



Interaction sensori-motrice en robotique : application à la préhension automatisée pour une main articulée à plusieurs doigts

Christian Bard

► To cite this version:

Christian Bard. Interaction sensori-motrice en robotique : application à la préhension automatisée pour une main articulée à plusieurs doigts. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1994. Français. NNT : . tel-00344968

HAL Id: tel-00344968

<https://theses.hal.science/tel-00344968>

Submitted on 8 Dec 2008

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

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

THESE

présentée à

l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR spécialité INFORMATIQUE

Arrêté ministériel du 30 Mars 1992

**INTERACTION SENSORI-MOTRICE EN ROBOTIQUE : APPLICATION
A LA PREHENSION AUTOMATISEE POUR UNE MAIN ARTICULEE A
PLUSIEURS DOIGTS**

Christian BARD

Thèse soutenue le 8 Septembre 1994

Composition du jury :

Président :	M. Roger Mohr
Rapporteurs :	M. Michael Brady M. Jean-Paul Laumond
Examineurs :	M. Christian Laugier M. Michel Maurette Mme Jocelyne Troccaz

Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle
46, avenue Félix Viallet. 38031 Grenoble Cedex

Avant-propos

Les bas de pages de cette thèse contiennent deux petits **films** qui montrent les opérations de planification de notre système. Ces petits films peuvent être animés en feuilletant les pages de cette thèse. Pour le film des pages impaires, le film défile dans le sens décroissant de la numérotation des pages. Pour le film des pages paires, il défile dans le sens croissant de la numérotation des pages.

Le film du démonstrateur du projet Second (pages paires) montre la réalisation d'une tâche de « prendre et poser » d'un objet de type L . Un premier robot, supportant des caméras vient se placer pour regarder l'espace de travail d'un second robot. Ce second robot réalise ensuite une tâche de saisie et de pose de l'objet, avec une pince à deux mors parallèles. Ce démonstrateur intègre des tâches de perception, de planification (méthodes mixte et coordonnée) et d'exécution, autour de notre planificateur de saisie. Il s'agit d'une collaboration avec l'Université de Karlsruhe en Allemagne (méthode de planification coordonnée), de l'Université de Gênes en Italie (reconstruction volumique), et de l'Université d'Oxford en Angleterre (stratégies perceptives).

Le film d'une opération de saisie (pages impaires), simule l'insertion d'une bouteille dans un verre. Un robot supportant une main articulée (une main de SALISBURY) vient saisir une bouteille et simule l'insertion de celui-ci dans un verre. Bien que non réaliste en tant que telle (sauf pour une tâche « peg in hole »), cette simulation montre la prise en compte de la tâche à réaliser, dans le cadre de notre planificateur de saisie (§ 7.3.5). Cette petite séquence a été réalisée avec une méthode locale de planification de trajectoire sans collisions (méthode des contraintes).

Remerciements

Je remercie, tout d'abord, les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur caution :

- M. Roger Mohr, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- M. Michael Brady, Professeur à l'Université d'Oxford, Angleterre.
- M. Jean-Paul Laumond, Chargé de Recherche CNRS.
- M. Michel Maurette, Directeur du département « Systèmes Robotiques » au Centre National d'Études Spatiales de Toulouse.

Parmi les membres du jury, je tiens à remercier tout spécialement les rapporteurs, dont les commentaires ont permis l'amélioration significative du manuscrit original.

Je remercie, chaleureusement Mme Jocelyne Troccaz, Chargé de Recherche CNRS, et M. Christian Laugier, Directeur de Recherche INRIA, pour leur encadrement scientifique. Je

souhaite que tous les doctorants aient un encadrement comme je l'ai eu, aussi bien au plan scientifique que pour leur disponibilité de tous les instants.

Je remercie, enfin, tous ceux qui, à titres divers, ont contribué à ce travail, et dont le soutien m'a permis de le mener à bien. Notamment, Christine Milési, mon souffre douleur de chaque jour, José Najéra, pour son aide dans la réalisation des petits films, Ammar Joukhadar pour sa réalisation du noyau « modèles physiques ». Enfin, Béatrice et Yoann, qui m'ont soutenu pendant les moments difficiles.

Christian Bard
Grenoble, Septembre 1994.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Problématique de la saisie	7
2.1	Comment saisir un objet?	7
2.2	La Saisie Humaine	10
2.3	La Préconfiguration	13
2.3.1	Modèles Tâche	13
2.3.2	Modèles objet	17
2.3.3	Aspects décisionnels	19
2.4	La stabilité	21
2.4.1	Définitions	22
2.4.2	Notions mathématiques liées à la stabilité	23
2.4.3	La stabilité dans les systèmes de saisie	26
2.5	Accessibilité et évitement des collisions	31
2.6	La saisie sensori-motrice	35
2.6.1	Les capteurs pour la perception	36
2.6.2	Les capteurs orientés tâche	37
2.6.3	Les capteurs pour le contrôle/commande	40
2.7	Conclusion et orientation des travaux	41
3	Notre Approche	45
3.1	Orientations	45
3.2	Formalisation du problème de la saisie: les hypothèses	46
3.3	Schéma de notre approche	47
3.3.1	Description de la fonction: phase d'approche	48
3.3.2	Description de la fonction: préconfiguration	49
3.3.3	Description de la fonction: interactions main/objet	49
3.4	Le modèle de l'environnement	50
4	Phase d'approche: modèle morphologique	53
4.1	Le modèle morphologique	53
4.1.1	Informations pertinentes	53
4.1.2	Approches possibles	54

4.1.3	Notre approche : reconstruction 3D à partir d'une analyse tomographique	54
4.1.3.1	Principe général	54
4.1.3.2	Modélisation des tranches : encapsulation par <i>Ellipses</i>	55
4.1.3.3	Reconstruction 3D par <i>Cylindres Elliptiques</i>	63
4.1.3.4	Les axes de coupe Δ	65
4.1.4	Résultat de la reconstruction : le modèle morphologique	69
5	L'analyse de préconfiguration	71
5.1	Les types de préconfiguration	71
5.1.1	Caractéristiques d'une préconfiguration	71
5.1.2	Cas particuliers	73
5.2	Taxonomies des mains robotiques	73
5.2.1	Le modèle de OTD	75
5.2.2	Le modèle de la main de Salisbury	77
5.3	Modélisation d'une préconfiguration	79
5.3.1	La taille de la main	79
5.3.2	Les préconfigurations d'un cylindre elliptique	80
5.4	Exécution d'une préconfiguration	83
5.5	Exemple pour une pince simple à deux mors parallèles	85
5.6	Préconfigurations avec une main idéale minimale	86
5.7	Stratégies de fermeture des doigts	87
5.7.1	Stratégies en termes d'opposition	88
5.7.2	Stratégies en termes de contacts	88
5.7.3	Stratégies de re-placement	89
5.8	Prise en compte des contraintes de tâche	89
5.8.1	Connaissances a priori	91
5.8.2	Accessibilité pour la main	92
5.8.3	Collisions engendrées par la tâche : le volume accessible	92
5.8.4	Qualité d'une préconfiguration	92
5.8.4.1	Implication d'une préconfiguration sur la stabilité	92
5.8.4.2	Degré de stabilité	93
5.9	Résumé	95
6	Vers la manipulation : interactions main/objet	99
6.1	La méthode	99
6.2	La modélisation physique	100
6.2.1	L'idée de base	100
6.2.2	Modélisation des objets	102
6.2.3	Modélisation de la main articulée	103
6.2.4	Interactions main/objet	104
6.2.5	Mécanismes de génération du mouvement	106
6.3	Planification globale de saisie	107

6.3.1	Description « physique » d'une tâche de saisie	107
6.3.1.1	Le mouvement de la main articulée	107
6.3.1.2	Comportement dynamique des forces	108
6.3.2	Modélisation des contraintes du planificateur de préconfiguration . .	110
6.3.2.1	Exemple sur une sphère et un cylindre	112
6.4	Conclusion	113
7	Intégration et expérimentations	115
7.1	Intégration	115
7.1.1	La Plateforme	115
7.1.2	Démonstrateur du projet SECOND (film pair)	117
7.1.3	Comparaison avec des systèmes existants	119
7.2	La reconstruction du modèle morphologique	119
7.2.1	La reconstruction à partir d'un modèle CAO	119
7.2.2	Enseignements sur la reconstruction.	125
7.3	Préconfiguration et mouvement jusqu'au contact	126
7.3.1	Les mouvements de transfert	126
7.3.2	Préconfigurations : expériences et limites	127
7.3.3	Le mouvement de préconfiguration.	129
7.3.4	Être plus robuste face aux incertitudes : «Move/Explore»	129
7.3.5	Les contraintes de tâche : cas d'un assemblage (film impair)	132
7.3.6	Discussion	135
7.4	Interactions main/objet : expérimentations	135
7.4.1	Simulation de la saisie d'un cylindre avec la main MDS	135
7.4.2	Discussion : gestion des incertitudes	137
8	Conclusion	139
	Bibliographie	143
A	Construction des ellipses	151
A.1	Définition	151
A.2	Matrice d'inertie d'un composant C	151
A.3	Longueurs des axes	152
A.4	Intersection d'une ellipse et d'une droite	153
B	Algorithme de modélisation des coupes	155
B.1	Notations	155
B.2	Étapes de la modélisation 2D	155
B.3	Modélisation 3D	156

C	Calcul des préconfigurations	159
C.1	Notations	159
C.2	Calcul des articulations pour une préconfiguration	159
C.2.1	P_1 à P_3 pour OTD	160
C.2.2	P_1 à P_3 pour la main de Salisbury	161
C.2.3	Calcul de δ	162
C.2.4	Position du poignet	162
C.3	Résultats pour chaque préconfiguration	163
C.3.1	valeurs pour OTD	163
C.3.2	Valeurs pour la main de Salisbury	165

Table des figures

2.1	Préconfiguration de la main [Jeannerod 81].	11
2.2	Programme de contrôle coordonné hypothétique pour la saisie humaine, guidé par la vue. <i>lines brisées</i> , signaux d'activation, <i>lines pleines</i> transfert des données [Arbib 81].	12
2.3	Exemple de prise puissance (a) et de prise précision (b) pour un tournevis.	14
2.4	Oppositions caractérisant la préhension humaine [Iberall 87].	15
2.5	Taxonomie selon Cutkosky [Cutkosky 86].	16
2.6	Saisie englobante, latérale et de précision [Lyons 86].	17
2.7	Notation des contacts pour une main humaine [Ikeuchi 93].	21
2.8	Exemple de prise force-closure et form-closure.	23
2.9	Conditions géométriques de saisie pour deux contacts ponctuels.	26
2.10	Position des articulations par rapport aux trois points de contact [Pollard 89].	29
2.11	Exemples de saisie « stable » d'objets polyédriques, par une main articulée [Pollard 89].	29
2.12	Polygone d'équilibre [Francois 91].	30
2.13	Exemples de contacts non ponctuels à considérer.	30
2.14	Exemple de manipulation par la méthode des contraintes. Les contraintes sont exprimées de manière à garantir le contact entre les doigts et l'objet. L'image 1 représente l'état initial : l'objet est en contact avec les doigts. La séquence d'images représente le mouvement effectué sans perte de contact.	33
2.15	Description des phases et paramètres pour une tâche simple de manipulation [Howe 90].	38
2.16	mouvement de type « serpent » pour un manipulateur à huit ddl [Reznik 93].	39
2.17	main articulée à cinq doigts enveloppant une patatoïde [Reznik 94].	39
2.18	Schéma de commande de la main de Salisbury.	40
2.19	Différents types de prises pour une même entité géométrique : le cylindre.	42
3.1	Modèle utilisé pour la saisie. Le modèle, CAO ou Sensoriel, est transformé en modèle octree.	51
4.1	Exemple de saisie sur des objets planaires [Bard 90].	55
4.2	Exemple d'une goupille G : $Octree(G)$; des quadrees à différentes altitudes, suivant un axe de coupe Δ (axe z); les composants C issus des coupes.	56

4.3	Soit C un composant ayant la forme d'un rectangle. Son modèle symbolique est une ellipse respectant ses caractéristiques de longueur, de largeur et d'orientation (rapport conservé).	57
4.4	Différents cas de découpage d'un composant en sous-composants.	60
4.5	Les directions d'accès valides associées à une ellipse E_i . D_i^1 , D_i^2 , D_i^3 et D_i^4 représentent les quatre directions d'accès associées à E_i . $R(D_i^1)$ est le « couloir » emprunté par la main, associé à E_i (notons que ce couloir a été élargi en rapport à l'épaisseur d'un doigt de la main). Dans le cas présent, la direction d'accès potentiel D_i^1 n'est pas valide à cause de l'ellipse E_j de S_i qui intersecte $R(D_i^1)$	61
4.6	Construction d'un candidat $3D$ à partir de candidats $2D$: reconstruction d'un cylindre ayant un axe orienté selon un angle de 45° suivant Δ . Le seuil appliqué est $\epsilon = \frac{d}{\tan(45)}$. d est la distance entre deux coupes. Sa valeur correspond à une demi épaisseur de doigt. Une nouvelle direction de coupe Δ est estimée en calculant la direction qui minimise la distance géométrique (aux moindres carrés) entre les centres des ellipses E_i ($i = 1, \dots, 6$).	64
4.7	Reconstruction d'un cylindre par une multitude de cylindres elliptiques, alors qu'un seul suffirait.	67
4.8	Contre exemple à l'heuristique de sur-reconstruction. L'épingle en travers du cylindre a échappé à la reconstruction.	68
4.9	Un découpage différent sur deux coupes consécutives donne deux arbres d'ellipses différents. On perd alors la protubérance à la reconstruction. . . .	69
4.10	Aspects morphologiques des résultats de la reconstruction $3D$. Exemple sur une tasse, avec les accessibilités.	70
5.1	P_1	74
5.2	P_2	74
5.3	P_3	74
5.4	P_4	74
5.5	P_5	74
5.6	P_6	74
5.7	P_7	74
5.8	P_8	74
5.9	P_9	74
5.10	P_{10}	74
5.11	P_{11}	74
5.12	P_{12}	74
5.13	P_{13}	74
5.14	P_{14}	74
5.15	P_{15}	74
5.16	Possible extraction des concavités en analysant les cylindres les uns par rapport aux autres. Le second exemple montre qu'une coupe dans certaines directions, n'apporte pas l'information du trou existant.	75

5.17	Le modèle de OTD avec ces principales originalités . Huit degrés de liberté dont deux pour le pouce. Image (2) : saisie bi-digitale. Image (3) : orientation sphérique. Image (4) : orientation cylindrique. Image (5) : orientation digito-palmaire.	75
5.18	Le modèle de la main de Salisbury. L'image (2) représente une prise bi-digitale. L'image (3) représente une prise cylindrique/sphérique.	77
5.19	Les orientations de la main de Salisbury (MDS). Les petits cercles représentent la position finale des bouts de doigts, et les flèches, les directions de mouvement pour la fermeture.	78
5.20	Configuration des doigts suivant le type de contact.	85
5.21	Stratégies de re-placement.	90
5.22	Analyse de stabilité d'une préconfiguration	94
5.23	Schéma du planificateur de préconfiguration.	96
6.1	Relations de type ressort linéaire et de type ressort angulaire.	102
6.2	Représentation de la main de Salisbury par des particules élémentaires. . .	104
6.3	Planification du mouvement d'une main articulée attirée par des bouts de doigts fictifs.	108
6.4	Relations de type R_L entre les points de contact pour garantir que la somme des forces extérieures soit nulle. Dans ce cas, la longueur de stabilisation des relations est égale à la distance entre les sphères.	109
6.5	Les étapes de la stabilité : (E_1) la main s'approche au contact de l'objet par rapport à sa préconfiguration, (E_2) compliance de l'ensemble main/objet. .	111
6.6	Description des étapes de liaisons sur une sphère et un cylindre, pour des saisies sphérique et cylindrique du bout des doigts.	112
6.7	Les relations R_L dépendent du type de contact souhaité : (1) contact Bt , (2) contact Pu , (3) contact Pa	113
7.1	Environnement de programmation.	116
7.2	Plateforme du démonstrateur du projet SECOND.	117
7.3	Analyse de pré-saisie l'objet de type L . Image 1 : analyse sans tenir compte de l'accessibilité du robot. Image 2 : accès de saisie possibles pour le système bras/pince.	118
7.4	Représentation d'une sphère munie de deux protubérances. 90 coupes ont été nécessaires sur l'axe $\vec{z}$ (image 2) et $\vec{x}$ (image 3). Temps de construction moyen de l'octree : [60] ms. Image 2 : temps de construction moyen des ellipses [1120] ms; temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques [740] ms. Image 3 : temps de construction moyen des ellipses [880] ms; temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques [2450] ms.	121
7.5	Représentation d'un combiné téléphonique. 120 coupes suivant sa plus grande longueur. Temps de construction moyen de l'octree : [3190] ms. Temps de construction moyen des ellipses [2430] ms. Temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques : [4760] ms.	122

7.6	Reconstruction d'une « banane ». L'axe de coupe choisi est $\vec{x}$. La reconstruction des deux bouts de la « banane » donne deux nouveaux axes permettant une meilleure reconstruction de chacun d'eux : directions (0.822 0.0 – 0.569) et (0.849 0.0 0.528).	122
7.7	Reconstruction d'un cylindre ayant subi une rotation (haut-gauche). Bien que la coupe ressemble plus à un parallélépipède qu'à un cylindre (bas-gauche), les proportions permettent d'obtenir un cylindre elliptique correct par rapport à son modèle CAO (droit).	123
7.8	Représentation d'un combiné téléphonique après « lissage ».	123
7.9	Bien qu'un doigt puisse passer entre les deux ergots du U, les prises par le haut ne sont pas valides. Les deux cylindres elliptiques s'intersectent. . . .	124
7.10	Reconstructions de formes patatoïdales. Si on ne peut distinguer l'objet à saisir dans le modèle volumique, tous les cylindres elliptiques reconstruits (suivant différentes coupes) sont potentiellement saisissables.	124
7.11	Cas d'un environnement dense.	126
7.13	Exemples de préconfigurations possible sur différentes tailles de cylindres elliptiques (pour MDS). (1) Épingle : préconfiguration de type $P_{7,10}$ pour le côté, et $P_{7,8,10}$ pour le haut. (2) Cylindre long et (3) « Sphère » : tout type. (4) Cylindre trop gros.	127
7.12	Mouvement, préconfiguration, et saisie « sphérique » du système bras/OTD sur un « pommeau ».	128
7.14	Exemple de préconfiguration pulpaire sur un cylindre, en simulation. L'image 2 montre la reconstruction avec les obstacles. La reconstruction du modèle pour l'octree est de [290] ms, les ellipses [2810] ms, et pour les cylindres elliptiques [2380] ms. La table et les piliers sont modélisés par un seul cylindre elliptique. Les images (3) à (8) illustrent une saisie pulpaire, jusqu'au contact.	129
7.15	Exemple de préconfiguration pulpaire et fermeture jusqu'au contact sur un cylindre, avec la main MDS.	130
7.16	Exemple de recherche d'une stratégie de fermeture pour une main idéale, pour la saisie d'une sphère. Les images (1) à (5) montrent les doigts attirés par le centre de la sphère jusqu'au contact. L'image (8) correspond à une position de contact nominale, où les forces et les moments s'annulent. Dans cet exemple les efforts appliqués par les doigts sont identiques.	132
7.17	Exemple de recherche d'une stratégie de fermeture pour une main idéale, pour la saisie d'une ellipsoïde, dont les caractéristiques sont proches d'un cylindre. Les images (1) à (5) montrent les doigts attirés par les bords du cylindre, jusqu'au contact. L'image (8) correspond à une position de contact nominale, où les forces et les moments s'annulent. Dans cet exemple les efforts appliqués par le pouce annulent la somme des efforts appliqués par les autres doigts.	133

7.18	Exemple d'un emboîtement d'une bouteille dans une chope. Bien que non réaliste, cet exemple montre la partie de l'objet à ne pas saisir (image 2). Cette partie a été analysée comme un contact cylindrique.	134
7.19	Re-positionnement de la main avant la saisie. Ce re-positionnement entraîne une saisie palmaire.	136
7.20	Saisie pulpaire d'un cylindre. Les paramètres liés à la friction ont été augmentés par rapport à la figure de saisie palmaire (figure 7.21).	137
7.21	Glissement d'un cylindre au moment de la saisie avec une main articulée. Glissement causé, soit par de mauvais paramètres de contrôle (ici, les paramètres liés à la rigidité), soit par une mauvaise configuration initiale avant la saisie.	137
8.1	Perspectives futurs : une intégration globale pour aboutir à la manipulation.	141
B.1	Procédure « Tree ».	156
B.2	Procédure « Creation_composants_3D ».	157
C.1	Exemple de calcul des configurations distales et proximales pour une pré-configurations.	160

Chapitre 1

Introduction

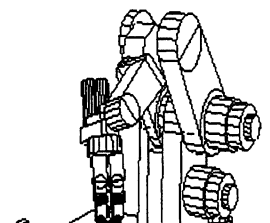
La saisie autonome

La main est une structure osseuse et articulaire dont l'apparition le long de l'évolution humaine est très ancienne. Son développement au long du temps a abouti chez l'homme à une forme si perfectionnée du point de vue anatomique et si performante du point de vue fonctionnel qu'on caractérise parfois l'espèce humaine par l'utilisation qu'elle fait de ses mains pour sa survie et sa maîtrise de l'environnement.

