateur consisterait en une transmission de tâche élémentaire associée de contraintes d'exécution.

Dans ces deux cas de figure, se pose le problème de la prise en compte

.../...

.../...

de l'interaction entre observateurs. Dans le premier cas, il s'agira d'une interaction de type série, dans le second cas, de type parallèle.

La façon la plus économique logiciellement parlant, mais aussi la moins performante, revient à considérer cette interaction inexistante surtout dans un contexte monoprocesseur, en se basant sur un jeu d'instructions de description de stratégies suffisamment restrictif et non équivoque, ainsi que sur une connaissance exhaustive des états et transitions d'états du processus. Dans ce cas, une situation conflictuelle, correspondant à une émergence de situation non répertoriée ou nécessitant une étape non descriptible de fonctionnement à partir du jeu d'instruction disponible, conduirait à l'avortement de l'opération.

Une manière plus souple d'aborder la question est de définir un jeu d'instruction plus général, moins spécifique à la structure et au fonctionnement de l'effecteur, et donc plus facilement transposable d'un effecteur à l'autre. La conséquence en est la présence au niveau coordinateur d'un module logiciel capable d'apprécier l'évolution des activités au niveau observateur pour, le cas échéant, modifier les consignes et contraintes des observateurs concernés. On reviendra sur cette question au paragraphe II - 5 - 3 traitant du niveau observateur.

Le deuxième aspect du travail du coordinateur réside dans le dialogue vecteur/effecteur.

Pour satisfaire aux exigences d'une stratégie de préhension, l'entité de commande associée à l'effecteur, par l'intermédiaire du coordinateur, se comportera vis à vis de l'entité de commande du vecteur comme un générateur de vecteurs de consignes ainsi que nous l'avons précisé au chapitre d'introduction. Par souci de généralité, il convient de transmettre des informations de type disposition (position, orientation dans \mathbb{R}^3) plutôt que de type posture, à charge pour le vecteur, par l'intermédiaire notamment de son modèle géométrique propre, de les convertir en informations de type posture. On retiendra de préférence un codage incrémental de ces dispositions d'une part parce qu'il importe peu à l'effecteur de connaître sa position dans le repère absolu, dans la mesure où ses critères d'évolution sont avant tout liés à la localisation et la nature de la cible et, d'autre part à cause de l'optimisation du code inhérent au mode incrémental.

.../...

De plus, pour ce sens de dialogue, devra exister une procédure de réponse du vecteur aux exigences de l'effecteur pouvant aller d'une réponse binaire du type nouvelle disposition adoptée ou nouvelle disposition impossible, jusqu'à la possibilité d'un retour d'état du vecteur (état interne, état de l'environnement local, ...) sur demande de l'effecteur.

Le dialogue en sens inverse sera moins sophistiqué et pourra se limiter à une réponse de l'effecteur aux exigences opératoires du vecteur, cette phase de fonctionnement du mode automatique étant caractérisé par une activité plutôt trivial de l'effecteur.

On remarquera ici qu'il ne faut pas confondre dialogue vecteur/ effecteur en mode automatique qui n'est qu'un aspect localisé du flux d'information circulant dans l'ensemble du système, avec d'autres procédures de dialogue spécifique au mode de commande correspondant (en commande manuelle à vision opérateur nulle, on peut très bien désirer connaître l'état de l'environnement local).

Quant au module du coordonnateur chargé de l'examen de l'interaction entre observateurs, il pourrait constituer soit la tâche de fond lorsque la probabilité d'interaction imprévue est faible, soit la tâche la plus prioritaire dans un cas contraire, mais dans les deux cas de figure elle examinerait le mot d'état de chaque observateur, actualisé à chaque activation de ceux-ci, de manière à, dans le meilleur des cas, réorienter leur activité respective sinon d'interrompre l'opération en cours.

Dans le cas d'une structure multiprocesseur, chaque observateur sera susceptible d'exécuter l'ensemble des fonctions intervenant dans la description d'une stratégie. Le coordonnateur leur transmettra alors trois types de données :

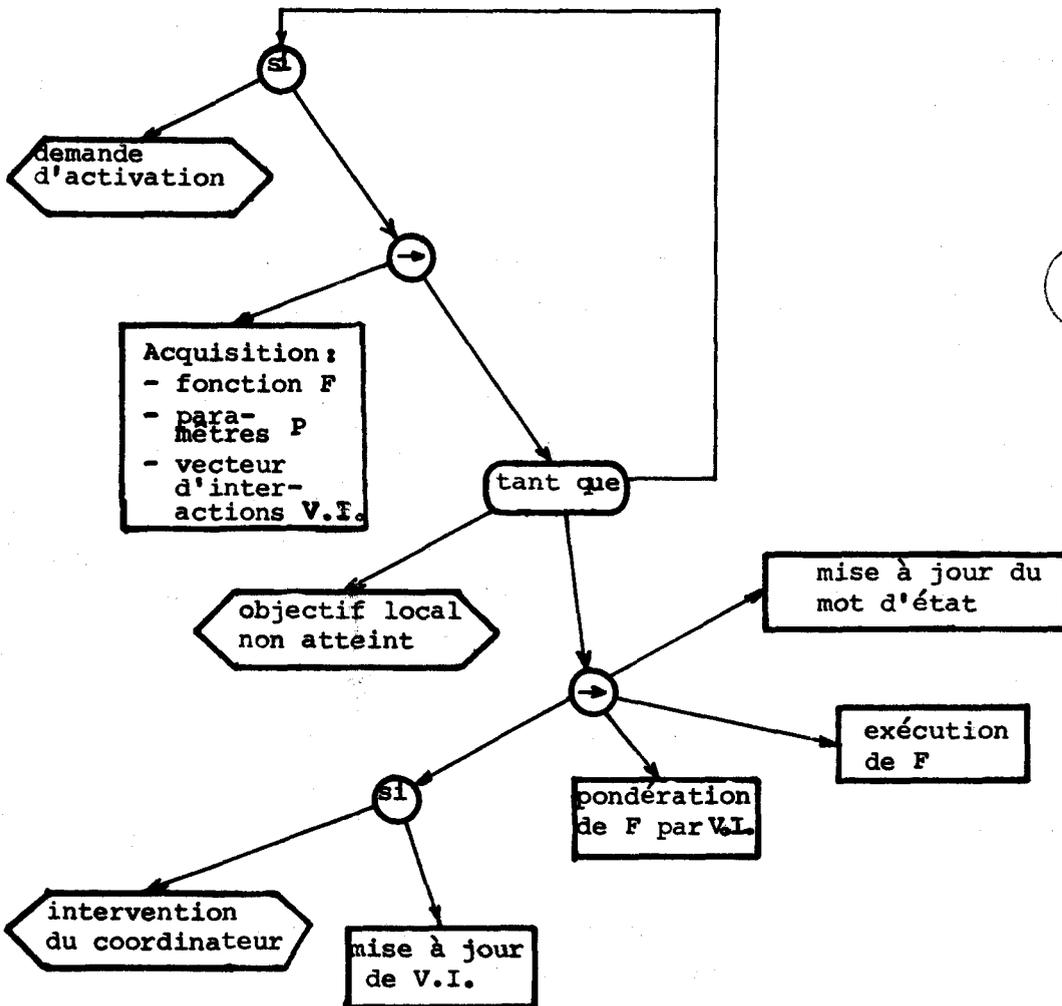
.../...

.../...

- le type de fonction à exécuter : ouverture, rotation, ...
- les paramètres relatifs à l'exécution de ces fonctions : trajectoire, condition de fin de fonction, ...
- un vecteur d'interaction entre sous-processus caractérisant le couplage entre processus et modulant l'exécution de la fonction locale.

Cette fois-ci, il y a évolution parallèle des activités des différents observateurs ainsi que de celles du coordinateur qui aura loisir de modifier dynamiquement les différents vecteurs d'interaction et résoudra ainsi les conflits éventuels entre observateurs.

On peut proposer la structure générale de commande au niveau d'un observateur pour une structure multiprocesseur au moyen de l'arbre programmatique suivant :



.../...

I - 7 - CONCLUSIONS

L'aspect original de notre travail consiste à considérer un robot manipulateur muni de son organe terminal, pour un mode de conduite automatique, comme une coopération entre deux systèmes distincts mais complémentaires participant à un même fonctionnement $z(t)$: le premier, le vecteur, par un mouvement $x(t)$ constitué d'un déplacement et d'un pointage du second, l'effecteur, fournit à ce dernier la possibilité d'effectuer une opération $y(t)$. Toute étape du fonctionnement caractérisée par une activité non spécifique de l'effecteur sera dirigée à partir des ressources du vecteur (phase d'approche d'un objet, transfert de pièce, ...), alors que toute étape du fonctionnement caractérisée par une opération spécifique de l'effecteur sera conduite par l'entité de commande associée à ce dernier (suivi de contour, usinage, préhension, ...).

Les paragraphes concernant l'élaboration du modèle géométrique et cinématique, ainsi que celui abordant la génération de trajectoire, ont mis en évidence les problèmes de temps de calcul pour l'élaboration en temps réel des consignes des actionneurs du vecteur et, par voie de conséquence, des problèmes de précision.

En fait, dans notre façon d'aborder le problème de la commande d'un robot manipulateur, on s'aperçoit que lorsque les opérations sont dirigées à partir du vecteur, c'est-à-dire dans la plupart des cas pour des opérations non spécifiques, l'orientation de l'effecteur est très souvent secondaire ou se limite à un pointage ne sollicitant qu'un seul degré de liberté (garder l'effecteur sur un axe vertical par exemple). Cela permet de réduire considérablement la complexité des calculs de consignes (Jacobien de dimension 3) et de gagner en finesse et précision. Pour une telle phase de fonctionnement, les éventuelles contraintes égalités destinées à compenser les redondances du vecteur sont fixées par le générateur de plans associé à ce dernier. Il retiendra la posture permettant le contournement d'un obstacle connu ou encore celle optimisant un critère de fonctionnement lié à la décomposition d'une tâche globale en sous-tâches élémentaires.

Par ailleurs, pour des activités spécifiques, les opérations seront dirigées à partir du logiciel de l'effecteur. En effet, une activité spécifique étant avant tout une phase de fonctionnement caractérisée par une opération généralement non triviale de l'effecteur, il est tout à fait cohérent de laisser l'

.../...

initiative à celui-ci pour spécifier, d'une part, son déplacement et son pointage au vecteur avec les éventuelles contraintes égalités, et de déterminer puis d'effectuer, d'autre part, les séquences de rôles aboutissant à l'exécution de l'opération. Là encore les opérations de positionnement et d'orientation de l'effecteur sont disjointes et réduisent considérablement la complexité et donc le volume des calculs.

Ainsi, dans la quasi-totalité des cas de figure, au delà de simples considérations formelles basées sur des analogies antropomorphiques, cette façon d'aborder le problème de la commande d'un robot manipulateur aboutit à une réduction de la complexité des algorithmes de commande sans réduire les performances globales du système.

Il n'existe pas actuellement sur le marché de robot manipulateur (avec ou sans organe de préhension) disposant d'une commande basée sur le modèle proposé ici. En fait, tout se passe comme si les constructeurs abordaient la commande d'un robot manipulateur par l'aspect structurel, c'est-à-dire en considérant avant tout le robot comme un mécanisme complexe au même titre qu'une machine-outil par exemple, plutôt que de l'aborder par l'aspect fonctionnel surtout lorsqu'il s'agit de préhension et de manipulation, ou encore d'opérations d'un effecteur doté d'un retour sensoriel.

Ceci se traduit par une lourdeur au niveau de la programmation de ces robots, même si l'on commence à disposer d'une prise en compte d'informations binaires concernant l'état de l'environnement pour conditionner l'exécution de certaines phases de trajectoires. Cette tendance actuelle ne peut pourtant pas être justifiée par le fait qu'une approche structurée, parce que très proche de l'architecture du système, apportera quelques pour cent de possibilités supplémentaires à une approche fonctionnelle. En effet, le gain en qualité de la relation homme machine dans le cas d'une approche fonctionnelle contribuera largement à l'amélioration globale de l'utilisation du robot manipulateur.

Par ailleurs, cette structure de commande intègre parfaitement les différents modes de commande des robots manipulateurs.

.../...

.../...

Dans un contexte de téléopération avancée, caractérisée par la présence indispensable de l'opérateur humain (liée à des questions de sécurité ou de complexité de l'environnement), la majeure partie des tâches peuvent être exécutées de façon automatique. Le passage de la phase manuelle à la phase automatique et vis et versa peut être décidé par l'opérateur ou déclenché de façon automatique. Que ce soit pour l'exécution d'une activité spécifique ou non spécifique, le système de commande devra intégrer une fonction permettant une interactivité permanente avec l'opérateur de manière à ce que ce dernier puisse :

- modifier dynamiquement les critères d'évolution du système,
- relancer une phase automatique de saisie après l'avortement d'une première tentative,
- combiner une commande partiellement manuelle et partiellement automatique (positionnement de la pince manuelle, centrage automatique),
- reprendre en main le cas échéant le système en commande manuelle.

Ces remarques restent valables lorsque la commande du robot manipulateur se fait en mode mixte tel qu'il a été défini par (HAB 81). Ce mode de conduite se caractérise par la juxtaposition de phases de conduite manuelle dirigées par l'opérateur et de phases de conduite automatique dirigées par l'une des entités de commande du robot manipulateur (celle associée au vecteur ou à l'effecteur); le choix phase automatique/phase manuelle est effectué en temps réel au terme d'une analyse multicritère portant sur l'état du système homme/machine. Dans la mesure où l'on différencie clairement les activités spécifiques des activités non spécifiques, c'est-à-dire celles prises en charge respectivement par l'effecteur et le vecteur, avec les conséquences évoquées au niveau de la commande du robot manipulateur, il est certain que l'estimation du comportement du robot manipulateur sera plus aisée et plus juste parce que mieux maîtrisée.

.../...

.../...

- BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE 1 -

- BON 83 : BONNET P, SCHNEBELEN B, MANOIT C : commande des mouvements d'un robot hydraulique" - D.E.A. Automatique - Centre d'Automatique UST LILLE 1983.
- AND 80 : ANDRE P. : "Les robots de coopération". Thèse d'état 1980, Université de Franche-Comté, Fac. des Sciences et Techniques.
- COI 82 : COIFFET Ph., CHIROUZE M. : "Eléments de robotique", HERMES Publishing, 1982,
- JOL 82 : D. JOLY - M. EDEL : "Conception and realisation of an intelligent and autonomous and effector" . Robot VI Conference proceedings - DESTROIT Mars 1982.
- CRO 77 : FR. ERSKING CROKKLEY. Design for a three - fingered Hand Mechanism and Machine Theory, 1977, vol. 12.
- KON 75 : M.S. KONSTANTINOV. Jaw type gripper mechanisms. - I.S.I.R. 1975, pp 323-338.
- OKA 79 : T.OKADA : "Object handling systems for manual industry". - I.E.E.E. Trans. On Syst. Man and Cyb. Fevrier 1979.
- UME 78 : Y. UMETANI : "The development of soft gripper for the versatile robot hand." Mechanism and machine theory, 1978, vol. 13.

.../...

CHAPITRE II PERCEPTION ET PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT

II - 1 - LA PERCEPTION TACTILE CHEZ L'HOMME

II - 2 - ELEMENTS DE PERCEPTION D'UN ROBOT MANIPULATEUR

II - 2 - 1 - Perception proprioceptive

II - 2 - 2 - Perception extéroceptive locale

II - 2 - 3 - Perception extéroceptive globale

II - 3 - ANALYSE DE L'INFORMATION LOCALE D'UN ROBOT MANIPULATEUR

II - 3 - 1 - Détection de présence

II - 3 - 2 - Estimation de distance par filtrage

II - 3 - 3 - Reconnaissance de caractéristiques simples liées à l'
objet

II - 4 - NATURE DES INTERACTIONS ROBOT MANIPULATEUR/ENVIRONNEMENT

II - 4 - 1 - Au niveau du vecteur

II - 4 - 2 - Interactions effecteur/environnement

II - 5 - PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DU ROBOT MANIPULATEUR

II - 5 - 1 - Au niveau du vecteur

II - 5 - 2 - Au niveau de l'effecteur

II - 6 - CONCLUSIONS

.../...

.../...

ANNEXE 1 : LES DISPOSITIFS DE PERCEPTION PROPRIOCEPTIVE D'UN ROBOT MANIPULATEUR

ANNEXE 2 : LES DISPOSITIFS DE PERCEPTION EXTEROCEPTIVE D'UN ROBOT MANIPULATEUR.

BIBLIOGRAPHIE

- RESUME CHAPITRE 2 -

Le premier paragraphe se propose de présenter l'organisation de la perception tactile chez l'homme et fait ainsi apparaître deux sources essentielles d'informations tactiles : extéroceptive apportée par la sensibilité essentiellement cutanée, et proprioceptive qui a trait à des notions d'ordre spaciales provenant des muscles et articulations.

A l'image de ce qui existe chez l'homme, tout robot manipulateur devra intégrer une organisation sensorielle disposant de ces deux sources d'informations proprioceptives et extéroceptives. Le deuxième paragraphe se propose de faire une synthèse des capteurs disponibles et utilisables actuellement à cette fin.

Puis, sont abordées dans le paragraphe suivant les façons d'exploiter cette structure sensorielle, en particulier celles concernant l'analyse de l'information extéroceptive locale à savoir : la détection de présence, l'estimation de distance et la reconnaissance de caractéristiques simples. L'analyse de l'information proprioceptive est passée sous silence dans la mesure où elle entre simplement dans les boucles de régulation du vecteur.

Les paragraphes quatre et cinq s'attachent à montrer l'intégration de cette information sensorielle extéroceptive locale dans la commande au niveau du vecteur comme au niveau de l'effecteur. La prise en compte de l'environnement global intervenant quant à elle au niveau de la génération de trajectoires et de l'élaboration de stratégies de commandes du robot manipulateur ne sera pas abordée ici.

Enfin, en dernier lieu, et en guise de synthèse des deux aspects fondamentaux de commande et de prise en compte de l'environnement, nous présentons la structure globale de cette symbiose environnement/commande conformément à l'organisation hiérarchique proposée en chapitre d'introduction.

.../...

II - 1 - LA PERCEPTION TACTILE CHEZ L'HOMME

Du point de vue fonctionnel, les éléments de connaissance que l'organisme retire des différents récepteurs sensibles ou sensoriels peuvent être divisés en deux groupes :

- les éléments de connaissance du monde extérieur (informations extéroceptives), qui sont apportés par la sensibilité essentiellement cutanée, et les autres organes du sens,
- les éléments de connaissance de l'individu lui-même que l'on peut subdiviser en :
 - . informations proprioceptives, qui ont trait à des notions d'ordre spatial ; ces informations proviennent des muscles, tendons et articulations,
 - . informations viscéroceptives qui concernent l'état et le fonctionnement des différents viscères.

Sensibilité de surface ou sensibilité tactile

La sensibilité tactile ne représente qu'une composante de ce qu'on a l'habitude d'appeler le toucher. En effet, le sens du toucher se compose de la sensibilité tactile, de la sensibilité thermique et de la sensibilité à la douleur. Elle est simplement la conséquence d'un contact léger auquel ne doit se superposer aucune pression accentuée sans quoi l'excitation tactile ne serait pas pure. En effet à ce moment là, la pression transmise sollicite d'autres récepteurs relatifs à la sensibilité profonde.

Cette sensation de contact est en réalité produite par une très minime variation de pression qui déforme l'épiderme. Pour fixer les idées, par exemple le seuil de la sensibilité est de 2 mg/mm^2 pour la pulpe des doigts et de 15 mg/mm^2 pour la face dorsale des doigts. De plus, cette sensibilité tactile n'apparaît qu'au niveau des points de tact et pas dans les régions voisines. L'écartement minimal entre deux points de tact varie de 2 mm pour la pulpe des doigts à quelques centimètres dans les régions

.../...

.../...

non spécifiques à la perception tactile.

Le message tactile issu des points de tact, amené au centre cortical par la voie tactile, donne lieu à la sensation suivie de la perception, c'est-à-dire de l'interprétation. La perception est le résultat de l'éducation ou apprentissage, et les jugements tactiles que nous portons sont la conséquence des habitudes fonctionnelles.

Sensibilité profonde ou sensibilité proprioceptive

Il s'agit d'un ensemble complexe de sensations et d'impressions sensibles, les unes conscientes, les autres inconscientes, dont la synthèse aboutit à l'individualisation d'un autre sens : le sens des attitudes et des mouvements.

La sensibilité profonde consciente comprend différents ordres de sensibilités provenant des parties profondes de la peau, des muscles, des tendons, des capsules, des aponévroses des ligaments articulaires et des os (PER 79).

C'est la synthèse de ces différentes impressions élémentaires qui donne l'image intégrée du mouvement et de l'attitude avec tous ses caractères. Ainsi se comprend la stéréognosie qui est la reconnaissance des objets palpés sans le secours de la vue. Nous sommes capables d'apprécier, par la simple palpation, et à l'aide des mouvements des doigts et des mains qui en explorent l'objet, les différents caractères ou qualités de celui-ci : consistance, rugueux, poli, température, forme, dimensions, tous les éléments de connaissance permettant, après intégration, de décrire l'objet et même de le reconnaître. Les sensibilités tactiles (superficielles) s'associent évidemment à la sensibilité profonde, mais ce sont surtout les mouvements de la main et les doigts, les articulations musculaires qu'ils ont nécessités, les déplacements articulaires, les pressions exercées qui représentent les éléments essentiels de la reconnaissance (BRI 77).

.../...

.../...

Il est bien des domaines où le modèle humain sera, et pour bien longtemps encore, une référence absolue. La cybernétique puis la robotique s'inspirent largement des nombreuses richesses de ce modèle, bien que tout ce que l'on pourra reproduire au niveau d'un robot manipulateur ne sera qu'un pâle reflet de la réalité sensorielle de l'homme.

Il est certain que les besoins ne sont pas les mêmes, mais l'on retrouvera, notamment dans le sensorium d'un robot manipulateur, deux sources d'informations sensorielles à l'image de ce qui a été précisé dans le paragraphe précédent concernant la structure de la perception tactile chez l'homme : il y aura les informations proprioceptives et les informations extéroceptives.

On désigne sous le nom de capteurs proprioceptifs des capteurs qui permettent le contrôle du robot au sens classique du terme sans tenir compte des éléments de l'environnement ; on se trouve ainsi dans un contexte de commande asservie. Dans cette famille, l'on distinguera les capteurs de position ou de déplacement, les capteurs de vitesse et les capteurs d'effort (ces derniers pouvant servir de capteur d'accélération).

On a coutume de comprendre par capteurs extéroceptifs ou proximaux, les capteurs capables de fournir au robot des éléments de connaissance de son environnement tant global que local. On distingue trois grandes classes de capteurs extéroceptifs : les capteurs tactiles, les capteurs de proximité et les capteurs de vision.

II - 2 - ELEMENTS DE PERCEPTION D'UN ROBOT MANIPULATEUR

II - 2 - 1 - Perception proprioceptive

a) position et déplacement

On distingue essentiellement ici les mouvements de translation

.../...

.../...

perçus par l'intermédiaire de potentiomètres ou de dispositif à transformateur variable, et les mouvements de rotation détectés par des capteurs optiques (codeur incrémental ou absolu), des potentiomètres ou des transformateurs variables (synchro, résolveur).

b) Vitesse

On utilisera généralement la génératrice tachymétrique de préférence à un capteur de position à partir duquel par dérivation on obtiendrait l'information de vitesse.

c) Effort

Il sera toujours quantifié par la mesure d'une déformation engendrée par les contraintes mécaniques. Une déformation peut être appréciée par une variation de longueur (jauge de contrainte), une contrainte peut quant à elle être mesurée directement par un capteur piézo-électrique.

d) Accélération

Elle peut être connue par dérivation de la vitesse, par la mesure de la force transmise par l'accélération d'une masse connue, ou en communiquant à une masse connue une force donc une accélération égale à celle que l'on désire mesurer de sorte que la masse reste un équilibre.

II - 2 - 2 - Perception extéroceptive locale

a) Capteur tactile simple touche

Il s'agit là d'un élément de sécurité (information tout ou rien de butée) ou orienté vers l'exploration tactile d'une pièce en vue de la localisation de points remarquables (information analogique).

b) Capteur matriciel

Constitué par la juxtaposition mécanique de capteurs élémentaires

.../...

.../...

simple touche tout ou rien ou analogique, ou d'un revêtement matriciel déformable et conducteur (fibres de carbone, peau artificielle) à résistivité transversale variable et fonction de la pression appliquée, ce type de capteur peut :

- former un outil amovible que le robot saisit à la demande pour explorer une portion d'environnement,
- faire partie intégrante d'un organe de préhension,
- équiper en permanence une partie d'environnement.

c) Capteur de proximité

On peut distinguer essentiellement deux catégories de proximètres :

- les capteurs passifs ou ne fonctionnant qu'en réception, ceci suppose que l'objet soit directement ou indirectement actif,
- les capteurs actifs comportant émetteur et récepteur. Etant maître de l'émission, il leur est possible de s'affranchir plus facilement du milieu ambiant, en revanche les informations de haut niveau peuvent être parfois plus difficiles à extraire.

II - 2 - 3 - Perception extéroceptive globale

Comme nous le verrons ultérieurement, cette perception ne sera que très rarement prise en compte dans les boucles de commandes dirigeant les opérations de l'effecteur, mais interviendra plutôt au niveau de l'élaboration d'une trajectoire ou de l'analyse de scène antérieure à une définition de stratégie de commande.

Ces éléments d'information seront essentiellement perçus et intégrés par des capteurs d'images de type D T C (Dispositif à Transfert de Charge) ou de caméra TV traditionnelles.

On trouvera en annexe 1 et 2 une présentation de ces éléments d'après essentiellement (COI 82) et (ESP 82)

.../...

.../...

II - 3 - ANALYSE DE L'INFORMATION LOCALE D'UN ROBOT MANIPULATEUR

Si l'analyse de l'information proprioceptive ne pose pas de problème majeur, dans la mesure où celle-ci est toujours interprétée de façon identique (et essentiellement destinée à la régulation du vecteur), et ce quelles que soient les spécificités des activités du robot, l'analyse de l'information extéroceptive est plus délicate dans la mesure où peuvent varier les conditions d'exploitation pour une même tâche ainsi que la fonction d'un capteur extéroceptif d'une tâche à l'autre.

Ainsi le problème de l'analyse de l'information extéroceptive se pose de la façon suivante : soit un capteur, ou un ensemble de capteurs auxquels on associe :

- un repère R_c ,
- un volume d'observation V_c , portion de l'environnement local où se trouve un objet.

Un système idéal fournirait alors un ensemble de couples $(X_1, P_1), \dots, (X_n, P_n)$ où X_i serait le vecteur image de la grandeur observée dans R_c d'un point i de la surface de l'objet appartenant à V_c et P_i un vecteur paramètre caractérisant la nature de l'objet au point i (coefficient de réflexion, rugosité, ...). L'image de la grandeur physique observée X_i ne sera interprétable que si le vecteur paramètre P_i précisera suffisamment les conditions d'exploitations. Dans ce cas, un nombre de points suffisamment distincts permettra un contrôle satisfaisant des opérations.

Cependant, dans la pratique, un nombre restreint d'informations suffisent pour aboutir à une décision pertinente comme c'est le cas par exemple pour la détection d'obstacles. Cela peut être vrai également pour un problème plus complexe de reconnaissance, à condition de trouver un ensemble de mesures suffisamment discriminants.