L'histoire montre que de tout temps, l'être humain a essayé de créer des machines pouvant le remplacer. La fonction effectrice que représente la main, n'échappe pas à cette règle.

Le besoin d'un outil préhenseur s'est fait sentir dès que l'on a commencé à construire des robots pour automatiser les chaînes de production. Ces outils issus de l'automatisation ont souvent permis de saisir des classes d'objets très spécifiques, et ayant de ce fait peu de versatilité. Les besoins croissants d'automatisation et de ré-utilisabilité des robots, ont peu à peu amené à des outils de « préhensions » plus génériques. Les robots industriels tels que l'on peut les observer sur les chaînes de montages de voitures ou autres, ne possèdent pas à proprement parler de préhenseurs, mais le plus souvent d'un « chargeur » qui permet le changement d'outils pour la réalisation de tâches, comme le vissage, la soudure, la peinture, etc Plus communément, ces robots utilisent des outils de préhension engendrant une saisie par adhérence (par le vide, la magnétisation . . .) ou par serrage.

Cependant, tous ces préhenseurs restent assez spécifiques par rapport aux objets manipulés ou aux possibilités de prises. Les efforts de la recherche ont donc porté bien évidemment sur des mains articulées dans l'optique d'approcher les fonctionnalités de la main humaine. Notamment dans le domaine bio-médical, pour la conception de prothèses et plus particulièrement en Robotique, où le préhenseur peut avoir toute la flexibilité et dextérité requise.



En robotique, dans le cadre de concepts tels que la programmation de niveau tâche et l'autonomie, l'utilisation en extrémité d'un bras manipulateur d'un outil de préhension de type main articulée, permet la réalisation d'une grande variété de tâches, y compris des tâches de manipulation fine comme l'assemblage, sans multiplication des dispositifs matériels et donc sans accroissement de la charge utile. Cet aspect est très important dans les applications spatiales, par exemple. Dans le cadre de la manipulation fine, l'utilisation d'une main revêt une importance particulière. Elle permet de corriger les défauts de positionnement sans déplacer le manipulateur (bras support de la main), le relayant à une fonction de porteur. De plus, l'utilisation de telles mains augmente la sûreté de fonctionnement. Notamment, parce que la saisie est potentiellement envisageable en mode dégradé. On peut toujours saisir avec deux doigts (suivant certaines limites) au cas où, un ou plusieurs des autres doigts tombent en panne.

On peut, à loisir continuer à énumérer les bienfaits de l'utilisation d'une main articulée. Cependant, à l'heure actuelle, si de telles mains existent dans certains laboratoires de recherche (dont le nôtre), leur utilisation est complexe à cause des dispositifs de commande de bas niveau qui leur sont associés : il est en effet difficile de spécifier une tâche, même simple, en donnant les valeurs successives des articulations des différents doigts. La difficulté s'accroît si, en plus, la tâche est partiellement spécifiée. Ce qui est le cas dans le type d'application que nous visons. La téléopération n'est pas non plus toujours envisageable, spécialement dans le cadre de la robotique d'exploration planétaire pour laquelle les temps de communication avec le segment sol sont trop importants. L'exécution des tâches ne peut se faire sans un contrôle constant, guidé par des informations issues de capteurs.

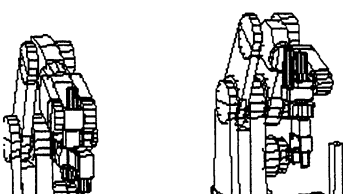
Pour arriver à l'autonomie des robots avec l'utilisation de telles "mains", la première étape de notre travail concerne la saisie automatique des objets. L'étude de l'automatisation de la tâche de préhension constitue un pré-requis à l'automatisation de la quasi-totalité des autres tâches, et notamment la manipulation d'objets.

Le contexte applicatif

La problématique générale que nous abordons dans ce mémoire concerne la planification de saisie avec une main articulée, d'objets quelconques dans un environnement plus ou moins structuré. Cette problématique cadre au mieux avec l'utilisation de telles mains dans l'espace.

En effet, plaçons notre dite main, au bout d'un bras de robot et plaçons ce robot sur une base « lunaire » ou dans une navette spatiale. Ce cadre n'est pas totalement irréaliste. Il existe déjà des navettes, pas encore de bases lunaires, mais cela ne devrait tarder. Les tâches pouvant alors être effectuées sont multiples :

- Il s'agit d'abord, de tâches de maintenance : manipulation de câbles, de protections thermiques, assemblage/désassemblage de connecteurs ou cartes. Cela concerne



aussi la capture d'objets bougeant ne subissant pas la pesanteur ou encore, le déclenchement de mécanismes (appuyer sur un bouton). Dans cette énumération de travaux de maintenance, les tâches sont bien spécifiées, les objets à saisir aussi, mais l'environnement change constamment. Les conséquences de ces tâches de références sont multiples. Ils concernent l'accessibilité, les types de prises, le domaine accessible, le volume de travail, les forces à appliquer, la précision en position et en vitesse, etc ...

- Il s'agit aussi de la collecte d'échantillons planétaires. C'est une tâche complètement différente. Les objets ne sont pas connus, l'environnement non plus. Les capteurs embarqués ont alors un rôle prépondérant dans la récupération d'informations sur l'environnement.

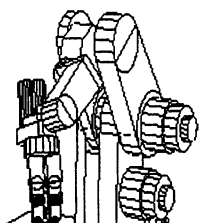
Comme on peut le voir, le cadre abordé est un cadre assez général. Les objets peuvent avoir une forme quelconque, le contexte applicatif est cependant connu. Plus particulièrement, le problème que nous abordons dans ce mémoire est de doter une main articulée, placée en extrémité d'un bras de robot, des capacités nécessaires à la réalisation autonome de la saisie d'un objet.

Nous venons de voir une application représentative du problème que nous voulons aborder. Cependant, plus proche de nous, dès qu'une main est placée en extrémité d'un bras de robot, ce travail peut être utilisé. Il s'intègre dans des programmes nationaux et européens, (dont le projet SECOND¹). La planification de saisie autonome est un problème fondamental dans ces programmes, où l'on veut doter un robot de facultés d'action et de manipulation de son espace de travail. À ce titre, la saisie a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche. De l'ensemble de ces travaux, il ressort que c'est un problème complexe.

Cette complexité se traduit tout d'abord par la recherche de prise. En effet, il existe une infinité de configurations de contact possible entre un objet et une main. Ensuite, il s'agit d'amener la main à une configuration de contact choisie. Entre en jeu, la complexité de la planification du mouvement. La planification du mouvement est aussi un problème fondamental en robotique. À cela, vient se greffer la complexité des interactions entre les doigts de la main et les objets à saisir, où les notions de contact et des forces appliquées sur l'objet, c'est-à-dire la notion de stabilité est prépondérante pour la réussite de la saisie.

La saisie s'intègre dans un contexte global de planification, tenant compte de l'environnement, de l'objet à saisir et de la tâche à effectuer une fois la saisie terminée. Notre travail se situe dans cette perspective de vision globale.

¹Projet Esprit-Bra3 < SEnsory CONtrolled Dextrous robots >.



La contribution

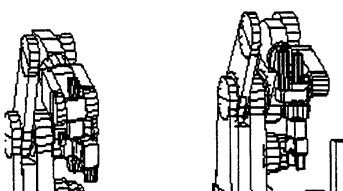
Notre contribution concerne la planification de saisie autonome, avec une main articulée. Elle s'articule autour de la résolution de deux types de problèmes :

1. Le premier problème consiste à choisir une stratégie de saisie. Cette stratégie repose sur l'analyse de critères géométriques et des contraintes de tâches. Ce premier problème a été résolu à l'aide du concept de « préconfiguration », qui permet de réduire la complexité de la recherche de prises. En premier lieu, on extrait des informations nécessaires au choix d'une prise. Il s'agit de déterminer une position de la main autour de l'objet. Cette position est décomposée dans un premier temps, en une préconfiguration de la main par rapport à l'objet. Elle décrit non seulement la position de chaque articulation, mais prend également en compte des critères de forme, de stabilité, d'accessibilité sur l'objet dans son environnement. C'est la description de la prise. Dans un second temps, un mouvement complet bras+main, amène la main suivant la configuration décrite précédemment. Cependant, la tâche consistant à positionner les doigts à un endroit très précis, est pratiquement impossible à concrétiser du fait des incertitudes au moment de l'exécution effective de la prise.
2. L'étude du deuxième problème a pour objet de conclure sur la faisabilité de la stratégie de saisie choisie (la stabilité en particulier), et de permettre la détermination du type de contrôle à appliquer sur la main. Il a été résolu à l'aide du concept de « modèle physique », qui permet de modéliser de manière appropriée les interactions main/objet. Cette modélisation permet de prendre en compte les contacts voulus entre l'objet et la main, les directions de mouvement des doigts, et enfin, les contraintes physiques liées à l'interaction des doigts et de l'objet.

Notre contribution principale est de proposer une méthode globale de planification de saisie apte à prendre en compte la chaîne complète. Dans un souci constant d'intégration globale, le principe de ces deux techniques, ainsi que la manière de les combiner, est décrit pour résoudre le problème de la saisie. Notamment nous décrivons comment à partir d'une observation simple venant de la saisie humaine : la préconfiguration des doigts, on a pu extraire une méthode automatique de saisie pour une main robotique.

La plateforme expérimentale

Pour résoudre cette opération de saisie de manière automatique, nous possédons une main articulée. Cette main articulée à plusieurs doigts comporte un nombre important de degrés de liberté (ddl). Une main de type « Salisbury » (du nom de son concepteur) à neuf ddl est disponible dans notre équipe (MDS). De plus, le Centre National d'Études Spatiales met au point une main articulée dite « Organe Terminal Dextre » (OTD) à huit ddl. On dispose d'un modèle cinématique et d'un modèle géométrique de ces mains. Cependant, notre connaissance des problèmes de la saisie au sein de notre équipe, pour



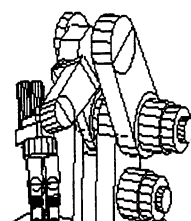
des mains simples à deux mors parallèles [74], nous pousse à réaliser un système autonome pouvant être utilisé aussi bien pour des mains simples que les mains citées précédemment.

Les mains articulées sont supposées équipées de capteurs tactilo-kinesthétiques, permettant de détecter les contacts au moment de la fermeture des doigts sur l'objet. Ces capteurs peuvent être des capteurs de forces et/ou des capteurs permettant de localiser le contact et la forme locale de la surface de l'objet (capteurs tactiles).

Enfin, un modèle géométrique de l'objet à saisir, et de l'environnement de saisie, est connu. Ce modèle peut venir, soit d'une modélisation CAO, soit de la perception. Cependant, aucune hypothèse n'est faite sur la forme des objets à saisir.

Plan de ce mémoire

Le plan de ce mémoire suit l'ordre logique de la réalisation de la saisie d'un objet, avec une main articulée. Les orientations de notre approche sont décrites au chapitre 3. La première étape concerne la récupération à partir d'un modèle CAO (ou perceptif) d'informations sur l'objet (chapitre 4). La seconde étape concerne le choix d'une configuration de contact sur l'objet (chapitre 5). C'est la description d'une prise. La troisième étape décrit la faisabilité d'une prise (chapitre 6). Enfin, un mouvement complet bras+main, amène la main suivant la configuration décrite précédemment (chapitre 7). Mais avant cela, la problématique de la saisie est exposée à travers différents travaux pertinents (chapitre 2).



Chapitre 2

Problématique de la saisie

La main : « l'instrument des instruments »
Aristote.

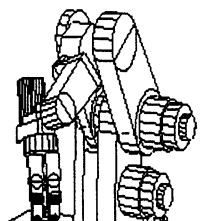
Toute la complexe organisation anatomique et fonctionnelle de la main concourt à la préhension. La préhension s'articule autour du concept de prise. **Une prise décrit une situation de contact entre les entités d'un outil de préhension, en l'occurrence les doigts d'une main, et un objet.** Cependant, il n'existe pas un seul type de préhension, mais de très nombreux, qui correspondent à trois grand groupes de prises : les prises avec la pesanteur, les prises actions, et les prises proprement dites, ne concernant aucune des deux premières catégories. *Les prises avec pesanteur* : elles utilisent la pesanteur pour assurer la stabilité de l'objet dans la main. *Les prises-actions* réalisent une action en prenant l'objet : une partie de la main contribue à la tenue de l'objet, tandis qu'une autre partie réalise une action sur celui-ci. Ceci ne résume pas toutes les possibilités d'action de la main : outre la préhension, celle-ci est capable de percussions, de contact et d'expression gestuelle [53]. Nous n'étudierons que la préhension, qui est un domaine assez vaste et qui représente la fonction essentielle de la main. Particulièrement lorsque l'on se situe dans le domaine de la robotique.

2.1 Comment saisir un objet ?

Dans le domaine de la robotique, le problème général abordé concerne la saisie d'un objet avec un outil préhenseur. Cette situation de contact est représentée par une structuration ou position des doigts de la main par rapport à l'objet. L'union de toutes ces positions constitue l'espace des configurations de la main.

Dans un contexte d'automatisation, quand il s'agit de résoudre le problème décisionnel lié à une opération de saisie d'un objet O à l'aide d'un outil M , en l'occurrence une main articulée, pour réaliser une tâche T donnée, tous les problèmes se concentrent autour de la notion de prise. Les questions à résoudre sont les suivantes :

1. Quelle prise choisir, c'est-à-dire comment prendre O ? Ou encore, quelles parties de la main à mettre en contact avec quelles parties de l'objet ?



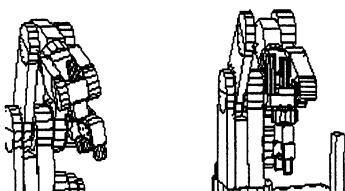
2. La prise choisie est-elle accessible? Cette accessibilité peut être locale, limitée à l'objet ou une partie de l'objet. Elle peut être en même temps globale. Le voisinage de l'objet est alors considéré.
3. La prise est-elle compatible avec le contexte de manipulation, c'est-à-dire permet-elle de réaliser la tâche spécifiée?
4. L'équilibre stable M/O est-il réalisé avec la prise choisie, l'objet ne risque-t-il pas de s'échapper de la main au moment de la saisie?

Dans le domaine de la robotique, nous sommes encore loin de toutes les possibilités de la main humaine. Cependant, en ce qui concerne l'automatisation de la saisie, pour des outils spécifiques, et pour certaines catégories d'objets, des progrès notables ont été réalisés, notamment pour des pinces à deux mors parallèles et des objets polyédriques [74, 49, 56, 100]. Dans ce cas précis, une méthode générale pour automatiser l'opération de saisie, s'est appuyée sur une analyse de la géométrie de l'objet à saisir, mais aussi, sur une analyse de l'outil et de ses relations avec l'objet pour un mode de saisie dite latérale, caractérisé par un contact de la surface des mors avec l'objet.

Dans PERTIN-TROCCAZ [74], le principe de base se concentre sur la recherche d'entités géométriques de type plan, droites et points, répondant au critère de parallélisme imposé par les mors de la pince. Ces prises sont ensuite filtrées grâce aux autres critères géométriques issus de la pince. La méthode se décompose en deux phases successives. Une première phase se concentre sur l'accessibilité locale et la stabilité. Elle est fondée sur un raisonnement géométrique sur l'objet et l'outil (la pince à deux mors). Cette première partie permet de prendre en compte les caractéristiques géométriques de l'outil considéré pour chercher des prises candidates : c'est par exemple le parallélisme imposé par les mors de la pince. Il s'agit également de la répartition de la matière : accessibilité des plans d'appuis par rapport à l'objet lui même. On prend également en compte la distance entre les plans d'appuis par rapport à l'écartement maximal imposé par l'outil, et de résistance aux rotations, c'est-à-dire l'équilibre au moment du serrage de l'objet par la pince. La seconde phase de l'approche, prend en compte les problèmes liés à l'accessibilité globale de l'objet sous les contraintes de la tâche donnée. Cette tâche concerne simplement la prise de l'objet et sa dépose à une autre position. Elle mixte une approche « espace des configurations » pour les grands mouvements de la pince, en fixant son orientation, et une approche par « espace balayé » pour chaque partie de l'outil (i.e. ses deux mors), pour les mouvements près de l'objet à saisir. Nous invitons le lecteur intéressé à se reporter à [74] pour plus de rigueur et de détails.

Un complément à la méthode précédente, si aucune prise ne satisfait aux contraintes imposées par l'accessibilité et par la tâche, consiste en la re-saisie, appelée « regrasping » [56, 96]. Dans ce cas, une séquence de saisie, de pose dans une nouvelle posture, et une re-saisie sont engendrées pour satisfaire les contraintes précédentes.

Bien que ces méthodes soient spécifiques à un outil de type pince à deux mors, elles



n'en sont pas moins originales, et nous apportent des enseignements importants sur la manière de procéder pour une main articulée :

1. Une étape essentielle à l'automatisation de la préhension consiste à formuler le concept de prise comme étant lié à un mode de saisie, et non pas à un outil et à un objet particulier.
2. L'étude de la compatibilité contextuelle de niveau objet, c'est-à-dire, essentiellement les contraintes dues à l'accessibilité, ne doit pas être une entité à traiter séparément de la recherche de prise.
3. Il est utile pour des raisons de complexité algorithmique de hiérarchiser la recherche et de n'effectuer les calculs lourds (espace des configurations) que pour des prises ayant de grandes chances d'être valide.

Néanmoins, nous ne pouvons pas appliquer les mêmes raisonnements, étant donnée l'architecture d'une main robotique. Elle ressemble plus à une main humaine, qu'à une pince à deux mors. Elle a au moins huit degrés de liberté (ddl), pour les mains les plus courantes. On peut néanmoins assimiler les deux mors à deux doigts (§ 5.5). En revanche, les mêmes questions restent d'actualité, mais leur complexité augmente.

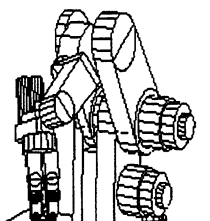
En effet, à cause du grand nombre de degrés de liberté d'une main articulée, il est impossible de construire et d'explorer la totalité de ses configurations, dans le but d'en choisir une, comme cela est généralement décrit pour une pince simple.

On peut raisonner en termes de contact. SALISBURY [86] a recensé toutes les configurations de contacts possibles d'une main robotique. Le résultat ne laisse pas indifférent et le chiffre obtenu est calculé comme suit :

$$\binom{n+k-1}{k} = \frac{(n)(n+1) \cdots (n+k-1)}{k!}$$

où la main est composé de k doigts, et chacun d'eux peut toucher un objet de n manières différentes. Pour la main MDS où $n = 343$ (7^3 : 7 contacts et 3 phalanges) et $k = 3$, le chiffre est de 6 784 540 combinaisons possibles. En tenant compte des configurations de contact entre la paume et l'objet, le chiffre dépasse 22 millions. En comparaison, pour une pince à deux mors, on obtient 3 contacts possibles : pas de contact, contact avec un seul mors, contact sur les deux mors. Il ne s'agit là que de contacts entre les phalanges et l'objet. Dès que l'on parle de position des doigts autour d'un objet, les possibilités deviennent infinies : l'espace des configurations dépend du nombre de degrés de liberté de la main ajouté à l'étude de l'objet.

Toujours pour la même raison (les ddl), la complexité de la planification du mouvement augmente. Ce problème, bien identifié en robotique, est exponentiel en fonction du nombre de ddl, et polynomial en la complexité de l'environnement. Notre principal objectif est de réduire cette complexité. Les procédés de la saisie humaine peuvent nous permettre de la réduire.



2.2 La Saisie Humaine

Une main articulée ressemble à une main humaine, avec des phalanges et des doigts. Une question que l'on peut se poser : *Quels sont les apports de la saisie humaine pour la Robotique ?*

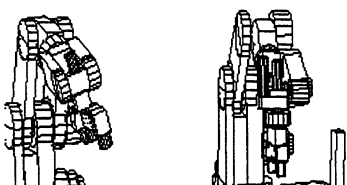
Du point de vue physiologique, la main représente l'extrémité effectrice du membre supérieur qui constitue son support, et lui permet de se présenter dans la position la plus favorable pour une action donnée. Néanmoins, la main n'est pas seulement un organe d'exécution, mais aussi un organe récepteur très sensible, dont les données sont indispensables à son action même. Elle permet la reconnaissance du relief, de la forme, de l'épaisseur (de l'espace en un mot). Elle permet aussi l'apprentissage des notions de surface, de poids, de température. À elle seule, elle peut nous permettre de reconnaître un objet, sans le recours de la vue [46].

Si on analyse le couple fonctionnel main/cerveau, au moment de la préhension, un certain nombre de concepts spatiaux apparaissent implicitement :

- La localisation : il s'agit de localiser l'objet dans son environnement.
- La position de saisie : elle concerne l'utilisation habituelle de l'objet. Pour être utilisés convenablement, certains objets doivent avoir une orientation bien définie. Notamment la prise d'un marteau se fait rarement par la tête, mais suivant l'orientation de son manche. L'orientation de la main s'en suit.
- La distance : Elle résulte de la mesure entre la main et l'objet, au moment où on a décidé de prendre l'objet.
- La forme : celle de l'objet à saisir.
- La taille : les proportions de l'objet ou de ses parties, doivent permettre sa saisie avec la main.
- L'encombrement : il s'agit de l'accessibilité de l'objet dans son environnement immédiat, mais aussi dans son utilisation ultérieure.

D'autres concepts, comme le poids, les efforts à appliquer (concernant la stabilité et l'équilibre) et la matière de l'objet, sont acquis pendant la saisie. Tous ces concepts, qui surviennent avant ou pendant la saisie, sont inconscients. Ils sont le résultat d'un apprentissage tout au long d'une vie. Il est difficile de les formaliser rigoureusement et surtout, d'estimer l'importance relative des différents critères les uns par rapport aux autres. Pour une main articulée robotique, et dans une optique d'automatisation de la préhension, ils doivent être explicitement traités, et résolus un par un.

Aux vus de tout ces composants à prendre explicitement en considération, il semble difficile de penser pouvoir appliquer les mêmes types de raisonnement, et de prendre en compte toutes les contraintes liées à la nature, la forme de l'objet, et à la tâche à exécuter. Pourtant, un début de réponse nous vient de l'étude du comportement humain face



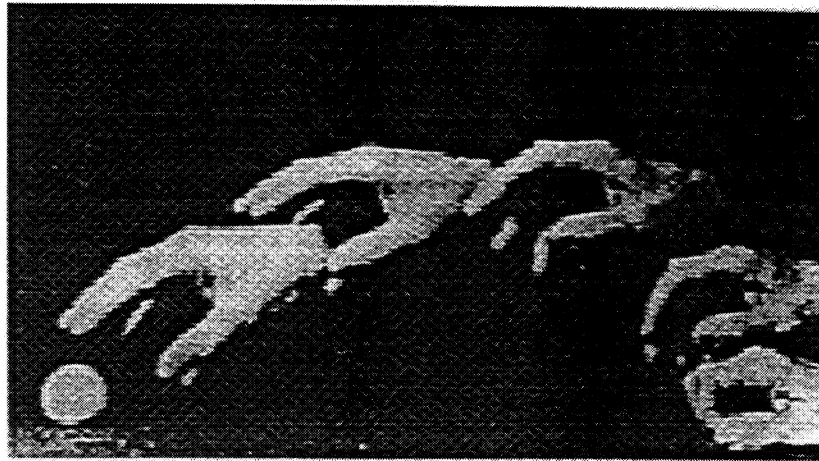


FIG. 2.1 - : Préconfiguration de la main [Jeannerod 81].

à la saisie.

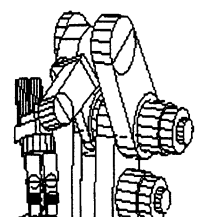
Des recherches en neuro-physiologie, portant sur la capture d'objets, font une place importante à l'analyse de l'interaction entre le geste et la vision [36] [2] [20]. Bien que la main puisse se passer d'informations visuelles pour la saisie, la vision, quand elle est présente, joue un rôle prépondérant dans la localisation de l'objet, dans l'analyse des proportions et de la forme de l'objet. Notamment, JEANNEROD [37] a décrit le mouvement de la main au moment de la saisie. Quand le bras et la main se dirigent vers l'objet en effectuant un mouvement balistique ¹, les doigts s'étirent et bougent, pour prendre la forme et taille de l'objet, anticipant ainsi le contact probable entre l'objet et les doigts. **Cette phase d'anticipation de la main avant le contact réel avec l'objet est nommée « préconfiguration » ou « pre-shaping »** ² (fig. 2.1).

ARBIB [2], quant à lui, a défini tous les contrôles intervenant dans la saisie humaine, sous la forme de schémas moteurs contrôlant les différentes actions de la vision et du mouvement de la main (fig 2.2). Un mouvement balistique est effectué jusqu'au but, durant lequel les doigts s'ajustent à la dimension de l'objet et la main tourne pour obtenir la bonne orientation. Quand la main est près de l'objet, un ajustement des doigts est effectué.

La description de la commande de la main humaine (d'un point de vue physiologique) par ARBIB [2] ou PAILLARD [20], et le mécanisme de préconfiguration décrit par JEANNEROD [36], peut nous permettre d'envisager la planification de saisie pour une main articulée robotique en évitant le piège de la complexité. On peut décomposer la préhension d'un objet avec une main articulée, en trois parties chronologiquement distinctes et

¹Le mouvement est dit balistique, car il est exécuté sans aucun contrôle, notamment sans réajustement des doigts.

²Le terme Anglais fait mieux ressortir le fait que la main prépare sa forme au contact. Cependant dans la suite nous emploieront le terme « préconfiguration ».



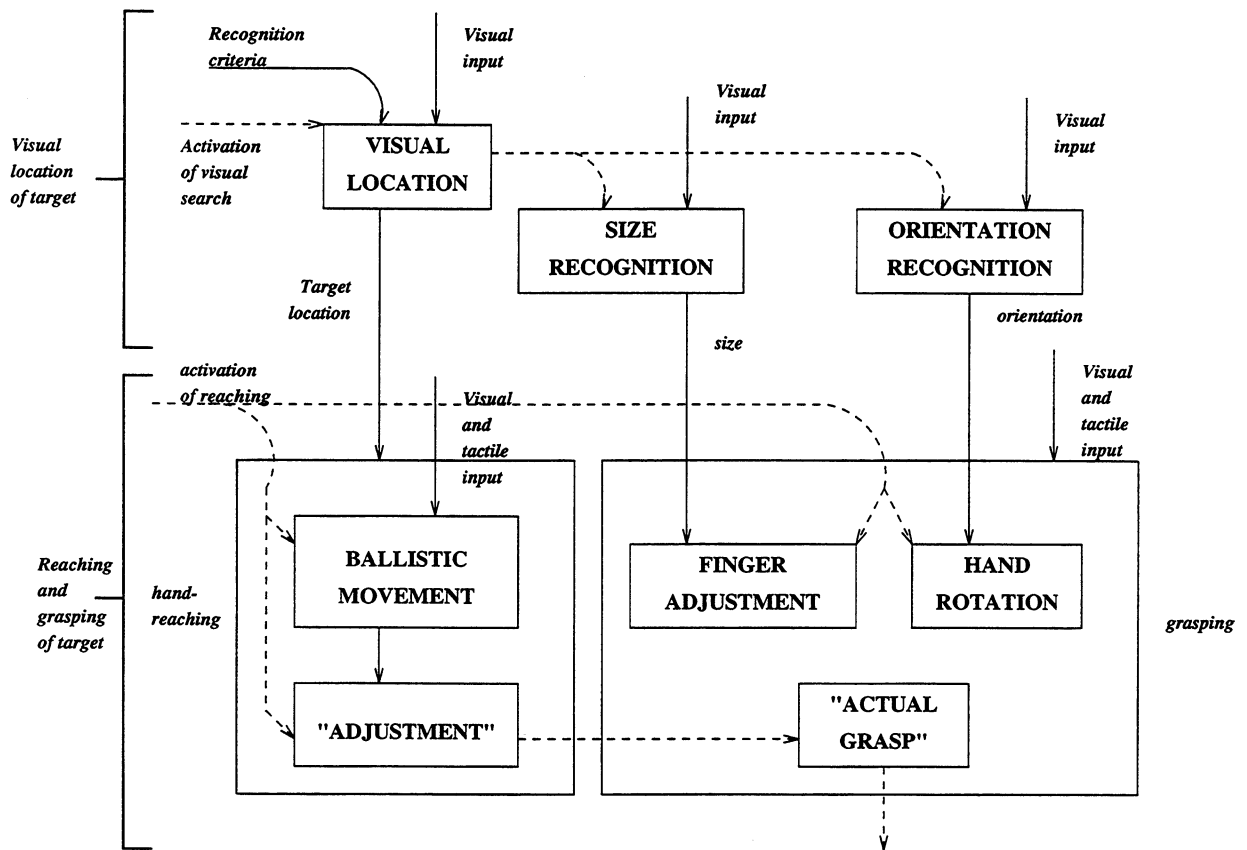
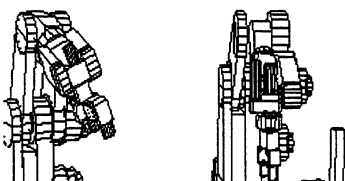


FIG. 2.2 - : Programme de contrôle coordonné hypothétique pour la saisie humaine, guidé par la vue. *lines brisées*, signaux d'activation, *lines pleines* transfert des données [Arbib 81].

résolubles :

- ~ **Localisation visuelle du but.** Elle inclut la reconnaissance de l'objet, la détermination de l'orientation, et l'analyse de forme et de dimension : informations venant de la vision.
- ~ **Transport vers le but.** Il inclut le mouvement balistique, et les mouvements fins près de l'objet (préconfiguration des doigts) : mouvements fins guidés par des données tactilo-kinesthésiques, c'est-à-dire des données venant de différents capteurs (tactiles, force, ...).
- ~ **Saisie.** Elle correspond à l'ajustement des doigts au contact de l'objet : mouvements guidés essentiellement par les données venant de capteurs tactiles.

Ces trois phases successives s'articulent autour d'un concept prometteur, la préconfiguration.



2.3 La Préconfiguration

Une préconfiguration est l'action de mise en forme des doigts autour de l'objet, avant la fermeture. La forme des doigts tient compte de la taille et de la forme de la partie d'objet à saisir, et dans une certaine mesure, de la tâche à exécuter. D'un point de vue robotique, elle est considérée comme une configuration englobante de l'objet. À un groupe de prises est associée une préconfiguration.

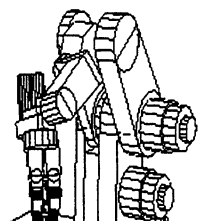
Le raisonnement en termes de préconfiguration semble raisonnable dans le sens où il existe peu de préconfigurations. Elles s'élèvent à *une vingtaine* pour tout type d'objet. Ce nombre a été évalué en comptant les différents modes de préhension décrits dans [46]. Il ne tient pas compte des prises-actions. De plus, en analysant les systèmes robotiques où le phénomène d'incertitude est un élément prépondérant pour la réussite d'une opération quelle qu'elle soit, il semble intéressant de proposer une préconfiguration et de laisser le choix d'une saisie précise, au contrôle d'exécution.

Un certain nombre de systèmes basés sur la notion de préconfiguration de la main ont été étudiés. Il en ressort deux grands types d'approches. Les uns considérant la tâche comme l'élément prépondérant dans la préconfiguration : nous les regroupons sous l'appellation « modèle tâche ». Les autres bien que ne négligeant pas la tâche, font une part importante à la morphologie de l'objet : nous les regroupons sous le nom « modèle objet ». Dans tous les cas de figure, il en résulte une classification des prises ou « taxonomie ». Cette classification permet d'organiser les types de saisie, les paramètres utilisés pour les réaliser, et révèlent les facteurs influençant le choix d'une prise parmi celles considérées.

2.3.1 Modèles Tâche

Étudiant la fonction de préhension en vue de sa restitution chirurgicale, NAPIER [67], distingue deux types de prises : la « prise-puissance » qui immobilise l'objet dans les doigts, et la « prise-précision » qui au contraire permet un gain de mobilité de l'objet dans la main au détriment de la stabilité. Pour Napier, c'est la finalité de la tâche et non la forme de l'objet qui détermine le type de prise. Pour étayer son opinion, il donne l'exemple de l'utilisation d'un tournevis, où le sujet commence par une prise puissance, permettant une bonne tenue du manche dans la main, et termine par une prise précision. Cette dernière permet la rotation du manche par les doigts, qui seule permet le vissage (figure 2.3). Cet exemple du tournevis est discuté plus loin (cf. page 41).

Ce phénomène de puissance versus précision a aussi été étudié en détail par IBERALL [33], et plus particulièrement pour déterminer la forme que la main prend pendant son mouvement vers l'objet à saisir. D'après des essais de préhension effectués sur différentes tailles de tasses, la forme de la main varie avec la taille de l'objet à saisir par le mécanisme sous-jacent *d'oppositions* des forces entre *doigts virtuels*. Pour IBERALL [31, 32], une tâche de saisie peut être définie en termes de nombres de doigts virtuels nécessaires



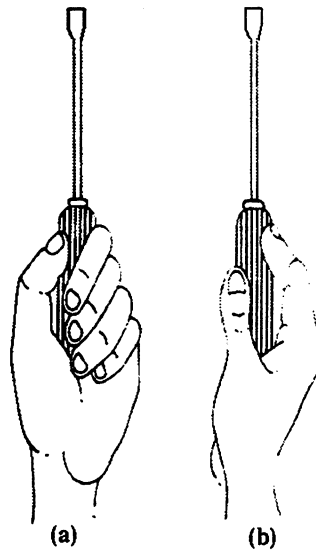


FIG. 2.3 - : Exemple de prise puissance (a) et de prise précision (b) pour un tournevis.

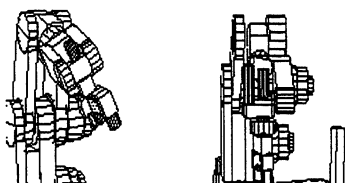
à opposer entre eux, et cela autour de l'objet, pour le saisir. Les doigts réels de la main bougent en conjonction, sous la notion de doigt virtuel « VF »³. Un doigt virtuel regroupe un ou plusieurs doigts réels. Les oppositions sont de trois types (figure 2.4) :

1. *Opposition pulpaire*. Opposition entre la pulpe du pouce (VF_1) et la pulpe des autres doigts (VF_2).
2. *Opposition latérale*. Opposition entre la pulpe du pouce (VF_1) et la partie latérale de l'index (VF_2) (et des autres doigts).
3. *Opposition palmaire*. Opposition entre les doigts (VF_2) (sans le pouce) et la paume de la main (VF_1).

La posture de la main pendant la saisie, reflète alors l'utilisation d'une ou plusieurs de ces oppositions. Par exemple, la saisie d'une tasse à café est un mélange d'opposition palmaire, décrivant le « crochitage » de l'anse avec les doigts, et d'opposition latérale permettant de neutraliser le moment créé par le poids de la tasse au niveau de l'anse.

La taxonomie utilisée par Iberall se rapproche de celle de Napier, dans le sens où l'opposition pulpaire s'apparente à une prise de précision, et l'opposition palmaire, à une prise qui privilégie la puissance. Le rajout d'une opposition latérale permet en outre, de contre-balancer les moments créés par des prises excentrées du centre de gravité de l'objet. L'intérêt se situe dans la notion de « doigt virtuel », qui permet de réduire la complexité du contrôle d'une main articulée. Avec cette notion, il suffit de mettre en correspondance les doigts réels concernés, et ainsi de n'agir plus que sur le doigt virtuel.

³Virtual Finger.



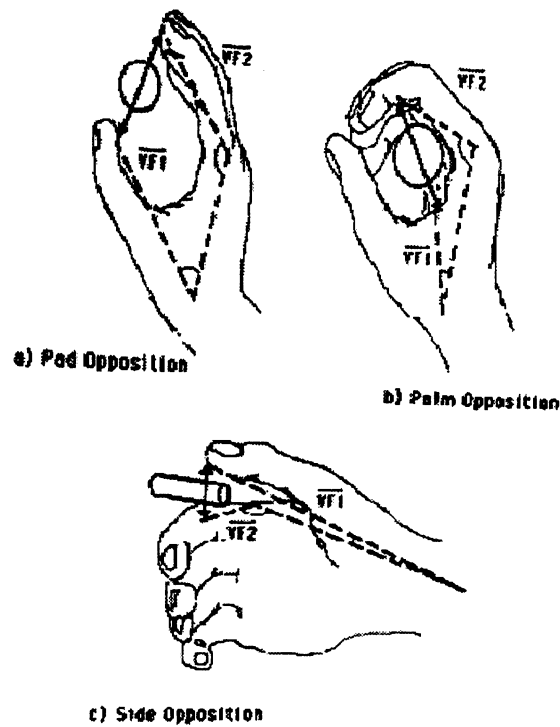


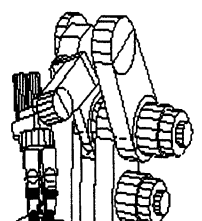
FIG. 2.4 - : Oppositions caractérisant la préhension humaine [Iberall 87].

CUTKOSKY [18], reprenant aussi les travaux de Napier, utilise une description synthétique des objets, et base sa taxonomie (figure 2.5) sur les choix de préconfigurations en milieu manufacturier (saisie de marteaux, tournevis, ...). Partant des deux catégories de saisie précision et puissance, il construit un arbre hiérarchique de prises, tenant compte à la fois de considérations géométriques symboliques ⁴ (symétrie radiale/circulaire, grossueur/forme) et de tâche (orientation du poignet, nombre de doigts réels/virtuel). Une fois que le choix canonique entre précision et puissance a été effectué, la géométrie devient aussi importante si ce n'est plus, que les considérations dues à la tâche, surtout quand des tâches similaires sont effectuées avec des outils différents (le lecteur peut se référer à [17] ou à [16] pour plus de détails).

Se rapprochant plus de la robotique, LYONS [58, 59] a classifié la saisie en trois grandes catégories de prises, basées aussi bien sur des caractéristiques de taille et de forme de l'objet, que sur l'usage attendu de l'objet en terme de précision ou puissance. Trois préconfiguration sont considérées :

1. La *Saisie englobante* où on essaye de maximiser l'aire de contact entre l'objet et la main, incluant la paume.
2. La *Saisie latérale* où l'opposition entre le pouce et les doigts donne à la main le comportement d'une pince à deux mors.

⁴À différencier d'un modèle CAO.



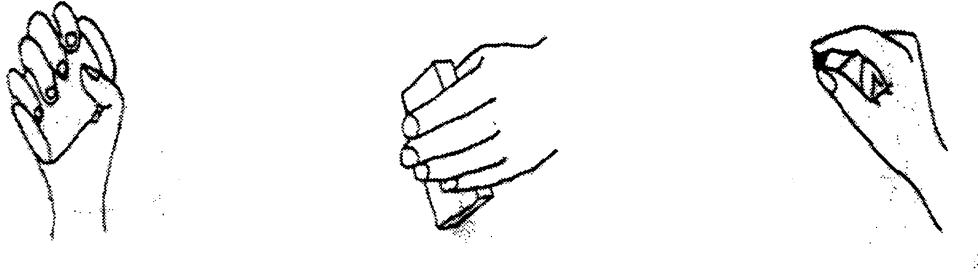


FIG. 2.6 - : Saisie englobante, latérale et de précision [Lyons 86].

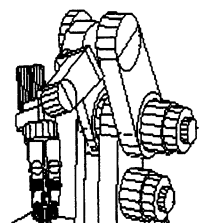
La littérature ne nous donne pas une réponse satisfaisante quant à la question de savoir si ce sont les contraintes liées à la tâche ou à la géométrie de la main/objet, qui en premier vont nous servir pour choisir et élaborer une saisie. Toutes les taxonomies identifiées dans ce paragraphe prennent en compte les besoins de la tâche dans leur description. Néanmoins, la géométrie de l'objet est une des composantes incontournables de la saisie.

2.3.2 Modèles objet

Certains systèmes font une part importante (si ce n'est prépondérante) au mode de raisonnement sur les objets [91] [99] [81]. Le plus souvent dans ces types d'approches, les informations sur les objets, proviennent de capteurs. Les environnements sont, pour la plupart non structurés et/ou partiellement inconnus.