Ainsi, l'analyse de l'information extéroceptive est essentiellement liée aux conditions d'exploitation dans lesquelles on peut inclure, mis à

.../...

part les paramètres caractérisant l'objet, la spécificité de l'information finale recherchée, ce qui nous conduit à différencier trois classes de traitements :

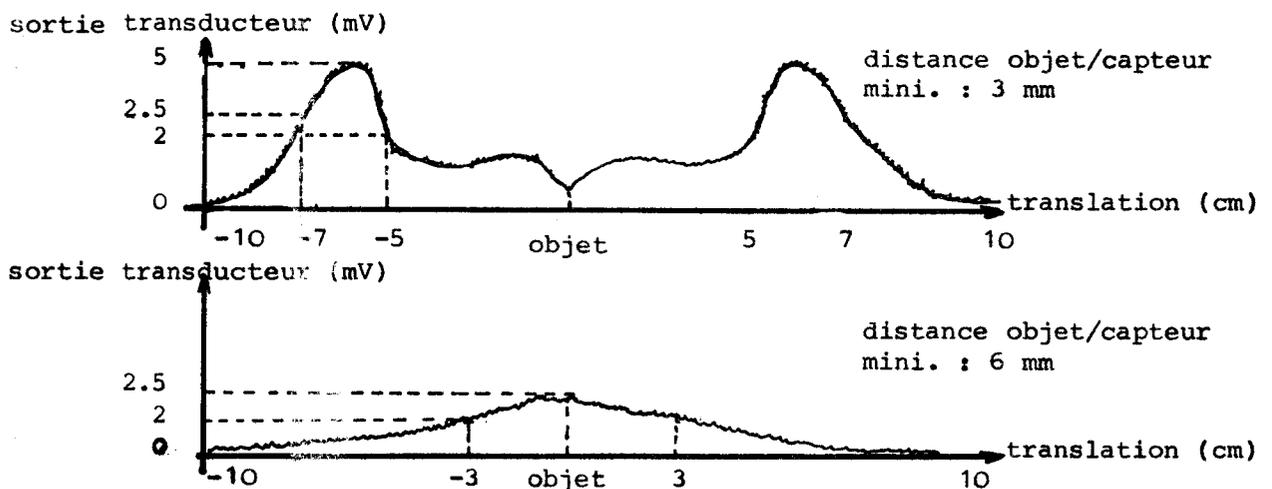
- détection de présence : information finale binaire,
- mesure analogique de la grandeur physique délivrée par le capteur,
- reconnaissance de caractéristiques simples liées à l'objet.

La sélection de l'un de ces modes de traitement se fera au terme d'un choix stratégique fonction des opérations à effectuer, alors que le vecteur paramètre P_i devra, dans la plupart des cas, être précisé de façon dynamique par l'opérateur.

Dans les paragraphes qui suivent, nous présenterons les techniques utilisées et les problèmes en suspens pour ces modes de traitement, abondamment illustrés du reste en (ESP 82).

II - 3 - 1 - Détection de présence

Si on examine le signal recueilli lors d'un déplacement de translation par un capteur de proximité à jet d'air (voir annexe 2, paragraphe 2-f) devant un cylindre de 10 centimètres de diamètre, on obtient les signaux suivants :



.../...

Le problème de la détection consiste à tester sur ce genre de courbe l'hypothèse de la présence d'un signal significatif $s(x)$. Plusieurs problèmes viennent compliquer l'affaire :

- 1 - le bruit issu du capteur,
- 2 - environnement variable : présence d'autres pièces, ...
- 3 - $s(t)$ est un signal dont les caractéristiques fréquentielles dépendent de la vitesse de déplacement de translation du capteur devant l'objet.

Pour détecter l'objet à partir de $f(x)$, on dispose de nombreuses techniques passées en revue dans (RUG 78), (COI 81) :

1 - le filtrage passe bas, qui peut se traduire par un intégrateur faisant une moyenne sur une fenêtre que l'on déplace au fur et à mesure de l'acquisition de $f(x)$. La variation de cette valeur moyenne permettra de reconnaître la présence de l'objet.

2 - la technique des test à intervalle régulier. Comme précédemment, on intègre le signal et si la valeur de cette intégrale est supérieure à un seuil, un objet est détecté. L'intégrale est remise à zéro à chaque intervalle T .

3 - le filtrage adapté qui relève du traitement du signal : exige beaucoup de calcul et des hypothèses sur le bruit ; cette technique est peu réaliste en proximétrie, telle qu'on la conçoit ici.

4 - la détection par changement de modèle. Elle consiste à déterminer un modèle du signal délivré par le capteur en l'absence d'objet par exemple un modèle autorégressif linéaire de la forme :

$$s(n) + a_1 s(n-1) + \dots + a_p s(n-p) = b_0 e(n)$$

Ce modèle va varier en présence d'un objet et la détection se fait sur une fonction discriminante de ce changement de modèle, par exemple :

$$d = \sum_{i=1}^P (a_i - \hat{a}_i)$$

.../...

a_i étant les paramètres du modèle et \hat{a}_i les paramètres estimés à partir des mesures.

5 - la détection basée sur les statistiques d'ordre peut être une méthode robuste et simple, répondant aux exigences du temps réel et ne nécessitant qu'un nombre réduit de connaissances à priori sur le système. Le principe en est la détection d'une croissance suivie d'une décroissance. Ainsi plaçons nous à l'itération i et supposons que p mesures ont été conservés :

- on lit les q mesures suivant la mesure i ,
- on classe les $p + q$ valeurs existantes par ordre décroissant,
- on conserve parmi celles-ci les $p + 1$ valeurs les plus élevées,
- on compte dans ces $p + 1$ valeurs le nombre K de données issues de q ,
- on compare $K(i) - K(i-1)$ ou $K_{\max} - K(i-1)$ à un seuil.

Cette méthode ne nécessite que la détermination (par apprentissage) de deux paramètres : p et q .

6 - étude de la variation du nombre de mesures supérieures à un seuil sur une fenêtre décalée à chaque pas. Lorsque ce nombre dépasse un seuil fixé par apprentissage, il y a détection d'un objet.

Le critère de sélection de l'une de ces méthodes dans un contexte d'interaction robot manipulateur/environnement sera du type à maximiser le rapport performance/temps de calcul ; parmi les six méthodes proposées, les deux dernières répondent le mieux à nos exigences.

II - 3 - 2 - Estimation de distance par filtrage

Le problème se pose de la façon suivante : est-il possible d'estimer la distance séparant un capteur d'une cible, au cours d'un déplacement rectiligne en sachant que :

.../...

.../....

- la réponse du capteur face à une cible c et placé à une distance x est $y = f(x)$
- la cible c appartient à la classe C des objets tels que $\forall c \in C, y = \hat{d} f(x)$ avec \hat{d} facteur d'affinité
- le mouvement relatif capteur/cible est rectiligne et à vitesse connue.

La distance initiale capteur/cible étant inconnue, on peut représenter le problème de l'estimation de la distance sous la forme suivante :

$$x(k+1) = x(k) + t(k) + v_1$$

$$\hat{d}(k+1) = \hat{d}(k) + v_2$$

$$y(k+1) = \hat{d}(k+1) f[x(k+1)] + w(k+1)$$

avec :

- $x(k)$: distance à estimer
- $\hat{d}(k)$: facteur d'affinité à estimer
- $t(k)$: incrément d'avance du capteur
- v_1 : erreur de positionnement
- v_2 : bruit centré autorisant $\hat{d}(k)$ à varier autour d'une valeur moyenne
- $y(k)$: sortie du capteur
- $f[x(k)]$: réponse moyenne du capteur à la classe C
- $w(k)$: bruit de mesure.

Il s'agit donc d'estimer le vecteur $X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ \hat{d}(k) \end{bmatrix}$ connaissant $y(k), \dots, y(1)$: ceci est un problème classique de filtrage dans lequel l'équation d'état est linéaire et l'équation de mesure non linéaire.

Sachant que la solution optimale du système, s'il était linéaire et gaussien, serait donnée par le filtre de Kalman, et que la solution

.../...

.../...

exacte du cas non linéaire est difficile à obtenir, les approches consistent à rechercher des solutions sous optimales obtenues à l'aide de diverses approximations. On trouvera des exemples d'algorithmes cablés ou programmés dans (AND 83).

Ceci dit, la mesure de distance n'est pas forcément nécessaire dans beaucoup d'applications utilisant la proximétrie ; une localisation plus ou moins fine est possible par balayage à l'aide d'un ensemble de capteurs judicieusement implantés et délivrant des informations binaires.

II - 3 - 3 - Reconnaitances de caractéristiques simples liées à l'objet

La mesure de distance constitue un premier niveau d'extraction de paramètres géométriques. Une étape ultérieure consiste à extraire un ensemble d'informations caractéristiques de l'objet lui-même de manière à procéder à de la classification d'objets (reconnaissance de 1 parmi n) ou à rechercher dans un objet une caractéristique particulière..

De par la nature des capteurs de proximité, ces problèmes nécessitent la prise en compte de données multiples obtenues en utilisant plusieurs capteurs ponctuels exploités par diverses stratégies d'approche de l'objet. Ainsi est-il possible de constituer une "image proximétrie" de l'objet à laquelle il est possible d'appliquer divers traitements.

La première approche du problème consiste à reconstituer une image matricielle de dimension $m \times n$ soit au moyen de m capteurs de proximité animés d'un mouvement selon une direction parallèle au plan de l'objet et échantillonnés n fois, soit au moyen d'une matrice de capteurs de contact de dimension donnée. Dans le cas de capteurs de proximité, chaque élément de la matrice image est obtenu par discrétisation d'une information analogique de distance capteur/objet. On se retrouve donc partiellement confronté au problème de tout à l'heure de l'estimation de distance avec cependant la différence que cette fois ci l'information absolue est moins intéressante que l'information relative tant pour la

.../...

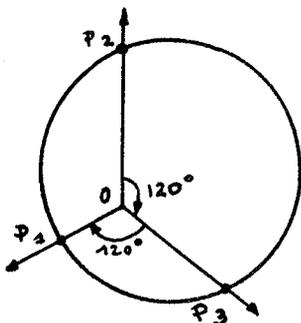
.../...

reconnaissance d'un objet parmi un ensemble que pour l'extraction de caractéristiques liées à l'objet (contour, centre de gravité, orientation, ...)

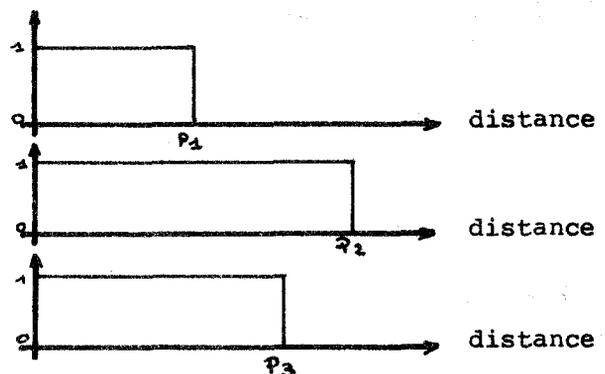
La seconde approche, plus spécifique des systèmes proximétriques ou extéroceptifs en général, cherche à utiliser directement les signaux capteurs pour extraire les informations recherchées, technique utilisable, de par sa nature, que dans les cas simples. On peut illustrer cette procédure par l'exemple suivant :

Soit à saisir un objet circulaire posé sur sa section plane à l'aide d'une pince à trois doigts munis de capteurs de proximités à jet d'air logés en bout des doigts. L'effecteur se présente, doigts fermés, à la verticale de l'objet et est animé d'un mouvement de translation verticale combiné avec un mouvement d'écartement des doigts de manière à déplacer l'extrémité des doigts dans un plan parallèle à la section plane de la pièce.

En supposant une réponse binaire des capteurs, le problème consiste à localiser l'axe de symétrie verticale et à déterminer le diamètre de la pièce de manière à centrer la pince pour une saisie stable. Les figures ci-dessous illustrent les conditions expérimentales et donnent un exemple de réponse des capteurs :



Vue de dessus



Réponses binaires des capteurs

.../...

.../...

En relevant les trois distances OP_1 , OP_2 , OP_3 correspondant aux positions des doigts lorsque leurs capteurs respectifs perdent le contact visuel de la pièce, on détermine à l'aide de relations trigonométriques simples les caractéristiques du triangle quelconque $P_1 P_2 P_3$ et par suite le centre de la section plane circulaire ainsi que son diamètre.

La phase suivante de l'algorithme de saisie consisterait à retirer la pince pour la centrer sur l'axe de symétrie verticale puis d'écartier les doigts d'une quantité à peine supérieure au rayon de l'objet et afin d'entourer l'objet avant de refermer la pince.

Il est clair que les possibilités et les performances d'une telle approche sont liées à la quantité d'information disponible. Par ailleurs, dans la pratique, une telle approche ne se justifie par rapport aux systèmes de vision globale que si elle permet de répondre au problème posé pour un coût total inférieur ; si le robot est déjà équipé d'un système de vision, seul le coût du traitement à performances égales est à prendre en considération. En tout état de cause, bien que les techniques proximétriques ne puissent pas résoudre les problèmes de reconnaissance de caractéristiques au delà d'un certain seuil de complexité, une synthèse d'informations de nature et de niveau différents (vision globale et perception locale) peut présenter un bon compromis performances/coût.

II - 4 - NATURE DES INTERACTIONS ROBOT MANIPULATEUR/ENVIRONNEMENT

II - 4 - 1 - Au niveau du vecteur : notion d'obstacle et de cible (ESP 82)

Il est très commode de scinder l'environnement en deux espaces disjoints en rapport direct avec l'entropie de l'information liée à chacun de ces espaces. En effet le premier de ces espaces ou environnement global fournira une information de haut niveau intégrée par les modules de commande situés au niveau de la génération de plan. Alors que l'information ponctuelle, spécifique au deuxième espace ou environnement local, interviendra directement au niveau de la génération de trajectoire,

.../...

.../...

c'est-à-dire dans la commande des actionneurs.

Cette séparation apparaît également au niveau de la technologie des capteurs d'environnement. La perception de l'environnement global se fait généralement par des capteurs de type caméra exploités par un logiciel d'accompagnement conséquent : analyse de scène, reconnaissance de forme, analyse de mouvement. Alors que l'environnement local est perçu par l'intermédiaire de proximateurs délivrant une information ponctuelle de type présence ou absence d'un objet, distance capteur/objet, état de surface ou couleur locale de l'objet.

Par ailleurs on remarquera que dans chacun de ces espaces, l'on a essentiellement affaire à deux types d'informations liés à la présence exclusive de deux types d'objets :

- les obstacles : tout objet (ou partie d'objet) s'opposant à, ou perturbant l'exécution d'une tâche,
- les cibles : tout objet (ou partie d'objet) sur lequel porte l'action instantanée du manipulateur requise par la tâche.

L'environnement global, constitué par l'ensemble des obstacles et cibles situés dans l'espace de travail à un instant donné, est rarement examiné dans son ensemble, mais plutôt d'une façon partielle ; la portion de l'espace observé est relative à la cible et fixé à priori. Ces modes de perception se caractérisent donc par :

- un volume d'information à traiter relativement important,
- l'absence d'informations relatives cibles/objets,
- un espace examiné dépendant d'éventuelles modifications de l'univers.

Au contraire, l'utilisation d'informations provenant de l'environnement local, ou portion d'espace situé au voisinage de l'ensemble des parties mobiles du robot, permet :

.../...

.../...

- de réduire le volume des traitements numériques nécessaires à l'accomplissement des tâches purement locales,
- de diminuer la précision exigée en boucle ouverte si des informations locales sont situées en bout de chaîne,
- d'autoriser l'adaptation du robot à des variations inattendues de l'environnement, parfois non perceptible globalement.

Il est clair que l'examen de l'environnement local du vecteur s'avère nécessaire lorsque l'univers général est impossible à percevoir dans sa totalité à l'aide de capteurs globaux, qu'il soit :

- variable de façon peu ou pas connue à l'avance,
- fixe ou répétitif, mais inconnu à priori.

En robotique, de telles conditions de travail se présentent fréquemment pour la raison suivante : l'environnement local minimum à observer est constitué par la zone d'incertitude du manipulateur relativement à la tâche à effectuer. Cette zone d'incertitude est liée à la précision du robot manipulateur en boucle ouverte vis à vis de la tâche (c'est-à-dire au niveau de l'effecteur) même si l'environnement est fixe. On est ainsi amené à envisager le déplacement des coûts, de la précision mécanique en boucle ouverte (chère) vers un traitement plus complexe prenant en compte la perception de l'environnement local à condition que la sensibilité des capteurs et la résolution des parties du manipulateur concernées soient suffisantes. Ce phénomène peut se rencontrer en robotique industrielle même sur des chaînes où la répétitivité des tâches est parfaite et où la commande du manipulateur est quasi séquentielle.

II - 4 - 2 - Interactions effecteur/environnement

Disposant d'un certain nombre de possibilités concernant les

.../...

.../...

technologies des capteurs, se pose à présent le problème de l'implantation de ces capteurs dans la structure mécanique de l'effecteur. Le problème n'a pas de solution générale car la dépendance vis à vis de l'application est très élevée. En particulier interviennent :

- les types de capteurs utilisés,
- l'aspect de la portion d'environnement local que l'on désire observer,
- la nature des traitements associés aux signaux capteurs, dépendant des fonctions affectées aux capteurs.

Il ressort de cela que les implantations doivent être étudiées en étroite liaison avec les techniques de commande envisagées ; il est cependant possible de dégager quelques principes de base concernant ces problèmes d'intégration (ESP 82).

Il faut remarquer en premier lieu que la diversité des organes terminaux existants rend difficile la mise au point des structures d'implantation d'intérêt général. Aussi, pour rester à un niveau de généralité suffisant, on s'intéresse à une fonction assez fréquente des systèmes proximétriques, en considérant un préhenseur multi-digital. Cette fonction est la suivante :

L'ensemble des proximètres intégrés à la pince doit permettre d'aider à chaque instant le système de commande à amener l'effecteur dans une situation donnée, relativement aux objets situés dans la portion de l'environnement local examiné.

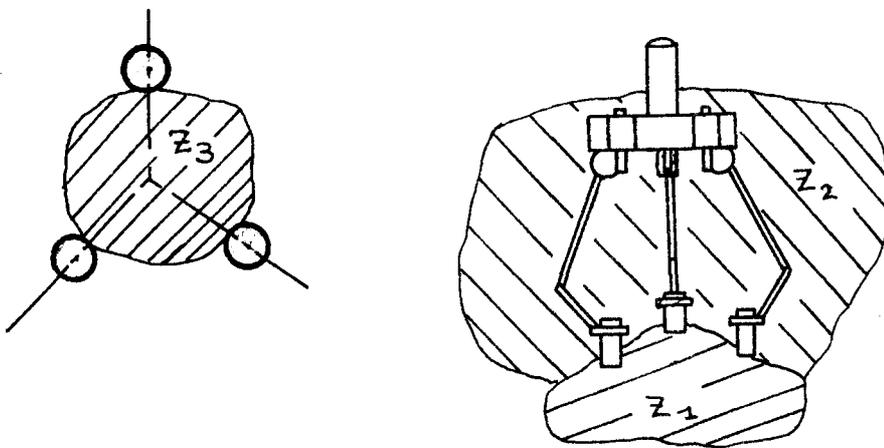
Autrement dit, il s'agit d'extraire de l'environnement local les informations instantanées pertinentes, les besoins considérés relevant aussi bien de la saisie que de l'évitement d'obstacles.

Dans ces conditions, nous pouvons définir à partir d'un effecteur trois zones d'activités qui sont des parties de l'environnement local dans lesquelles les fonctions sont particularisées :

.../...

1. une zone extérieure à dominante attractive Z_1 ,
2. une zone extérieure à dominante répulsive Z_2 ,
3. une zone intérieure Z_3 .

Prenons comme exemple une pince à trois doigts :



Les trois zones précédemment définies se caractérisent alors ainsi :

- ZONE 1 :

L'observation de cette zone doit permettre à la fois les traitements en boucle ouverte (compensation des incertitudes mécaniques du vecteur) et en boucle fermée (actions spécifiques). En outre, il est souhaitable que l'orientation spatiale de l'effecteur puisse tirer profit de ces informations ; cela conditionne la structure d'implantation en Z_1 de trois façons :

- . les capteurs seront de bonne qualité : portée, précision, champ assez étroit, bonne information de distance,
- . ils seront en nombre suffisant,
- . les détections d'observation ne sont pas toutes situées dans un

.../...

.../...

même plan. Ce dernier point conduit à augmenter la hauteur des doigts, utiliser des excroissances spécialisées, ou placer en fond de pince des capteurs dont les directions d'observations donnent une sensibilité suffisante pour contrôler des mouvements qui ne déplacent pas nécessairement le plan des extrémités des doigts parallèlement à lui-même.

Cette zone Z_1 est appelée "à dominante attractive" car les fonctions de commande relative à cette zone auront généralement comme objectif la préhension. Sa structure géométrique est liée à l'application, mais il est certain que les extrémités des doigts y ont une situation privilégiée.

- ZONE 2 :

Cette zone est généralement le complément de Z_1 dans l'environnement local défini à l'extérieur de la pince. Comme son nom l'indique, son observation relève plus de la surveillance que du contrôle fin : de l'anticollision (informations binaires) à la navigation en présence d'obstacle. On disposera donc de capteurs à champ large, dont la juxtaposition couvrira le volume recherché. Leurs performances n'ont pas à être très élevées en ce qui concerne la précision, et l'on utilisera souvent le signal capteur brut, sans prétraitement, en consigne de répulsion.

- ZONE 3 :

La zone intérieure comporte essentiellement le volume situé entre les doigts et allant jusqu'à la limite de Z_1 . Sa fonction primordiale consiste à assurer une bonne prise. L'action des capteurs s'étend depuis l'entrée de l'objet dans Z_1 jusqu'au contact. Entre ces deux instants, les conditions de bonne prise à respecter sont :

- maintien d'une position relative évitant un choc dans le fond de la pince, mais assurant une pénétration suffisante,

.../...

.../...

- poursuite du centrage effectué dans Z_1 ,
- serrage et contrôle de la prise (problèmes de glissement).

Nous aurons donc souvent à effectuer des actions de nature voisine de celles de Z_1 , mais dans un volume plus petit, mieux délimité. D'où les caractéristiques des capteurs à utiliser :

- portée réduite, champ étroit, taille petite, nombre de capteurs important,
- disposition permettant de couvrir tout le volume.

Il faut remarquer enfin qu'il n'est pas obligatoire d'associer de façon stricte capteurs et zones ; ainsi une matrice située en fond de pince peut aussi bien observer Z_1 que Z_3 .

II - 5 - PRISE EN COMPTE DE L'ENVIRONNEMENT DU ROBOT MANIPULATEUR

L'insertion d'informations proximétriques dans la commande des robots manipulateurs constitue un pas important dans leur évolution vers une prise en compte réelle et permanente de leur environnement. Cette prise en compte se fera d'une part au niveau du vecteur, ce qui se traduira par une intégration d'informations proximétriques dans les techniques classiques de commande, et d'autre part au niveau de l'effecteur concrétisée par une orientation spécifique des évolutions des activités du robot manipulateur lorsque celles-ci seront dirigées à partir de l'effecteur. Nous abordons dans les paragraphes suivants les deux aspects de cette question.

II - 5 - 1 - Prise en compte de l'environnement au niveau du vecteur

Une première possibilité de prise en compte dynamique des interactions entre robot et environnement a été proposée par (KHA 80) dans un contexte de commande dynamique. Rappelons, dans un premier temps, le principe de la commande dynamique (REN 80), (COI 81).

.../...

.../...

Les modèles de robots (géométrique et cinématique) présentés dans le chapitre précédent sont valables sous trois grandes classes d'hypothèses :

- le robot a une structure parfaite : pas de flexion, pas de déplacement relatif des centres de rotation,
- la commande est parfaite : c'est-à-dire instantanée, avec un calcul des consignes rigoureux, et une possibilité d'incrément infiniment petit,
- le robot est sans dynamique : absence d'inertie et de frottements.

Pour piloter un robot de façon plus efficace, les chercheurs ont proposé un modèle prenant en compte une partie de sa dynamique propre, à savoir qu'on suppose :

- le robot très rigide (pas d'élasticité),
- les articulations parfaites (pas de frottement),
- pas de mouvements relatifs des centres de rotation,

et on prend en compte l'ensemble des forces s'exerçant sur le robot :

- la pesanteur,
- les forces des actionneurs,
- les forces générées par les masses en mouvements (inertielles, centrifuges, coriolis).

En faisant le bilan des forces en présence par l'utilisation du formalisme de LAGRANGE $(\frac{d}{dt} (\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i$ avec $i = 1$ à k degrés de liberté $L =$ énergie cinétique - énergie potentielle, $F =$ forces extérieures et pesanteur), l'on aboutit au modèle dynamique suivant :

$$[A(\theta)]\ddot{\theta} + [B(\theta)]\dot{\theta}^2 + [C(\theta)]\dot{\theta}\dot{\theta} = Q(\theta) + \Gamma$$

.../...

.../...

avec :

- $\ddot{\theta}$: vecteur des accélérations des articulations
- $\dot{\theta}^2$: vecteur du carré des vitesses des articulations
- $\dot{\theta}\dot{\theta}$: vecteur du produit des vitesses des articulations
- $[A(\theta)] \ddot{\theta}$: couples inertiels
- $[B(\theta)] \dot{\theta}^2$: couples centrifuges
- $[C(\theta)] \dot{\theta}\dot{\theta}$: couples de Coriolis
- $Q(\theta)$: couples dus à la pesanteur
- Γ : couples moteurs

La commande dynamique consiste toujours à inverser ce modèle. Ce qui veut dire que connaissant $x(t)$ (c'est à dire la position et l'orientation de l'effecteur dans le repère R_0) et étant capable de passer de $x(t)$ à $\theta(t)$ (c'est à dire disposant d'un robot résolvable), quel $\Gamma(t)$ faut-il appliquer aux articulations pour que le robot exécute bien $\theta(t)$ et donc $x(t)$. Ce qui est une question difficile vu la non-linéarité du système.

Toujours est-il que dans un tel contexte, la façon de prendre en compte les interactions robot manipulateur/environnement, proposée par O. KHATIB en (KHA 80) est la suivante : l'on associe aux objets un champ de forces dérivant d'un potentiel, répulsif pour les obstacles et attractif pour les cibles. Les forces résultantes sont appliquées en N points du robot et conduisent à exercer un couple généralisé supplémentaire Γ_e représentatif de l'organisation de l'environnement qui modifiera le modèle dynamique en y substituant Γ par $\Gamma + \Gamma_e$. Comme la réponse des proximètres est souvent du type d/d^2 (ce qui correspond à un potentiel newtonien), la connaissance analytique du potentiel (donc une modélisation de l'environnement) n'est pas nécessaire.