RAO et al. [81] récupère la forme de l'objet à saisir par un système caméra/laser et il extrait une représentation symbolique de l'objets sous la forme de cônes généralisés. Un cône généralisé est dans ce cas, une forme géométrique planaire uniforme suivant un axe 3d rectiligne de direction arbitraire. À partir de cette représentation, l'auteur cherche à reconnaître une ou plusieurs formes canoniques parmi six pré-définies (boite, sphère, cylindre, cône, tore et pyramide), dont il extrait les caractéristiques géométriques de type hauteur, rayon, orientation, etc. Ses hypothèses partent du principe selon lequel certains modes de saisie sont mieux adaptés à certaines formes d'objet. Nous discuterons ce principe par la suite (cf. page 41). L'auteur définit à partir de ce principe, huit modes de saisie pour la main robotique articulée Belgrade-USC. Ces modes sont associés à une ou plusieurs primitives géométriques, dont les paramètres sont relatifs à la taille de l'objet. La sélection d'un mode de saisie se base, ensuite, principalement sur des critères heuristiques de stabilité, comme saisir près du centre de gravité, et par rapport à la mesure de volume/taille de l'objet. Bien que ne considérant que le modèle de l'objet pour le choix de ses prises, Rao considère que les contraintes imposées par la tâche sont dominantes par rapport aux informations sur l'objet.

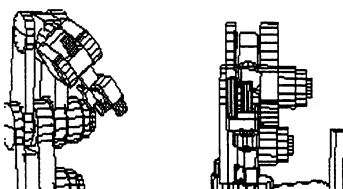
Le système de STANSFIELD ([91] ou [89] pour plus de détails), utilise trois types de prises possibles pour une main de type Salisbury, et ce, pour saisir des objets dont la



description est issue de la vision : *la prise englobante*, *la prise du bout des doigts*, et *la prise pincée* où les deux doigts ne forment qu'un en face du pouce, pour saisir des objets creux. Les prises à deux doigts ne sont pas considérées. La préconfiguration (la même pour les trois prises envisagées) consiste à ouvrir les doigts suivant la grosseur de l'objet, et à les écarter symétriquement pour obtenir un maximum de stabilité. Pour obtenir les informations nécessaires à la préconfiguration, une caméra fournit différentes vues de l'objet (l'objet est seul dans la scène) : les vues de côté et vue de dessus. Les données extraites incluent le nombre de parties de l'objet, la taille approximative, la forme (courbé ou plan), et le contour. Ces données servent à définir un volume englobant, représenté par un parallélépipède. Un système à base de règles écrites en Prolog confère à chaque type d'objet un type de saisie. Une saisie pincée (« pinch ») est effectuée sur le bord d'une tasse. Une saisie englobante est associée à un objet dont toutes les vues issues de la caméra ont un profil courbe. Le volume englobant permet d'engendrer une préconfiguration suivant un des types de prises. L'auteur en déduit un mouvement d'approche centré sur une des vues, et une saisie finale, par fermeture des doigts sur l'objet. Le système de Stansfield comporte un avantage non négligeable : il est testé sur une vraie main articulée. Néanmoins, cette approche ne semble pas généralisable à tout type d'objet. Pour une tasse, le système de vision extrait deux parties distinctes, qui sont l'anse et le corps. Il n'est pas évident de faire de même pour un objet ayant plus de deux parties. Cependant, même si ce système raisonne sur des objets relativement simples, on peut s'apercevoir que peu d'informations sont nécessaires pour engendrer des prises.

Considérant une représentation volumétrique à base d'octree, un autre système basé sur l'utilisation de la préconfiguration dans le mouvement de saisie [99], propose sept schémas de saisie. Chacun de ces schémas associe une préconfiguration (sphérique, parallélépipédique, cylindrique, pince, « protubérance », et concavité) et une stratégie sensorimotrice ou stratégie de fermeture (glissement/fermeture, fermeture, englobant/fermeture, et contour/fermeture ⁵). Le choix d'une préconfiguration est basé sur la description de l'objet. Le nom de chaque préconfiguration correspond à une caractéristique précise ou à une forme globale d'un objet. Le choix d'une stratégie de fermeture est un mixage entre la grosseur de l'objet par rapport à la main et ses caractéristiques de forme. S'il s'agit de fermer les doigts sur la concavité d'une tasse, la stratégie utilisée est « contour/fermeture ». La partie la plus intéressante de ce travail concerne l'extraction automatique des caractéristiques géométriques de l'objet : le système manipule des objets représentés par un modèle octree où la main est elle même représentée par un modèle octree. Les auteurs évaluent en premier lieu le degré de similarité de l'objet à saisir avec des objets canoniques de type sphère, cylindre ou parallélépipède ; puis effectue une analyse en tranches pour les objets ayant une forme cylindrique : le cylindre est coupé en trois tranches correspondant aux trois doigts. Une analyse de protubérance (très empirique) est effectuée si l'objet est trop gros ou si il n'y a pas d'axe préférentiel, en évaluant le contour extérieur d'une partie de l'objet (choix d'un point quelconque sur le contour de l'objet et extraction à partir d'un « feu de prairie » [14]). Une approche à base de champs de potentiels est utilisée pour générer les trajectoires sans collisions pour atteindre l'objet, et y ajuster les doigts :

⁵il s'agit de glisser les doigts dans une concavité et de les fermer.



les bouts de doigts sont attirés par des buts positionnés suivant la stratégie de fermeture envisagée.

Synthèse Les modèles tâches préconisent que des contraintes issues de considérations fonctionnelles sont plus importantes. D'un autre côté, les modèles objets, basent leur approche sur la forme de l'objet. L'important est d'estimer le « poids » des différents critères. Cutkosky préconise de traiter celui qui réduit l'espace de recherche le plus rapidement.

Dès que les informations sur la nature de l'objet sont issues de capteurs, l'aspect géométrique oriente et réduit l'espace de recherche plus facilement que les contraintes issues de la tâche à exécuter. De plus, l'aspect géométrique est intrinsèque au problème de la saisie. Il peut être pré-calculé dans certains cas, notamment les cas où les tâches sont répétitives.

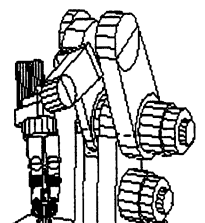
2.3.3 Aspects décisionnels

Prendre en compte les aspects tâche et objet « simultanément », fait intervenir un processus décisionnel, évaluant le degré d'importance de toutes les contraintes. Tous les systèmes utilisant un modèle objet ou un modèle tâche, à un moment donné, ont eu besoin de résoudre ce problème.

Traitant le cas dans le milieu manufacturier, CUTKOSKY [16] a développé un système expert pour clarifier le rôle de la dextérité, de la sensibilité⁶ et de la stabilité dans le choix d'une saisie. Ce système « Grasp-exp » a été élaboré pour choisir une saisie humaine à partir d'informations initiales fournies par un opérateur et des exigences de la tâche. Ces exigences se traduisent par des attributs relatifs à la dextérité, la précision, la sensibilité, la stabilité, la sécurité⁷, et des caractéristiques géométriques de l'objet à saisir. Les informations liées à l'objet concernent son épaisseur (épais ou non), sa taille (petit, moyen, grand), sa forme approximative (compacte, mince, prismatique), et sa forme (sphère, disque, rectangle, cylindre, etc...). La tâche est décrite comme nécessitant de la stabilité (oui ou non), de la dextérité (oui ou non) et de la sécurité (de 0 à 1). Ce système est basé sur la décomposition hiérarchique précision versus puissance, décrite dans le paragraphe précédent (§ 2.3.1). Les prises en puissance fournissent de la sécurité et de la stabilité, tandis que les prises de précision soulignent les aspects dextérité et sensibilité de la tâche. Pour que ce système puisse obtenir d'une manière unique et correcte la bonne prise, moins de 100 règles ont été nécessaires. Néanmoins, une leçon que tire Cutkosky de son système « grasp-exp » est la description trop vague des objets (long, mince, ...) utilisée au départ. Des informations plus précises sur la forme de l'objet ont du être ajoutées pour affiner

⁶La sensibilité est ici utilisé dans le sens : résistance aux vibrations et aux petits changement de positions et de forces.

⁷La sécurité va dans le sens de la stabilité mais se rapproche plus précisément d'une mesure de la résistance aux glissements. Elle diminue quand les forces appliquées augmentent.

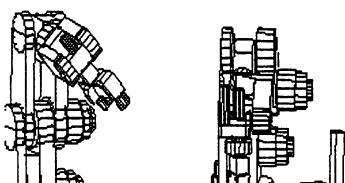


l'expertise. Pour l'auteur, un aspect clé réside dans la désignation de caractéristiques de saisie spécifiques à chaque objet. Il faut donc proscrire des informations neutres sur la géométrie (cubes, cylindres), pour au contraire souligner les éléments importants de la saisie et de l'exécution de la tâche dans l'objet, comme décrire un marteau en termes de son manche et de sa zone de contact sur sa « tête ».

Relatant des opérations simples d'assemblage en milieu manufacturier, LIU [54] se démarque de Cutkosky en récupérant les informations initiales sur l'objet par la vision [81], et en intégrant dans son système, des tâche pré-définies (sept) basées sur le comportement humain. À partir d'une quinzaine d'heuristiques déterminant la position de saisie, l'orientation, le type de saisie, le nombre de doigts, et les forces à appliquer (maximiser ou pas les contacts), des méta-heuristiques permettent de donner des priorités suivant le type de tâche effectuée. Chaque tâche est définie par des mots clés (bouger, insérer, enlever, tourner, ...) décrivant l'action à mener. Elles influent ensuite sur la qualité de la saisie à obtenir. S'il s'agit de tourner un écrou avec une clé à molette, la position de saisie sera prépondérante par rapport à son orientation. D'un autre côté, si l'action concerne la manipulation, l'orientation est choisie en premier. Les types de saisie issus de l'analyse de forme des objets, sont ensuite ordonnés en appliquant les heuristiques une par une. Les ambiguïtés sont résolues par les méta-heuristiques, qui déterminent l'ordre d'application. Bien que difficile à généraliser pour tout type de tâche, le système de Liu a le mérite de soulever le problème du choix d'une stratégie de prise parmi plusieurs, quand certaines sont contradictoires. Notamment, l'auteur souligne clairement que les méta-heuristiques doivent être révisées dès que la liste des tâches augmente.

Dans un registre différent, IKEUCHI [44] adopte le paradigme « plans d'assemblages à partir de l'observation ». Il concerne l'observation et la compréhension de la main humaine effectuant une tâche de saisie, et l'exécution avec une main robotique (la main de Salisbury) de cette même tâche avec un minimum d'intervention humaine. Ikeuchi utilise directement la vision pour reconnaître le type de saisie qu'utilise une main humaine. Pour cela, il classe les prises suivant les contacts entre la main et l'objet et leurs positions dans l'espace pour chaque type de prise. Chaque phalange peut avoir au plus un contact, pour un total de quinze contacts (un pour la paume de la main, figure 2.7). Chaque prise possède une position unique des points de contact sur la main. La difficulté consiste à différencier, à partir d'une main humaine et d'un objet saisi, l'objet des doigts. L'exécution de la saisie, avec et sans l'objet, permet de faire cette identification. Les points de contact sont une des données du système (« data glove »). Ensuite, il recherche les normales aux points de contact et les comparent, pour trouver les oppositions naturelles entre doigts (ou doigts virtuels, IBERALL [32]). Cette recherche permet d'asseoir son raisonnement quant à savoir quelle prise a été utilisée pour la saisie. L'originalité de ce travail provient de l'aspect décisionnel lié à la reconnaissance du type de saisie pour une tâche donnée par l'observation. Cette reconnaissance influe sur les besoins nécessaires à l'accomplissement de la tâche. La taxonomie utilisée ne présume pas de la tâche à effectuer, contrairement aux autres taxonomies évoquées au paragraphe 2.3.1.

Cependant, cette approche enregistre des stratégies de saisie dans un contexte humain,



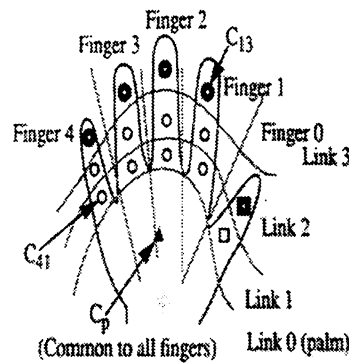


FIG. 2.7 - : Notation des contacts pour une main humaine [Ikeuchi 93].

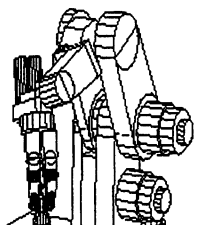
alors que la finalité consiste à les exécuter avec une main robotique. Bien que l'auteur ne relate pas la suite envisagée de l'approche, on est à même de se demander : *comment la transition entre saisie humaine et saisie robotique peut se faire ?* Du point de vue de la cinématique, ce transfert n'est pas direct ⁸. Cette transition ne peut pas se concevoir avec le concept de préconfiguration. En effet, même si on peut faire correspondre les types de préconfigurations possible d'une main humaine et ceux d'une main robotique, l'exécution de fermeture des doigts sur l'objet peut être complètement différente.

2.4 La stabilité

Dans le cadre d'une saisie intentionnelle, guidée par un but plus général que celui de tenir un objet, il apparaît crucial de tester la compatibilité de la prise choisie avec la tâche à réaliser. Dans le domaine de la manipulation en général, cette compatibilité doit combiner un aspect bas niveau lié au modèle de l'objet (accessibilité), et un aspect qualitatif et quantitatif, orienté vers le rôle que l'objet doit tenir pour atteindre le but souhaité. Ce second aspect concerne la stabilité de la prise elle-même, mais aussi la stabilité lors de l'action à réaliser.

Dans la littérature, la stabilité est l'un des aspects les plus traités. En effet, c'est un des aspects clés pour la réussite de toute saisie. Pour une main articulée, les travaux sur les problèmes de stabilité se sont concentrés sur la recherche de points ou zones de contact sur l'objet, de telle manière que si on peut amener les bouts des doigts sur ces points ou zones en appliquant certaines forces, la saisie est alors stable. La nature des forces et le

⁸Une main humaine possède 21 degrés de liberté, alors qu'une main robotique comme la main MDS en possède 9.



type de stabilité définit la complexité du problème.

2.4.1 Définitions

La « stabilité » est répartie en trois classes : l'équilibre, la fermeture en force ou « force-closure », et la fermeture en forme ou « form-closure ». Chaque classe peut être traitée avec différents types de contacts canoniques : contacts points sans friction, contacts points avec friction, et contacts mous avec friction. Les contacts complexes peuvent être décomposés en la somme des contacts canoniques précédents.

Définition 1 Une prise est dite en « équilibre » si et seulement si la somme des forces et des moments exercés sur l'objet est nulle.

Définition 2 Une prise est dite « force-closure » si et seulement si on peut exercer à travers un ensemble de points de contact, des forces et moments arbitraires sur l'objet. D'une manière équivalente, n'importe quel mouvement de l'objet dû à une force externe peut être annihilé par une saisie « force-closure ». La stabilité est garantie par une variation des forces des doigts.

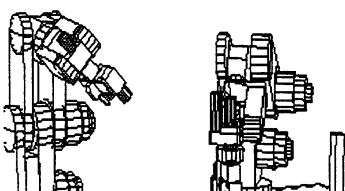
Une prise force-closure garantit qu'il existe une prise en équilibre. Néanmoins, les intensités des forces à appliquer par chaque doigt ne sont pas explicitées. À l'inverse, si une prise est en équilibre, il se peut qu'elle ne soit pas « force-closure ». En effet, rien ne garantit que l'adjonction d'une force externe ne vienne pas rompre l'équilibre.

Définition 3 Une prise est dite « form-closure » si et seulement si l'objet est totalement contraint par un ensemble de points de contact, sans tenir compte de l'ampleur des forces en présence. La stabilité est garantie par la forme même de l'objet.

Une prise en équilibre est la condition minimum à la bonne réalisation de la saisie. Une prise force-closure est du plus grand intérêt. En effet, elle permet de réagir à n'importe quelle force externe, ce qui est pratique pour des tâches d'assemblage ou de manipulation. En revanche, avec une prise form-closure, qui représente la stabilité « maximale », la manipulation de l'objet dans les doigts n'est plus possible, l'objet est en isostatisme dans la main.

La nature des points de contact associés aux efforts engendrés par les bouts de doigts sur un objet peut changer complètement le problème à résoudre. Le plus généralement, on considère les contacts suivants :

- *Points de contact sans friction.* Le doigt peut seulement exercer une force normale à travers le point de contact dans la direction inverse de la normale externe à la surface en contact. Cette représentation peut être utilisée pour la recherche de positions nominales stables des doigts sur l'objet (§ 7.3). Néanmoins, les mains répondant à ce critère, sont quasi-inexistantes.



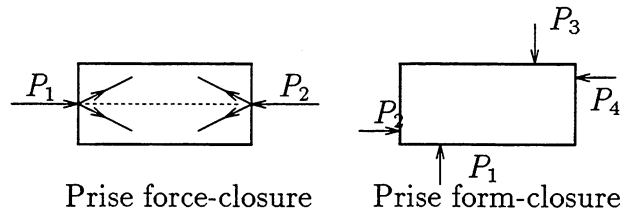


FIG. 2.8 - : Exemple de prise force-closure et form-closure.

- *Points de contact avec friction.* Le bout de doigt peut exercer n'importe quelle force dirigée dans le cône de friction au point de contact. Ce type de contact est le plus utilisé pour la recherche de la stabilité.
- *Contacts mous.* Le bout de doigt peut exercer n'importe quelle force dirigée dans le cône de friction, et n'importe quel moment autour de l'axe du cône de friction.

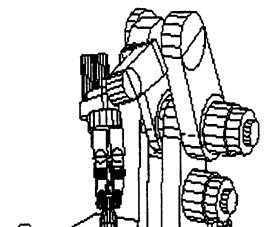
Pour des prises force-closure [70, 80] et form-closure [60], les résultats suivants ont été observés :

- Une prise form-closure peut être vue comme une prise force-closure, avec des contacts points sans friction. Une prise force-closure avec points de contact sans friction nécessite au moins quatre contacts en dimension deux, et au moins sept en dimension trois. Les objets avec des symétries radiales (cylindres, ...) n'ont pas de saisie force-closure avec points de contact sans friction. En effet, le moment autour de l'axe de symétrie ne peut être neutralisé.
- Trois doigts sont nécessaires et suffisants pour obtenir une saisie force-closure pour des points de contact avec friction pour n'importe quel objet en dimension deux. Quatre en dimension trois.
- Une saisie avec deux points de contacts avec friction est force-closure si et seulement si le segment rejoignant les deux points de contacts est à l'intérieur des deux cônes de friction, en dimension deux. Le même résultat est valable pour deux contacts mous en dimension trois.

Par la suite nous ne nous intéresserons plus aux aspects liés à la stabilité « form-closure ». Nous ne recherchons que l'équilibre au moment de l'interaction des doigts avec l'objet. Le lecteur intéressé pourra se reporter à [97] pour l'analyse des mécanismes de génération de saisie form-closure en 2D, et à [60] pour un état complet des possibilités de saisie form-closure en 2D/3D avec et sans friction.

2.4.2 Notions mathématiques liées à la stabilité

Pour obtenir la stabilisation d'un objet dans la main, les contacts (avec friction) des doigts de la main sur l'objet doivent satisfaire les conditions suivantes : l'équilibre doit



être réalisé, les forces des doigts de la main doivent être dans les cônes de friction (non glissement), la condition de force-closure doit au moins être réalisée pour les forces externes connues (par exemple la gravité)⁹. Enfin, certaines contraintes géométriques doivent être respectées. Ces quatre conditions peuvent être formulées d'une manière analytique :

Condition 1 (équilibre « statique »). L'objet doit être en équilibre, c'est à dire que le résultat des forces et des moments qui agissent sur cet objet est nul. L'équilibre est caractérisé par les deux formules suivantes :

$$\sum_i \vec{f}_i = \vec{0}, \quad \sum_i \vec{f}_i \wedge \vec{r}_i = 0 \quad (2.1)$$

où $\vec{f}_i$ est la force de contact entre l'objet et le doigt numéro i , et $\vec{r}_i = [r_{xi}, r_{yi}, r_{zi}]^t$ exprime la position du doigt dans un repère quelconque. Pour trois doigts, cette condition implique que les forces soient coplanaires, et qu'elles s'annulent en un point, appelé point de rencontre ou de convergence.