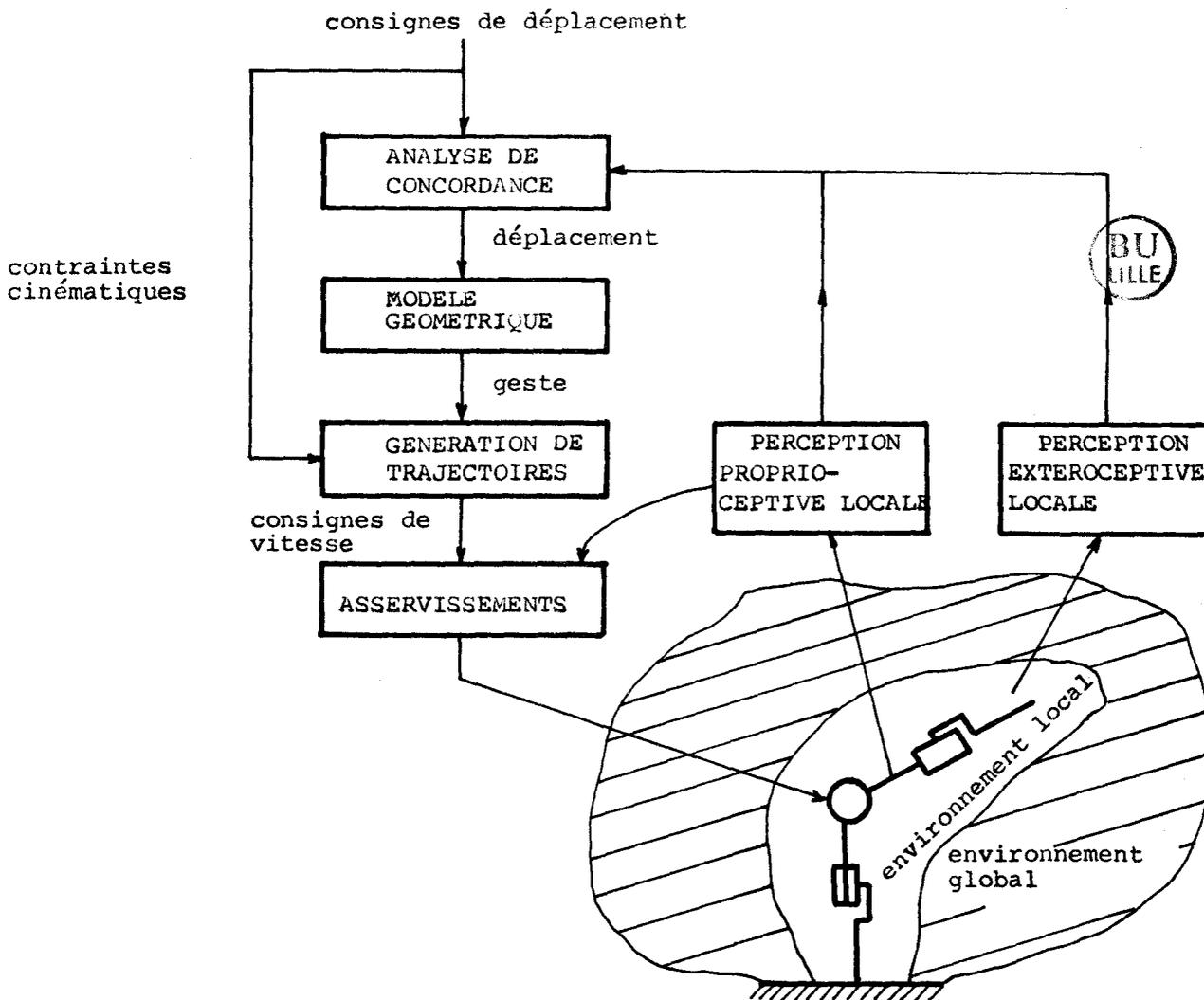
.../...

.../...

Il est clair que, vu la complexité des calculs engendrés par un tel modèle, une commande dynamique en temps réel n'est actuellement pas une chose réaliste. En d'autres termes, il faut en revenir à une commande géométrique ou cinématique.

De plus, il est à noter avant toute chose que la perception de l'environnement local du vecteur ne se limitera pas à un simple rôle de détection d'obstacles uniquement dans le cas où le vecteur est redondant en disposant de plus de trois degrés de liberté pour le positionnement de l'effecteur.

Afin de bien visualiser cette interaction commande du vecteur/état de l'environnement local, indiquons sur la figure ci-dessous les différents niveaux de cette symbiose :



.../...

.../...

Toute consigne de déplacement, issue de l'un quelconque des générateurs de consignes du système (module de commande manuelle, unité de commande de l'effecteur, ...) et transmise par l'intermédiaire du coordonnateur système, arrive au niveau opératoire du vecteur pour subir dans un premier temps une ANALYSE DE CONCORDANCE qui consiste à ajuster cette consigne en fonction des exigences de l'environnement.

C'est à ce niveau que se situe en fait l'interaction environnement local/commande du vecteur.

Dans le cas d'un vecteur non redondant, l'existence d'une discordance entraîne l'interruption du mouvement signalée au coordonnateur système par un message adapté.

Dans le cas d'un vecteur redondant, ce module logiciel d'analyse de concordance déduira, à partir de l'information de perception locale, la localisation dans \mathbb{R}^3 des obstacles détectés. Il transmettra ensuite au modèle géométrique, d'une part les consignes de déplacement, et d'autre part les contraintes destinées à lever l'indétermination liée à la redondance du vecteur, si toutefois la localisation des obstacles est telle que leur contournement soit possible.

Les consignes de déplacement cohérentes sont transformées au niveau du MODELE GEOMETRIQUE en consignes gestuelles, qui associées aux contraintes cinématiques issues du coordonnateur système (en même temps que les consignes de déplacement initiales) sont différenciées par le GENERATEUR DE TRAJECTOIRES en consignes de vitesse de préférence (voir paragraphe I - 3) envoyées sur les ASSERVISSEMENTS.

La complexité de l'analyse de concordance sera liée au degré de redondance du vecteur ainsi qu'à sa structure. Il est de ce fait difficile de présenter une méthodologie générale ; les conséquences d'apparition d'obstacles pourront consister depuis une immobilisation de l'un ou l'autre degré de liberté jusqu'à la génération de trajectoires partielles de contournement.

.../...

.../...

La mise en oeuvre d'une telle procédure est tout à fait réaliste d'autant plus qu'il est absolument possible de prédéterminer un type de correction à chaque apparition d'obstacle (le nombre de capteurs implantés sur le vecteur étant limité).

II - 5 - 2 - Prise en compte de l'environnement au niveau de l'effecteur

La prise en compte des informations proximétriques au niveau de la commande de l'organe terminal peut s'effectuer de deux façons différentes :

- a - en suivant une stratégie, c'est-à-dire en planifiant des trajectoires ou des classes d'enchaînements de mouvements élémentaires, selon des procédures figées ou adaptables. Cette approche peut, par exemple, si elle est associée à une technique d'extraction de paramètres de formes, permettre la recherche et la caractérisation de zones préhensibles ; elle peut aussi être utilisée pour la saisie de pièces de forme connue et bien localisées dans l'espace de travail,
- b - en constituant une boucle de commande locale basée sur un retour permanent des informations issues des capteurs. Dans ce cas, les signaux sont utilisés avec une quantification finie de l'échelle de leur dynamique, contrairement au seuillage tout ou rien classique.

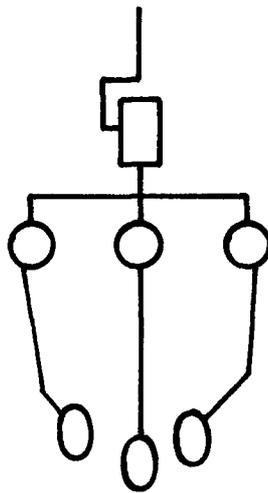
On remarquera que la deuxième approche n'est qu'une généralisation de la première où l'enchaînement des mouvements élémentaires est établi en temps réel à partir d'un critère général d'évolution assurant d'une part une continuité dans la perception de l'environnement local et cherchant surtout une évolution de la perception vers la zone intérieure de la pince.

Pour le premier cas de commande, à chaque activité spécifique ou opération de l'effecteur correspondra une stratégie propre constituée

.../...

d'un ensemble de fonctions ou de déplacements élémentaires activés séquentiellement et dont l'exécution sera conditionnée par les réponses généralement binaires des capteurs d'environnement associés. De plus, si l'on considère l'organe terminal comme un ensemble de sous-processus parallèles, il y a lieu, soit de définir des éléments de stratégie absolument compatibles, c'est-à-dire n'entraînant pas de conflit au niveau fonctionnel, soit de tolérer une activation simultanée de fonctions éventuellement incompatibles discrémentées le cas échéant par un module logiciel de coordination des activités de l'ensemble des sous-processus.

Par exemple, soit une pince à trois doigts dotée d'un mouvement de rotation pour l'écartement de chacun des doigts et d'une translation verticale de l'ensemble de la pince comme le montre la figure ci-dessous :



Considérons cet organe comme un ensemble de trois sous-processus parallèles correspondant aux trois doigts. Vu la structure mécanique de cet outil, il est clair que le nombre de mouvements élémentaires n'entraînant pas de conflit fonctionnel est restreint et se limite à l'ouverture et la fermeture des doigts. Par conséquent, pour utiliser un jeu de mouvements élémentaires permettant de générer un ensemble satisfaisant de trajectoires (mouvements élémentaires correspondant aux huit directions cardinales), il sera indispensable d'implanter un module de coordination des activités des trois sous-processus pour lever les conflits générés par les limitations

.../...

.../...

structurelles de l'organe.

Quant au deuxième cas de commande, il peut être formulé de la façon suivante :

A chaque capteur ou sous-ensemble de capteurs, l'on associe, dans le repère de la pince :

- un emplacement d'observation e_i ,
- une direction d'observation d_i ;
- un signal s_i (pouvant être le résultat d'une composition entre les signaux élémentaires),
- un emplacement d'action x_i ,
- une direction d'action y_i .

Entre deux instants successifs kt et $(k + 1)t$, l'action élémentaire souhaitée au terme de l'algorithme de commande, consiste à déplacer le point x_i vers le point $x_i + w_i \cdot y_i$, avec $w_i = f(s_i)$. La commande incrémentale à appliquer est alors un ensemble de translation/rotation des segments constituant l'effecteur entre kt et $(k + 1)t$ qui permettra de satisfaire l'intégralité des contraintes induites par les actions élémentaires souhaitées. Et le critère d'évolution des activités de l'algorithme de commande sera tel que le choix des ensembles $(e_i, d_i, x_i, y_i, w_i)$ assurera une continuité entre la perception de l'environnement local et l'activité spécifique de l'effecteur (préhension, ...).

En d'autres termes, l'on associe à chaque capteur deux paramètres d'observation e_i et d_i caractérisant ses conditions d'exploitation liées à son implantation physique. Dans le cas d'une préhension, la spécification des paramètres d'action x_i et y_i ainsi que le signal du capteur assure la caractérisation des deux fonctions élémentaires liées aux zones d'activité de l'effecteur telles qu'elles ont été définies au chapitre précédent (paragraphe I - 4 - 2) : répulsion ou attraction. Et la corrélation entre les paramètres d'observation et d'action définira précisément l'enchaînement de ces deux fonctions de manière à amener finalement la pince en

.../...

.../...

position de saisie sans discontinuité dans la perception de l'environnement local.

II - 6 - CONCLUSIONS

Le premier chapitre de notre travail s'est proposé de présenter les problèmes spécifiques à la commande du vecteur et de l'effecteur en retenant pour chacun d'eux une structure de commande en accord avec le principe de coopération défini au chapitre d'introduction. L'évolution de la commande verticale et figée classique vers une coopération horizontale entre deux entités complémentaires, le vecteur et l'effecteur, a été rendue possible par une nouvelle affectation et exploitation des ressources de perception locale de l'ensemble du robot manipulateur.

La mise en évidence des principes d'interaction environnement/commande dans ce nouveau contexte a nécessité un tour d'horizon des possibilités technologiques actuelles de constitution d'un sensorium d'appréhension de l'environnement local, ainsi que des techniques adaptées d'analyse de cette information.

L'examen de ces trois aspects : organes de perception, analyse de l'information et principes d'interaction, bien que connus jusqu'alors mais exploités dans une structure de commande verticale, a permis de cerner la question de la prise en compte de l'environnement d'un robot manipulateur dans un schéma de coopération tel qu'il est défini dans ce mémoire. Ici réside la spécificité de ce chapitre.

Nous avons vu que, dans un tel schéma, la différenciation des activités du robot manipulateur se traduisait par la définition de trois entités opérationnelles concrétisant les consignes de déplacement, pointage et d'opération en activités physiques correspondantes.

A l'autre extrémité de la structure de commande, on trouve un ensemble d'entités logicielles, en interaction éventuelle avec l'opérateur humain, générant ces vecteurs de consignes. On y trouve notamment, mis à part les modules de commande manuelle, mixte ou centralisée, l'entité de commande du vecteur intégrant les différentes stratégies de commande auto-

.../...

matique pour les phases à opération non spécifique, ainsi que l'entité de commande de l'effecteur dans son aspect stratégies de préhension et génération de consignes de déplacement et de pointage pour les phases de conduite automatique à opération spécifique.

Et entre les deux niveaux se situe le coordinateur système chargé d'initialiser le système, de mettre en relation les émetteurs de consignes avec leurs destinataires, et de gérer les ressources communes du système.

L'on aboutit ainsi au schéma général de commande tel qu'il est donné en page suivante. Il nous permet de bien localiser les différents niveaux d'interaction environnement/commande.

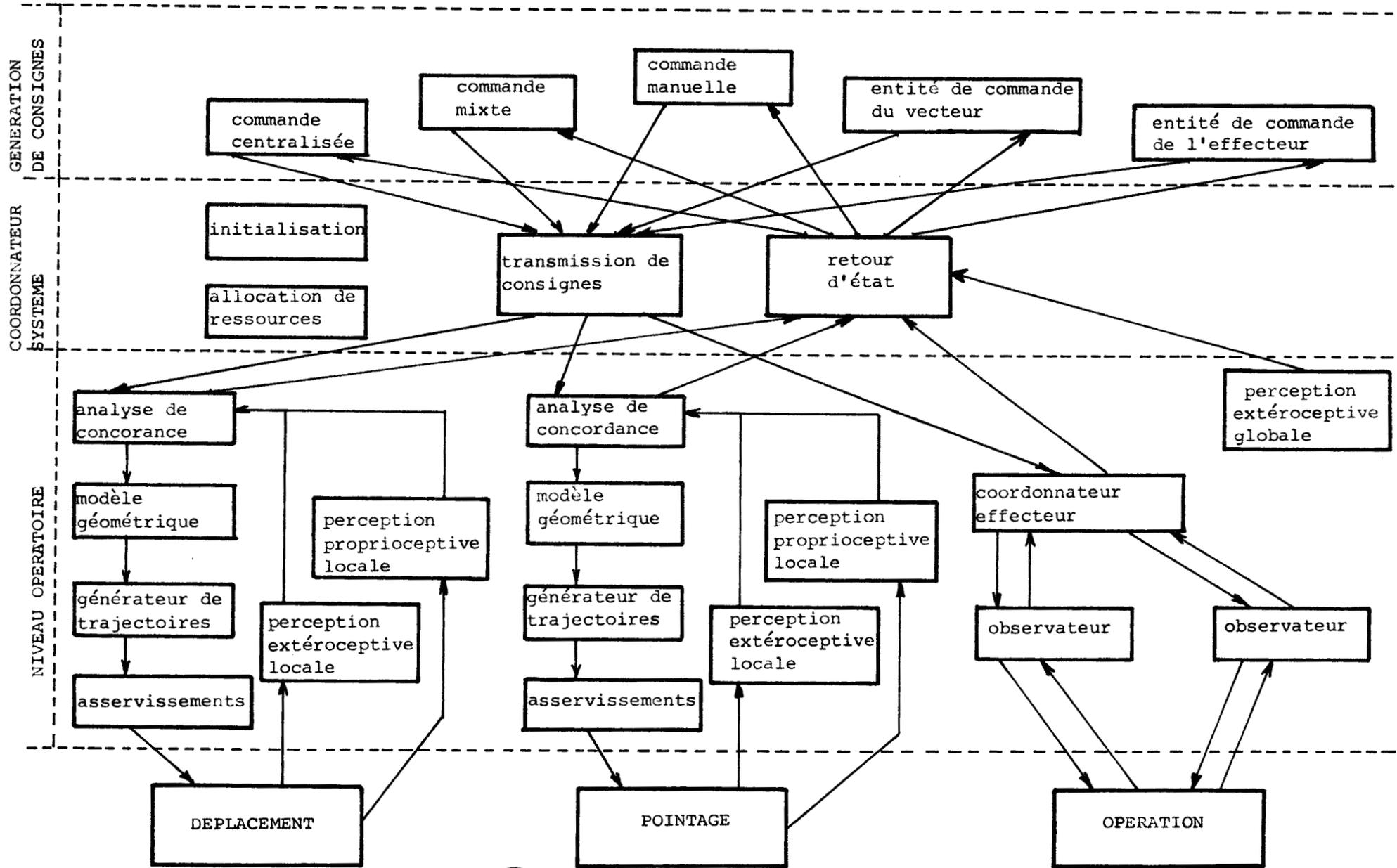
Au niveau opératoire, on trouve une certaine différence dans la prise en compte de l'environnement local du vecteur et de l'effecteur, liée à la différence de nature des activités de chacun. Alors que l'exécution d'un déplacement ou d'un pointage passe nécessairement par une unique succession d'opérations logicielles, l'opération d'un effecteur à usage multiple, ne pouvant être décomposée d'une unique façon, entraîne une structure de commande différente.

De ce fait, pour l'effecteur, chaque observateur a la charge d'une boucle de commande locale basée sur un retour permanent de l'information proprioceptive et extéroceptive locale ; l'exécution simultanée d'un ensemble de ces commandes locales correspond à la concrétisation d'une étape de la stratégie de préhension, alors que pour le vecteur, les asservissements utilisent exclusivement l'information proprioceptive locale. De plus, au sommet du niveau opératoire du vecteur se trouve un module dénommé analyse de concordance, chargé d'adapter les consignes en fonction de l'état de l'environnement local, qui exploite l'ensemble des ressources de perception locale.

De plus, comme l'indique ce schéma général, la totalité de l'information doit aussi être disponible, sous forme intégrée au niveau des modules de génération de consignes.

Pour le module de commande de l'effecteur, il s'agit avant tout d'un retour extéroceptif de l'environnement du vecteur ; en effet, lorsque les activités du vecteur sont dirigées depuis l'entité de commande de l'

.../...



.../...

effecteur, il importe à ce dernier de connaître la localisation des obstacles dans le champ d'action du vecteur de manière à pouvoir générer des incréments de consignes cohérentes.

Le module de commande du vecteur aura besoin d'une part d'une information d'état de l'environnement global destiné au choix ou à l'adaptation en temps réel des stratégies de commande, et d'autre part un compte rendu, le cas échéant, de l'évolution des activités non spécifiques de l'effecteur.

Dans le cas d'une commande manuelle, on cherchera à soigner particulièrement la représentation synthétique des informations proprioceptives et extéroceptives, locales et globales. De la qualité de cette représentation dépendra le niveau de la relation homme-machine. La représentation graphique symbolique et le retour d'effort y contribueront grandement.

La commande mixte est la seule commande représentée qui ne génère pas de consignes de déplacement, pointage ou d'opération mais détermine à partir de l'évolution des performances du robot manipulateur et de l'opérateur humain le mode de commande, manuel ou automatique le mieux adapté aux circonstances. De ce fait, le retour d'information est avant tout utilisé pour cette évaluation des performances du robot manipulateur.

Enfin, dans le cadre d'une commande centralisée, le retour de perception et d'état du système renseigne l'unité centrale de commande pour l'élaboration des stratégies et la nature des interactions entre les différents postes de robots manipulateurs.

.../...

BIBLIOGRAPHIE - CHAPITRE 2

- AND 83 : G. ANDRE : "Utilisation de proximitres infra-rouge en télé-
opération".
Thèse de Docteur-Ingénieur, RENNES 1983.
- BRI 77 : BRIOT M. : "La Stéréognosie en robotique"
Thèse d'Etat, TOULOUSE Université P. Sabatier 1977,
- COI 81 : Ph. COIFFET : "Les Robots tome 2 - Interaction avec l'en-
vironnement"
Hermes Publishing, PARIS 1981,
- COI 82 : Ph. COIFFET - M. CHIROUZE : "Eléments de robotique",
Hermes Publishing - PARIS 1982.
- ESP 82 : B. ESPIAU : "Prise en compte de l'environnement local dans la
commande d'un robot manipulateur",
Thèse d'Etat, Université RENNES I - Juin 1982.
- KHA 80 : O. KHATIB : "Commande dynamique dans l'espace opérationnel de
robots manipulateurs en présence d'obstacles".
Thèse de Docteur-Ingénieur, TOULOUSE 1980.
- PER 79 : PERUCHON E. : "Contribution à la réalisation de fonctions
tactiles artificielles à partir de l'analyse du système humain".
Thèse de Troisième Cycle, MONTPELLIER 1979,
- REN 80 : M. RENAUD : "Contribution à la modélisation et à la commande
dynamique des robots manipulateurs".
Thèse d'Etat, TOULOUSE 1980.
- RUG 78 : G. RUGET - B. ESPIAU : "Etude et mise en oeuvre de détecteurs
de proximité à fibres optiques".
Rapport final IRIA 76-77-131, Octobre 1978.

LES DISPOSITIFS DE PERCEPTION PROPRIOCEPTIVE

D'UN ROBOT MANIPULATEUR

A1 - 1 - CAPTEURS DE POSITION

- Capteur potentiométrique

Linéaires ou rotatifs, à piste bobinée, à piste plastique ou hybride (piste bobinée classique recouverte de plastique conducteur), ils existent dans des gammes de courses de 25 mm à 1 000 mm pour les linéaires, de 1 à 10 tours pour les rotatifs. Bien souvent lorsque le déplacement linéaire est important, plutôt que d'utiliser un potentiomètre linéaire lourd et encombrant, on transformera le mouvement de translation en un mouvement de rotation par un système pignon crémaillère et potentiomètre rotatif.

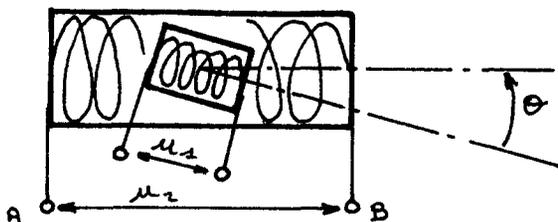
- Transformateur variable

Le capteur se compose de deux bobines fixes dans lesquelles se déplace un noyau magnétique solidaire d'une tige mécaniquement reliée à la translation à mesurer. Le déplacement du noyau provoque une variation de couplage entre les bobines. Si le primaire est alimenté par une tension alternative, on recueille au secondaire une tension de même fréquence mais dont l'amplitude est modulée par la position du noyau. L'exploitation de ces capteurs nécessite une démodulation par une électronique qui est parfois intégrée au capteur. On trouve dans cette catégorie de dispositifs des longueurs de courses comprises entre quelques dixièmes et quelques dizaines de millimètres.

Parallèlement à ce que nous venons de voir pour la mesure de déplacement linéaire, nous retrouvons une technique mettant en oeuvre un transformateur variable pour la mesure angulaire.

.../...

Considérons la figure ci-dessous représentant deux bobines, l'une fixe, l'autre mobile autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure :



Si la bobine intérieure est alimentée en alternatif par une tension $u_1 = U \sin \omega t$, on recueille entre A et B une tension induite $u_2 = k U \cos \theta \sin \omega t$ où θ est l'angle que font entre eux les axes des deux bobines. Cette propriété est la base de fonctionnement de deux capteurs de position angulaire très utilisés, à savoir : le synchro et le résolveur.

. le synchro :

le synchro est constitué d'un stator composé de trois bobines disposées à 120 degrés,

. le résolveur :

le résolveur fonctionne sur un principe analogue à celui du synchro. Ici toutefois, le stator est composé de deux bobines fixes disposées à 90° l'une de l'autre ainsi que le rotor.

- les codeurs optiques incrémentaux

Une cellule photoélectrique ou un phototransistor détecte les variations d'éclairement provoquées par le défilement devant une source lumineuse de traits noirs régulièrement espacés dessinés sur un disque. Cette alternance de phases sombres et éclairées se traduit par un train d'impulsions. En général, les codeurs incrémentaux possèdent deux sorties

.../...

.../...

principales, chacune générant un certain nombre d'impulsions par tour, jusqu'à 2×10^6 , nombre qui détermine la résolution du capteur. Les deux signaux sont déphasés de $1/4$ de pas en décalant par exemple les deux pistes de sorte que l'examen de la différence de phase entre les deux signaux permette de déterminer le sens de rotation de l'arbre moteur. De plus, une troisième sortie appelée "marker" produit une seule impulsion par tour.

Les codeurs incrémentaux sont le plus souvent utilisés dans les asservissements de position où le zéro peut être flottant, ce qui n'est pas vraiment le cas en robotique.

- les codeurs optiques absolus

Le codeur absolu se présente sous la forme d'un disque sur lequel sont disposées des couronnes noires et blanches de sorte que, sur un rayon quelconque, la succession des zones noires et blanches constitue la représentation binaire de l'angle que fait l'arbre moteur avec une origine connue. Le dessin des pistes est choisi de façon à produire un code GRAY dans lequel le passage d'un nombre à son suivant se traduit par le changement d'un seul bit dans la combinaison qui le représente. Le dispositif de lecture optique est constitué d'une barette de photorécepteurs placés sur un rayon du disque. De plus, le constructeur intègre dans le codeur toute l'électronique de conversion de ce code en un code binaire pur directement utilisable par un ordinateur.

A1 - 2 - CAPTEURS DE VITESSE

Une vitesse étant la dérivée d'une position, on pourrait utiliser les signaux des capteurs mesurant la position qu'il suffirait de dériver numériquement ou analogiquement. Mais ce faisant, l'on dérive aussi les parasites et cette méthode ne donne pas toujours satisfaction, notamment près des bornes extrêmes de variation de vitesse :

- aux basses vitesses, risques d'instabilités,

.../...

.../...

- aux vitesses élevées, précision médiocre.

On préfère utiliser la génératrice tachymétrique pour la mesure de vitesse.

A1 - 3 - CAPTEURS D'EFFORT

- les jauges extensométriques

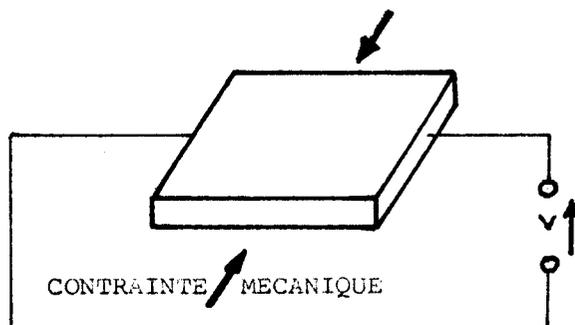
Constituées d'un conducteur très fin en forme de serpentín, collé sur un support flexible, toute déformation de la structure sur laquelle elles sont fixées provoquera une variation de la résistance selon la loi

$$\frac{\Delta R}{R} = C \frac{\Delta l}{l}$$

avec l'hypothèse qu'il n'y a pas de variation de la résistivité (la constante C dépend du métal). On notera que les signaux délivrés sont très faibles ce qui nécessitera un soin particulier de leur mise en forme.

- les capteurs piézoélectriques

La piézoélectricité est une propriété que possèdent certains cristaux qui, soumis à un champ de contraintes mécaniques, accumulent des charges électriques sur deux faces opposées, proportionnellement à l'effort, comme l'indique la figure ci-dessous (ZEL 69) :



.../...

.../...