On peut exprimer ces équations sous forme matricielle :

$$W = G\vec{f} \text{ avec } G = \begin{pmatrix} i & \dots & i \\ r_1 & \dots & r_n \end{pmatrix} \text{ et } r_i = \begin{pmatrix} 0 & -r_{zi} & r_{yi} \\ r_{zi} & 0 & -r_{xi} \\ -r_{yi} & r_{xi} & 0 \end{pmatrix}$$

où W est le résultat des forces et moments de l'action des doigts sur l'objet, exprimé sous forme matricielle, G est la matrice $6 \times n$ des moments aux n points de contact, i la matrice 3×3 identité, r_i une matrice anti-symétrique exprimant $\wedge \vec{r}_i$, et enfin, $\vec{f} = [f_1, \dots, f_n]^t$ est le vecteur des directions des forces exercées aux points de contact.

On appelle communément W la matrice des forces de saisie [62, 72].

Condition 2 (pas de glissement). Toutes les forces appliquées par les doigts sur l'objet doivent rester dans le cône de friction, pour empêcher le glissement. Les deux formules suivantes traduisent cette condition :

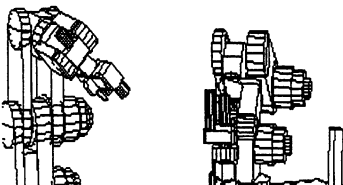
$$\mu |\vec{f}_n| > |\vec{f}_t| \text{ ou } |\omega| < (\arctan(\mu) = \phi)$$

$$\text{ou } (\vec{f} \cdot \vec{f}) - (1 + \mu^2)(\vec{f} \cdot \vec{n})^2 < 0 \text{ et } \vec{f} \cdot \vec{n} > 0$$

où μ est le coefficient de frottement (ϕ l'angle associé), $\vec{f}_n$ et $\vec{f}_t$ sont les composantes perpendiculaire et tangente de la force $\vec{f}$. ω est l'angle entre la direction de la force et la perpendiculaire au point de contact $\vec{n}$ (normale externe).

Condition 3 (force-closure). On doit être capable d'augmenter les efforts exercés par les doigts, jusqu'à un certain seuil (en dessous du seuil mécaniquement acceptable) afin de pouvoir contrer des forces externes possible (force de gravité par exemple).

⁹Cette condition peut être supprimée si on connaît les efforts à appliquer sur chaque doigt pour contre-balancer les forces externes.



Cette condition s'exprime mathématiquement par la résolution du système linéaire à n inégalités qui ne doit pas avoir de solutions homogènes ou particulières [70] :

$$W^t \delta_t \geq 0 \quad (2.2)$$

où δ_t représente un mouvement infinitésimal de l'objet à saisir (translation et/ou rotation). Intuitivement, l'équation 2.2 peut être traduite en langage naturel : « si les forces exercées par les doigts peuvent compenser n'importe quelle force externe, le seul mouvement infinitésimal possible de l'objet est le mouvement nul ».

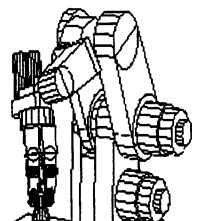
Il est possible, connaissant les valeurs des forces appliquées sur chaque doigt, de vérifier l'équilibre en résolvant l'égalité suivante : $W \vec{F}_a = \vec{0}$, où $\vec{F}_a$ représente le vecteur des amplitudes associées aux différentes forces. Considérons le poids de l'objet. Il est assimilé, soit comme une des n forces de contact, soit comme le torseur $\vec{Q} = [0, 0, -mg, 0, 0, 0]^t$ dont il faut pouvoir annuler l'effet (la pesanteur), c'est-à-dire résoudre l'égalité $\vec{Q} = W \vec{F}_a$.

L'analyse de stabilité d'une prise existante ne pose pas vraiment de problèmes. Néanmoins, les problèmes résident dans la génération de prise selon des critères de stabilité et de contrôle continu, pour contre-balancer les forces externes. Il est nécessaire de trouver les forces à appliquer à chaque point de contact, avec des temps de résolution permettant une application en temps réel. Le lecteur intéressé pourra se reporter à [85], [101], [73] et [48] pour plus de détails.

Condition 4 (contraintes géométriques de contact). Dans certains cas, les conditions mathématiques précédentes peuvent être exprimées par des contraintes géométriques de contact. En effet, il faut s'assurer que l'objet puisse être saisi par la main, i.e que certaines conditions sur la géométrie des points de contact soient remplies. La figure 2.9 illustre cette contrainte pour deux points de contact dans le plan : l'angle entre les deux faces de contact ψ et l'angle du cône de friction Φ (si il s'agit d'un contact ponctuel), doivent vérifier l'inégalité $\psi < 2\Phi$.

Dans cet ordre d'idée, PONCE et FAVERJON [80] ont proposé une condition suffisante permettant de savoir si une prise à trois points de contact sur un objet polygonal, est « force-closure » : « si les trois normales intérieures aux points de contacts couvrent positivement le plan en formant des angles inférieurs à $\pi - 2\Phi$ (2Φ est l'angle du cône de friction), et l'intersection des trois cônes doubles (ouverte) de friction n'est pas vide, alors la prise est force-closure » (voir [80] pour la démonstration).

Ces conditions sur la stabilité doivent être vérifiées et maintenues tout au long de la saisie, et de la manipulation de l'objet. La stabilité est un problème complexe quant à sa réelle mise en place dans un système de saisie. En effet, tous les conditions énoncées précédemment présupposent des conditions optimales de contrôle et de synchronisation des doigts au moment du contact. En effet, un doigt arrivant au contact de l'objet, explicitement analysé en termes de position et d'efforts, génère un changement de contrôle au



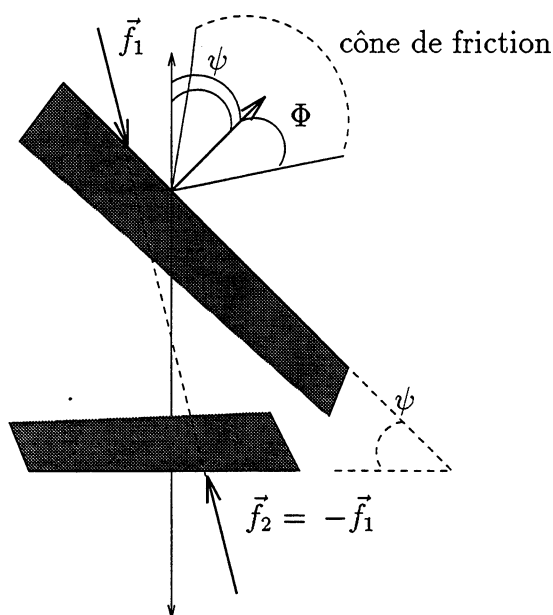


FIG. 2.9 - : Conditions géométriques de saisie pour deux contacts ponctuels.

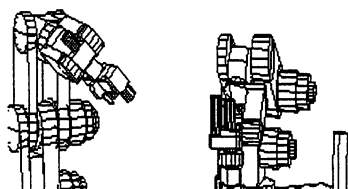
niveau de la commande, et peut engendrer des perturbations en termes de déplacement. Le problème consiste à maintenir le contact, tout en assurant la quasi-staticité des conditions énoncées précédemment. Le lecteur pourra se référer au chapitre 6 pour connaître notre approche à ce sujet. Mais, dans un premier temps, abordons la stabilité dans les systèmes de saisie telle qu'elle est traitée dans la littérature concernant la robotique.

2.4.3 La stabilité dans les systèmes de saisie

Dans les années 70 à 86, un certain nombre d'auteurs ont proposé des méthodes prenant en compte la stabilité et l'équilibre, soit reposant sur un support de modélisation géométrique, soit sur un support plus mécaniste considérant la friction comme un élément essentiel. Les travaux les plus significatifs sont ceux d'HANAFUSA [29] et BAKER [4], avec une main à trois doigts élastiques, et une approche basée sur une recherche de minima d'énergie potentielle correspondant aux contacts stables, et FEARING [23], utilisant le glissement implicite d'un doigt pour provoquer la rotation d'un objet bi-dimensionnel et le ramener dans le cône de frottement (extension des travaux de MASON [61]). Le lecteur peut se reporter à TROCCAZ [76], pour une liste assez complète de toutes les approches significatives correspondant à ces années là.

Le problème essentiel est de trouver des zones ou points de contact répondant aux conditions plus ou moins contraintes énoncées ci-avant (conditions 1 à 4).

Cherchant à trouver des points de contact avec friction « force-closure » pour deux doigts (condition 3), NGUYEN [70], précurseur en la matière, décrit un algorithme de

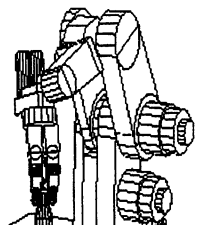


recherche de positions « force-closure » pour des objets polygonaux. Le résultat de l'algorithme donne des zones force-closure pour un couple de segments appartenant à l'objet, et la ligne (bissectrice des deux segments) où les forces s'annulent. Une zone force-closure correspond à un segment où, quelle que soit la position du doigt sur cet endroit, la prise est considérée comme bonne. Une zone force-closure permet de prendre en compte les incertitudes de position des doigts autour d'un point force-closure. Toutes les zones force-closure peuvent être obtenues en examinant tous les couples de segments répondant aux critères géométriques énoncés précédemment (condition 4). D'autres travaux font cas d'algorithmes force-closure pour des objets aux profils courbes. C'est le cas de FAVERJON et PONCE [22]. Ils décrivent un algorithme permettant de donner toutes les positions force-closure sur des objets $2d$, courbes ou polygonaux, tant que l'on peut exprimer la normale en chaque point de contact. Pour cela, ils expriment de manière analytique le fait qu'une saisie est stable, si la ligne reliant deux points de contact est interne aux cônes de friction. Le lecteur peut se référer à BLAKE [13], pour l'application du travail de Ponce au cas de la saisie $2d$ d'objet courbes. L'originalité de ce travail provient de la récupération depuis la vision de l'enveloppe courbe des objets à saisir par un « contour déformable »¹⁰. Un contour déformable peut être associé à un élastique qui vient se coller contre le contour de l'objet. Poursuivant dans la même voie, BLAKE [94] utilise ce concept pour la saisie d'objets courbes $3D$, avec une pince à deux mors parallèles.

Étendant leur travail à trois points de contact, PONCE et FAVERJON [80], proposent un algorithme permettant de calculer les positions force-closure pour trois doigts sur un objet polygonal. L'originalité de ce travail par rapport à celui de Nguyen, provient de la méthode utilisée. En effet, leur algorithme, basé sur la définition donnée page 25, n'a pas besoin de calculer le point où toutes les forces s'annulent. De plus, dans les zones force-closure trouvées, les auteurs essayent de mettre le centre de gravité de l'objet le plus près possible de l'intersection des cônes de friction. Cette dernière condition diminue les effets de la gravité sur une éventuelle saisie.

Partant du fait qu'une saisie stable à trois doigts correspond à une position force-closure dans le plan des trois points de contact (plan de saisie), POLLARD [79] ([77] pour plus de détails) aborde le problème avec une main de Salisbury pour des objets polyédriques. Une des hypothèses du système, mis à part le fait que l'environnement est complètement structuré, concerne les faces sur lesquelles les doigts vont se placer. Elles sont connues au départ. Cependant, la position des doigts au contact de chaque face reste à trouver pour garantir l'équilibre. Pour trois points de contact, l'équilibre est caractérisé par un point appelé point de convergence. En effet, étant donné que la somme des forces doit être nulle, l'intersection des forces se matérialise par le point de convergence (condition 1). Ce point se trouve sur le plan formé par les trois points de contact. Comme il est exprimé dans ce qui suit, on peut facilement choisir un plan de saisie, et chercher ensuite les points de contacts dans ce plan. Le système de Pollard considère des points de contact avec friction, dont la représentation est l'intersection du cône avec le plan. On est donc ramené à un problème en deux dimensions, une fois le plan de saisie choisi. Le plan considéré dépend de l'orientation des faces, et doit maximiser la représentation de son

¹⁰Un contour déformable est référencé sous le nom de « snake » dans la littérature.



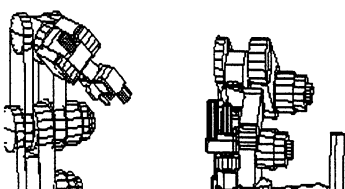
intersection avec chaque cône de friction (coefficient μ). Il doit être aussi perpendiculaire que possible aux trois faces :

- Si toutes les faces sont parallèles, il existe une infinité de plans parallèles à un autre garantissant un coefficient μ de « friction maximum » ¹¹.
- Si deux faces sont parallèles, il existe un plan unique garantissant un coefficient maximum μ . Il est formé à partir des deux normales indépendantes.
- Si aucune des faces n'est parallèle à une autre, il existe un seul plan qui coupe chaque cône de friction, avec un coefficient résultant μ_r de friction égal pour chaque face, mais inférieur à μ . $\mu_r = \sqrt{\mu^2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta}$, où θ est l'angle entre le plan de saisie et des faces considérées, et μ le coefficient de friction.

L'orientation (cas 1) et la position du plan de saisie sont choisies de façon à maximiser les zones de contact (segments) sur les faces. Une fois le plan de saisie complètement défini, le calcul du point de convergence dépend lui aussi de l'orientation des segments résultant de l'intersection du plan avec les faces (parallèle, concave ou convexe). Le but est de maximiser les zones potentielles de position des doigts sur les segments, tenant compte du cône (2d) de friction associé. Enfin, les points de contact représentent le milieu de chaque zone potentielle de saisie. La figure 2.11 montre quelques exemples de saisie sur des objets polyédriques. Une fois les points de contact choisis, une configuration de la main et du poignet est calculée, en plaçant chaque triplet d'articulations sur un cercle passant par les trois points de contact (cf. figure 2.10). Ce placement sur un cercle concentrique tient compte des possibilités cinématiques de la main. Cette technique peut être assimilée à une préconfiguration. Une approche en « ligne droite » permet d'atteindre ensuite la configuration finale des doigts. Une approche globale est utilisée pour amener la main à sa configuration initiale (avant contact), pour les trois premiers degrés de liberté du bras du robot supportant la main. Les autres degrés de liberté du bras et de la main sont figés, pour cette étape. L'analyse de stabilité utilisée dans ce système a quelques contraintes restrictives, telles que l'utilisation des bouts des doigts, la connaissance des faces à atteindre, et de la modélisation de l'environnement polyédrique. Les solutions trouvées sont stables, faisables et accessibles par une main de Salisbury montée sur un robot six-axes. L'intérêt d'un tel système est de prendre en compte tous les problèmes de la saisie les uns après les autres, même sous les contraintes énoncées précédemment.

Envisageant la saisie d'échantillons planétaires, pour une éventuelle exploration autonome, FRANCOIS et al. [24] évaluent la stabilité de la saisie de cailloux avec une « main » à trois doigts (3 ddl, 1 par doigt). Cette « main » peut être assimilée à une pince à trois mors cylindriques parallèles, engendrant des saisies de type sphérique. L'originalité vient de la prise en compte de contacts mous. Néanmoins, la force de gravité, ainsi que les moments apparaissant du fait des multiples points de contact (doigt mou), sont négligés. Cette hypothèse est justifiée en considérant la force de gravité comme très petite par

¹¹ différent du coefficient de friction.



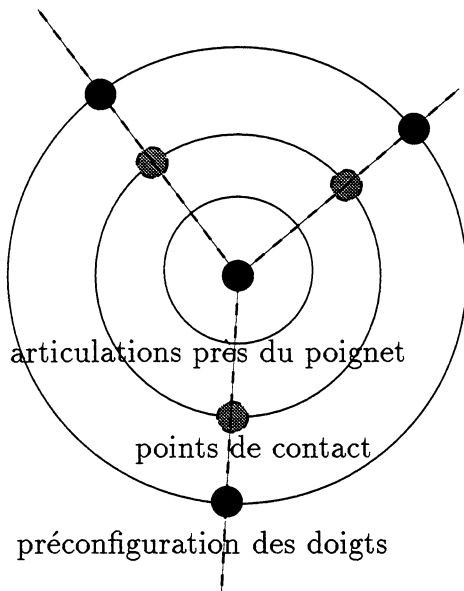


FIG. 2.10 - : Position des articulations par rapport aux trois points de contact [Pollard 89].

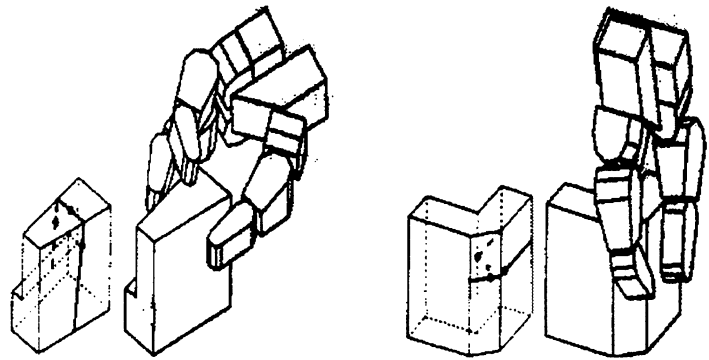
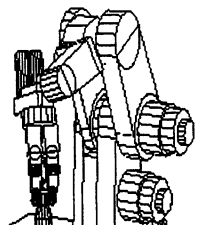


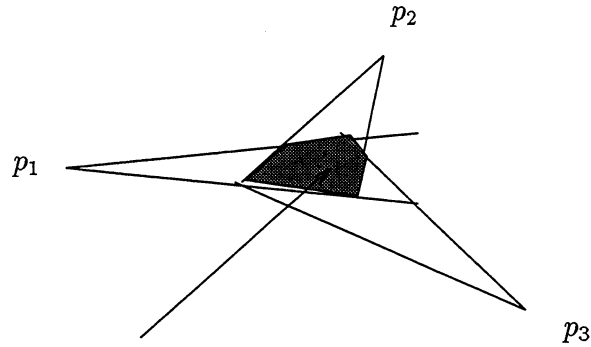
FIG. 2.11 - : Exemples de saisie « stable » d'objets polyédriques, par une main articulée [Pollard 89].

rapport aux efforts en présence, et la distance entre les multiples points de contact (sur un même doigt) très petite par rapport à la taille de l'objet. La stabilité considérée est alors décrite par les équations de la *condition 1* (eq. 2.1), et implique que les forces soient coplanaires et se rencontrent au point de convergence. Considérant la friction, ce point se trouve dans un polygone résultat de l'intersection des cônes de friction avec le plan de saisie (figure 2.12.c). Si le polygone est vide, la saisie n'est pas stable. Le contour des cailloux est analysé avec des surfaces déformables, extension 3D de contours déformables.

L'étude réalisée par Francois et al., est basée sur l'existence d'un polygone fermé représentant l'aire de convergence des forces appliquées sur chaque doigt dans le cône de friction. Cette hypothèse est très fortement liée aux types de prises réalisables par la main, notamment la saisie sphérique. En effet, pour une saisie cylindrique, caractérisée par des forces parallèles en opposition, le point de convergence existe à l'infini, mais l'intersection des cônes de friction est vide. Néanmoins, pour des prises sphériques à trois doigts, on peut envisager la recherche d'une position stable par maximisation du polygone de stabilité. La prise la plus stable est celle dont l'intersection des cônes de friction est la plus grande. Cet aspect n'a pas été abordé par l'auteur.

Le calcul des conditions d'équilibre n'est pas facile dans le cas général, où il faut considérer plusieurs doigts qui agissent sur un objet de forme quelconque. Les approches actuelles qui étudient les interactions main/objet ne sont donc pas satisfaisantes à bien des égards, et notamment dans le cas général de la saisie d'objets de forme quelconque. Les principales hypothèses restrictives concernent les contacts (ponctuels), et les classes d'objets à saisir. Les objets considérés sont des objets simples, ramenés à des contours





Polygone de stabilité

FIG. 2.12 - : Polygone d'équilibre [Francois 91].