A1 - 4 - CAPTEURS D'ACCELERATION

Les capteurs d'accélération trouvent leurs applications dans la commande dynamique des robots. La mesure peut se faire de différentes façons :

- on peut la déduire par dérivation de la vitesse ; ce procédé est rarement satisfaisant à cause de la diminution du rapport signal/bruit,
- on peut mesurer la force communiquée par l'accélération d'une masse parfaitement connue ; on se ramène à la mesure d'efforts à l'aide de jauges de contraintes. Si une force F s'applique sur une surface S d'un matériau dont le module de YOUNG est E , on a alors :

$$\frac{F}{SE} = \frac{\Delta l}{l} = \text{loi de HOOKE}$$

$$\text{Par conséquent, } \frac{\Delta R}{R} = C \frac{\Delta l}{l} = C \frac{F}{SE}$$

- on peut aussi communiquer volontairement à une masse connue une force, donc une accélération, égale à celle que l'on désire mesurer de sorte que la masse reste en équilibre. Cette force peut être d'origine électromagnétique ou électrodynamique et l'on se ramène de cette façon à une mesure d'un courant. Sur ce principe fonctionnent les capteurs dits à rappel asservi. On trouve sur le marché des accéléromètres aux performances diverses auprès de constructeurs tels que CROUZET, SAGEM, ... On sait mesurer des accélérations de quelques dixièmes de "g" (accélération de la pesanteur) à quelques milliers de g.

LES DISPOSITIFS DE PERCEPTION EXTEROCEPTIVE

D'UN ROBOT MANIPULATEUR

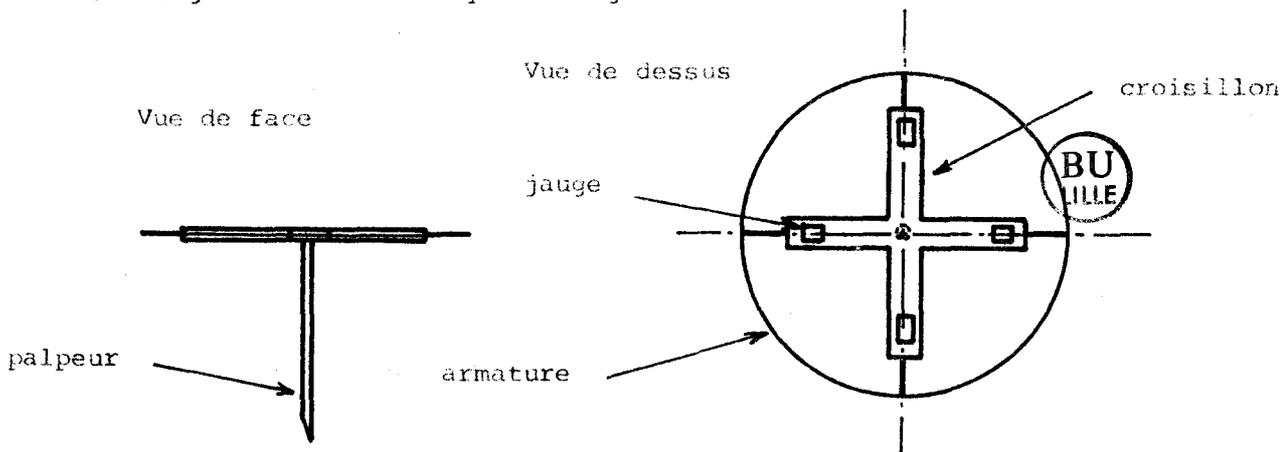
A2 - 1 - LES CAPTEURS TACTILES

a) Capteur simple touche tout ou rien

Ce capteur est du type fin de course miniature à fermeture mécanique par l'intermédiaire d'un levier ou d'un pointeau. D'une mise en oeuvre simple, il offre une information très pauvre ; on l'utilise généralement comme élément de sécurité (information de butée)

b) Capteur simple touche analogique

Ce type de capteur est destiné à l'exploration tactile d'une pièce en vue de la localisation de points remarquables ou de la suivie d'un contour (sondage, positionnement d'outils, ...). A titre d'exemple, citons la réalisation de PERUCHON (PER 79). Son capteur tactile se compose d'une tige longue et fine solidaire d'un croisillon monté sur une armature rigide comme l'indique la figure ci-dessous :



Sur chacune des branches de la croix sont collées des jauges de telle sorte que, lorsque le capteur vient en contact d'un objet, l'on

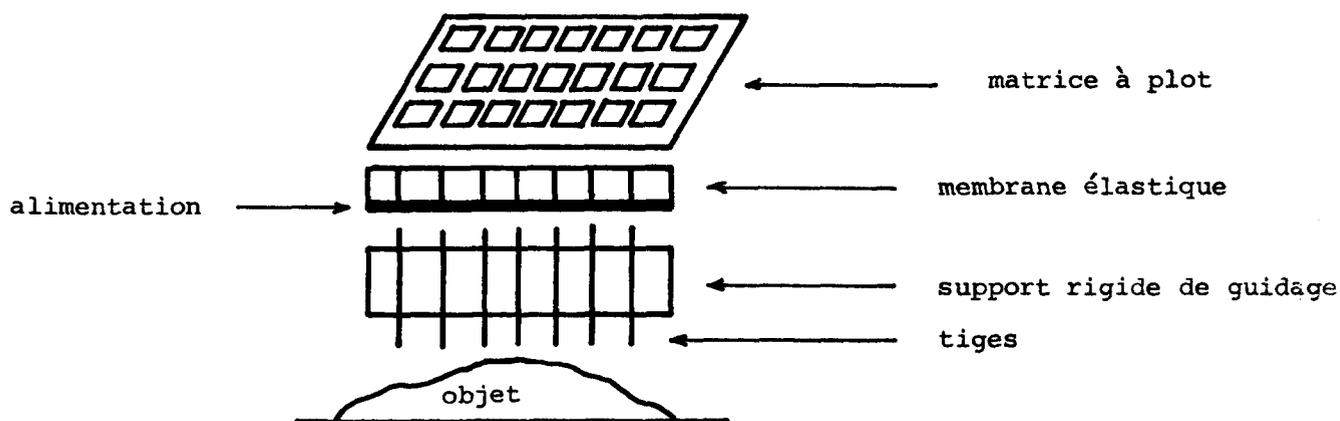
.../...

puisse mesurer les composantes de l'effort de contact

c) Capteurs matriciels à aiguilles

Ces capteurs sont constitués par la juxtaposition mécanique de capteurs élémentaires simple touche tout ou rien ou analogique.

Un premier exemple, que l'on doit à GOLDGEWICHT (GOLD 74) concernant un capteur matriciel tout ou rien, est basé sur le principe suivant, illustré par la figure ci-dessous :



Ce capteur est constitué de plots métalliques fixés sur un support isolant. Les tiges en position de repos sont en contact avec la partie inférieure métallisée de la membrane inférieure faisant usage d'électrode d'alimentation. En position active, une tige est déplacée verticalement vers le haut pour venir en contact avec son plot correspondant ; on obtient ainsi une empreinte numérisée.

Le deuxième exemple que nous donnons est un capteur matriciel analogique développé par PAU (PAU 76). Il est constitué d'une monture rigide et épaisse percée de trous disposés en forme de matrice carrée dans lesquels coulissent des aiguilles. Chaque aiguille est en fait un capteur de déplacement fonctionnant sur le principe du transformateur différentiel (voir II - 2 - 1). Suivant la forme de l'objet en contact avec la matrice, chacune des aiguilles pénètre plus ou moins à l'intérieur du corps du capteur, ce

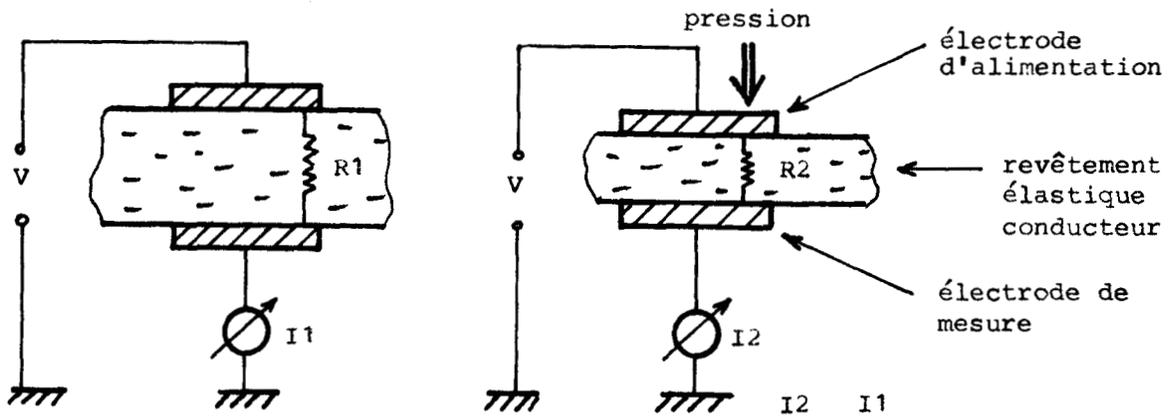
.../...

.../...

qui permet, à l'aide de méthodes de reconnaissance de formes, une reconstitution du relief de l'objet.

d) Capteur du type "peau artificielle"

Le modèle humain, d'une surface souple, enrobante et truffée de capteurs, a tenté bien des techniciens qui se sont évertués à créer des ersatz encore très imparfaits car on ne semble pas encore avoir trouvé ce support idéal déformable et sans hystérésis qui pourrait aussi bien être posé sur l'environnement que sur les doigts d'un robot. C'est CLOT en FRANCE (CLO 75) qui a réalisé le premier ce type de capteurs, ou peau artificielle, basé sur le principe suivant : considérons un revêtement élastique conducteur placé entre deux électrodes, comme le montre la figure ci-dessous :



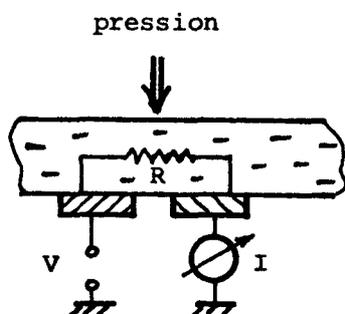
En l'absence de pression sur le revêtement, l'application d'une tension V entre les électrodes fait circuler un courant I_1 à travers le revêtement conducteur ; en appliquant une pression sur le revêtement, sa résistance transversale varie et le courant y circulant prend une valeur I_2 supérieure à I_1 : la variation $\Delta I = I_2 - I_1$ représente une image de la pression exercée.

La présence d'une métallisation sur la partie supérieure du revêtement peut parfois être un inconvénient, en particulier lorsqu'il y a

.../...

.../...

risque d'usure. Aussi est-il préférable d'utiliser le mode d'excitation représenté ci-dessous :



Les revêtements plastiques sont des élastomères conducteurs composés de :

- caoutchouc naturel ou synthétique en raison de leurs propriétés mécaniques (élasticité, fluage, tenue au déchirement,...)
- particules conductrices telles que graphite, charbon actif, poudres métalliques (fer, nickel, argent, cuivre, zinc).

La diminution de la résistivité du revêtement sous l'action de la pression est due à la mise en contact, au sein du matériau, d'un nombre plus grand de particules conductrices favorisant ainsi le passage du courant électrique.

Ce capteur peut être utilisé de trois manières différentes :

- il peut constituer un outil amovible que le robot saisit à la demande et avec lequel il explore son environnement,
- il peut faire partie intégrante d'un organe de préhension. Le robot est alors doté d'un sens tactile,
- il peut être situé dans l'environnement (table revêtue d'une peau artificielle).

.../...

.../...

A2 - 2 - LES CAPTEURS DE PROXIMITE

Rappelons qu'on peut distinguer essentiellement deux catégories de capteurs de proximités :

- les capteurs passifs ou ne fonctionnant qu'en réception : ceci suppose que l'objet soit directement ou indirectement actif,
- les capteurs actifs comportant émetteurs et récepteurs distincts ou confondus. Etant maître de l'émission, il est possible de s'affranchir plus facilement du milieu ambiant ; en revanche les informations de haut niveau peuvent être parfois plus difficiles à extraire.

Nous passerons sous silence ici les capteurs passifs dans la mesure où ils peuvent être considérés comme une sous-classe de capteurs actifs et examinons les diverses technologies des capteurs actifs classées par fréquence d'émission :

a) ultra-sons

Cette classe de capteurs est intéressante d'un point de vue rapport qualité/prix (GAL 80). Des problèmes subsistent cependant concernant l'analyse à faible distance (quelques centimètres) et l'encombrement. Qui plus est, les systèmes d'émission/réception peuvent présenter une certaine fragilité mécanique. En revanche, les mesures de distance ou de vitesse fournies par ces capteurs sont relativement correctes, compte tenu bien sûr de la largeur des champs d'émission/réception et malgré une certaine sensibilité à l'orientation de la cible. La distance est généralement évaluée par la mesure du temps séparant l'émission de la réception après réflexion sur la cible, et la vitesse par effet DOPPLER. Réalisations : (POL 80), (MON 81), (PAV 80).

b) Hyperfréquences

Malgré l'existence de plusieurs systèmes industriels de détection (barrières, détecteurs d'obstacles), ces techniques n'ont pas encore à notre

.../...

.../...

connaissance été utilisées en robotique. Elles pourraient cependant s'avérer utiles par exemple en phase d'approche à faible distance (quelques mètres) en robotique spatiale (ESP 81).

c) Infrarouges

Le principal problème lié à de tels capteurs est leur sensibilité à la nature de l'objet visé en particulier à sa capacité d'absorption. D'où la nécessité de disposer d'une bonne puissance d'émission dans le champ souhaité de façon à détecter même les objets peu réfléchissants. Les caractéristiques des émetteurs optoélectroniques généralement utilisés pour ces capteurs sont :

- l'émetteur est une diode électro luminescente à AsGa émettant à 0,95 μm ,
- la puissance optique est proportionnelle au courant traversant la diode,
- le vecteur intensité correspond à la puissance émise par unité d'angle solide,
- l'éclairement et la puissance reçues à une distance d de l'émetteur par unité de surface normale,
- l'angle optique est fixé par la lentille du boîtier de la diode (de quelques degrés à 60 degrés),
- une émission pulsée permet de s'affranchir des parasites d'un éclairage ambiant,

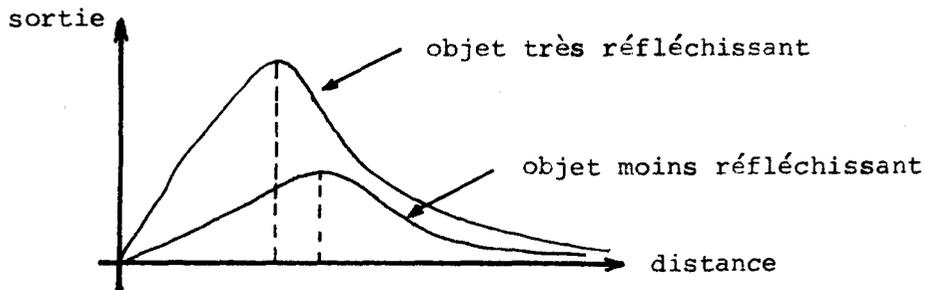
Pour les récepteurs, on peut noter les caractéristiques suivantes :

- il s'agit généralement d'une photo-diode ou d'un photo-transistor caractérisé par sa sensibilité (mA/mW cm^{-2}), son cône de

.../...

directivité, son spectre,

- le signal de sortie est généralement obtenu par démodulation synchrone ; les parasites optiques sont ainsi transformés en signaux à valeur moyenne nulle ce qui limite néanmoins la bande passante du système et la puissance lumineuse moyenne,
- les signaux de sortie ont généralement l'allure présentée par la figure ci-dessous, où l'on constate l'existence d'un maximum dont la valeur dépend de l'objet visé. L'affaiblissement de la zone d'approche est dû à la sortie du champ de vision (émetteur et récepteur n'étant pas confondus, il existe une zone d'ombre liée aux volumes d'émission et de réception)



Citons quelques réalisations :

- capteur à fibres optiques : les fibres optiques ont comme fonction à la fois de déporter l'électronique de traitement et d'assurer une focalisation à l'émission et à la réception. Simples, peu encombrants et peu coûteux, ces capteurs présentent cependant l'inconvénient d'être de faible portée moyenne (5 à 15 cm suivant les conditions de réflexion) et trop sensibles à la nature des objets. En outre, on peut noter les problèmes des fibres optiques : rayon de courbure pas très faible, pertes d'énergie aux connecteurs importants. Voir (DOR 78).
- Capteur sans fibre optique : ces capteurs sont dans leur principe proches des précédents, utilisant le même type de composants

.../...

.../...

sans pour autant faire appel aux fibres optiques, ce qui nécessite l'implantation sur le capteur lui-même de la partie amplification. De plus, on combine le nombre et l'implantation des émetteurs et récepteurs de manière à augmenter la portée ou à réduire l'influence des conditions de réflexion. Citons (QUE 79), (MAS 81),

- les recherches en proximités infrarouges : le spécialiste français en la matière est ESPIAU de l'I.M.I.A. de RENNES qui a présenté l'ensemble de ses travaux dans (ESP 82). Quant aux ETATS-UNIS, des travaux analogues sont menés par BEJCZY au JET PROPULSION LABORATORY (BEJ 80).

d) capteurs inductifs

Ces capteurs, également nommés "à courant de FOUCAULT", détectent sans contact toute pièce métallique non nécessairement ferro-magnétique. Une bobine, logée dans une ferrite magnétique ouverte, en constitue l'élément sensible. Le champ de détection est créé par un oscillateur HF. Lorsqu'une pièce métallique entre dans ce champ, des courants de FOUCAULT prennent naissance. Si la distance diminue, les pertes magnétiques augmentent et la résistance équivalente diminue. Ces capteurs sont généralement fournis sous forme compacte normalisée, assurant une bonne robustesse industrielle. Les distances de détection vont de quelques dixièmes de millimètres à 35 mm.

Avantages de ce système :

- résolution excellente,
- temps de réponse faible,
- bonne fiabilité (avec une durée de vie élevée).

Inconvénients quant à l'utilisation de ces capteurs en robotique :

- la nature de la cible n'est pas quelconque,
- la mesure de distance est généralement difficile,
- le rapport portée/ encombrement est faible.

.../...

.../...

e) capteurs capacitifs

Le principe de ces détecteurs consiste en la création d'un condensateur dont l'une des électrodes est la face sensible du capteur. L'autre électrode est constituée par la pièce à détecter si elle est conductrice, ou par la masse environnante si elle est isolante. L'étendue de mesure est voisine de celle des capteurs inductifs. Il est à noter que l'air constituant le diélectrique du condensateur, une variation du taux d'humidité, provoque une déformation des caractéristiques.

Mis à part la particularité liée à la technologie, les avantages et inconvénients de ces capteurs sont identiques à ceux des capteurs inductifs.

f) capteurs à jet d'air

Ce sont généralement des capteurs à voile annulaire rotatifs. L'air d'alimentation est injecté à travers une mince fente annulaire avec une divergence obtenue par un mouvement tourbillonnaire. Pour cela l'air est amené tangentiellement dans une chambre alimentant la fente annulaire.

Par suite de mélange turbulent, l'air ambiant présent à l'intérieur du voile est entraîné et toute cette zone est en dépression. Lorsqu'un objet s'approche du capteur, le voile est refoulé et la pression remonte, d'où le signal de distance capté par l'intermédiaire d'un orifice au centre du voile et relié à un transducteur de pression.

Toutefois, la remontée de pression n'est pas uniforme dans le voile si l'objet se présente obliquement. Il est alors intéressant de disposer de plusieurs orifices de mesure de la pression. Ainsi, une pression différentielle mesurée en deux points diamétralement opposés renseigne sur l'orientation de la face en regard. En prenant l'information selon deux diamètres orthogonaux, on peut en principe déterminer la direction de la normale à la surface.

Cependant, les contraintes d'intégration de capteurs de proximité

.../...

.../...

dans un organe terminal manipulant des objets décimétriques sont telles que la fiabilité dans la réalisation de ce type de capteurs pneumatiques à cinq orifices de mesure est loin d'être satisfaisante. C'est pour cela que l'on s'oriente plutôt vers un capteur doté d'un unique orifice de mesure placé au centre du voile (PAV 80).

g) capteurs d'images

Nous nous bornerons à décrire ici les capteurs de vision de type CCD (Charge Coupled Devices ou, en français, DTC : Dispositif à Transfert de Charge), bien que les caméras TV traditionnelles soient toujours largement répandues et utilisées essentiellement à poste fixe. On se reportera à la littérature spécialisée pour le détail du fonctionnement (COI 81).

Une caméra DTC se présente sous forme de barette ou de matrice d'éléments photosensibles qui peuvent être des photo-diodes ou des photo-transistors. Les photons incidents créent des charges électriques par l'intermédiaire de l'élément photosensible. Ces charges sont transférées dans un registre de lecture qui décale vers la sortie les signaux utiles. Ces charges transférées dans le registre sont lues par un amplificateur de charges qui mesure les variations de tension aux bornes d'une capacité. Entre deux lectures, la capacité est rechargée à une tension de référence. La focalisation de l'image observée se fait par l'intermédiaire d'une optique appropriée.

BIBLIOGRAPHIE ANNEXES 1 ET 2

- BEJ 80 : BEJCZY A.R. : "Smart sensors for smart hands".
R.A. Breckenbridge Editor, vd 67, Progress in Astronautics and
Aéronotics, 1980.
- COI 81 : COIFFET Ph. : "Les Robots tome 2".
Hermes Publishing, PARIS 1981.
- DOR 78 : DORE A, ESPIAU B : "Etude et réalisation d'un palpeur tridi-
mensionnel de proximité et de position".
Rapport de fin de contrat DGRST 77-7-0092 et 77-7-0093, Nov. 1978.
- ESP 81 : ESPIAU B. : "Préétude pour la commande d'un robot manipulateur
spécial équipé de capteurs de proximité"
Rapport final, convention CNES 80/800, Mai 1981.
- ESP 82 : ESPIAU B. : "Prise en compte de l'environnement local dans la
commande d'un robot manipulateur".
Thèse d'Etat, Univ. RENNES I, Juin 1982.
- GAL 80 : GALEY B., HISA P. : "A survey of robotic sensor technology".
12 th South Eastern Symp. on System Theory. VIRGINIA May 1980.
- GOL 74 : GOLDGEWICHT : "Un dispositif d'identification de formes".
Machine moderne, Juin 1974.
- MAS 81 : MASUDA R. and al. : "Total sensory system for robot central and
its design approach".
11 et ISIR, TOKYO, Oct. 1981.
- MON 81 : MONCHAUD S., PRAT R. : "Téléométrie acousto-optique dans l'air"
Deuxième journée de robotique, RENNES 1981.

.../...

PAV 80 : PAVLIN C : "Capteurs pneumatiques intégrés à un organe terminal de préhension".

Rapport final DGRST n° 79-7-0298, JUILLET 1980.

PER 79 : PERUCHON E. : "Contribution à la réalisation de fonctions tactiles artificielles à partir de l'analyse du système humain".

Thèse de Troisième cycle, MONTPELLIER 1979.

QUE 79 : QUENECH'DU Y, BUISSON J. : "Réalisation d'une pince équipant un robot à six degrés de liberté.

Rapport final IRIA 79 089, RENNES 1979.

ZEL 69 : ZELBSTEIN U : "Mesures électroniques au laboratoire et dans l'industrie".

Dunod 1969.

.../...

.../...

CHAPITRE III : APPLICATIONS : ETUDE ET REALISATION D'UN ORGANE DE PREHENSION
DE DEUXIEME GENERATION

III - 1 - DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

1 - 1 - Structure mécanique

1 - 2 - Nature des informations

1 - 3 - Commande des actionneurs

1 - 4 - Choix de la structure matérielle de commande de l'effecteur

1 - 4 - 1 - Commande intégrée à l'effecteur

1 - 4 - 2 - Commande à distance.

III - 2 - MISE EN OEUVRE DE LA MAQUETTE

2 - 1 - Essais préliminaires et commande à partir d'un monochip

2 - 2 - Commande monoprocesseur

III - 3 - ANALYSES ET INTERPRETATIONS

3 - 1 - Principes mécaniques

3 - 2 - La commande

3 - 3 - Conclusions.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES 1 ET 2

IV - CONCLUSIONS GENERALES

.../...

.../...

RESUME CHAPITRE 3

=====

Les travaux à la base de notre réflexion présentée ici concernent l'étude et la réalisation d'un organe terminal de deuxième génération* ; c'est-à-dire dotée d'une part d'un retour sensoriel et disposant d'autre part d'une faculté à mener à terme les opérations de préhension ainsi que de diriger l'évolution du vecteur au cours des phases terminales de manipulation.

Nous présenterons dans le premier paragraphe les différentes options mécaniques retenues, tant au niveau de la structure, que de la motorisation et de l'infrastructure sensorielle.

Suivent alors, dans le second paragraphe, deux exemples d'implantation de la structure de commande définie antérieurement : une structure multiprocesseurs utilisant des monochips 8 bits et une structure monoprocesseur sur carte standard organisée autour du noyau d'un moniteur temps réel multi-tâches.

La concrétisation de stratégies de préhension simples mettent en évidence les spécificités de ces deux solutions ainsi que les limitations structurelles de la maquette.

Les analyses et interprétations constitueront le dernier paragraphe, alors que les développements ultérieurs envisageables seront présentés dans la conclusion générale.

* Travaux développés dans le cadre d'un contrat DGRST en collaboration avec la Société BERTIN.

.../...

.../...

III - 1 - DESCRIPTION DE LA MAQUETTE

1 - 1 - Structure mécanique

a) Description générale

La maquette présente les caractéristiques suivantes :

- elle constitue l'organe terminal d'un robot "Hall" possédant 5 degrés de liberté,
- elle comporte 3 doigts mobiles indépendants articulés autour d'un poignet et possédant chacun deux degrés de liberté :
 - . un mouvement d'ouverture-fermeture commandé,
 - . un mouvement d'orientation passive avec rappel élastique pour permettre au doigt de s'appliquer sur la surface au moment de la saisie,
 - . un mouvement axial du poignet par rapport au bras.

Ce mouvement est rendu nécessaire du fait de l'impossibilité de faire exécuter par le bras du robot les petits mouvements d'avance et de recul nécessaires au contournement de l'objet à saisir. L'amplitude de ce mouvement restant toutefois limitée, le relais est pris par le bras chargé alors de ramener le poignet dans la partie centrale de sa course.

b) Présentation

La planche 1 est une vue générale de la pince.

Les photos de la planche 2 montrent l'équipement de l'extrémité du doigt avec ses capteurs pneumatiques et ses transmetteurs électriques.

Le poids total de la pince, avec sa motorisation, est un peu inférieur à 6 Kgs.

.../...