2d polygonaux ou à des objets courbes 2d, dont on connaît la courbure. De plus, les modèles de représentation sont souvent géométriques, et l'environnement d'utilisation n'est quasiment jamais pris en compte. En résumé, on étudie le plus souvent la stabilité sous des hypothèses quasi-statiques :

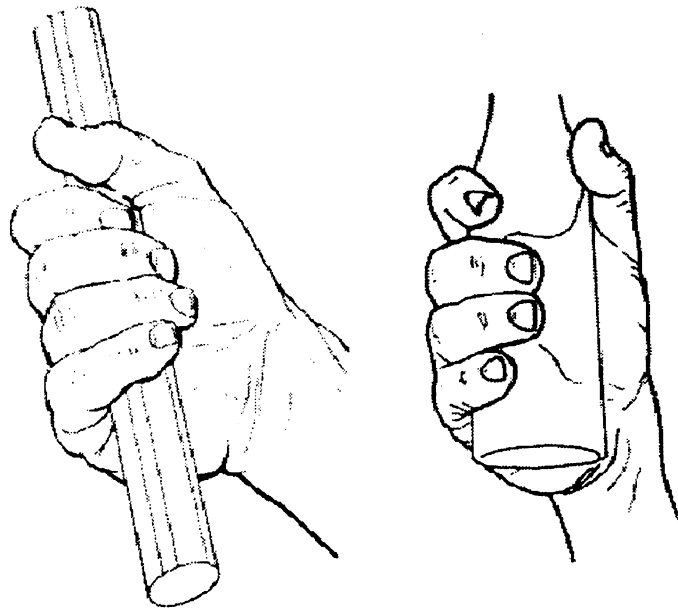
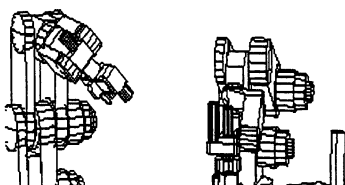


FIG. 2.13 - : Exemples de contacts non ponctuels à considérer.

1. *Le contact considéré est ponctuel.* Les doigts peuvent engendrer des forces tangentes et normales, sans générer de moments aux points de contact.
2. *Les calculs se ramènent à un calcul 2d dans le plan de saisie , formé par les points*



de contact (trois points ou plus dans le même plan). Le plan de saisie est représenté par un polygone ou une courbe fermés.

3. Enfin, *seuls des critères géométriques et cinématiques* sont pris en compte pour l'étude de stabilité. Il est à noter que le cône de friction est une représentation géométrique d'un problème mécanique.

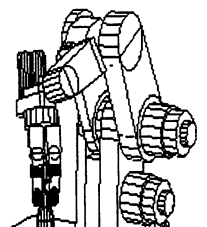
Ces hypothèses ne sont plus suffisantes dès que l'on veut réellement appliquer à une vraie main le résultat de l'étude de stabilité. En effet, les contacts deviennent mous et surfaciques (« soft fingers ») et les objets (dont la main) ont des caractéristiques physiques, telles la masse ou l'inertie, qui ne peuvent pas être négligées. Certaines de ces hypothèses, dans un souci de réalisme, ne peuvent pas être écartées :

- Ni la main, ni l'objet ne sont des entités purement rigides. Généralement, les doigts se déforment aux points de contact, pour faire apparaître une surface de contact. Or cette déformation modifie profondément la physique des interactions main/objet, et écarte l'hypothèse de contact ponctuel, sur laquelle reposent les approches antérieures. Cependant, ces phénomènes d'élasticité ne peuvent pas être étudiés à l'aide des modèles géométriques classiques.
- Les contacts pulpaire et palmaire doivent être considérés (fig. 2.13). En particulier, sous l'hypothèse de contacts multiples, on augmente le nombre de cas où l'objet est dans des conditions de saisie satisfaisantes.
- Les conditions de stabilité, telles qu'elles ont été décrites, ne permettent pas de « contrôler » le mouvement éventuel de l'objet à saisir en cas d'instabilité « instantanée ». Ce qui est le cas le plus courant. Des stratégies doivent être élaborées pour permettre de relier les forces engendrées par le système objet/main, et le contrôle des doigts. Là encore, les modèles géométriques sont difficilement utilisables.

Néanmoins, ces analyses de stabilité sont utiles dans la planification même de la saisie. Ils permettent de faire un choix parmi les multiples solutions possible de saisie, et donnent des conditions initiales sur les directions et les efforts à engendrer.

2.5 Accessibilité et évitement des collisions

Très peu de méthodes s'inquiètent de l'accessibilité des solutions proposées pour la saisie par une main articulée. Le type d'accessibilité le plus souvent pris en compte, concerne les accessibilités locales sur l'objet lui-même, et sur son environnement proche. Les accessibilités dites globales, considèrent la main et son bras porteur. Il faut trouver un chemin sans collision de la configuration courante main/bras à une configuration de saisie. Le domaine concerné est la planification de trajectoires pour de grands nombres de degrés de liberté.



La complexité algorithmique du problème de la planification de trajectoire, pour des systèmes à nombre élevé de degrés de liberté, entraîne, en pratique, une perte de complétude des solutions. En effet, la complexité est évaluée comme polynomiale pour l'environnement, et exponentielle en nombre de degrés de liberté du robot [87]. Trois grands types de méthodes de planification peuvent être énumérés : les méthodes globales, locales, et mixtes.

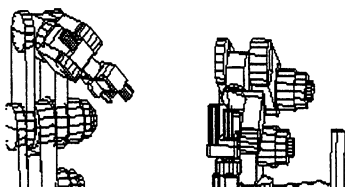
Concernant la saisie, ces méthodes peuvent être utilisées pour les accessibilités de la prise (i.e. le mouvement des doigts seuls), les trajectoires de la main vers l'objet (i.e. la planification du mouvement des doigts et du poignet), la trajectoire du bras considérant la main avec une configuration fixe, et enfin, la planification sans collisions du système bras/main où tous les degrés de libertés peuvent évoluer. Il n'existe pas, à proprement parlé, de méthodes de planification plus appropriées pour une recherche de trajectoire suivant le cas envisagé (i.e. pour la prise, main/objets, le bras et/ou le système bras/main), néanmoins certaines sont plus adaptées que d'autres. Ensuite, la difficulté consiste à les connecter pour réaliser globalement la tâche de saisie [100].

Les accessibilités d'une prise. LAUGIER et al. [51] ont proposé un algorithme de recherche d'accessibilité des prises pour une pince à deux mors parallèles. Cet algorithme énumère toutes les possibilités de saisie tenant compte de la morphologie de la main et de l'objet (un polyèdre). Ne pouvant pas utiliser le même processus avec un main, les accessibilités d'une prises se concentrent vers la trajectoire des doigts jusqu'au contact.

Partant du principe que la prise a été choisie, c'est-à-dire qu'une position des bouts de doigts au contact de l'objet ou qu'une position du poignet par rapport à l'objet a été fixé, il s'agit de trouver une configuration telle qu'elle soit sans collision avec l'objet et les obstacles alentours. Dans ce cas, on ne considère que le mouvement des doigts.

Pour le mouvement des doigts, les méthodes locales de planification de trajectoire semblent les plus adaptées. Ces méthodes n'utilisent pas un modèle complet de l'espace libre, et prennent en compte à un instant donné, l'environnement proche du robot. Dès que l'espace des configurations devient trop complexe, ces méthodes deviennent pertinentes. Deux méthodes représentatives de ce groupe sont : la méthode des potentiels par KHATIB [47] et la méthode des contraintes par FAVERJON [21]. Elles ont la capacité de prendre en compte un grand nombre de degrés de liberté. Les limites de ces types de méthodes concernent les minima locaux. C'est un problème inhérent à toutes les méthodes basées sur des minimisations. Elles deviennent efficaces dès qu'il s'agit de petits mouvements en environnement contraint, comme bouger les doigts vers un but précis ou pour la manipulation des objets entre les doigts sans perdre le contact (figure 2.14). On peut très bien envisager avec ce type de méthode que les bouts des doigts sont attirés vers un but très précis, sachant que ces doigts sont proches de leur position finale.

Les trajectoires main/objets. Les méthodes locales peuvent aussi être utilisées pour ce cas de figure. Contrairement à précédemment, la contrainte sur le poignet a été relâ-



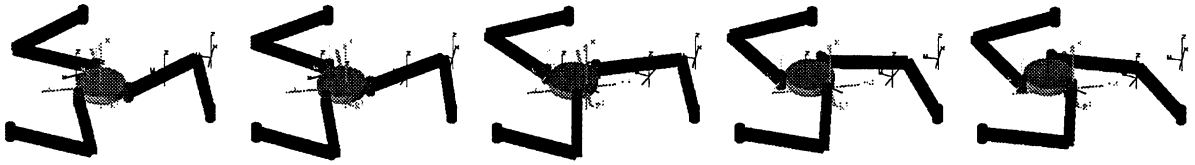


FIG. 2.14 - : Exemple de manipulation par la méthode des contraintes. Les contraintes sont exprimées de manière à garantir le contact entre les doigts et l'objet. L'image 1 représente l'état initial: l'objet est en contact avec les doigts. La séquence d'images représente le mouvement effectué sans perte de contact.

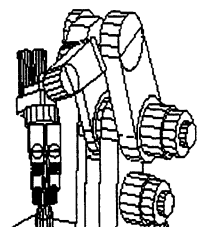
chée. Il peut bouger lui aussi, et suivre la trajectoire des doigts, attirés par un but précis.

Pour ce type de trajectoires, des méthodes globales peuvent aussi servir à planifier une configuration des doigts et du poignet.

Les méthodes globales classiques se caractérisent par une complète modélisation de l'espace libre. On cherche, dans ces méthodes, à représenter l'espace libre dans l'espace des configurations. En pratique, elles s'appliquent à un bras de robot dont on ne considère que les trois premiers corps [55, 21]. Les autres corps sont considérés avec une orientation fixée. Cependant les techniques actuelles s'orientent vers la construction itérative de l'espace des configurations ou vers des stratégies séquentielles, pour prendre en compte tous les degrés de liberté du robot.

Dans ce sens, POLLARD [78] se concentre sur le problème des obstacles dans l'environnement. L'espace des configurations du poignet (espace en six dimensions) est construit pour que la main atteigne un certain type de saisie ou une certaine configuration, sans collisions avec les obstacles. Partant de l'hypothèse que le type de contact est connu (i.e. la position des bouts de doigt sur l'objet), l'espace est construit itérativement, en partant de la phalange distale (phalange la plus éloignée du doigt) vers la phalange proximale, en évaluant le débattement possible de chaque phalange dans l'espace libre, par rapport à une configuration de la phalange précédente. L'implantation est effectuée sur une machine massivement parallèle où chaque processeur représente une discrétisation des positions du poignet, avec 180 orientations possible pour chaque position. Les débattements de chaque phalange sont eux aussi discrétisés. Cette méthode de calcul des positions et orientations du poignet autour d'un objet à saisir peut permettre d'être efficace quand l'objet est très irrégulier, et quand l'ajustement des doigts autour des objets n'est pas évident. Le résultat donne une trajectoire des doigts, une position et orientation du poignet.

Les trajectoires du bras. Les trajectoires du bras sont envisagées quand on connaît parfaitement la position du poignet et des doigts par rapport à l'objet à saisir. C'est typiquement une approche complémentaire aux techniques de trajectoires du poignet/doigts, citées dans le paragraphe précédent.



Les méthodes de planification sans collision pour un bras de robot sont très étudiées en Robotique. Les méthodes globales citées, en ne considérant que les trois premiers ddl du robot (les autres étant fixées) et les méthodes locales, en considérant tous les ddl peuvent convenir pour les trajectoires du bras. Cependant, le nombre de ddl pour les méthodes globales et les minima locaux pour les méthodes locales, contraignent fortement la recherche de trajectoires.

Pour palier ces contraintes, des méthodes récentes ont fait leur apparition.

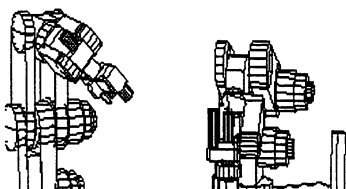
Les méthodes globales actuelles, tenant compte de tous les degrés de liberté s'orientent (comme je l'ai déjà dit) vers des systèmes itératifs. Un système représentatif de construction itérative de l'espace des configurations pour la planification sans collisions, est celui de GUPTA [28]. Il décompose le problème de la planification de mouvement à n ddl en n problèmes à un ddl. Le principe consiste à planifier le mouvement du premier segment du robot. La configuration finale du robot est connue. Ce premier mouvement donne un chemin de référence pour le second segment. Ce chemin est discrétisé, et est représenté par le point d'attache du segment au premier segment. Il suffit ensuite de trouver un chemin (sans collisions) pour ce second segment, suivant le chemin du précédent, etc., jusqu'au dernier segment du robot.

Pour les méthodes locales, des processus aléatoires ont été rajoutées pour sortir des minima locaux. Ce sont des techniques de planification assez récentes, qui souffrent d'un manque de déterminisme. Au pire, elles balayent l'espace accessible au robot complètement, mais ne sont pas capable de s'arrêter toutes seules, si il n'existe pas un chemin sans collisions. On est alors obligé de limiter le temps de recherche. En revanche, s'il existe un chemin, elles le trouvent. Une méthode représentative de ce type de technique concerne l'algorithme de Monte-Carlo [10]. Une autre méthode est référencée sous l'appellation « fil d'Ariane » [1]. L'algorithme fil d'Ariane utilise deux sous-algorithmes « Search » et « Explore ».

« Explore » collecte des informations sur l'espace accessible au robot. Il place des balises le plus loin possible de balises (ou état initial) déjà placées, en mémorisant le chemin d'une balise à l'autre. « Search » utilise une méthode locale pour atteindre la position finale à partir d'une balise. Les deux algorithmes d'optimisation cités sont implantés sous la forme d'algorithmes génétiques parallèles. Ils utilisent la notion de chemin « Manhattan ». Le principe consiste à ne faire bouger le robot que d'un degré de liberté à la fois.

Les trajectoires du système bras/main. Contrairement aux méthodes de planification citées précédemment, il s'agit de prendre en compte toutes les contraintes de planification en même temps : les doigts, le poignet et le bras support.

Les méthodes « mixtes », comme leur nom l'indique, font un savant mélange des méthodes locales et globales. Elles semblent les plus appropriées à l'utilisation d'une main articulée au bout d'un bras de robot. En effet, la planification de saisie avec une main

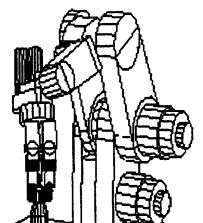


articulée permet de trouver des solutions pour l'objet considérant son environnement très proche. Elle est généralement décomposée en deux sous-buts. L'un concernant la saisie finale et l'autre concernant l'approche ou « préconfiguration » avant la saisie. On peut envisager une méthode globale amenant la main à sa configuration initiale de « préconfiguration », et une méthode locale amenant la main à sa configuration finale. Le mixage entre les deux méthodes se situe au niveau du passage de l'une à l'autre. Étant données une configuration initiale et finale, une méthode locale éloigne le poignet+main suffisamment loin à la fois des positions initiale et finale (deux sous-buts). La méthode globale considère les ddl poignet+main fixes, pour trouver un chemin entre les deux sous-buts [7]. Le lecteur peut se référer à BELLIER [11], pour la description rigoureuse d'une méthode « mixte » de planification de trajectoire, basée sur une représentation de l'espace des configurations (3 ddl) par octree (globale), et sur la méthode des contraintes présentée précédemment (locale). Cependant, cette méthode n'est pas mixte dans le vrai sens du terme, dans la mesure où elle ne change pas de planificateur quand l'un ou l'autre tombe dans une impasse.

Bilan. Utiliser un système robotique à grand nombre de degrés de liberté (quinze ddl pour notre plateforme robotique bras/main), est un problème très complexe. Nous avons vu que les approches essayent de décomposer le problème en considérant, soit la planification du mouvement du bras avec une main dont la configuration est fixée, et ensuite une planification du mouvement des doigts avec une orientation de la main fixe (pour les méthodes globales), soit la planification complète main+bras, en mettant des priorités sur le mouvement des articulations (méthodes locales avec ou sans processus aléatoires). Chaque méthode possède ses propres défauts : les unes coûteuses en temps de calcul et/ou incomplètes dans les solutions proposées, les autres ayant des minima locaux, ou ne sachant pas quand les solutions n'existent pas. Quoiqu'il en soit, il ressort dans tous les cas, une séparation au niveau de la planification du bras et de la main. Cette séparation est plus ou moins prononcée suivant les méthodes : plus la méthode est locale, plus cette séparation est atténuée, jusqu'aux méthodes aléatoires où le robot et la main ne forment qu'une seule et même entité. Cependant, les méthodes mixtes semblent être un bon compromis pour prendre en compte les contraintes, à la fois au niveau des accessibilités près de l'objet et au niveau de l'environnement global de saisie.

2.6 La saisie sensori-motrice

La motivation de la saisie sensori-motrice ou « saisie guidée par ses sens » est que le monde étant toujours en mouvement et incertain, le robot doit continuellement inter-agir par l'intermédiaire de capteurs, pour mettre à jour sa propre « vision » du monde. De ce fait, il peut, d'une manière robuste, réagir aux incertitudes.



En robotique, le schéma encore assez classique, mais tourné vers le passé, quand il s'agit de faire interagir un robot avec son environnement, est une planification dite « hors-ligne », où on effectue une modélisation et une planification sur un modèle CAO, tandis que les capteurs sont utilisés comme une aide au bon déroulement de l'exécution. De plus en plus, les méthodes actuelles fondent leur planification sur des données issues de capteurs pour être bien plus robustes aux incertitudes.

Pour la saisie, il en va de même, où les interactions entre les doigts et l'objet au moment de la saisie effective sont la clé de la réussite. Le schéma classique que l'on retrouve dans toutes les approches, est peu différente de la « commande » de la saisie humaine. Si on regarde attentivement le schéma de la commande de la saisie humaine proposé par ARBIB (figure 2.2), la saisie sensori-motrice est décomposée en deux parties distinctes :

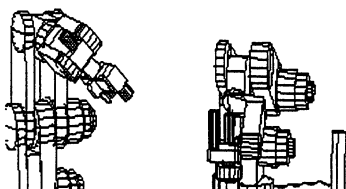
1. *Localisation visuelle de la cible.* Elle permet la localisation, la reconnaissance de taille et de forme de l'objet. Elle engendre une orientation et configuration des doigts pour la saisie. En robotique, cette partie peut être assimilée à des caméras ou autre système visuel permettant la reconstruction de l'environnement de saisie, et la reconnaissance ou le traitement des informations nécessaires à la saisie de l'objet. Le plus souvent, ces capteurs « visuels » ne sont pas concentrés sur la main, mais placés d'une manière fixe ou sur un second robot, permettant dans ce cas, le suivi de l'action et différents points de vue de l'environnement. Nous les référencerons par la suite, comme capteurs « visuels » ou « externes ».
2. *Atteindre et saisir la cible.* Cette partie permet l'activation du mouvement pour atteindre l'objet et l'ajustement des doigts sur celui-ci. Les capteurs utilisés peuvent encore être des capteurs visuels pour atteindre le but, mais concernent essentiellement des capteurs tactiles pour l'ajustement des doigts sur l'objet. Cette fois-ci, les dits capteurs sont positionnés sur la main même, permettant de traduire les efforts exercés par les doigts (capteurs de force), la forme locale de contact (capteurs tactiles), etc. Ces capteurs sont référencés comme tactilo-kinesthésiques ou « internes ». Dans ce cas, la « planification » est « en-ligne », permettant de réagir aux incertitudes de la modélisation et aux événements non prévus. Ils servent aussi au contrôle/commande de la main.

2.6.1 Les capteurs pour la perception

Il s'agit de capteurs « visuels » permettant la localisation et la modélisation avant l'étape de planification de saisie.

Nous avons déjà donné un aperçu de systèmes utilisant des capteurs « externes » pour reconstruire ou obtenir des informations pertinentes pour la planification de saisie [81] [91] [45] (§ 2.3.2). Il s'agit le plus souvent, de caméras ou lasers.

Couramment, des informations volumiques sous la forme d'octree ou d'ensemble de voxels, sont obtenues à partir d'une [93] ou deux caméras (stéréo) [26]. Ces informations volumiques peuvent être aussi reconstruites, à partir d'un laser et d'une caméra [98]. Un plan



laser donne une image de profondeur de l'objet coupant le plan dans une direction particulière. Cette image permet d'obtenir les contours segmentés de l'objet à saisir. Dans le cas de TROCCAZ [75] (saisie automatique avec une pince à deux mors parallèles), les plans de coupe de l'objet sont parallèles au plan de saisie. Il existe une multitude de techniques permettant d'obtenir des informations volumiques.

2.6.2 Les capteurs orientés tâche

Bien que la vision offre une capacité perceptive indéniable, dans certains cas elle ne suffit pas. Dans les meilleurs cas, elle ne donne qu'une information partielle, sauf si l'objet est seul (cas d'étude de faisabilité). Les objets peuvent être partiellement occultés par d'autres ou par la main (e.g. tâche de manipulation). De plus, nous ne pouvons pas percevoir visuellement un objet entièrement, en une seule étape. Pour des reconstructions volumiques globales, plusieurs vues de l'objet sont nécessaires. Enfin, les cas courant d'exécution d'une tâche par un robot, se situent la plupart du temps, dans des situations de visibilité extrêmement pauvre (éclairage insuffisant, encombrement important, ...).