Planche 1 : VUE GENERALE DE LA PINCE

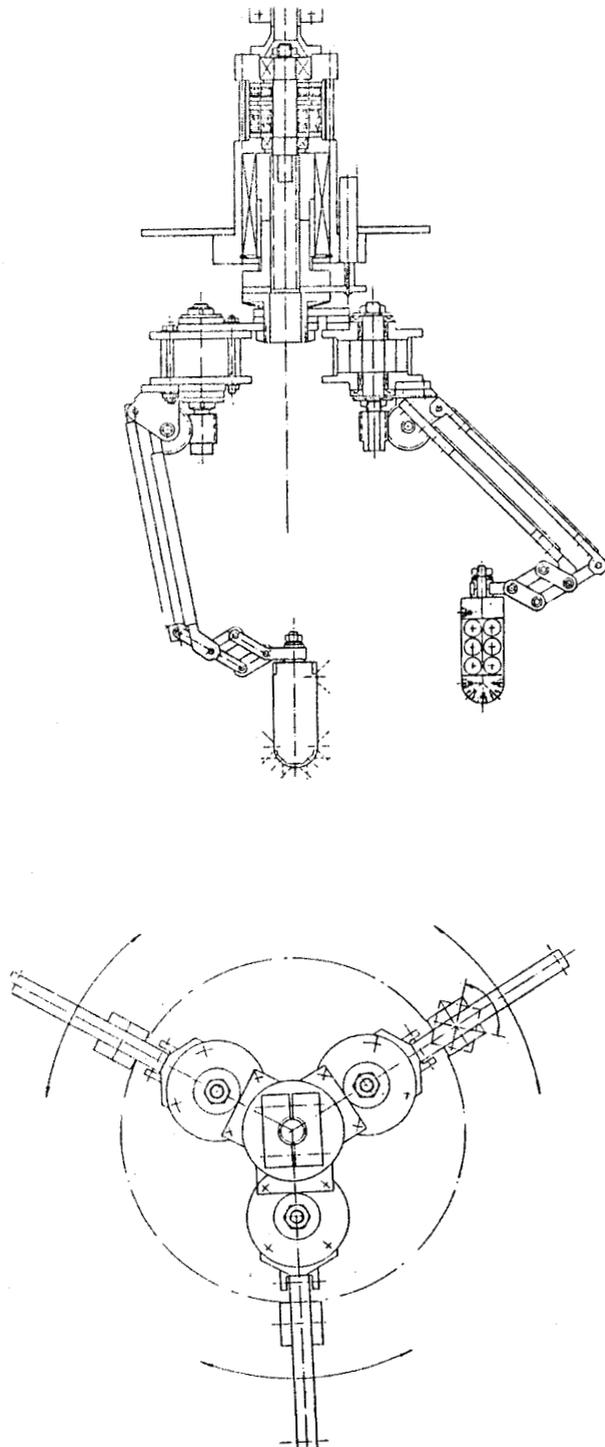
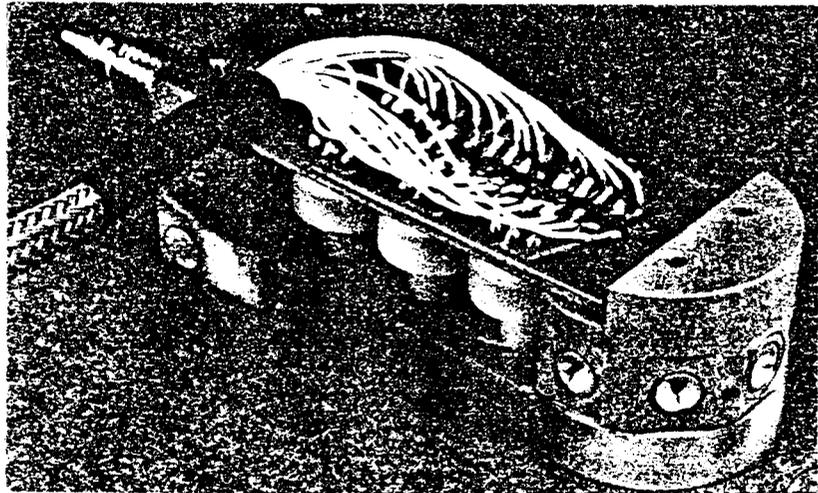
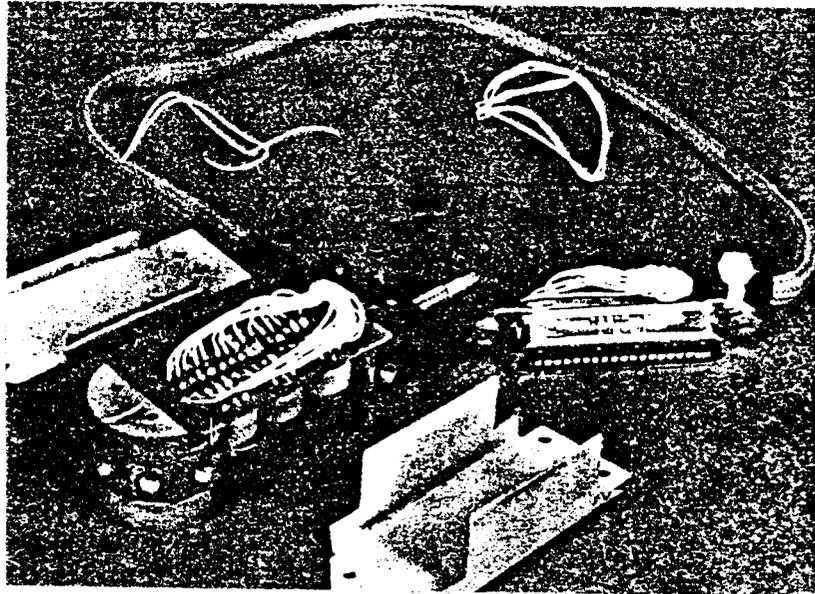
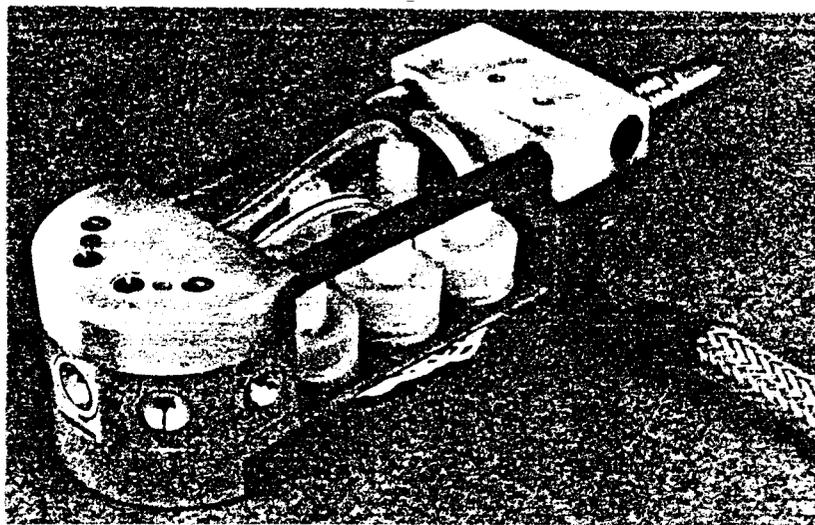


Planche 2 : EXTREMITE D'UN DOIGT



SU
LILLE



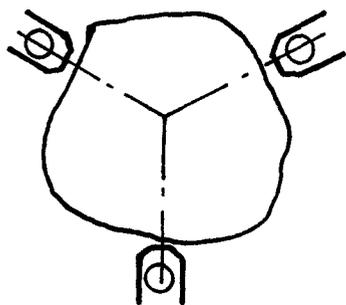
.../...

Les doigts sont répartis de façon symétrique autour du poignet, l'ensemble présentant une symétrie ternaire.

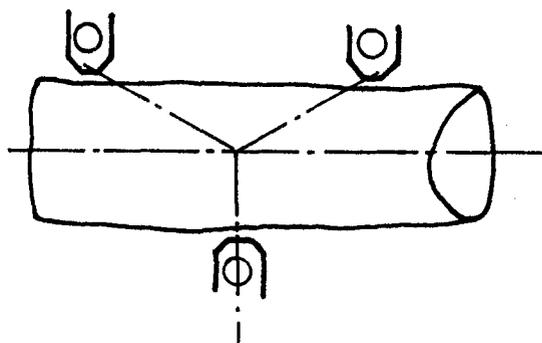
Cette disposition permet de saisir des objets de forme approximativement sphérique.

Pour les pièces de forme allongée, la structure générale est encore valable à condition d'orienter les doigts de manière à amener les faces avant de deux d'entre eux parallèlement au troisième.

Ceci s'obtiendra par un réglage préalable du degré de liberté passif des doigts. On doit alors connaître l'orientation de la pièce pour amener la pince dans la bonne direction.



Saisie d'un objet de forme sphérique



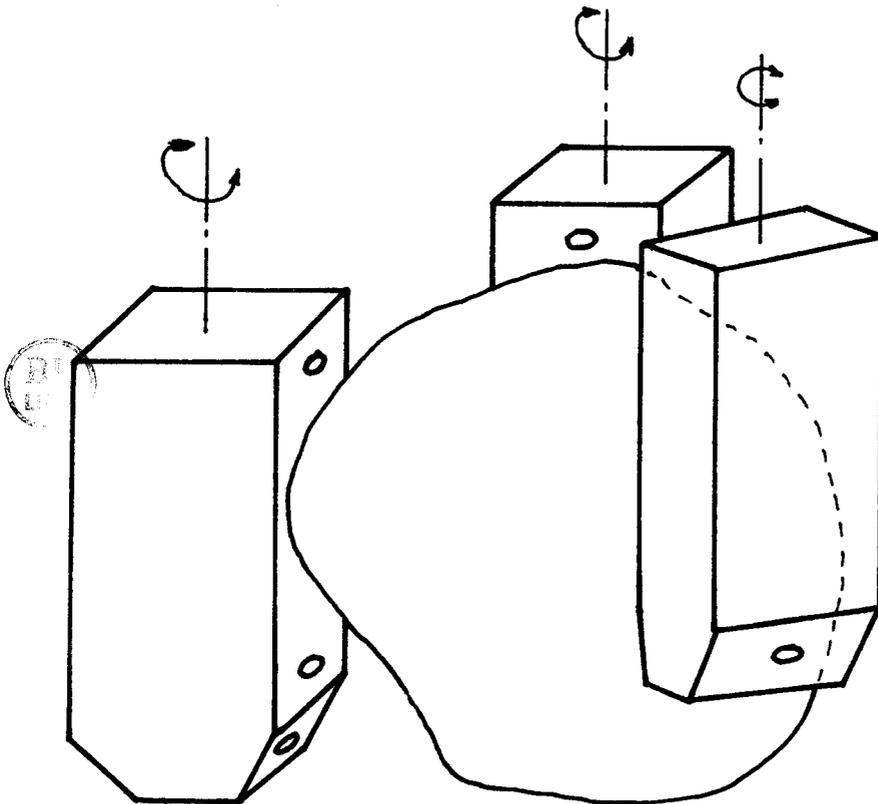
Saisie d'un objet de forme allongée.

.../...

.../...

L'ouverture du doigt s'obtient par une rotation autour d'un axe placé au niveau du poignet, à la manière des doigts d'une pince à sucre.

Toutefois, les mouvements de chacun des doigts sont commandés séparément. De plus, la partie terminale du doigt est articulée de manière à rester parallèle à l'axe du poignet. Ceci permet d'emprisonner l'objet entre trois faces parallèles de hauteur suffisante pour trouver une face d'appui sur l'objet.



Le mouvement de contournement est obtenu par combinaison en séquence de la montée/descente du poignet et de l'ouverture de chacun des doigts, ces mouvements étant commandés à partir des capteurs de proximité placés sur les doigts (un peu en retrait pour éviter de serrer sur les capteurs).

.../...

.../...

Un compromis doit être recherché entre la force de serrage, la force de levée et la rapidité de contournement de l'objet.

Dans la mesure où l'on souhaite que le temps de contournement et de saisie reste de l'ordre de la seconde, les mouvements élémentaires successifs doivent être exécutés en quelques centièmes de seconde.

Pour des raisons de commodité de commande, on a retenu des moteurs-couples pour motoriser cette maquette. Les constantes de temps de l'ordre du centième de seconde sont possibles à condition de choisir des moteurs suffisamment légers (annexe 3).

Avec un rendement mécanique global estimé à 0.5, la force de serrage exercée à l'extrémité du doigt à 15 cm de l'axe du moteur est d'environ 12,5 N (en continu).

En admettant qu'avec un revêtement de surface convenable on obtienne un coefficient de frottement de l'ordre de 1 à l'endroit de la prise, on ne peut pas espérer soulever plus de 1 à 2 kgs avec cette pince.

Pour accroître cette valeur, il faudrait augmenter le poids des moteurs, mais alors la pince serait trop lourde pour être accélérée et ralentie efficacement pendant le contournement. On a contourné la difficulté en réalisant une pince autobloquante par entraînement irréversible du doigt et articulation autoserrante du doigt.

Pour le mouvement du poignet un calcul analogue montre que l'on peut conserver une vitesse de contournement convenable avec le même moteur, à condition de limiter à 6 kgs le poids de la pince.

On a choisi, pour les quatre degrés de liberté, le moteur ARTUS de référence T 1342 (voir Annexe 3).

c) Récapitulation des degrés de liberté de la pince

L'objectif visé consiste à donner à la pince la plus grande adaptabilité possible pour permettre la saisie de pièces de formes très diverses. De ce fait, la pince comporte trois doigts pouvant s'ouvrir très largement et de manière indépendante. La zone centrale est la plus dégagée possible

.../...

pour libérer de la place.

En dehors des mouvements commandés que sont l'ouverture de chacun des doigts et la translation du poignet, un certain nombre de degrés de liberté passifs ont été aménagés :

- Le plan dans lequel les doigts se déplacent est orientable. Ceci permet de placer les trois doigts à 120° pour saisir un objet rond, ou d'en resserrer deux pour les rendre opposables au troisième. Ceci permet de saisir des objets allongés en orientant convenablement la pince.

- L'extrémité du doigt peut pivoter autour de son axe, avec rappel élastique. Ainsi, lorsque le doigt vient serrer l'objet, il peut se plaquer sur sa surface. De même, si un objet est anguleux, de sorte que la face est tellement oblique qu'elle arrive à échapper au domaine des capteurs, le recentrage du doigt lors d'un contact remettra les capteurs en prise et permettra de poursuivre le contournement. Dans ce cas, un léger contact avec la pièce est inévitable.

- L'extrémité du doigt est montée sur un support rétractable, à base de parallélogramme articulé, qui assure deux fonctions :

- . en cas de collision avec l'objet, le doigt peut s'effacer,
- . après un préserrage qui permet de déformer le parallélogramme, (en l'accompagnant, si nécessaire, par un mouvement de descente du bras) on obtient un serrage automatique de la pièce à la levée du fait de l'irréversibilité du mécanisme de fermeture des doigts.

L'ouverture et la fermeture des doigts s'obtiennent par une rotation autour d'une articulation par l'intermédiaire d'une vis d'Archimède (rapport de réduction de 30). Un montage en parallélogramme maintient l'extrémité des doigts parallèles entre eux. Un capteur angulaire potentiométrique mesure l'angle d'ouverture de chaque doigt. Le mouvement vertical du poignet est actionné également par un moteur couple à travers un système

.../...

.../...

vis-écrou à raison de 5 mm par tour (vis à billes TRANSROL SNEA 20 X 5 R 1).

Etant donné le diamètre de la vis (20 mm) l'irréversibilité du mouvement n'est pas assurée.

Pour maintenir le poignet en position fixe au cours du mouvement d'approche et pendant certaines phases du contournement, le moteur est équipé d'une génératrice tachymétrique ce qui permet d'asservir la vitesse à zéro. Les légères dérives de position qui peuvent en résulter sont sans importance.

Un capteur potentiométrique (linéaire) mesure la position du poignet et permet de rattraper les mouvements du poignet par un accompagnement du bras avant qu'il n'arrive en butée.

La course utile du poignet est limitée à 10 mm et permet de réaliser une trajectoire en escalier en relation avec le mouvement des doigts pendant le contournement.

1 - 2 - Nature des informations extéroceptives

Compte tenu des formes variées des objets que peut rencontrer la pince, un minimum de six capteurs nous a semblé indispensable. En effet, l'angle sous lequel un objet peut être abordé par un capteur se situe dans un cône de 45° de demi-angle au sommet.

Dès lors, on convient de répartir les capteurs comme suit :

- sur la face extérieure verticale du doigt : 1 capteur,
- sur l'extrémité : 3 capteurs,
- sur la partie verticale intérieure : 2 capteurs.

Les capteurs utilisés sont pneumatiques, du type dit à voile annulaire rotatif. Rappelons les raisons essentielles de ce choix :

- Bonne endurance en ambiance industrielle : insensibilité aux parasites électriques ou magnétiques, à la poussière, au brouillard d'eau ou d'huile,

.../...

- Réponse indifférente à la nature du corps détecté et à sa consistance,
- Portée limitée évitant les échos indésirables et le parasitage par l'environnement,

En face de ces avantages, ils présentent bien entendu des limitations et des inconvénients :

- Faible distance de détection obligeant à aborder l'objet à vitesse réduite,
- Influence de la forme et de la granulométrie de la surface. La réponse du capteur dépend de l'angle sous lequel se présente l'objet. La vision est limitée à un cône de 45° de demi-angle,
- Nécessité de convertir le signal pneumatique en signal électrique. Par sécurité, en cas de contact avec un objet, la pression que doit pouvoir supporter le capteur électrique est la pression d'alimentation. De ce fait la plage utile est faible devant l'étendue de mesure du capteur et requiert un traitement approprié.

Le capteur à voile rotatif présente des avantages spécifiques par rapport aux autres types de capteurs pneumatiques :

- le voile annulaire a une portée plusieurs fois supérieure à celle de la buse pour un même débit, soit environ 7 mm pour un capteur miniature,
- sa courbe est plus monotone que celle du capteur à voile simple ou à voile divergent.

Rappelons que dans un capteur à voile annulaire, le jet de mesure est concentrique à la prise de pression et qu'il maintient cette dernière en dépression tant qu'il ne rencontre aucun obstacle à courte distance.

.../...

.../...

Les plages de mesure doivent être jointives ce qui nécessite une fabrication spéciale telle que le capteur soit intégré à la structure. On veut, néanmoins, rendre le capteur démontable, en cas de réalisation défectueuse ou de bouchage.

Finalement, on a opté pour un capteur comportant un noyau amovible. Le voile annulaire est ménagé entre le noyau et un perçage pratiqué dans le doigt. La prise de pression est pratiquée dans le noyau et isolée de l'alimentation périphérique par un joint annulaire.

On observe presque toujours, lorsque l'incidence est proche de la normale, une distance pour laquelle la courbe de réponse présente un méplat ou même une inversion de sens. Cette région est généralement siège d'instabilités correspondant à une modification sensible du profil aérodynamique.

Ces effets avaient été minimisés sur les capteurs de taille réduite réalisés précédemment.

L'expérience a montré que le mode de réalisation adopté pour permettre l'intégration des capteurs dans le doigt apporte des modifications de caractéristiques et des accidents sur la courbe de réponse. On a pu y remédier partiellement en évasant la prise de pression, ce qui offre l'avantage supplémentaire de réduire les risques de colmatage, en cas de contact intensif avec la pièce.

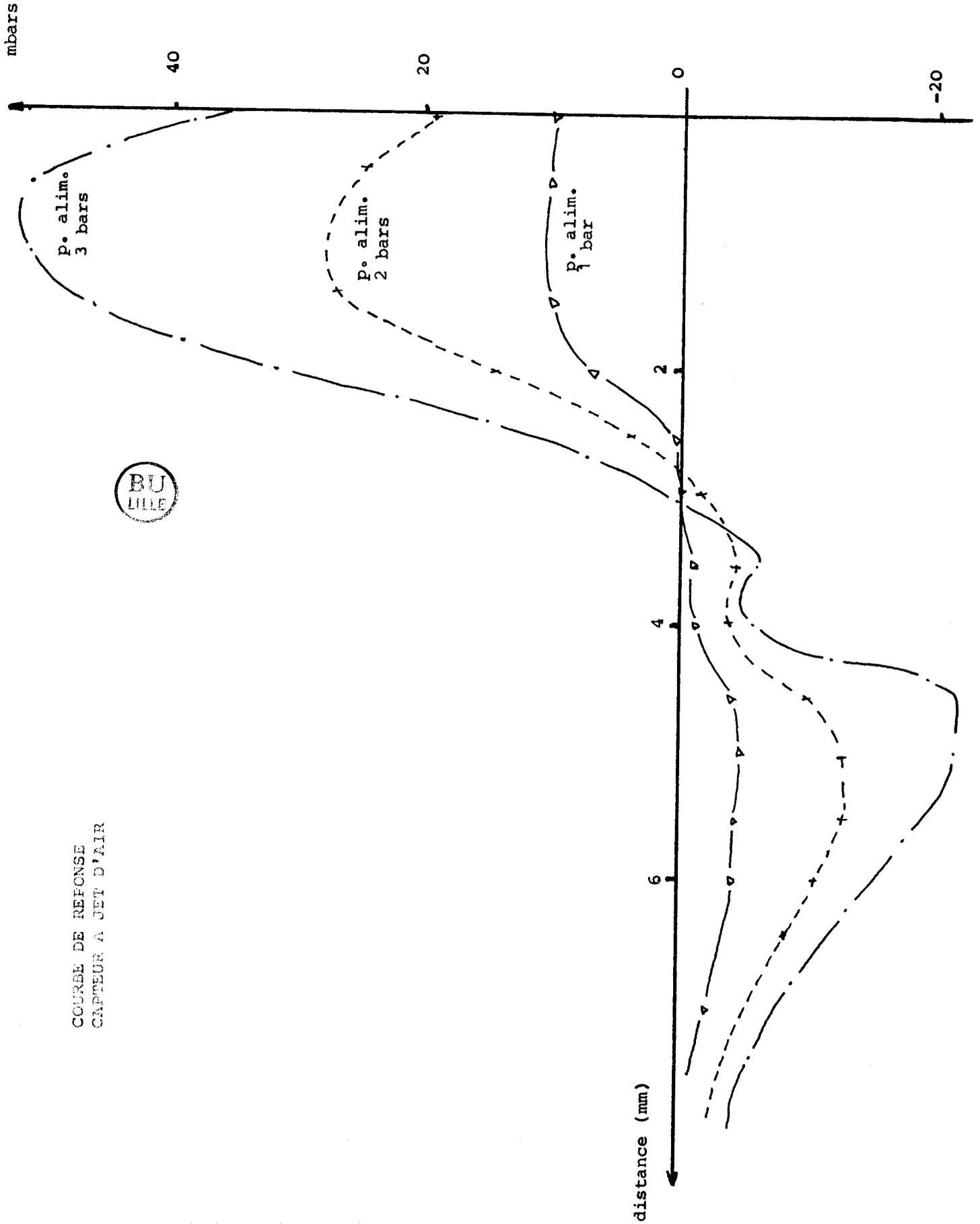
Quelques courbes typiques de réponse sont présentées ci-après.

Le doigt comporte six capteurs, le sixième étant disposé au sommet de la face de serrage de manière à délimiter la zone utile pour la saisie. Les capteurs sont très rapprochés à l'extrémité du doigt ce qui complique les problèmes d'alimentation et les sorties de signal.

Intéraction entre capteurs

Le problème qui peut se poser est l'intéraction des jets des

.../...



COURBE DE REPONSE
CAPTEUR A JET D'AIR

.../...

capteurs disposés face à face sur les doigts adjacents, lorsque la pince est fermée. Or c'est dans cette position que se fait l'approche initiale.

Deux capteurs placés face à face commencent à interagir à une distance de l'ordre de 7 à 10 cm. En deça de 3 cm, les champs aérodynamiques se combinent et la sortie passe en surpression.

Ceci compromettrait un système de pince à deux doigts dans lequel des capteurs seraient disposés face à face au même niveau.

Pour la pince à trois doigts, on rencontre les dispositions suivantes :

- trois doigts symétriques avec des jets orientés à 120° les uns des autres (saisie d'une pièce de forme non allongée),
- deux doigts disposés face au troisième mais décalés latéralement (saisie de pièces de forme allongée).

L'expérience montre que les capteurs orientés à 120° n'interagissent pas au-delà de 1 cm de distance. En deça, c'est l'obstacle que constitue le capteur et non son jet qui est détecté.

Elle montre également que deux capteurs face à face mais décalés d'une largeur de doigt (15 mm) n'interagissent pas l'un sur l'autre.

Comportement dynamique

Pour son utilisation en saisie automatique, le capteur doit pouvoir fonctionner à plus de 100 Hz. Ceci suppose :

- une liaison entre capteur pneumatique et sa mesure électrique aussi courte que possible, inférieure à 10 cm,
- l'absence de mouvements du tube de liaison correspondant.

Il est exclu, par exemple, de relier le capteur pneumatique placé

.../...

.../...

sur un doigt à un capteur électrique disposé au niveau du poignet.

Les mécanismes d'amortissement du signal pneumatique que l'on risque de rencontrer sont de deux ordres :

- temps d'établissement du profil aérodynamique entre capteur et obstacle,
- temps d'établissement de la pression dans le tube de liaison qui se comporte comme un circuit R, L, C.

Capteurs électriques

La mesure de distance effectuée par le capteur pneumatique est transformée en signal électrique par l'intermédiaire d'un capteur électrique.

Il existe des capteurs électriques à membrane effleurante suffisamment petits pour pouvoir être incorporés directement dans les capteurs pneumatiques éliminant ainsi tous les problèmes que pose la ligne de transmission.

Ces capteurs sont malheureusement trop coûteux encore, environ 3 000 F. pièce.

Dans une taille un peu supérieure, il existe des capteurs plus abordables. Ils nécessitent une liaison au capteur par tube. Il faut éviter toute déformation du tube susceptible d'induire un signal parasite.

Le modèle retenu est un capteur piézorésistif de Pressure System Inc. (réf. PR 2002 SN 26). On trouvera en page 127 un schéma de principe de ces transducteurs.

Six de ces capteurs et leurs circuits d'alimentation sont incorporés dans le doigt. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

.../...

.../...

- étendue de mesure : 400 mbar
- pression maximale : 2 bars
- sensibilité maximum : 254 mV/bar
- sortie différentielle : 100 mV P.E.
- tension d'alimentation : 12 à 24 volts
- impédance interne : 3,2 K Ω

L'implantation des capteurs électriques est également délicate en raison de leur volume non négligeable bien qu'ils soient miniaturisés. Ils doivent en effet être placés à proximité immédiate des capteurs pneumatiques pour limiter le temps de réponse des liaisons pneumatiques et les risques de signaux parasites qui peuvent s'y induire par suite des chocs et des vibrations (leur disposition est visible sur la planche 2).

Traitement du signal

Le plus faible niveau du signal fourni par le transducteur a nécessité un filtrage et une amplification propre à chaque capteur, le rapport signal/bruit à la sortie des transducteurs étant de l'ordre de 3 à 5.

Pour des raisons de commodité d'adressage, nous avons regroupé, au niveau de chaque doigt, l'ensemble des informations analogiques sur un multiplexeur analogique suivi d'un convertisseur analogique/numérique avant d'arriver à la carte processeur.

On trouvera en page suivante le schéma développé de notre chaîne de mesure.