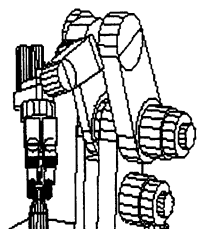
En ajoutant à la main des capteurs tactilo-kinesthétiques, une complémentarité se crée au niveau de la perception. Ces capteurs peuvent être utilisés seuls ou en conjonction avec la vision.

La plupart des expériences avec des capteurs internes, ont pour but de répondre à un certain nombre de questions que l'on peut se poser pour obtenir une saisie sensori-motrice, et qui sont implicites pour une saisie humaine :

- Comment des informations de forces et/ou tactiles, peuvent être utilisées pour la collision avec l'environnement immédiat et pour s'assurer de la stabilité d'une saisie ?
- Quels sont les capteurs appropriés pour détecter la fin d'une phase et le commencement d'une autre ?
- Quelles sont les stratégies de contrôle les plus intéressantes pour chaque phase d'une tâche ? Faut-il une stratégie globale avec des gains différents, ou une différente pour chaque tâche ?

Il est clair que les capteurs tactilo-kinesthétiques sont la réponse à toutes ces questions. Ils peuvent détecter et signaler les changements de phases. La difficulté réside dans l'interprétation de ces signes permettant d'engendrer de bons comportements, face aux événements.

La première utilisation des capteurs de forces positionnés en bout de doigts, concerne la production et le maintien de saisies stables. BICCHI [12], les utilise pour identifier les limites du coefficient de friction en translation et rotation pure, pour différentes matières des objets. Cette identification des limites du frottement permet, par la suite, de mieux contrôler (ou éviter) le glissement. HOWE et al. [30], décrit une expérience avec deux doigts soulevant un objet d'une table. Pour cette expérience, plusieurs capteurs « internes » sont utilisés : trois accéléromètres, pour mesurer l'accélération du doigt et de l'objet, un



capteur de force sur chaque doigt, donnant la force normale et tangentielle (le poids de l'objet est connu). La tâche exécutée comporte différentes phases (figure 2.15) : approche (doigt/objet/table en contact), soulèvement, portage (contact doigt/objet), repose, et départ (contact objet/table seulement). Les résultats de cette expérience montrent que

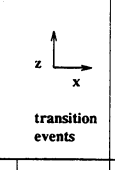
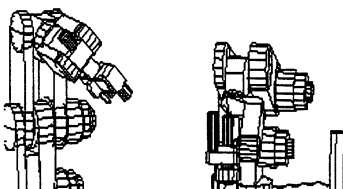
		Pre-contact	Loading	Manipulation	Unloading	Post-contact
		$\dot{f}_g \leq 0$	$\dot{z} > 0$	$f_t \leq \frac{0}{m_g} \times 2$	$\dot{f}_g \leq 0$	
direction x	Force Fx		$0 \rightarrow F_g$	F_g	$F_g \rightarrow 0$	
	Location Xd	$X_i \rightarrow X_o$	X_o	X_o	X_o	$X_o \rightarrow X_f$
	Control	Position	Stiffness	Stiffness	Stiffness	Position
direction z	Force Fz		$0 \rightarrow Mg/2$	$Mg/2$	$Mg/2 \rightarrow 0$	
	Location Zd	Z_o		$Z_o \rightarrow Z_{max} \rightarrow Z_0$		Z_o
	Control	Position	Force	Stiffness	Force	Position

FIG. 2.15 - : Description des phases et paramètres pour une tâche simple de manipulation [Howe 90].

l'accéléromètre en bout de doigt et sur l'objet annoncent clairement le début de chaque phase [30].

Poursuivant le même type d'expérience, STANSFIELD [92] utilise les capteurs de force, pour montrer la corrélation entre force de saisie et poids de l'objet. L'expérience pratiquée consiste à soulever, avec une main articulée, un objet dont le poids est inconnu, et d'ajuster les forces exercées pour contre-balancer la gravité, sans causer de dommages sur l'objet. Les résultats de cette expérience, montrent que le changement de texture des objets n'influence que très peu (suffisamment pour être négligé), l'algorithme proposé.

D'autres types de capteurs peuvent être utilisés, pour l'obtention d'informations « physiques » de l'objet. On nomme ce type de capteurs, des capteurs tactiles. Le but est d'approcher les informations cutanées que l'être humain perçoit au niveau de sa peau : la chaleur, la texture, la géométrie locale de surface de l'objet. Ce capteur cutané est représenté par une matrice carrée dont chaque aire de contact est un capteur mesurant la pression. Il est utilisé pour détecter le type de contact (point, ligne, multiple et/ou étendu), la texture de la surface de contact, la dureté (ou mollesse), et la température. Les utilisations peuvent être multiples, notamment pour le suivi de contour d'un objet, la détection des contacts. Dans ce sens, DARIO [19] décrit l'architecture de contrôle pour des explorations tactiles. Le capteur a une couche dermique et épidermique, et la combinaison des deux couches, permet d'être très sensible aux variations multiples. De même, STANSFIELD [90] utilise un type approché du capteur décrit précédemment. Les informa-



tions perçues, servent à détecter les types de surface de l'objet et sa dureté. De même, BOROVAC [15] mesure la pression exercée sur chaque bout de doigt avec un capteur tactile, pour réaliser, avec deux doigts de la main Belgrade-USC, une tâche d'insertion d'un parallélépipède dans un trou chanfreiné (forces réagissant dans le plan d'insertion, cas 2D).

Simulant sur un robot la présence de capteurs tactiles, REZNIK [83] utilise une méthode de planification réactive pour déplacer un robot de type « serpent »¹². Le déplacement du robot est assimilé à un mouvement de serpent. Dans cette méthode, le robot est capable de « sentir » les obstacles dans le voisinage de n'importe quel point de son corps. Cette enveloppe sensitive détecte la présence d'un obstacle, et fournit la géométrie exacte de la partie de l'obstacle dans l'enveloppe. Dès que le robot est en interaction avec un obstacle, une méthode locale essaye de dégager le segment du robot en collision, et répercute au niveau de tout son corps, le mouvement. Le mouvement global du robot vers son but est commandé par un algorithme de « labyrinthe »¹³. L'intérêt d'une telle approche, est de ne prendre en considération que la partie de l'environnement en interaction avec le robot, à un moment donné. La figure 2.16 montre un exemple de mouvement pour un manipulateur à huit ddl, contournant un obstacle. Cet algorithme a été adapté pour une main articulée à cinq doigts, où chaque doigt est considéré comme un robot « serpent » [84] (figure 2.17). En pratique, l'application en milieu réel, reste assez hypothétique. Il faut pour cela recouvrir le robot d'une sorte de peau dont la sensibilité doit permettre de connaître la forme locale de l'objet sans pour cela être en contact.

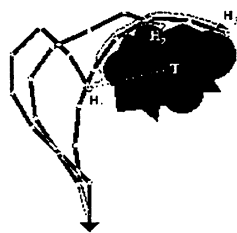


FIG. 2.16 - : mouvement de type « serpent » pour un manipulateur à huit ddl [Reznik 93].

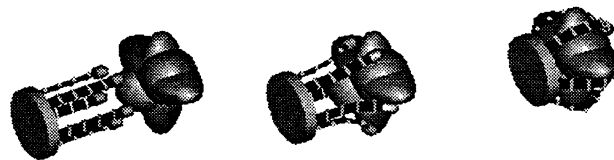
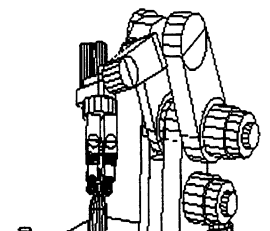


FIG. 2.17 - : main articulée à cinq doigts enveloppant une patatoïde [Reznik 94].

¹²Robot avec un grand nombre de degrés de liberté.

¹³Un algorithme de « labyrinthe » correspond à un balayage de l'espace de recherche jusqu'à trouver une solution (si elle existe). La stratégie employée peut par exemple, considérer de toujours contourner les obstacles par la gauche.



2.6.3 Les capteurs pour le contrôle/commande

La plupart du temps, les capteurs tactilo-kinesthétiques viennent renforcer les informations obtenues par la mécanique même de la main. En effet, prenons par exemple la main de Salisbury. Un schéma classique de commande est montré figure 2.18. Ce schéma intègre déjà différents capteurs, notamment les jauges de mesures des tensions sur les câbles et les encodeurs des moteurs. Ils permettent à eux seuls de connaître les efforts exercés et perçus par les doigts, par l'intermédiaire des couples exercés sur les articulations et les câbles. Avec ce schéma, SALISBURY [85] a établi un contrôle/commande hybride force/position. Fearing a expérimenté une tâche de manipulation avec le même type de contrôle/commande (§ 2.4.3). Il sous-entend clairement que l'ajout de capteurs de forces permet d'obtenir un système plus robuste, en comparant les efforts, et en modifiant le mouvement, pour obtenir les forces désirées au bon endroit.

Venant renforcer cette conviction, KANEKO [43] utilise un système sans capteurs tactiles,

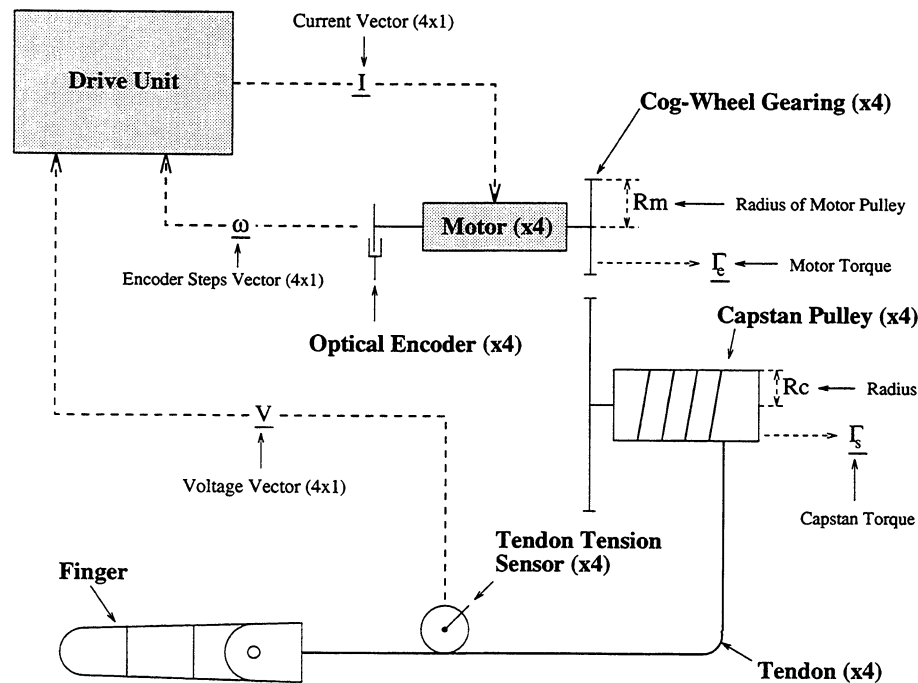
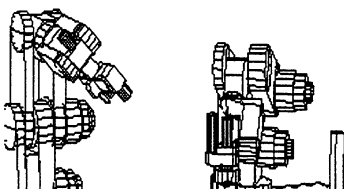


FIG. 2.18 - : Schéma de commande de la main de Salisbury.

et mesure les moments exercés sur les transmissions cinématiques. L'algorithme comporte deux phases : la première consiste à faire entrer en contact une phalange et un objet inconnu ; la deuxième phase détermine le point exact de contact, en bougeant un peu l'articulation par glissement. La forme locale de l'objet, autour du point de contact obtenu, utile pour la stabilité, ne peut pas être connue sans un capteur tactile [42].



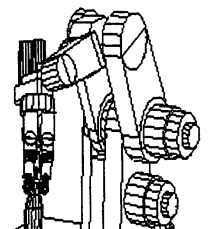
2.7 Conclusion et orientation des travaux

Après avoir passé en revue les systèmes précédents, il est clair qu'une approche essayant de raisonner dans le sens de la saisie humaine, semble la plus appropriée pour envisager la saisie au sens robotique. Cela se ressent dans les types de capteurs internes usités pour la saisie, et dans la notion de préconfiguration. Pour cela, il est nécessaire de transformer la « commande » complexe de la saisie humaine, en trois problèmes Robotique résolubles, articulés autour de la notion de préconfiguration :

1. Localisation visuelle du but : reconnaissance, détermination, orientation, analyse de forme et taille de l'objet. Cette localisation visuelle doit permettre d'effectuer une préconfiguration. Elle indique l'endroit où les doigts vont être posés sur l'objet. On utilise, pour cette tâche, des capteurs sensoriels externes.
2. Atteindre le but : mouvement du bras et préconfiguration des doigts en accord avec la reconnaissance, pour amener la main autour de l'objet à saisir. Des capteurs visuels permettent d'atteindre le but, tandis que des capteurs tactilo-kinesthésiques permettent des mouvements fins près de l'objet.
3. Saisir : fermeture des doigts en accord avec la préconfiguration effective, et stabilité. Seuls des capteurs internes sont à même de prendre en compte et de fournir les informations permettant de réagir aux interactions doigts/objet.

Le raisonnement, induit par la notion de préconfiguration, est le moyen approprié pour réduire la complexité algorithmique. De plus, une préconfiguration est attachée à une zone où les doigts vont se refermer, et non à des points particuliers sur l'objet. Cette dernière remarque est très importante, elle permet de traiter des groupes de solutions en même temps.

Les systèmes « tâche » (modèle tâche), orientent la saisie en fonction de la tâche à effectuer. Certains poussent le raisonnement jusqu'à l'association d'une prise à un type de tâche donné plutôt qu'à un objet. Les systèmes orientés objets (modèle objet), s'attachent au type d'objet à saisir. Ils associent une ou plusieurs prises à un modèle canonique d'objet, qu'ils essaient de reconnaître par le biais de capteurs externes ou dans un environnement de saisie structuré. Ils supposent pour cela, que la prise sur un objet canonique est connue. Envisager la saisie en orientant notre approche suivant l'un ou l'autre des deux modèles qui ressortent de la littérature, ne nous semble pas approprié. Pour étayer l'opinion du lecteur, regardons la figure 2.19 montrant des exemples de prises totalement différentes, pour un cylindre. Il s'agit de saisir une aiguille, un crayon, un manche et une bouteille. La tâche joue un rôle important dans cet exemple pour engendrer la saisie. Bien que l'entité géométrique commune soit identique pour tous ces objets, un cylindre, les prises sont complètement différentes. Enfin, prenons deux objets quasiment identiques. S'il s'agit de saisir un fusain en lieu et place du crayon, la différence entre ces deux modes de saisie vient de la tâche, alors que la géométrie est pratiquement identique. Dans le cas de la saisie d'un crayon (pour écrire), les mouvements doivent être précis. Avec un fusain, ils sont plus grossiers. Cette différence oriente le type de prise à effectuer. Dans cet



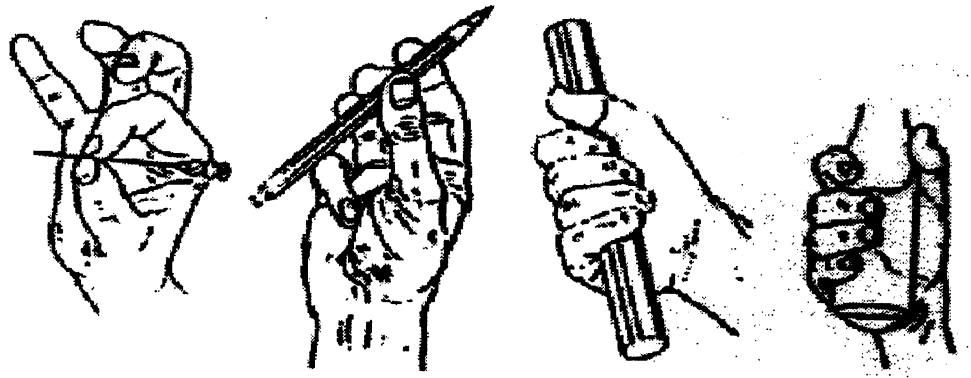


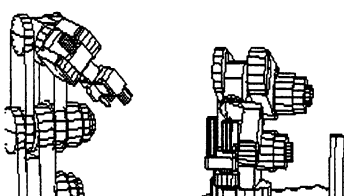
FIG. 2.19 - : Différents types de prises pour une même entité géométrique : le cylindre.

exemple, il existe bien une constante, elle concerne le nombre de doigts virtuels utilisés pour les contacts : deux. Néanmoins, les contacts obtenus sont très différents. Il n'est donc pas approprié d'envisager une recherche d'entités géométriques canoniques, au vu de ces simples exemples.

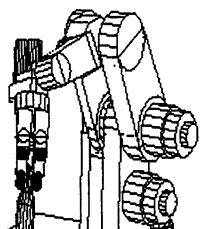
En orientant notre approche dans le sens d'un modèle tâche uniquement, le chemin à suivre ne semble pas le meilleur non plus. Pourtant, NAPIER semble convaincu du contraire. L'exemple du tournevis, qu'il prend comme exemple pour affirmer sa théorie, peut être discuté. En effet, une prise en puissance est nécessaire au départ de la tâche de vissage pour enfoncer une vis. Ensuite, seule une prise en précision permet le vissage. Les cas de figure de cette réalisation de vissage ne sont valides que dans les cas de grande résistance au vissage, au départ de la tâche. Cette description de l'utilisation du tournevis peut être remise en cause, si la résistance au vissage est pratiquement nulle, du fait que le support de vissage possède déjà un chanfrein taraudé. Il en est de même, s'il s'agit d'une vis relativement petite et d'un tournevis relativement petit par rapport à la main. On peut envisager les prises inverses : précision pour insérer la vis dans un trou et puissance ensuite, pour s'assurer du maintien de la vis en fin de tâche.

Ce que l'on peut reprocher à ces méthodes orientées vers l'un ou l'autre des deux modèles est de ne pas avoir une vision globale de la saisie, dans l'optique de la rendre autonome. La géométrie est de toute façon un problème intrinsèque, et la tâche est une contrainte supplémentaire, renforçant le choix d'une prise.

Les systèmes capables de chercher des zones géométriques stables, suivant certaines contraintes de force ou de formes, sont intéressants car ils permettent ensuite de juger de la qualité d'une prise. Cependant, ils sont incomplets, car des informations importantes sur les critères physiques d'un objet, tels son poids, son élasticité ou les déformations au moment du contact, sont indispensables à la réalisation d'une saisie stable. Peu de systèmes intègrent les modèles tâches et objets à la fois. De plus, les incertitudes de la



connaissance de l'environnement et du contrôle/commande du robot, font apparaître la nécessité de laisser au contrôle/commande, l'exécution de la fermeture et la gestion des interactions, via les informations fournies par les capteurs internes. La préconfiguration est une notion bien adaptée pour ça. Elle sépare la phase d'approche, qui amène les doigts autour de l'objet, de la phase d'interaction. Cependant, les contraintes exprimées au niveau de la préconfiguration doivent se retrouver au niveau de la fermeture.



Chapitre 3

Notre Approche

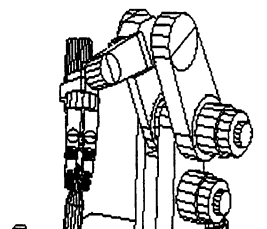
Les enseignements que nous venons d'évoquer, renforcent nos motivations quant à l'approche à adopter pour réaliser d'une manière autonome, une tâche de saisie. Nous prenons aussi en considération les antécédents (au sein de l'équipe), plus que pertinents, dans le domaine de la saisie automatique avec des pinces simples.

3.1 Orientations

Les méthodes utilisant des pinces simples sont contraintes à rechercher des contacts avec un outil ayant des faces parallèles, la représentation par facettes d'un objet est alors la plus simple à utiliser. De plus, elle est cohérente avec la morphologie du préhenseur. Dans le cas d'une main dextre, les contacts sont beaucoup moins contraints. La combinatoire est alors plus importante. Pour la réduire, il semble plus intéressant de rechercher des entités ou protubérances homogènes sur un objet, sur lequel placer les doigts. La préconfiguration renforce cette hypothèse, dans le sens où il n'existe qu'un nombre très réduit de configurations par rapport aux formes multiples que peuvent prendre les objets. Il ne s'agit pas de rechercher des formes canoniques dans un objet, mais bel et bien de donner une représentation unique permettant d'effectuer une préconfiguration, en accord avec la tâche.