1 - 3 - Commande des actionneurs

Le fait d'avoir monté élastiquement l'extrémité des doigts pour les raisons indiquées nous contraint à travailler à vitesse réduite (voir paragraphe 3-1-1). Deux types de solutions sont alors envisageables :

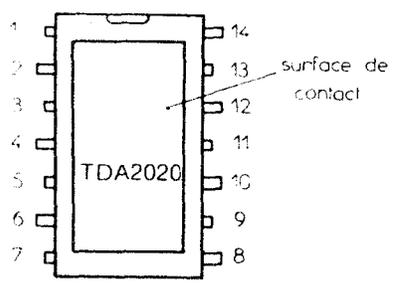
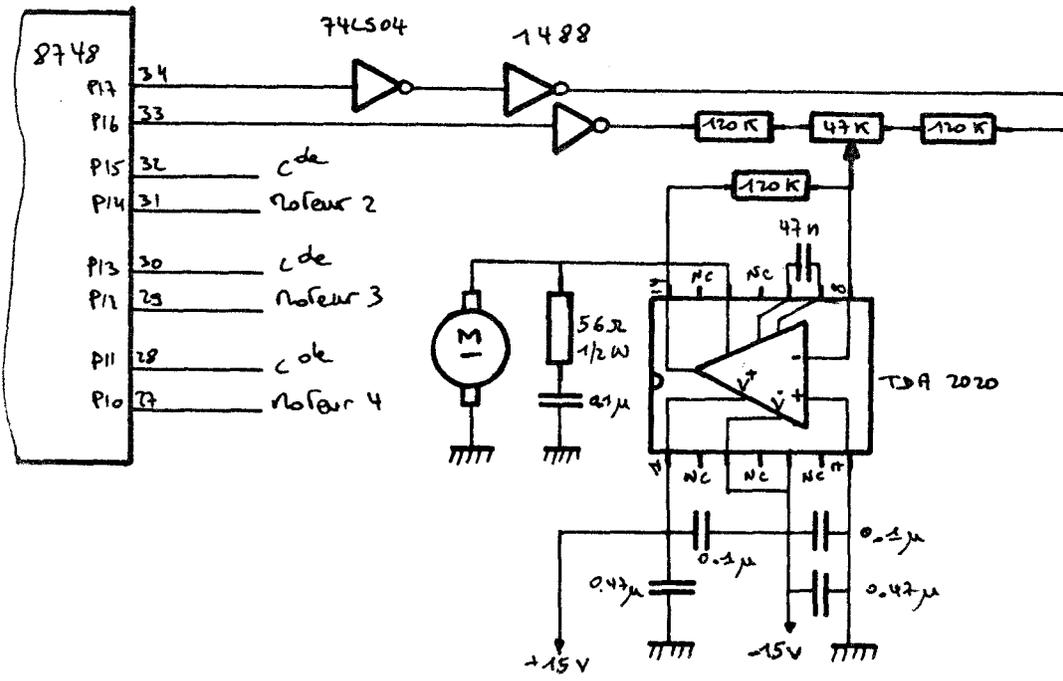
- réduire la tension d'alimentation des moteurs, ce qui entraînerait des modifications de la maquette,

.../...

.../...

- commander le moteur en impulsion de largeur constante dans l'hypothèse d'un frottement sec constant.

On retiendra la deuxième solution, facilement implantable dans un environnement à microprocesseur. Cette commande sera du type tout ou rien à deux sens de marche. Vu la puissance des moteurs, il est tout à fait possible d'intégrer les interfaces de commande sur la pince. Le schéma de cet interface est donné ci-après :



- Broches :
- | | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 - de l'alimentation positive; | 8 entrée inverseuse; |
| 2 non connecté; | 9 compensation; |
| 3 - de l'alimentation négative; | 10 compensation; |
| 4 non connecté; | 11 non connecté; |
| 5 à relier au 3 extérieurement; | 12 limitation de puissance; |
| 6 non connecté; | 13 non connecté; |
| 7 entrée non inverseuse; | 14 sortie. |

CI vu de dessus

.../...

1 - 4 - Choix de la structure matérielle de commande de l'effecteur

Le choix d'un produit informatique pour l'élaboration du calculateur de l'effecteur répondant au cahier des charges tel qu'il a été défini ici, dépendra avant tout de l'option technologique retenue au niveau de son implantation physique. Si l'on souhaite l'intégrer à la "mécanique" de l'effecteur, il y a lieu de s'orienter vers un produit spécifique à base de monochips. En revanche, si l'on opte pour un dispositif séparé, il est intéressant de développer un calculateur à partir d'une carte processeur de type iSBC (INTEL) ou d'un ensemble de cartes au format EUROPE ou STD.

Dans les deux cas de figure, il est question de développer une structure autonome, non tributaire de la nature et de la structure du calculateur du vecteur, mais reliée à cette dernière par une liaison standard aussi bien au niveau technologique que protocolaire (RS 232, V24, ...).

Nous présenterons dans le paragraphe suivant une série d'essais relatifs à ces deux options en évoquant en premier lieu dans ce qui suit, les spécificités logicielles et technologiques des deux possibilités.

1 - 4 - 1 - Commande intégrée à l'effecteur : la solution monochip

L'utilisation d'une structure à base de monochip s'impose lorsque les contraintes d'implantation matérielles sont sévères pour un dispositif mettant en jeu des ressources logicielles et matérielles compatibles avec ces circuits.

Ceci implique naturellement une phase de conception et de réalisation du hardware spécifique préalable à l'implantation et à la mise au point du logiciel.

On rencontre dans cette gamme de produits essentiellement deux types de microprocesseurs bâtis autour d'une structure de base composée d'

.../...

.../...

une unité centrale, d'une banque de registres, de mémoire vive, de ports d'entrée-sortie, d'un circuit horloge et d'un timer/compteur d'évènements. La différence se situe au niveau de la présence dans le circuit soit de mémoire reprogrammable soit d'une chaîne d'acquisition de données analogiques et d'un port de sorties analogiques.

Il est certain que dans notre contexte, il sera nécessaire d'opter pour une structure monochip multiprocesseurs dans la mesure où il est inconcevable de commander trois degrés de liberté, de scruter vingt et un capteurs et d'assurer le dialogue avec le vecteur au moyen d'un unique monochip ; ce qui à priori peut sembler contraire à la philosophie monochip dont la vocation première est avant tout de permettre l'intégration de l'ensemble des fonctions de commande dans un seul boîtier. En effet, s'il faut rajouter des circuits d'extension autour du monochip, autant développer un produit classique avec un microprocesseur et l'ensemble des circuits périphériques nécessaires.

Cependant, la solution multi-monochips est loin d'être aberrante si toutefois la communication entre les processeurs ne diminue pas exagérément leurs capacités d'interaction avec leur environnement respectif. En effet, on bénéficiera alors d'un parallélisme réel dans l'exécution globale de la commande, et ce pour une structure matérielle minimale. Ainsi, pour une commande à trois niveaux, telle que nous la proposons dans ce mémoire, on peut proposer la structure suivante :

- le monochip idéal (convertisseur N/A et A/N et mémoire reprogrammable) n'existant pas pour des raisons de technologie de fabrication des circuits intégrés, on choisira pour chaque observateur lié à chaque doigt un monochip reprogrammable auquel on adjoint un multiplexeur analogique 8 voies et un convertisseur analogique numérique 8 bits, solution offrant également la souplesse de choix de la résolution du convertisseur. La commande du moteur (deux sens de marche) restera en tout ou rien : on utilisera deux bits d'un port de sorties,

.../...

.../...

- la fonction de coordination serait également prise en charge par un monochip du même type avec comme seul circuit périphérique un dispositif d'amplification des signaux de communication avec le calculateur associé au vecteur (on retiendra de préférence une communication parallèle pour des questions de vitesse et de simplification du protocole (surtout lorsque le monochip ne dispose pas d'entrée-sortie série),
- enfin, l'ensemble des stratégies pourrait être implanté en mémoire reprogrammable de type 2716 ou 2732 connectée en extension sur le monochip de coordination. Ce type de mémoire étant très répandu, il serait facile à l'utilisateur de développer et d'implanter ses propres stratégies en disposant de la syntaxe du langage de description des stratégies ainsi que d'un programmeur de mémoire.

L'ensemble de cette disposition est donnée sur le schéma de la page suivante.

1 - 4 - 2 - Commande à distance de l'effecteur

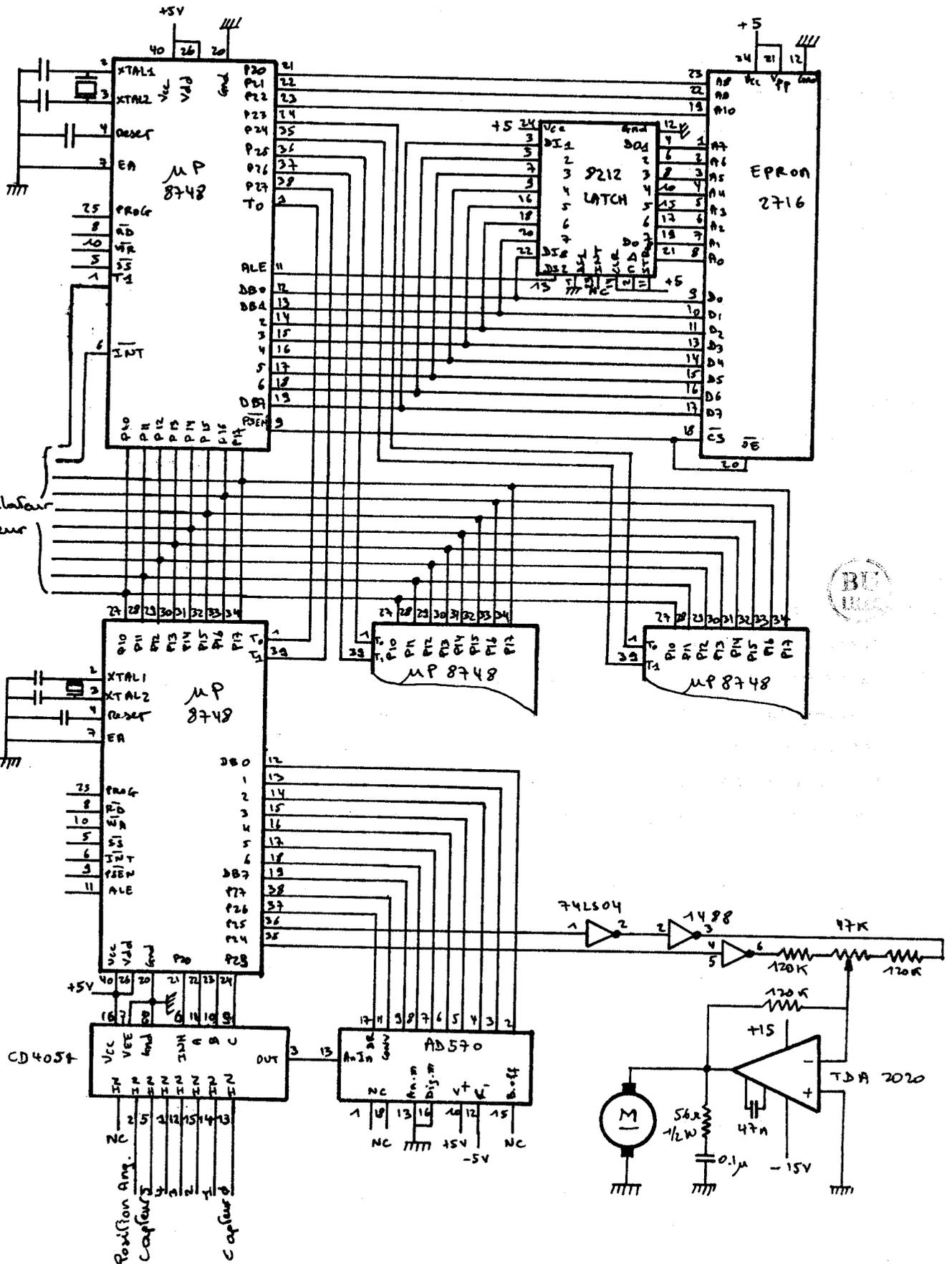
Pour des questions de transmission de signaux, on intégrera les circuits d'interface (amplification et conversion analogique numérique des signaux capteurs, commande des moteurs) à l'organe terminal, de manière à ne transmettre que des informations numériques.

Parmi les "briques de construction" d'un calculateur, on trouve essentiellement deux tendances : les cartes au format EUROPE ou au format STD de taille réduite (environ 200 cm²) intégrant chacune une fonction de base (carte processeur, mémoire vive, entrées-sorties...), et les cartes du type iSBC d'INTEL, de taille trois fois supérieure aux précédentes, et intégrant un ensemble de fonctions standard : processeur, mémoire morte et vive, liaisons série et parallèle, timer, gestion des interruptions,...

Le choix du format déterminera la structure du calculateur :

.../...

COMMANDE MULTI-MONOCIPS



.../...

multiprocesseur pour un format de type EUROPE ou monoprocesseur dans le cas contraire. On remarquera par ailleurs que dans les deux cas les fonctions conversion analogique-numérique et numérique-analogique sont, la plupart du temps, proposées sur une carte séparée, ce qui ne nous pénalise pas dans la mesure où elles sont, dans notre cas, spécifiques et intégrées à l'effecteur.

La solution calculateur non intégré à l'effecteur bâti autour d'une structure multiprocesseurs ne se différencie de la solution multi-monochips présentée précédemment que par son aspect matériel : on conservera toute la souplesse de la structure multiprocesseurs mais cette fois ci sur un matériel standard (on attaquera directement l'implantation et le test du logiciel). Nous n'insisterons donc pas davantage.

En revanche, il est intéressant de préciser les principes de base d'un logiciel équivalent implanté sur une structure monoprocesseur. Si l'on veut conserver notre découpage fonctionnel de la commande de l'effecteur pour élaborer rapidement les modules logiciels correspondants, il est tout à fait intéressant de disposer d'un outil logiciel constituant l'ossature de l'application, intégrant les notions de découpage modulaire des tâches et de gestion dynamique des priorités, pour permettre respectivement l'implantation d'une commande conformément à sa description modulaire et une pseudo-concrétisation des parallélismes de fonctionnement.

Chaque module fonctionnel constituerait alors une tâche à laquelle on associerait un niveau de priorité. Et notre outil logiciel en question aurait alors comme fonctions :

- d'évaluer les conditions d'activation de chacun des modules de manière à déterminer ceux d'entre eux qui sont activables,
- de séquencer, en fonction de leur priorité, les modules activables,
- de gérer l'ensemble des ressources communes de la structure informatique de commande.

De tels outils informatiques existent, même pour des cartes

.../...

.../...

processeurs huit bits, telles que celles de la série iSBC d'INTEL : il s'agit des moniteurs multitâches temps réel. Les constructeurs proposent depuis quelque temps déjà ce type de produit accompagnant leurs cartes standard pour permettre à l'utilisateur de se consacrer pleinement à son application, ce qui diminue le temps d'étude, impose une normalisation dans l'organisation et l'écriture des logiciels, permet un accès plus facile à l'organisation du logiciel ainsi qu'une extension aisée. Moyennant un investissement temporel initial, l'on obtient un allègement de la programmation, ainsi qu'un logiciel souple, efficace et présentant une bonne sécurité de fonctionnement. De plus un nombre important d'utilitaires standard permet la définition rapide d'un système (gestion d'un moniteur, ...)

.../...

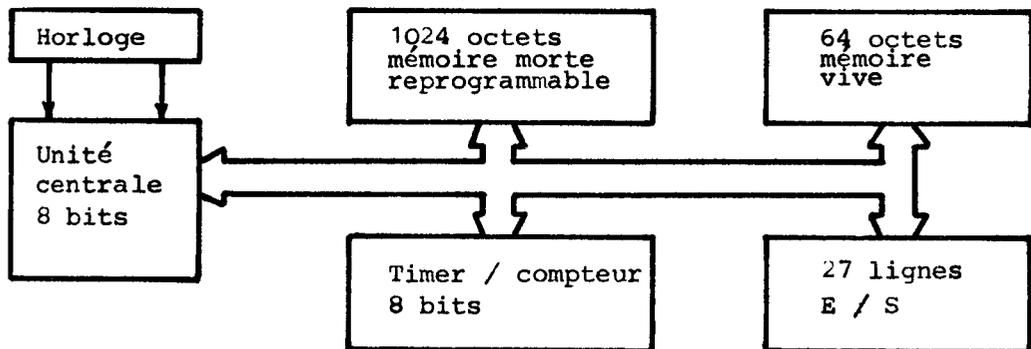
III - 2 - MISE EN OEUVRE DE LA MAQUETTE

Nous présentons ici, dans un premier temps, les différents essais préliminaires à la mise en oeuvre de toute stratégie (test des capteurs et actionneurs), effectués à l'aide d'une structure de commande organisée autour d'un monochip INTEL 8748 de manière à évaluer les performances de la maquette ainsi que les possibilités de ce monochip dans notre contexte.

Puis, dans un second temps, seront exposés les essais de commande sur une structure informatique standard organisée autour du noyau d'un moniteur temps réel.

2 - 1 - Essais préliminaires et commande à partir d'un monochip

Les essais présentés ici ont été effectués sur le monochip 8748 d'INTEL qui est du type à mémoire reprogrammable dont la structure est donnée ci-dessous :



et ayant comme caractéristiques essentielles :

- boîtier 40 broches,
- alimentation unique 5V \pm 10 %
- 1 niveau d'interruption,
- temps de cycle de 2,5 ns

Pour la conduite de nos essais, ce microprocesseur est émulé à partir de l'outil de développement MCT 48-E (GAL 83).

.../...

.../...

2 - 1 - 1 - Les capteurs

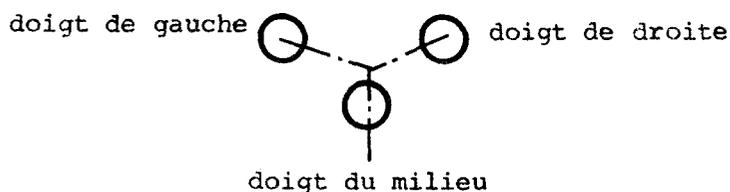
a) sous programme d'acquisition

De structure classique, il se compose de quatre étapes : positionnement de l'adresse du capteur (destiné au multiplexeur analogique), envoi du signal de début de conversion, temporisation correspondant au temps de conversion, acquisition de l'information.

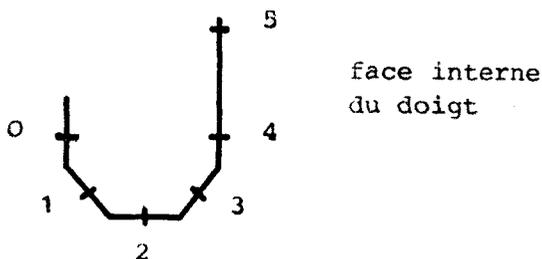
b) dynamique des capteurs

Un relevé systématique des performances de la totalité des capteurs a été effectué de manière à évaluer les possibilités de la pince. Ces relevés sont indiqués dans le tableau ci-dessous, avec en dernière colonne la distance maximale capteur/objet entraînant une variation perceptible du signal.

Pour le repérage des doigts, une vue de dessus de la pince donne la distribution suivante des trois doigts :



Quant à l'implantation des capteurs sur un doigt, elle est la suivante :



Un capteur sera noté C_{ij} avec i n° du doigt (1 pour gauche, 2 pour milieu, 3 pour droite) et j n° du capteur.

.../...

Capteur	Signal en l'absence d'objet (code hexa)	Signal pour un capteur obs-trué (code hexa)	Portée Max. (mm)
C10	26	E6	5
C11	26	E6	1
C12	32	E5	6
C13	80	E5	6
C14	27	E5	1
C15	27	27	0
C20	24	24	0
C21	27	E6	5
C22	50	E6	6
C23	E6	E6	0
C24	27	E6	1
C25	27	E6	1
C30	26	E6	1
C31	27	E6	5
C32	30	E5	6
C33	40	E5	6
C34	27	E6	1
C35	27	E6	1

Ce tableau montre que 50 % des capteurs sont quasiment inutilisables ne détectant la présence d'une pièce que lorsque celle-ci est en contact mécanique avec le doigt.

Il faut donc en chercher la raison :

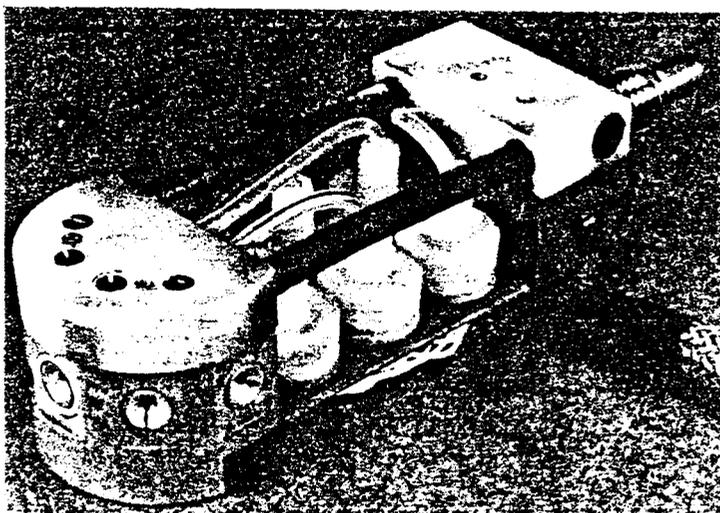
.../...

.../...

- soit du côté de l'alimentation en air des capteurs (obturation d'un conducteur, mauvais raccordement, ...),

- soit au niveau de la prise de mesure (étanchéité au niveau du transducteur, ...),

- soit au niveau de la finition mécanique et de la fiabilité du montage du capteur. La vue ci-dessous donne une vue d'ensemble d'un doigt et permet d'apprécier cette difficulté.



On pourra retenir aussi, pour une version ultérieure, d'intégrer au niveau du doigt la partie amplification des signaux issus des transducteurs de manière à transmettre des signaux de puissance plus importante.

Malgré ces performances moyennes, il sera tout à fait possible de mettre en oeuvre des stratégies de préhension dans la mesure où les capteurs situés en fond de doigts sont exploitables.

c) mesure de la position des doigts

L'information de position est délivrée par un potentiomètre rotatif. La plage de variation entre les butées mécaniques d'ouverture et de fermeture est de l'ordre de 130 incréments pour une course de l'ordre de 90 degrés, ce qui correspond à une résolution statique de 0,7 degré.

.../...

.../...

En fait, la course utile d'un doigt est inférieure à la course mécanique maximale dans la mesure où la situation pince fermée correspond à une position des doigts au delà de la butée mécanique.

En d'autres termes, une trajectoire représentée sous forme échantillonnée occupera un tableau de longueur inférieure à 130 valeurs.

2 - 1 - 2 - Les actionneurs

a) commande des doigts

La structure de l'interface de commande des moteurs nous ramène à utiliser les moteurs couples à la manière d'un moteur pas à pas, ce qui implique un sous-programme de commande du type : sélection du moteur et du sens de rotation, temporisation, arrêt du moteur. La temporisation est déterminée de façon expérimentale de manière à obtenir un incrément de position en rapport avec les exigences des trajectoires.

L'ouverture et la fermeture des doigts s'obtiennent par une rotation autour d'une articulation par l'intermédiaire d'une vis d'Archimède, sans dispositif de rattrapage de jeu, ce qui, pour un asservissement en position par commande tout ou rien, risque d'introduire des oscillations non amorties. C'est la raison pour laquelle on travaillera en boucle ouverte et on évitera le changement de sens de rotation en cours de stratégie.

Le fait de devoir travailler en boucle ouverte nécessite une modélisation du comportement mécanique de chacune des articulations, notamment pour connaître la loi de variation du frottement sec.

Une série de relevés ont permis de représenter cette loi de variation ; pour ce faire, on a envoyé une succession d'impulsions élémentaires de commande de l'actionneur en relevant les incréments de position correspondants.

Pour le doigt de gauche par exemple, on obtient les courbes indiquées en page suivante. Celles pour les deux autres doigts sont identiques.

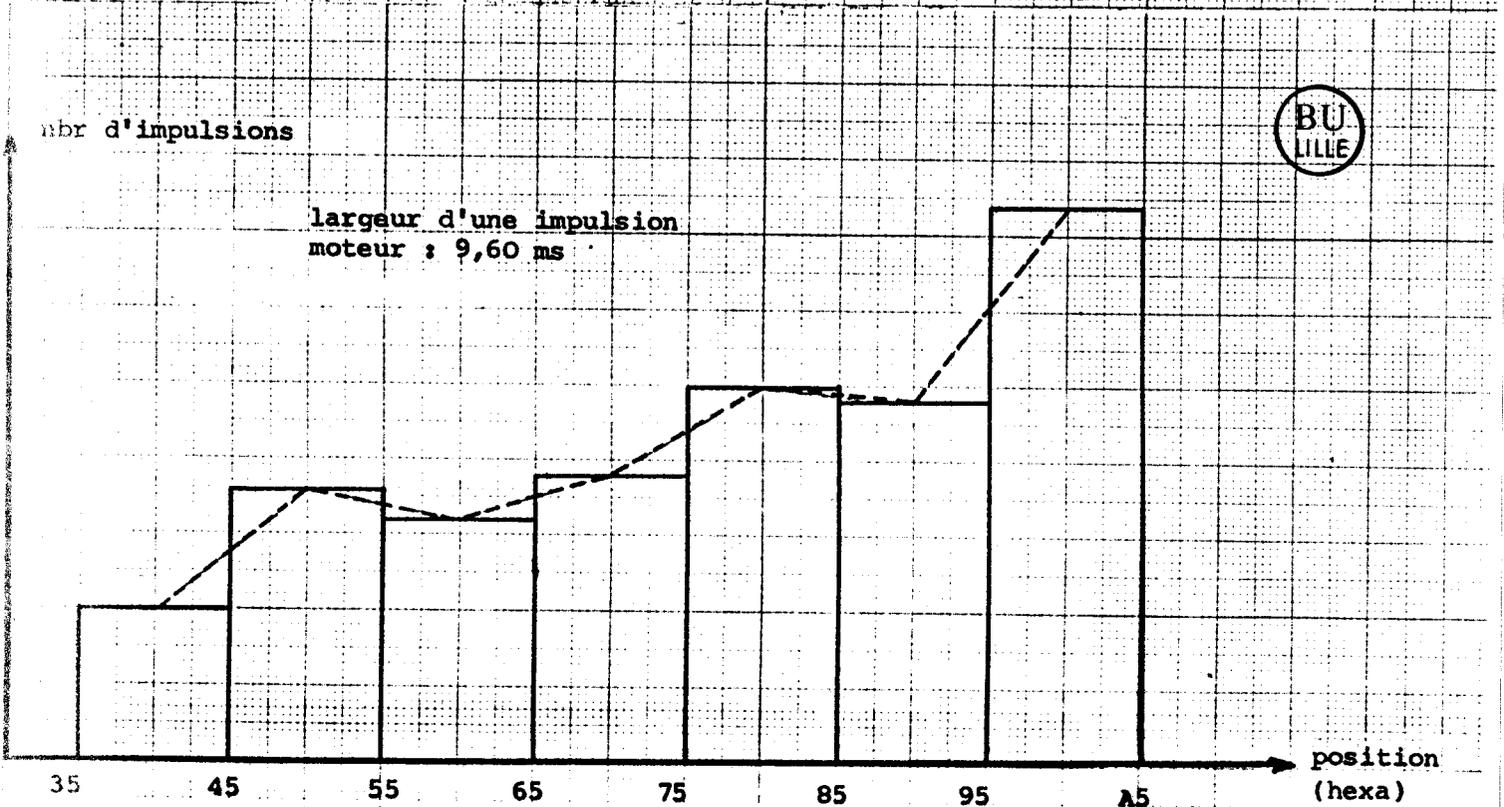
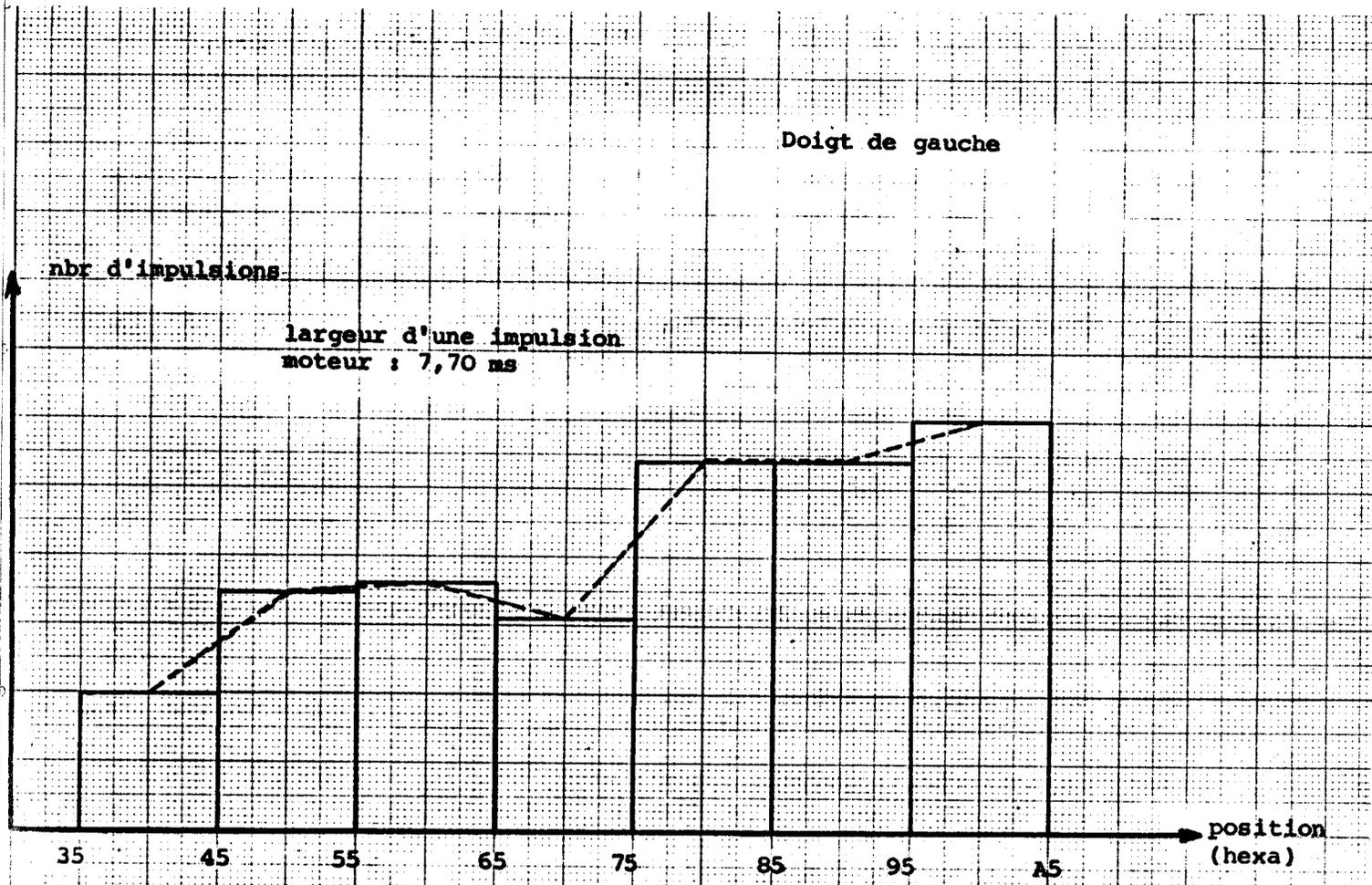
En première approximation, le polygone des fréquences définit

.../...

HISTOGRAMMES ET POLYGONES DES FREQUENCES

pour la détermination du frottement sec

Doigt de gauche



.../...

quelques paliers délimités par les ordonnées 10, 15, 20 et 25, ce qui conduit à une segmentation de la position en quatre intervalles : (butée inférieure, 46), (47, 73), (74, 91), (92, butée supérieure).

A chacun de ces intervalles est associé un nombre d'impulsions élémentaires par incrément de position (toujours d'après l'histogramme) respectivement égal à 0.6, 1.26, 1.95 et 2.44.

b) le mouvement de translation du site expérimental

Ce mouvement de translation est obtenu par un système vis-écrou non réversible. Ne disposant d'aucun retour de position, nous devons travailler en boucle ouverte en ayant affaire ici à un dispositif à réponse linéaire. L'algorithme de commande de ce moteur est le même que pour les actionneurs de la pince.

2 - 1 - 3 - Algorithmes de préhension

a) suivi d'un objet

Cette première étape, qui consiste à asservir la position d'un doigt à celle d'un objet se déplaçant dans la direction d'ouverture et fermeture du doigt, va nous permettre de mettre en évidence les problèmes de commande. En fait, il s'agit d'un asservissement en position dont le retour est obtenu par l'intermédiaire d'un capteur extéroceptif.

La commande des moteurs étant de type pas à pas, la loi de commande ne pourra être que de type bang-bang. Lorsque le doigt est trop près de la pièce, il y a écartement, lorsqu'il est trop loin, il y a approche et pour une position intermédiaire le doigt reste en place.

Le choix des moteurs-couples se justifie par le fait de chercher à respecter l'objectif initial qui se proposait d'effectuer le contournement et la saisie d'un objet décimétrique, à l'aide des seuls capteurs de la pince, en un temps de l'ordre de la seconde. Ceci implique à la fois des performances dynamiques conséquentes ainsi qu'une structure mécanique légère.

.../...

.../...

Par ailleurs, le fait d'avoir monté élastiquement l'extrémité des doigts pour permettre un serrage auto-bloquant atténue fortement les qualités dynamiques de la maquette, ce qui nous contraint à travailler à vitesse réduite en introduisant une temporisation entre deux impulsions successives de commande des moteurs.

Cette réduction de vitesse correspondant à une atténuation de dynamique résoud en même temps le problème de l'établissement d'un cycle limite inhérent à une commande tout ou rien.

Enfin, pour ce qui est du rattrapage du jeu articulaire, non seulement le jeu dépend de la position du doigt, ce qui nécessiterait une modélisation, mais surtout sa compensation entraîne un déplacement de l'extrémité du doigt supérieur à la portée des capteurs ce qui est tout à fait intolérable. Pour nos stratégies de préhension, on s'interdira tout changement de sens dans la phase de contournement de la pièce.

b) exemple de stratégie de préhension

Il s'agit de saisir une pièce à face supérieure plane et horizontale ayant des faces latérales perpendiculaires à celle-ci. La stratégie retenue consiste à :

- détecter la face supérieure de la pièce par un mouvement de translation verticale descendant,
- générer un mouvement horizontal des trois doigts dans un plan parallèle à la face supérieure de la pièce pour arriver à l'extrémité de celle-ci,
- entourer l'objet par un mouvement de translation verticale descendante,
- serrage et retrait.

Pour la génération de trajectoire, il est commode de relever expérimentalement l'ensemble des trajectoires utilisées, d'en mémoriser les points remarquables, et de les restituer en temps réel à l'aide de fonctions d'interpolation simples.

.../...

.../...

On remarquera aussi que pour l'étape de la stratégie consistant à générer une trajectoire dans un plan horizontal, seul un des doigts actifs est asservi en position, les autres se contentant d'adopter une position identique. La perte de vue de la pièce par le capteur n° 2 d'un doigt entraîne son immobilisation.

Sur cet exemple simple, il a été possible de mettre en évidence plusieurs points intéressants :

- l'intérêt, au niveau de la commodité de mise au point d'une stratégie, de disposer d'un ensemble de trajectoires d'évolution pour le contournement des objets,
- la nécessité de regrouper par doigt l'acquisition des informations et la commande des moteurs, d'où la structure multi-monochips,
- les limitations structurelles de la maquette : zone aveugle, portée des capteurs, difficultés de commande des moteurs, auxquelles il faut remédier avant de passer à la phase d'essais faisant intervenir le robot.

2 - 2 - Commande monoprocesseur

Nous présentons ici les essais effectués sur une architecture monoprocesseur bâtie autour d'une carte processeur SBC 80/30, d'une carte de conversion numérique analogique SGC 724 et d'une carte de conversion analogique numérique SBC 732 d'INTEL, le tout émulé à partir d'un système de développement MDS 231 sous ICE 85. Les programmes ont été écrits en PLM 80 (langage structuré pour des applications temps réel) et en assembleur (cf. annexe 3).

Afin d'illustrer et d'estimer l'objectivité de notre propos antérieur, nous avons développé le logiciel de commande autour du noyau du moniteur temps réel RMX 80 dont le rôle essentiel consiste à "faire plusieurs choses en même temps", en d'autres termes à permettre un pseudo-

.../...

.../...

parallélisme des activités par une gestion de l'allocation de la ressource principale qu'est le microprocesseur aux différentes tâches. On trouvera en annexe 4 quelques détails du fonctionnement interne de ce moniteur ; nous précisons ici simplement la structure d'une application construite autour de lui. On y trouve :

- le noyau qui assure l'ordonnement des diverses tâches système (Terminal Handler, Free Space Manager, ...) et utilisateur. C'est lui qui décide à tout moment à quelle tâche sera allouée l'unité centrale. Il dispose de l'état, de la priorité et du contexte de toutes les tâches,
- des tâches systèmes (terminal, disque souple, convertisseurs, analogiques et numériques, ...) qui assurent la communication avec les périphériques standards,
- des tâches de l'application écrites par l'utilisateur,
- une horloge gérée par le noyau de RMX 80 qui permet d'effectuer des travaux périodiques et de respecter les délais imposés par le système avant de poursuivre un travail ou d'en commencer un autre (activation périodique, attente, ...).

a) définition des tâches

- interprétation des stratégies et activation de l'observateur correspondant : toute stratégie étant décrite au moyen d'un jeu d'instructions spécifiques, ce module a pour fonction de concrétiser chaque étape de la stratégie par l'activation d'un observateur correspondant en lui transmettant les paramètres et contraintes correspondants,
- coordination des activités de l'effecteur : cette tâche s'occupera essentiellement à gérer les compte-rendus des observateurs, ce qui implique :

. une capacité à moduler une stratégie lorsque certaines de

.../...

.../...

ses étapes s'avèrent mal adaptées à la réalité physique,

- une aptitude à définir les nouvelles consignes de disposition destinées au vecteur lorsqu'un observateur en manifeste le besoin,

- dialogue bidirectionnel avec le vecteur : les fonctions de base de ce module consistent :

- en mode automatique, à coder et à transmettre au vecteur les consignes de dispositions élaborées par le module précédent, à interpréter et à reporter au niveau de la coordination des activités de l'effecteur les réponses du vecteur à ces nouvelles sollicitations, ou à transmettre au vecteur, lors d'activités non spécifiques, un retour proprioceptif ou extéroceptif relatif à l'environnement local de l'effecteur pour le contrôle de ces activités non spécifiques,

- en mode manuel, il s'agit de transmettre aux n actionneurs de l'effecteur les consignes élaborées par l'opérateur humain, soit par l'intermédiaire de n organes de commande, soit au moyen de fonctions élémentaires qui pourraient très bien être celles utilisées à la description des stratégies. Il s'agit également de restituer à l'opérateur humain un retour sensoriel traduisant l'état de l'environnement local ainsi que l'évolution de l'opération (retour d'effort),

- les observateurs : le découpage fonctionnel retenu implique la définition d'autant d'observateurs que de tâches élémentaires, elles-mêmes directement liées au nombre et au type d'instructions de description de stratégie.

b) Essais

Il est bien évident que pour notre application aucune des tâches

.../...

.../...

système (gestion d'un disque, ...) ne nous intéresse ; seul le noyau RMX 80 est utilisé et a du reste une longueur inférieure à 2 K octets.

Les remarques du paragraphe III - 2 - 1 concernant les performances de la maquette ne nous ont pas permis d'évaluer l'intégralité des aspects de cette commande monoprocesseur. Nous avons dû nous limiter à l'implantation de stratégies simples, ce qui ne nous a pas donné l'occasion de développer les aspects spécifiques des modules de coordination d'autant plus que le site expérimental ne faisait pas intervenir le robot.

La pièce utilisée était un cylindre d'un diamètre de dix centimètres, reposant sur une section plane et chanfreinée sur la partie supérieure. La stratégie de préhension se décomposait en cinq phases, chacune exécutée par une tâche correspondante :

- initialisation : fermeture de la pince,
- approche de l'objet : translation verticale jusqu'à détection de l'objet,
- translation horizontale jusqu'à détection du chanfrein,
- translation à 45 degrés jusqu'à détection de la génératrice du cylindre,
- recherche d'une position favorable de saisie, puis préhension.

L'enchaînement de ces cinq tâches, utilisant un ensemble commun de sous-programmes (commande des moteurs, acquisition des signaux capteurs, ...) constitue un exemple simple de définition d'observateurs.

Dans un cas plus général, il y aura autant d'observateurs que d'éléments de description de stratégie, ainsi que de tâches destinées à l'évaluation de l'état du système pour signaler les défaillances éventuelles et, le cas échéant, modifier des éléments de stratégie faisant appel à une ressource (capteur, ...) momentanément défaillante.

.../...

.../...

c) Conclusions

Ce paragraphe a mis en évidence l'intérêt d'utiliser un logiciel standard de type moniteur temps réel pour servir de noyau à l'implantation sur une structure monoprocesseur de la commande de l'effecteur telle qu'elle a été définie dans ce mémoire.

Mis à part l'aspect standard de ce logiciel qui implique une organisation rigoureuse de la programmation, il est tout à fait indiqué de décomposer une structure hiérarchique de commande en modules élémentaires de niveaux de priorités différents ayant accès au processeur en fonction de leur niveau de priorité, mais aussi de l'occurrence d'évènements extérieurs ainsi que de la circulation d'informations entre modules.

Ce partage de la ressource principale, le processeur, est effectué par le logiciel constituant le noyau d'un moniteur temps réel qui, dans le cas présent, est d'une longueur inférieure à 2 K octets. Il est certain qu'un logiciel de ce type a été conçu initialement pour constituer le système d'exploitation d'une application temps réel comprenant un certain nombre de périphériques tels que moniteur, clavier, disquettes, ..., ce qui n'exclut pas l'utilisation de son noyau comme base d'un système fermé (absence de périphériques).

III - 3 - ANALYSE ET INTERPRETATION

3 - 1 - Principes mécaniques

a) Rappel des options retenues

Cette pince, réalisée conformément aux choix définis lors de l'étude des capteurs pneumatiques intégrés à un organe de préhension (PAV 80), doit constituer l'organe terminal d'un robot et assurer la fonction de saisie automatique.

Son objectif final est d'être capable d'effectuer le contournement et la saisie d'un objet décimétrique, à l'aide de ses seuls capteurs,

.../...

.../...

en un temps de l'ordre de la seconde. Pour cela, les mouvements élémentaires pendant la phase de contournement doivent être exécutés en quelques centièmes de secondes, ce qui suppose une bande passante supérieure ou égale à 100 hertz au niveau des capteurs et du système de traitement de l'information.

Les capteurs de proximité équipant les doigts sont disposés de telle sorte que leurs domaines de détection se recouvrent dans la partie où des risques de collision avec l'objet sont à craindre pendant le contournement.

Comme l'indication de distance donnée par ces capteurs est assez sensible à l'orientation de la face de l'objet en regard, on décide de ne retenir de leur information que deux seuils de distance : trop près, trop loin. Dans ces conditions, on ne peut effectuer, pratiquement, que des mouvements par tout ou rien qui, pour respecter les impératifs de vitesse de saisie, doivent comporter de fortes accélérations.

Ces considérations conduisent tout naturellement à adopter des moteurs-couples.

L'opération de contournement d'un objet associe deux mouvements élémentaires :

- l'ouverture de chacun des doigts,
- un mouvement de descente du poignet qui, pour des raisons de précision et de rapidité de réponse, ne peut pas être confié au robot.

Pour respecter les impératifs de vitesse de saisie, les moteurs de la pince doivent être suffisamment petits et légers, conditions nécessaires pour réduire au minimum la constante de temps de mise en vitesse.

Leur couple est, de ce fait, relativement réduit, ce qui entraîne deux conséquences :

- la pince doit être assez légère pour ne pas surcharger le moteur du poignet. Son poids à vide ne doit pas dépasser 6 kgs.

.../...

.../...

- la force en bout de doigt est relativement modérée, d'autant que l'on veut des doigts assez longs pour enserrer des objets entre dix et vingt centimètres de diamètre. S'il n'est pas possible d'introduire au cours de la saisie d'autres artifices qu'un simple serrage des doigts, la charge que l'on peut ainsi soulever est assez modeste (un à deux kilos). Pour l'accroître, le mécanisme de fermeture des doigts est rendu irréversible et les doigts sont autoserrants. Un revêtement de surface approprié permet d'augmenter le coefficient de frottement et d'éviter le glissement.

Même en tenant compte des inerties ramenées au moteur, les constantes de temps mécaniques sont très faibles, typiquement de l'ordre de 10 à 20 ms. Pour assurer un freinage efficace avec une constante de temps équivalente, il est nécessaire de mettre l'induit en court-circuit, en limitant toutefois l'intensité au maximum que peut supporter le moteur. Cette contrainte est prise en compte au niveau de la commande.

b) Difficultés rencontrées

Les principaux problèmes que pose ce type de pince du point de vue de la mécanique sont essentiellement liés au fait que l'on cherche à alléger au maximum la structure pour améliorer les caractéristiques dynamiques. Celle-ci y perd en rigidité et il risque de s'introduire des jeux indésirables. Or, pour certaines incidences de la pièce, les courses utiles des doigts peuvent descendre au millimètre ce qui, ramené au niveau des engrenages, correspond à des jeux très faibles.

D'un autre côté, si l'on cherche à réduire l'entre-axe vis-roue, on introduit un risque de grippage.

Un dispositif à rattrapage de jeu serait concevable au prix d'une certaine complication de la mécanique.

Ainsi, même au niveau d'un simple modèle probatoire, une mécanique très soignée, coûteuse par conséquent, s'impose déjà.

.../...

.../...

Les constantes de temps de mise en vitesse qui ont été choisies pour les moteurs-couple de manière à tenir les performances dynamiques sont telles que les éléments mécaniques subsistent de fortes accélérations. Le fait d'avoir monté élastiquement l'extrémité des doigts pour les raisons indiquées s'avèrent néfastes dans la mesure où cette élasticité, du fait de l'inertie de l'extrémité du doigt, introduit un retard et une constante de temps dans le système. S'agissant d'une commande par tout ou rien, on risque de voir s'établir un cycle limite.

Une optimisation est à faire pour déterminer les bonnes lois d'élasticité à introduire.

Il était envisagé, pour approcher par étapes ces problèmes, de travailler dans un premier temps à vitesse réduite. Il faudrait pour cela alimenter les moteurs sous plus faible tension, mais l'influence de la pesanteur, selon la position, et les frottements secs conduisent rapidement à des limites. Le seul moyen pratique consisterait à modifier les rapports de réduction, ce qui conduit à des transformations de la maquette.

Ainsi, il est apparu, dès les premiers essais, que des améliorations mécaniques s'imposent si l'on veut pouvoir tirer pleinement partie de cette maquette. Une telle évolution, prévisible au demeurant, fait partie du programme d'étude complémentaire qui a été présenté conjointement par les partenaires.

c) Interprétation

Il apparaît une certaine difficulté à concilier les degrés de liberté passifs, nécessaires pour s'adapter au mieux à toutes les situations, et les performances dynamiques qui veulent que les signaux interprétés par le système de commande soient les conséquences des mouvements commandés et d'eux seuls.

Une solution évidente consiste à motoriser les mouvements passifs, mais ceci conduirait à un alourdissement et à un coût excessif de l'organe de préhension.

.../...

.../...

Pour la poursuite de l'étude, et au niveau des applications, une attention toute particulière devra être apportée à ces mouvements passifs. Il conviendra de ne retenir que ceux qui s'avèreront indispensables. De plus, on s'efforcera de limiter au maximum l'inertie des pièces correspondantes pour rendre négligeable l'effet des accélérations. On pourra également examiner si on ne pourrait pas introduire la compliance nécessaire non plus par des articulations supplémentaires, mais par une déformabilité de la structure des doigts.

Ces options seront à examiner au stade des applications industrielles.

3 - 2 - La commande

Les divers essais de saisie automatique effectués ont permis de mettre en évidence :

- l'ensemble des solutions matérielles d'implantation de la commande à trois niveaux telle qu'elle a été définie au chapitre 1 : structure monoprocesseur organisée autour d'un logiciel de base du type moniteur temps réel, ou architecture multiprocesseurs constituée de circuit monochip,
- la spécificité des modules logiciels en contact direct avec l'environnement physique : traitement de l'information tactile, commande des actionneurs,
- les limites structurelles de la maquette : jeu mécanique entraînant des difficultés à réaliser un asservissement de position de bonne stabilité, portée et angle d'ouverture des capteurs trop faible entraînant des zones aveugles rendant la détection des objets difficile, sinon impossible dans certaines situations.

Au sujet du choix de la structure de commande multiprocesseur à base de monochips ou monoprocesseur sur carte standard, disons qu'il n'y a pas de solution exclusive (voir paragraphe 2), mais que la solution

.../...

.../...

intégrant la structure informatique sur l'organe terminal simplifie les problèmes de liaison et procure à l'effecteur une indépendance et donc une flexibilité valorisante qui va tout à fait dans le sens de l'idée centrale de cette thèse.

3 - 3 - Conclusions

L'approche du problème de la préhension en partant de l'objet qui, par la variabilité des formes et l'extrême diversité des positions qu'il est susceptible d'occuper, exige de l'organe de saisie et de son mode de commande une très grande souplesse s'avère un concept extrêmement riche.

Ceci ne manque pas de se traduire, tant au niveau de la mécanique qu'au niveau des logiciels par un certain nombre de difficultés. Il en est qui découlent directement des options retenues pour les capteurs, les actionneurs, la mécanisation et la commande. S'agissant d'un modèle probatoire, étudié au demeurant avec des moyens très limités, il est bien évident que le dispositif réalisé ne peut pas être optimal et qu'un certain nombre d'améliorations restent à apporter au niveau de la maquette si on veut en exploiter toutes les ressources.

Il est d'autres difficultés, par contre, qui proviennent de la complexité des tâches que l'on se propose de faire accomplir à l'organe de saisie. Or celles-ci sont inhérentes à la nature même des tâches.

Il n'est, pour s'en convaincre, qu'à imaginer l'extrême diversité des objets qu'est capable de saisir une main humaine et de penser au petit nombre de ceux que pourrait prendre un organe de saisie non adaptatif quelles que soient par ailleurs la souplesse du robot qui le porte et la puissance de son logiciel de commande.

Il est exclu qu'un organe terminal puisse atteindre la dextérité de la main, mais bon nombre de tâches incluant entre autres le tri de pièces ou l'assemblage impliquent de saisir des objets de formes très différentes, pas nécessairement toutes définies au départ. L'approche

.../...

.../...

d'un objet par un référentiel qui lui est lié simplifie singulièrement la tâche.

C'est en réalité un champ nouveau de l'application de la robotique que l'on tente de pénétrer par le biais du concept proposé. Il ne faut voir, dans les premiers résultats obtenus, que des premières tentatives qui en appellent d'autres.

Au delà de cet aspect exploratoire, il faut bien s'interroger sur la finalité de l'opération entreprise.

La saisie d'un objet n'est pas une fin en soi. Si le système arrive à se placer de manière à ce que l'objet soit prenable, il n'en connaît pas pour autant de manière sûre la position. Il est des cas où ceci est sans importance, par exemple s'il s'agit d'extraire des pièces d'un vrac pour les présenter sur un tapis ou sur tout support approprié permettant de le reprendre ultérieurement.

Dans d'autres cas, l'opération de saisie se limite simplement à un recentrage à partir de petites déviations. La position peut dès lors être parfaitement définie. Un tel dispositif muni de capteurs peut alors sembler luxueux par rapport à un mécanisme capable d'effectuer également une telle saisie de manière quasi-passive.

L'intérêt est d'abord l'ensemble des conformations que peut prendre la pince ce qui la rend apte à remplacer une série d'organes spécialisés qu'il faut concevoir pour chaque nouveau type de pièce et changer à chaque pièce. Or cette dernière approche, qui correspond déjà aux versions actuelles les plus avancées de la robotique, est en fait, une négation de la robotique qui veut que l'outil soit entièrement adaptatif et que sa spécialisation soit obtenue par un logiciel éminemment interchangeable.

La différenciation des tâches qu'autoriserait un organe de saisie adaptatif permettrait de prolonger jusqu'au niveau de l'objet la souplesse d'action que l'on attend du robot.

Ce sont actuellement les tâches d'assemblage qui posent aux robots

.../...

.../...

les problèmes les plus sévères. En effet, si l'on peut imaginer organiser l'environnement du robot pour favoriser sa tâche, si l'on peut lui réserver des tâches répétitives donc fastidieuses, on ne peut pas empêcher que les pièces à assembler soient de formes très différentes. S'il n'en était pas ainsi, d'ailleurs, il n'est pas certain que le robot soit la meilleure solution.

Mieux sera connu ou reconnu l'environnement d'une pièce, plus précises seront la saisie et la présentation ultérieure. Il n'est pas exclu de prévoir ensuite, au niveau de l'assemblage, les moyens nécessaires de recentrage.

L'intérêt évident d'une telle pince est de permettre d'apporter successivement sur le montage la totalité des pièces qui constituent l'ensemble. Si l'on opte pour une structure en ligne où l'assemblage s'effectue de poste en poste par progression le long d'une chaîne, cette pince offre également une large flexibilité, ce qui répond au besoin de réalisation de courtes séries de pièces, objectif très largement recherché aujourd'hui.

Notons que la conception que l'on propose ici, qui consiste à doter l'effecteur d'une structure de commande lui permettant de résoudre de façon autonome la tâche qui lui incombe, se prête parfaitement à l'emploi de la pince aussi bien sur une chaîne que comme organe terminal de robot. Le choix à priori d'une telle pince n'implique donc pas une option préalable quant au type d'automatisation que l'on compte implanter, mais il assure, dans tous les cas, la possibilité d'introduire le maximum de flexibilité.

Ainsi, l'étape intermédiaire qui constitue la suite logique de ce programme, et qui vise à obtenir un ensemble autonome, apparaît d'ores et déjà comme permettant de réaliser un outil nécessaire en soi en tant qu'élément pour des ateliers flexibles.

L'effet de série devrait compenser la différence de coût due à la non spécificité de la pince au poste de travail où elle est affectée. Par contre, l'universalité qui en résulte autorise par la suite la constitution de chaînes remodelables au gré de l'utilisateur et susceptibles, par conséquent, d'intéresser un large éventail d'industries.

.../...

.../...

Parallèlement à cet objectif à moyen terme, il convient d'examiner les problèmes qui se posent à l'industrie de manière à développer, dans un premier temps, des applications plus spécifiques nécessitant la réalisation de pinces spécialisées. Les logiciels correspondants pourront être sensiblement réduits dans la mesure où les stratégies seront plus simples et le nombre de capteurs moins élevé. On trouve dans cette catégorie des systèmes de chargement-déchargement de machine ou des tris de pièces en nombre limité.

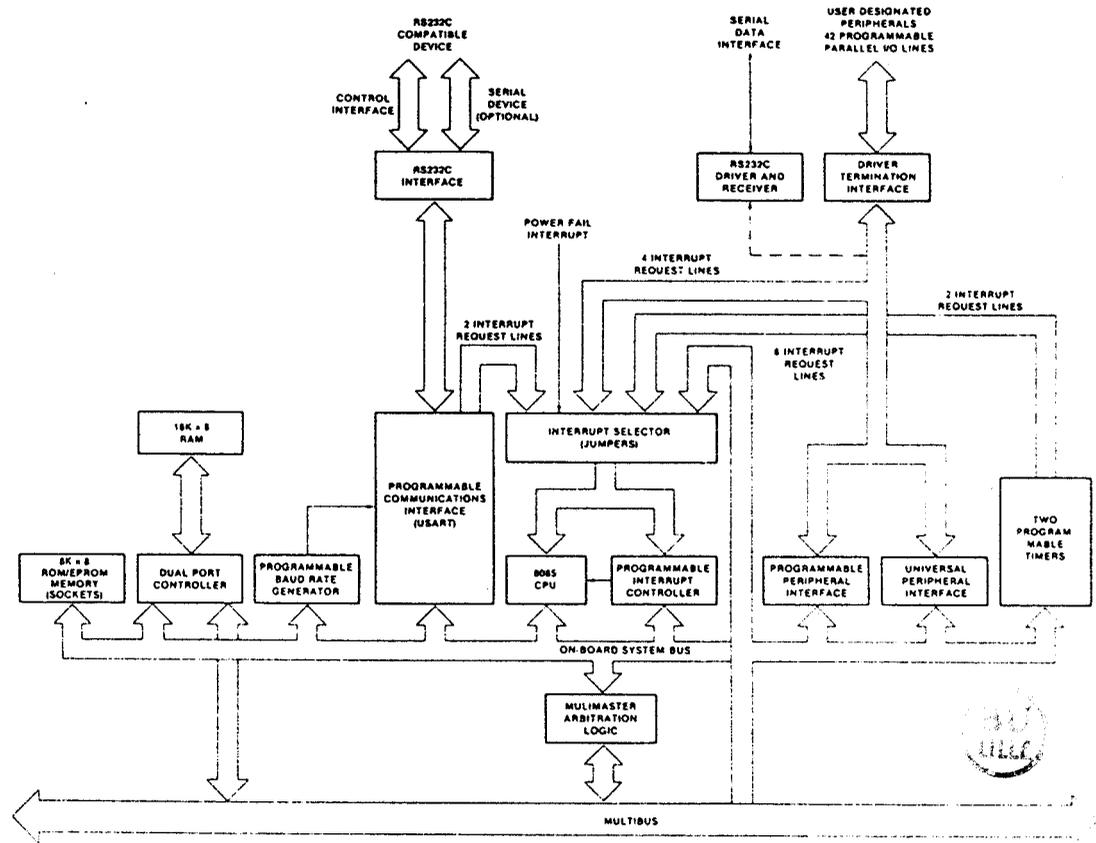
B I B L I O G R A P H I E

GAL 83 : P. GALAND : "Contribution à l'évolution de la fonction préhension des robots manipulateurs".
Mémoire de D.E.A. - Centre d'Automatique LILLE. JUIN 1983.

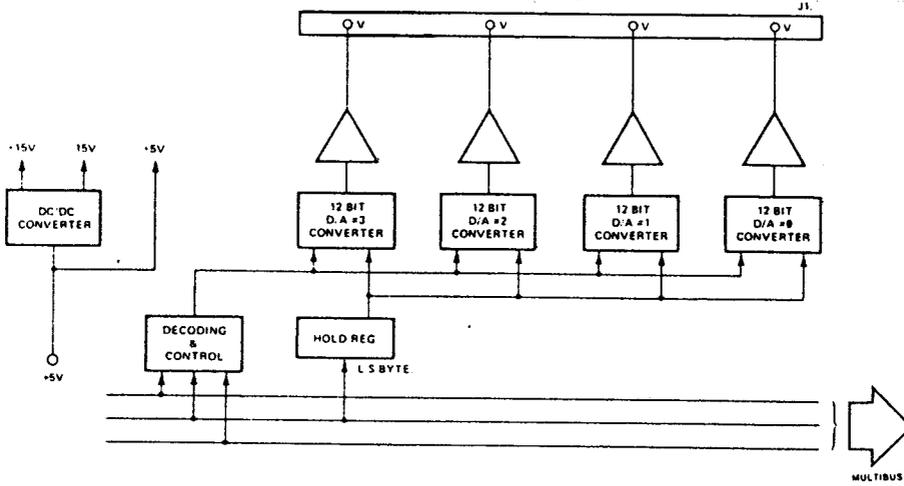
PAV 80 : PAVLIN C : "Capteurs pneumatiques intégrés à un organe de préhension".
Compte rendu de fin d'étude DGRST, décision d'aide n° 79.7.0298
Juillet 1980.

ANNEXE 3

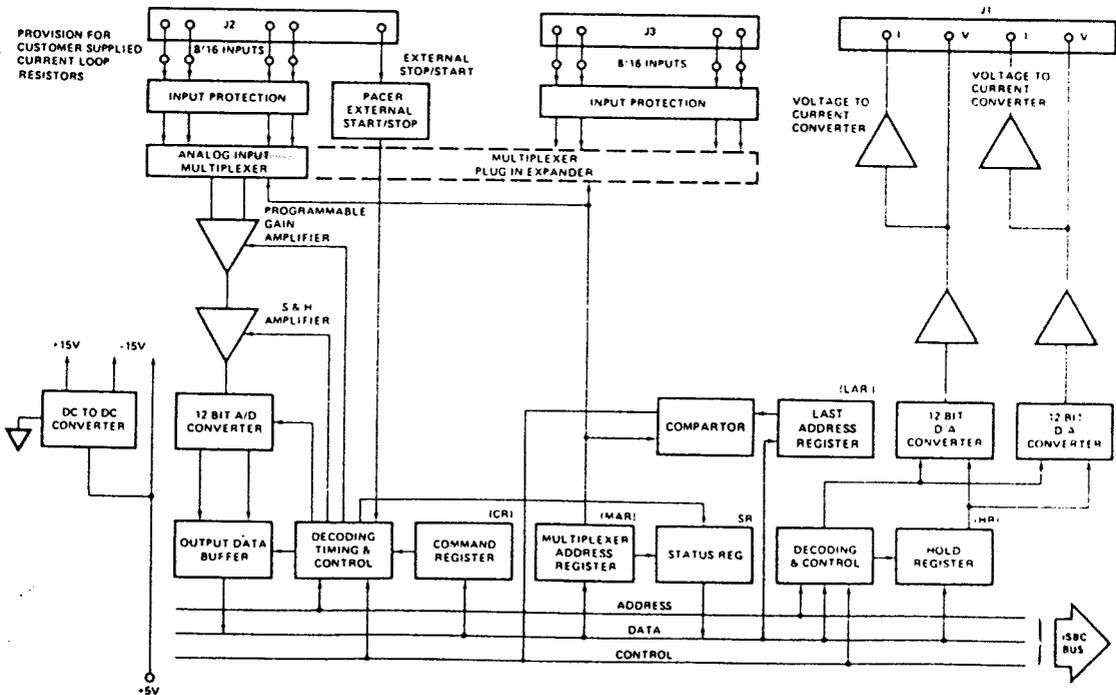
Caractéristiques de la carte SBC 80/30 :



Caractéristiques de la carte SBC 724 :



Caractéristiques de la carte SBC 732 :



MOTEUR COUPLE A AIMANT PERMANENT EN ELEMENTS PLATS

DIAMETRE : 48 mm COUPLE CRÊTE: 28 cm.N

Les bobinages indiqués ci-dessous représentent des valeurs typiques et ne sont pas limitatifs. Ces moteurs peuvent être bobinés pour des tensions d'alimentation et des caractéristiques différentes.

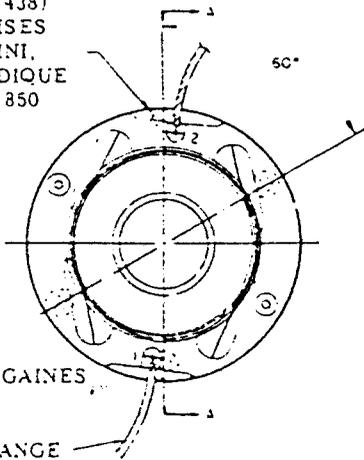
Ce moteur-couple plat, à aimant permanent à courant continu est livré en trois éléments séparés : un induit, une broche porte-balais et un anneau inducteur. L'anneau inducteur ne doit pas être en contact direct avec un support en matériau magnétique. L'excentricité rotor-inducteur ne doit pas excéder 0,0500 mm. Il est livré avec un shunt magnétique qui ne doit être retiré qu'après la mise en place du rotor. La durée de vie des balais dépasse normalement 10⁷ tours. Nous pouvons réaliser sur demande des moteurs avec arbre et roulements ainsi que des ensembles moteurs-génératrices tachymétriques.

PARAMETRES	UNITE	SYMBOLE	VALEUR
Couple crête	cmN	T _P	28,4
Constante moteur	cmN/√W	K _M	2,64
Constante de temps électrique	ms	τ _E	0,34
Constante de temps mécanique	ms	τ _M	13,4
Puissance à couple crête rotor bloqué	w	P _P	98
Coefficient source d'impédance nulle d'amortissement	cmN/rad/s	F ₀	0,038
visqueux source d'impédance infinie	cmN/rad/s	F ₁	2,34.10 ⁻³
Friction sèche	cmN	T _F	0,70
Ondulation moyenne de couple	%	τ _R	7
Nombre de cycles par tour	—	—	31
Élévation max. de températ. par watt	deg C	TPR	13,4
Température max. de bobinage	deg C	—	105
Moment d'inertie rotor	cmN.s ²	J _M	1,12.10 ⁻³
Facteur de puissance	cmN/s ²	P	7,06.10 ⁵
Accélération max. théorique	rad/s ²	α _M	25.10 ³
Vitesse à vide max.	rad/s	ω _{NL}	340
Masse du moteur	g	—	216

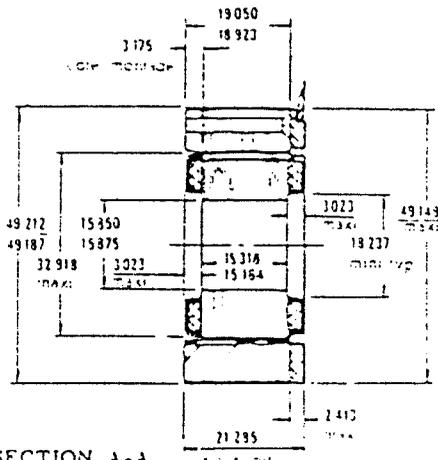


PARAMETRES	UNITE	SYMBOLE	CARACTERISTIQUES DE BOBINAGE A a H							
			A	B	C	D	E	F	G	H
Résistance c.c.(25°C)	Ohms	R _M	1,67	8,9	14,2	22,6	35,9	57,2	91,0	145
Tension à couple crête(25°C)	Volts	V _P	12,8	29,5	37,2	47,0	59,2	74,8	94,7	120
Courant à couple crête	A	I _P	1,0	3,31	2,62	2,1	1,65	1,3	1,0	0,83
Sensibilité de couple	cmN/A	K _T	3,7	8,8	11	14	17	22	27	34
Force contre-électromotrice	V/rad/s	K _B	0,037	0,086	0,11	0,14	0,17	0,22	0,27	0,34
Inductance	mH	L _M	0,5	3,0	4,8	7,6	12	19	31	49

4 TROUS N° 41 (Ø 2,438)
DEBOUCHANTS FRAISES
A 82° AU Ø 4,318 MINI.
ESPACES COMME INDIQUE
SUR Ø PERCAGE 42,850



CABLES N° 28 AWG GAINES
TEFLON TYPE E.
L = 254 mm MINI
N° 1 VERT, N° 2 ORANGE



SECTION A-A

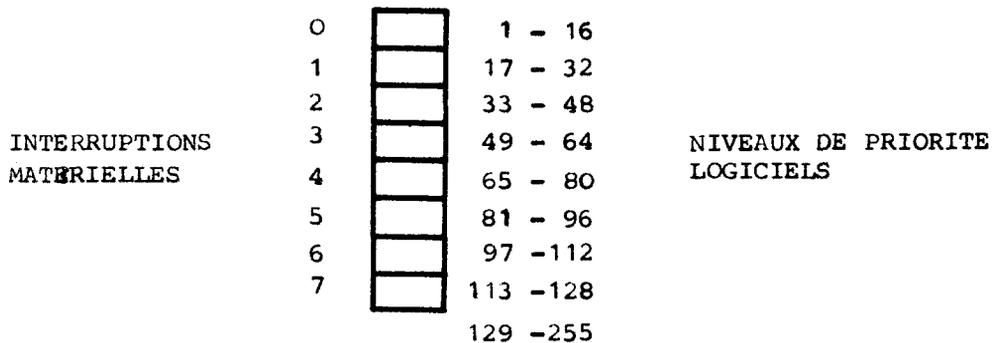
mm	in.
2,413	0,095
2,438	0,096
3,022	0,119
3,175	0,125
15,163	0,597
15,316	0,603
15,849	0,624
15,875	0,625
18,237	0,718
18,923	0,745
19,05	0,750
21,285	0,838
32,918	1,296
42,849	1,687
49,149	1,935
49,187	1,936
49,212	1,937

A N N E X E 4
=====

RMX 80 : MONITEUR TEMPS REEL MULTI-TACHES, 8 BITS

a) Fonctionnement interne

Le premier travail à effectuer est de segmenter l'application en un certain nombre de tâches, de façon à obtenir un logiciel modulaire. Après, il faut assigner une priorité aux tâches ainsi définies. RMX 80 autorise 256 niveaux de priorités entre les tâches. A chaque niveau d'interruption (0 à 7) sont liés 16 niveaux de priorité logiciels ainsi que le montre la figure ci-dessous :



Il est nécessaire, dans un système temps réel, que les tâches puissent communiquer entre elles. RMX 80 permet cette communication grâce aux messages et aux échanges. Un message est un bloc de données qu'une tâche envoie (SEND) à une autre tâche par l'intermédiaire d'un échange. En fait, RMX 80 ne poste que l'adresse du message afin d'éviter les pertes de temps occasionnées par l'envoi de plusieurs octets. Les messages contiennent les données et les informations de synchronisation entre les différentes tâches du système. Un échange est une adresse (ou boîte aux lettres) où RMX 80 range les messages en attente d'être pris par les tâches et met à la queue la liste des tâches qui attendent un message.

Les deux primitives les plus utilisées du noyau de RMX 80 sont RQSEND pour l'émission d'un message et RQWAIT pour la réception d'un message :

.../...

- RQSEND envoie un message vers un échange en postant l'adresse du message vers l'échange. Une tâche qui envoie un message vers un échange où une tâche de plus forte priorité est en attente provoque l'activation de cette tâche, et donc sa propre mise en attente,
- RQWAIT : si une tâche exécute un RQWAIT, elle se met en attente d'un message à un échange, pendant une durée déterminée ou indéterminée. Elle peut aussi demander sa mise en attente pendant un nombre de tranche de temps (l'unité étant de 50 ms).

Ces deux primitives permettent de réaliser les deux fonctions principales d'un système multi-tâches : la communication entre deux tâches et l'exclusion mutuelle. L'exclusion mutuelle garantit qu'une seule tâche obtient la ressource commune à un instant donné.

L'exclusion mutuelle peut être obtenue de la façon suivante :

- à l'initialisation du système, on définit l'échange COFFRE dans lequel on envoie le message CLE,
- pour accéder à la ressource commune, une tâche devra d'abord chercher "la CLE dans le COFFRE". Si le COFFRE est vide, il faudra attendre que l'utilisateur actuel de la ressource vienne remettre la CLE dans le COFFRE. En d'autres termes, chercher la CLE dans le COFFRE, c'est faire un RQWAIT du message CLE à l'échange COFFRE pendant un temps indéterminé, et remettre la CLE dans le COFFRE, c'est renvoyer le message CLE (en fin d'utilisation de la ressource commune) à l'échange COFFRE.

A côté des échanges de communication entre tâches, il y a des échanges d'interruptions, au nombre de huit (un échange par interruption hardware) et définis par RMX 80. L'apparition d'une interruption provoque un RQSEND automatique vers l'échange d'interruption correspondant où attend en permanence la tâche de gestion d'interruption.

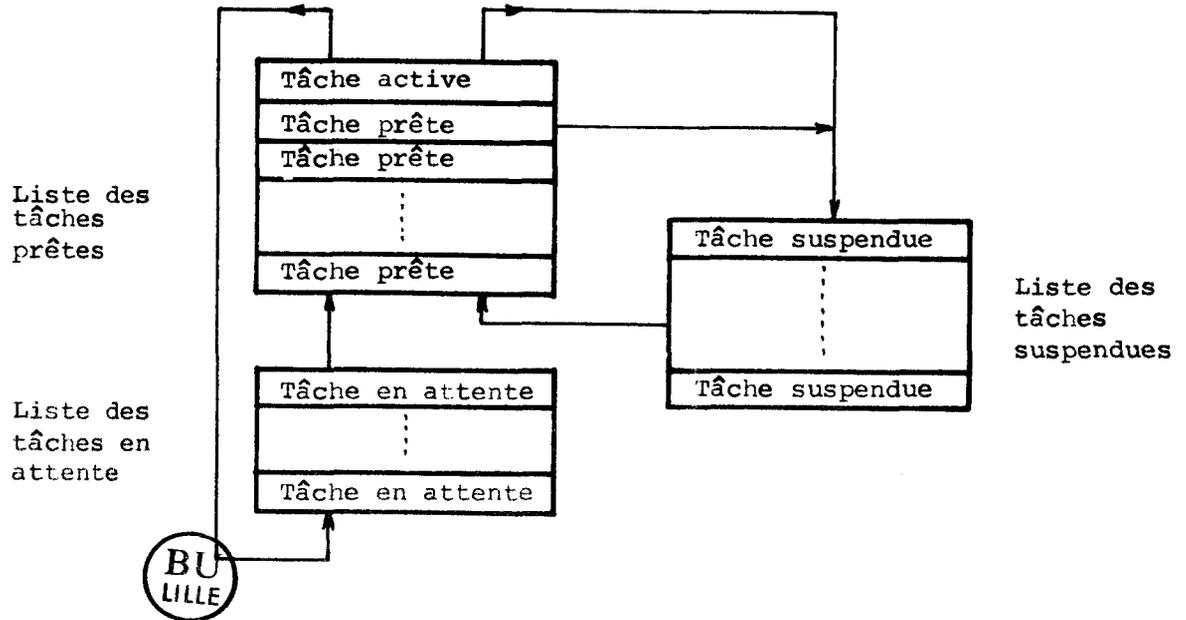
On notera que la gestion des files d'attente aux échanges est, pour les messages comme pour les tâches, de type FIFO.

.../...

.../...

b) les différents états d'une tâche

Ils sont au nombre de quatre, comme l'indique la figure ci-dessous :



- Tâche active : c'est la tâche qui s'exécute à un instant donné, c'est toujours la tâche de plus forte priorité de la liste des tâches prêtes,
- Tâche prête : toutes les attentes pour l'obtention d'un message ou d'un délai ont été satisfaites. La tâche attend que son niveau de priorité soit le plus fort dans la liste des tâches prêtes pour passer au niveau actif,
- Tâche en attente : la tâche attend un message ou l'écoulement d'un temps à un échange,
- Tâche suspendue : une telle tâche n'est plus scrutée par le noyau et n'est donc plus activable quel que soit son niveau de priorité.

Le passage d'une tâche active à une autre se fait lorsque :

.../...

.../...

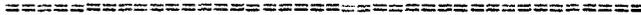
- la tâche active se met en attente d'un message ou d'un temps à un échange. Si un message est déjà disponible à l'échange, la tâche reste active, sinon la tâche passe dans la liste des tâches en attente et c'est alors la tâche de plus forte priorité de la liste des tâches prêtes qui devient active,

- la tâche active envoie un message vers un échange où une tâche de plus forte priorité qu'elle était en attente : celle-ci devient alors la tâche active,

- une interruption arrive. Si la tâche en attente de l'interruption est de plus forte priorité que la tâche active, il y a activation de la routine d'interruption,

- si une tâche de plus forte priorité que la tâche active était en attente d'un délai qui arrive à expiration, elle devient active.

CONCLUSIONS GENERALES



CONCLUSIONS GÉNÉRALES

A partir d'un problème spécifique de préhension, nous avons tenté de proposer une méthodologie générale et globale d'analyse et de mise en oeuvre de la commande d'un robot manipulateur.

L'approche fonctionnelle de ce problème conduit à une triple différenciation des activités d'un tel système :

- déplacement de l'effecteur par l'activation des $m - k$ actionneurs du vecteur,
- pointage de l'effecteur obtenu par les k actionneurs du vecteur à m degrés de liberté,
- opération de l'effecteur spécifique à sa structure et son emploi.

Les conséquences de cette disjonction fonctionnelle, au niveau de la commande, se traduit par :

- une simplification des algorithmes du niveau opératoire (modèle géométrique, génération de trajectoire) dans la mesure où il est plus facile et plus rapide de travailler sur deux systèmes d'équations respectivement de dimension m et k que sur un unique système de dimension $m + k$,
- une structure interne épousant la forme de ce découpage avec comme corollaire une interaction homme-machine non pas liée à la structure physique du robot manipulateur, mais orientée vers son utilisation.

On remarquera à ce sujet le parallèle existant entre un langage de programmation d'une machine informatique et les procédures de commande d'un robot manipulateur. Un langage informatique proche de la structure

.../...

interne de l'ordinateur et nécessitant la connaissance de celle-ci pour sa manipulation sera performant au niveau de la vitesse d'exécution mais fastidieux d'utilisation et de mise en oeuvre. Quant au langage évolué orienté vers une utilisation spécifique, son usage est plus confortable et plus immédiat au détriment du temps réel.

Il en sera de même pour les procédures de commande d'un robot manipulateur : liées à la structure du système, elles permettent une exploitation maximale de celui-ci moyennant une certaine lourdeur de commande, en revanche, orientées utilisation, elles présenteront des qualités de mise en oeuvre appréciables au détriment éventuellement (dans le cas d'un vecteur redondant) d'une exploitation non maximale de possibilités conjointes de déplacement et de pointage.

Mais la conséquence essentielle de cette approche fonctionnelle, et qui fait l'originalité de ce travail, se situe au niveau de la normalisation de la coopération vecteur/effecteur. En effet, nous disposons de deux entités structurellement distinctes pour concrétiser la triade fonctionnelle évoquée ci-dessus.

Jusqu'à présent, les constructeurs de robots ou les concepteurs de langage de programmation de robots n'ont pas mis l'accent sur cette coopération dans la mesure sans doute où jusqu'alors un effecteur se limitait souvent à un simple degré de liberté tout ou rien. Mais dans l'optique d'un organe terminal flexible, doté d'un nombre de degrés de liberté autorisant plusieurs types de préhension et équipé d'un sensorium appréhendant l'environnement local, l'opération de l'effecteur devient une fonction riche en possibilités et variantes nécessitant une organisation rationnelle de la coopération avec le vecteur.

Nos diverses remarques concernant l'organisation de la préhension chez l'homme, les aspects de la commande du vecteur, les effecteurs de première génération, nous ont conduit à distinguer deux états de fonctionnement d'un robot manipulateur doté d'un organe terminal de deuxième génération :

- un état caractérisé par une activité non spécifique de l'effecteur :

.../...

.../...

approche de l'objet à saisir, transfert, ...

- un second état caractérisé par une opération spécifique de l'effecteur : préhension, assemblage, suivi d'une pièce mobile...

Pour l'obtention d'une flexibilité maximale, nous avons montré que chacun de ces deux états du fonctionnement devait être pris en charge par l'entité de commande associée au vecteur dans le premier cas, alors que dans le second cas, l'opération, le pointage et le déplacement seraient élaborés par l'entité de commande associée à l'effecteur. En effet, cette conception se prête parfaitement à l'utilisation de la pince aussi bien sur une chaîne de montage que comme organe terminal de robot. Le choix à priori d'une telle pince n'implique donc pas une option préalable quant au type d'automatisation que l'on compte implanter, mais il assure dans tous les cas, la possibilité d'introduire un maximum de flexibilité.

Qu'un robot manipulateur soit programmé par l'intermédiaire d'une console de programmation ou d'un langage de programmation compilé, il est dans l'état actuel des choses indispensable de définir explicitement et dans le détail chaque phase de son évolution. Alors que dans la démarche proposée les phases caractérisées par une opération spécifique de l'effecteur sont intégralement prises en charge par celui-ci : il s'occupe de définir puis de transmettre au vecteur le déplacement et le pointage adaptés aux exigences de l'opération qu'il exécute. De ce fait, pour ces activités spécifiques, la programmation du robot manipulateur se résumera en la spécification du choix de la stratégie de préhension, accompagnée le cas échéant d'une fonction de caractérisation, ce qui représente une évolution appréciable de la relation homme-machine.

Cette structure de commande permet d'accueillir parfaitement l'ensemble des modes de conduite d'un robot manipulateur : commande manuelle, mixte, automatique, dans la mesure où comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, ce qui différencie un mode de commande d'un autre au niveau logiciel est la spécificité du module de génération de consignes de déplacement, d'opération et de pointage. En d'autres termes, un mode de commande peut mettre à contribution les ressources logicielles du vecteur et de l'effecteur (stratégies d'évolution, de préhension, ...) ou développer directement, à partir de critères internes, les consignes du robot manipulateur.

.../...

.../...

Enfin, nous aimerions mentionner une possibilité intéressante concernant l'utilisation d'un langage informatique, de développement récent, permettant une définition rapide, structurée et extensible de primitives pouvant constituer un langage spécifique comme le nécessite le développement d'un effecteur de deuxième génération. En effet, il est intéressant de disposer d'un langage imposant par sa structure propre les règles syntaxiques du langage de description de stratégies de préhension.

Le FORTH est un tel langage à la fois structuré, concis et d'exécution rapide, sans pour autant être "gourmand" en mémoire. Deux concepts fondamentaux sont à la base du FORTH : les notions de pile et de dictionnaire. La pile est une structure en mémoire vive de type LIFO destinée à manipuler l'ensemble des paramètres des primitives du langage. Quant au dictionnaire, il s'agit d'un répertoire de primitives constitué par les instructions de base du FORTH ainsi que de primitives spécifiques définies par l'utilisateur à partir des instructions de base. On peut ainsi étendre judicieusement les mots du dictionnaire par compilation après définition de ces mots, ce qui oblige ce langage à être structuré.

Le langage de description des stratégies de préhension serait alors constitué des nouveaux mots ainsi définis accompagnés de l'ensemble des instructions de base intervenant dans ces mots.



RESUME :

L'étude des performances de la manipulation chez l'homme fait apparaître une propriété essentielle concernant la structure de la commande utilisée : il s'agit d'une commande répartie ou dualisée, l'une associée aux activités de la main, l'autre aux activités de l'ensemble des segments corporels supportant la main. Ainsi toute activité gestuelle et manuelle est la résultante d'une collaboration horizontale et bidirectionnelle de ces deux entités de commande dont l'aboutissement se concrétise à travers une structure mécanique redondante mais médiocre, dotée d'un sensorium complexe et sophistiqué.

A partir de cette remarque développée au chapitre d'introduction, nous nous proposons dans un deuxième temps, par l'intermédiaire d'une description formelle des activités d'un robot manipulateur, de présenter clairement les activités spécifiques du vecteur et de l'effecteur, tant au niveau technologique que fonctionnel, ce qui nous conduira à proposer une structure générale de commande d'un robot manipulateur intégrant les différents modes de fonctionnement possibles : manuel, automatique, mixte ...

Cette structure générale sera ensuite développée dans les deux premiers chapitres de ce mémoire :

- le premier abordera les aspects spécifiques à la commande du vecteur et de l'effecteur,
- le second traitera dans un premier temps le problème de l'interaction avec l'environnement pour aboutir dans un deuxième temps à une structure de commande de robot manipulateur autorisant cette symbiose environnement-commande.

Enfin, en troisième partie, nous présenterons le résultat de nos travaux, à la base de ces développements, concernant l'étude et la réalisation d'un organe de préhension doté de facultés de perception et de commande permettant une intégration structurelle et fonctionnelle dans un schéma général de commande tel qu'il est défini ici.

MOTS CLE : Robotique, préhension, commande hiérarchisée, coopération.