Bien que ne pouvant pas adopter les mêmes algorithmes qu'avec une pince simple, la démarche reste la même. Le tableau 3.1 montre les analogies entre la méthode utilisée pour la recherche de prise avec une pince à deux mors et nos motivations quant à la réalisation d'un planificateur de saisie pour une main articulée.

Notre approche utilise un modèle symbolique permettant de regrouper toutes les informations pertinentes, susceptibles d'aider au choix et à l'exécution d'une préconfiguration, sans toutefois s'attacher au type même de l'objet. Ces informations pertinentes doivent prendre en compte les contraintes de la tâche, les contacts à obtenir, la géométrie et les caractères physiques de l'objet, pour converger vers une prise stable. Dans un contexte



<i>Saisie à deux mors</i>	<i>Saisie par une main articulée</i>
Représentation géométrique plan/face/point	Modèle symbolique issu de la CAO ou de la vision
Dénombrement de toutes les prises possibles	Dénombrement de toutes les préconfigurations
Heuristiques de tri sur la qualité principalement sur la stabilité, et sur l'accessibilité locale	filtrage par accès aux préconfigurations tri sur la stabilité et adéquation à la tâche notion de précision, forces, manipulabilité
filtrage et raffinement par accessibilité globale	Espace des configurations complexe → méthodes de planification externes (locale, mixte, ...)

TAB. 3.1 - : Analogies entre les approches [Pertin 86] et [Bard 94].

d'automatisation, il faut pouvoir extraire à partir de capteurs externes, ce type de modèle. Notamment dans une optique d'intégration de la saisie dans un système complet de réalisation de tâche par un robot manipulateur. Le chapitre 4 décrit dans ce sens le modèle et l'approche proposés pour une main articulée.

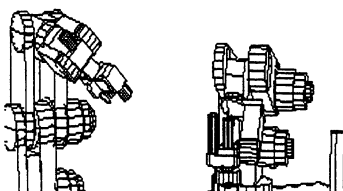
Enfin, pour faciliter le passage vers le contrôle de l'exécution d'une tâche de saisie et par la suite vers la manipulation, nous prenons en compte les contraintes physiques liées à l'objet et à la main.

3.2 Formalisation du problème de la saisie : les hypothèses

Le problème de la saisie se pose en de multiples termes, qui dépendent essentiellement de trois entités : un objet O à saisir, un outil de préhension M (une main robotique articulée), et enfin, une tâche T pour laquelle on veut saisir O avec M . Avec ces trois entités, la question importante à laquelle on se doit de répondre, avant de parler de manipulation, de transport ou de tout autre tâche complexe dans un contexte de programmation automatique, est la suivante :

Comment saisir O au moyen de M en respectant les contraintes imposées par T , et cela de manière automatique ?

Depuis bien longtemps déjà, pour des objets spécifiques, des outils spécifiques et des tâches spécifiques, on a su résoudre les problèmes soulevés par cette question (le lecteur peut se référer au chapitre 2 pour des approches récentes). Définissons les moyens avec lesquels on veut répondre à cette question, c'est-à-dire en termes de non spécificité de nos trois entités.



Soit O l'objet. Il va du « simple » objet à forme « patatoïdale », comme un échantillon planétaire, à un objet manufacturé qui a une utilité particulière comme une tasse ou un tournevis. Le modèle de cet objet, dont nous avons une connaissance volumétrique, peut être construit, soit par un système CAO, soit par le traitement de données issues de capteurs sensoriels.

Soit M l'outil de préhension. L'aspect versatilité est prépondérant pour l'outil de préhension. En plus, du fait qu'il peut s'adapter à différents objets, il doit permettre de mieux résoudre les problèmes d'accessibilité et de stabilité. L'aspect redondant ne doit pas être négligé. Il implique, dans certains cas, un fonctionnement dégradé. Cette « tolérance aux fautes » est intéressante en milieu spatial. Il se peut qu'un doigt ne puisse plus être commandé ; la saisie avec les deux autres doigts est encore possible. Enfin, c'est un outil qui permet d'envisager une variété de tâches. Notre but est de saisir un objet pour réaliser par la suite une tâche précise, et pas seulement aller le poser.

Pour notre étude, deux types de mains articulées sont considérées : la main du Centre National d'Études Spatiales OTD¹, et la « main de Salisbury » physiquement disponible pour nos expérimentations. Nous verrons par la suite que cette étude est assez générique pour permettre la saisie d'objets avec une simple pince à deux mors parallèles. Renforçant cet aspect, la main OTD peut être assimilée à une pince simple quand on utilise seulement deux doigts (cf. chapitre 1).

Pour notre réalisation, nous supposons disposer d'une connaissance parfaite du modèle géométrique et cinématique de l'outil considéré.

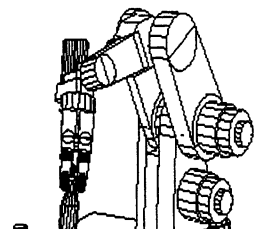
Soit T la tâche. Elle va de la simple opération de « prendre et poser » à une manipulation complexe, qui répond à l'utilisation particulière d'un outil (au sens objet), comme enfoncer un clou avec un marteau, ou insérer un connecteur dans son boîtier. La première étape de cette tâche consiste à prendre l'objet O avec M en tenant compte de certains impératifs. Ces impératifs seront énoncés plus loin. Notre étude principale se concentre sur l'automatisation de la tâche de préhension. En effet, elle constitue un pré-requis vers n'importe quelle étape de manipulation ultérieure.

3.3 Schéma de notre approche

Soit notre main M montée sur un robot manipulateur R , placés dans un environnement W . Cet environnement peut être complètement ou partiellement connu. Trois fonctions principales sont nécessaires pour les étapes de notre scénario :

- **Récupération des données.** Récupérer une information volumique VOL_{O/W_i} sur l'objet O , ainsi que sur son environnement immédiat W_i . L'information de volume est nécessaire pour envisager la saisie avec une main en dimension trois. W_i est matérialisé par un volume englobant, de la taille de l'objet et de la taille de l'outil.

¹Organe Terminal Dextre.



Ceci pour permettre de prendre en compte les aspects accessibilité de l'objet lui-même, mais des obstacles près de l'objet et des doigts. Cette information volumique peut être issue, soit de capteurs sensoriels externes, notamment de la vision, à l'aide de caméras et/ou d'un laser, soit d'un modèle CAO connu a priori (§ 3.4). Par la suite, nous supposons faire la différence entre l'objet à saisir et les obstacles environnants. Le cas d'un objet non différencié dans son environnement, est discuté plus loin (§ 7.2.1).

- **Fonction 1 : phase d'approche.** Extraire, à partir de l'information VOL_{O/W_i} , des informations morphologiques pour configurer la main autour de l'objet ou d'une de ses parties.

→ *Fonction « phase d'approche »* (chapitre 4).

- **Fonction 2 : préconfiguration.**

- Choisir une prise, compte tenu des contraintes d'accessibilité de la main, de tâche et de stabilité sur l'objet et son environnement.
- Amener la main près de l'objet à saisir au moyen de R . Nous utilisons un planificateur de mouvement sans collision, pour un bras manipulateur disponible et implanté dans notre laboratoire [11]. Nous avons eu un aperçu (§ 2.5), et nous verrons par la suite, que les fonctionnalités du planificateur « mixte » de trajectoire sans collision correspondent à nos besoins (§ 7).
- Préconfigurer les doigts suivant la partie d'objet (ou l'objet) à saisir, en fonction des informations morphologiques extraites de VOL_{O/W_i} .

→ *Fonction « préconfiguration »* (chapitre 5).

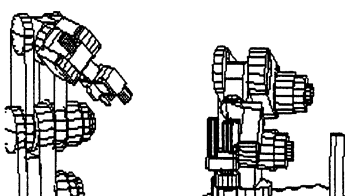
- **Fonction 3 : interactions main/objet.** Fermer les doigts pour réaliser la saisie effective à partir de la préconfiguration, tenant compte de toutes les contraintes imposées par l'environnement : la stabilité, la tâche, l'encombrement, l'accessibilité, et la dynamique des interactions main/objet.

→ *Fonction « interactions main/objet »* (chapitre 6).

3.3.1 Description de la fonction : phase d'approche

Nous envisageons avec un robot doté d'une main articulée d'approcher ou de parvenir à une « qualité » dans la saisie, comparable à celle que l'on peut avoir quand, « nous » en tant qu'êtres humains, nous saisissons et manipulons un objet. Une approche naturelle, en rapport avec l'outil, est une approche *morphologique*.

Du GREC morphé *forme*, et logos *science*, une approche morphologique se démarque d'une approche géométrique, par la recherche de formes homogènes dans un objet. Ces formes homogènes permettent de placer les doigts. Pour fixer les idées, une tasse ne sera pas décrite par un modèle CAO classique, mais par ses deux entités « canoniques », qui sont son corps et son anse. Le modèle morphologique associé au corps et à l'anse, doit



faire transparaître une description des proportions avant tout. Le principal intérêt vient de la connaissance directe de ces informations, ce qui n'est pas le cas pour des modèles géométriques classiques. En y rajoutant des informations d'accessibilité, de contact et de stabilité, le modèle devient pertinent pour la saisie. En général, il est moins précis qu'une description géométrique. Il est, néanmoins, plus pertinent pour l'analyse de saisie. Il permet de diminuer l'aspect combinatoire.

3.3.2 Description de la fonction : préconfiguration

Une préconfiguration consiste à orienter la main dans une direction adéquate de telle manière qu'elle accède facilement à l'objet, et à positionner les doigts, pour que la main prenne une forme proche de la forme de l'objet. Il existe peu de préconfigurations pour une main robotique, pour tous les types d'objet.

Il s'agit pour nous, de définir les préconfigurations d'une main robotique par rapport aux informations issues de l'environnement, c'est-à-dire de la tâche à effectuer et du modèle utilisé dans la fonction « phase d'approche ».

La fonction « préconfiguration » intègre une connaissance des positions initiales des doigts autour de l'objet, et une connaissance des mouvements et forces initiaux des doigts qui vont à la rencontre de l'objet à saisir. On ne referme pas les doigts de la même manière pour une saisie sphérique et une saisie cylindrique (cf. 5.7).

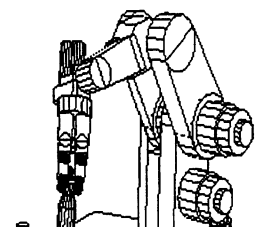
3.3.3 Description de la fonction : interactions main/objet

La fonction de préconfiguration sert naturellement, d'initialisation à la phase d'interaction (ou de fermeture).

Dans une étude de préconfiguration, si des connaissances géométriques sur l'objet peuvent suffire pour engendrer une préconfiguration, ce n'est plus le cas si l'on veut prendre en compte les interactions entre les différents corps en présence. On ne peut pas saisir un objet sans connaître certains « *attributs physiques* », tels la masse de l'objet, sa rigidité, ou la déformation engendrée par les bouts de doigts mous (main MDS), cela pour s'assurer de la cohérence de la fermeture des doigts sur l'objet, c'est-à-dire engendrer une complète *stabilité*.

Pour mettre en œuvre des aspects quantitatifs, de nombreux attributs physiques peuvent être associés à un objet du monde physique. En effet, chaque objet possède des propriétés qui rendent compte de comportements particuliers de cet objet face à des actions qu'on lui fait subir. Si l'on s'intéresse à des forces extérieures, la rigidité, et l'élasticité font partie des aspects physiques à considérer pour étudier le mouvement et la déformation des objets. C'est le cas pour la saisie.

Cependant, il est très difficile d'obtenir un modèle informatique capable de présenter toutes les propriétés d'un objet donné. On doit se contenter de représenter quelques



propriétés physiques, dans des conditions bien connues. Dans la fonction « interactions main/objet », nous mettons en évidence un modèle, basé sur la « dynamique des interactions », permettant de décrire la réaction mécanique des objets en relation avec des forces extérieures, afin de prédire leurs mouvements. Il est utilisé pour prédire explicitement l'interaction main/objet, et nous aider ainsi à évaluer une opération de saisie plus efficace et plus sûre en relation avec la fonction de « préconfiguration ».

Cette idée de « dynamique des interactions entre corps physiques » a déjà commencé à être abordée en robotique [38], notamment dans le domaine de la robotique mobile où des résultats encourageants en simulation, ont permis de valider certains concepts. Nous reprenons ici cette idée, pour la saisie.

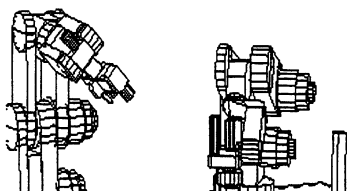
3.4 Le modèle de l'environnement

Pour ne pas restreindre le cadre d'application de cette approche, les informations « brutes » peuvent venir d'un modèle classique utilisé en CAO, par représentation des frontières ou de construction ensembliste des objets [82], tel qu'il est implanté dans l'outil de développement robotique ACT [64]. Les informations peuvent venir aussi, d'un modèle issu d'un capteur sensoriel externe, par exemple l'énumération statistique de l'espace occupé à partir de caméras stéréo (les voxels) [26] ou par segmentation de tranche à partir d'un laser [34], ...

Tous ces modèles ont en commun l'information de volume nécessaire à une saisie 3D. Il n'est pas question d'extraire de chaque représentation les informations morphologiques indispensables, mais de convertir ces représentations en un modèle unique, qui garde l'information principale de volume, et à partir duquel on extrait les caractéristiques physiques. Nous utilisons une représentation volumique par octrees [25]. Un octree est une représentation hiérarchique des objets, dite « d'énumération spatiale ». La modélisation par octree est basée sur la division récursive en huit octants d'un cube de référence, contenant le ou les objets à modéliser. Le processus de subdivision se poursuit jusqu'à l'obtention de cubes vides (ne coupant pas l'objet) ou pleins (inclus dans l'objet), ou bien jusqu'à un niveau de subdivision maximal pour lesquels les cubes coupant l'objet sont considérés comme pleins.

Les octrees possèdent toutes les caractéristiques requises :

- L'information de volume : un octree est une décomposition d'un volume en cellules, elles-mêmes étant obtenues par division récursive des volumes.
- La possibilité d'obtenir une précision pour chaque type de situation par discrétisation en profondeur de l'arbre octal. On peut imaginer par exemple, avoir besoin de moins de précision pour une analyse de préconfiguration, en supposant que l'information de forme est conservée, que pour une analyse de stabilité.
- Le nœud principal représente une vue volumétrique de l'objet et de son environnement local, permettant d'engendrer un processus d'analyse d'accessibilité.



- Enfin, chose très importante pour garantir l'aspect réaliste de l'approche, il est possible (et très facile) d'obtenir un octree, que ce soit à partir d'un voxel ou d'une représentation de type CAO (figure 3.1).

Le second travail consiste bien sûr à utiliser à bon escient le modèle précédent pour l'analyse de préconfiguration, le choix d'une prise et la réalisation effective de la saisie. En effet, ce modèle octree doit être à son tour façonné, pour arriver au but que nous nous sommes fixés, c'est-à-dire obtenir une représentation « symbolique » adaptée à la saisie. Par la suite nous notons VOL_{O/W_i} par $Octree(O/W_i)$.

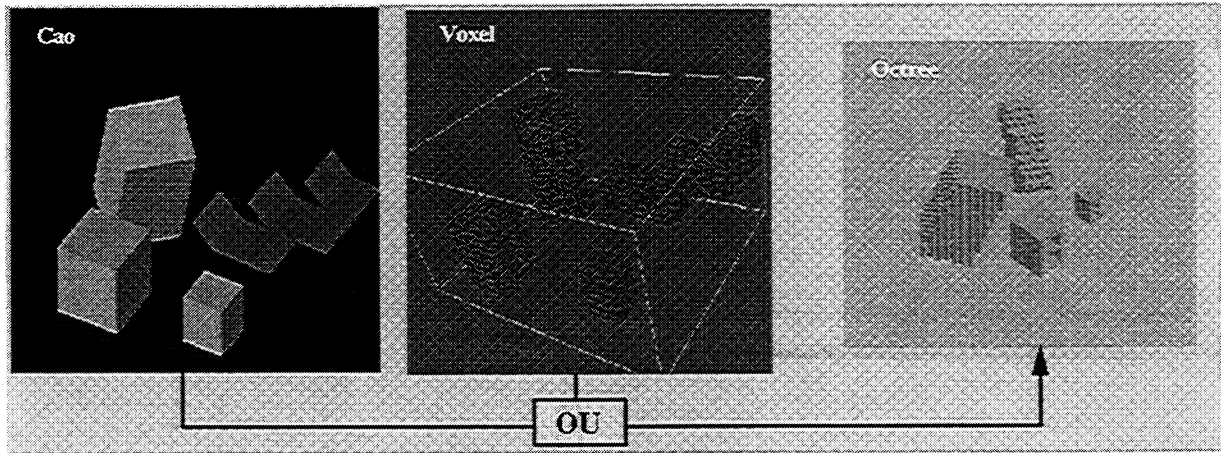
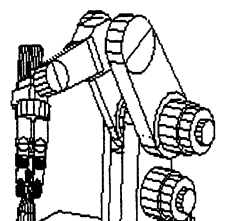


FIG. 3.1 - : Modèle utilisé pour la saisie. Le modèle, CAO ou Sensoriel, est transformé en modèle octree.



Chapitre 4

Phase d'approche : modèle morphologique

Ce chapitre explique comment, à partir d'un modèle volumique d'objet, on peut extraire les informations essentielles permettant la saisie pour une main robotique.

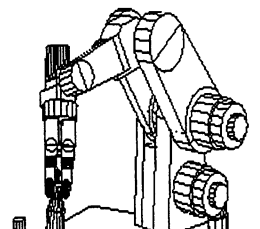
4.1 Le modèle morphologique

4.1.1 Informations pertinentes

Dans un précédent chapitre (§ 2), ont été décrites de manière non formelle un certain nombre d'informations, utilisées pour choisir et exécuter une prise. Les informations susceptibles de permettre de mener à bien la saisie, concernant l'objet, la main et la tâche à effectuer :

- La taille et la forme de l'objet sont indispensables, pour extraire les zones servant à positionner les doigts.
- Une main est composée au minimum de deux doigts. Le nombre de doigts est important pour la paramétrisation de la prise. Les types et lieux où les contacts se produisent au moment de l'interaction sont nécessaires pour effectuer une préconfiguration, envisager la fermeture et analyser la stabilité.
- Les oppositions entre doigts définissent en partie, la tâche ultérieure à réaliser.
- Les prises trouvées doivent être accessibles.

À partir d'un « modèle morphologique », il est important que l'on puisse extraire ou déduire ces informations. Nous regroupons sous l'appellation « modèle morphologique » toutes les informations extraites de $Octree(O/W_l)$ ($Octree(O/W_l) \equiv Octree(O) \cup Octree(W_l)$) susceptibles de nous aider. Si $Octree(O)$ est analysé seul, les informations obtenues n'auront aucune répercussion sur les accessibilités par rapport aux obstacles de W_l .



4.1.2 Approches possibles

$Octree(O)$ est, par définition, l'objet à saisir. En faisant l'hypothèse d'uniformité dans la structure mécanique de l'objet, on peut, par analyse de « sa matrice d'inertie » $I(O)$ (ou matrice d'inertie géométrique) obtenir certaines caractéristiques de forme [27]. Notamment, on peut facilement identifier certaines homogénéités, c'est-à-dire que d'un point de vue analytique, $I(O)$ possède deux ou trois valeurs propres identiques. Notamment, si $I(O)$ possède deux valeurs propres identiques, le vecteur propre associé à la troisième, donne une direction prédominante, et l'objet est homogène dans les deux autres directions. Dans le cas où les trois sont identiques, les proportions de l'objet sont homogènes dans toutes les directions. Cette identification est très faible dès que l'objet a une forme plus ou moins complexe. De plus, pour aborder la préconfiguration, il est important de pouvoir raisonner sur les proportions (chapitre 5).

On peut envisager la squelettisation de $Octree(O)$. L'idée du squelette consiste à centrer dans la forme, un squelette dont la signification est l'élongation et les déformations [14]. Une extension du squelette, est la ligne médiane qui permet de faire des distinctions qualitatives sur la morphologie des régions codant l'épaisseur (renflement, amincissement, élongation, ..). Son graphe associé introduit la notion de voisinage entre des rétrécissements et des formes proéminentes [65]. Néanmoins, ces méthodes de squelettisation sont sensibles aux bruits.

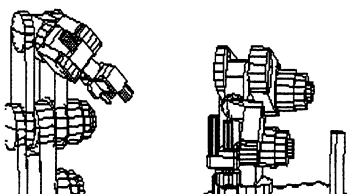
Une étude globale n'est appropriée que pour des cas d'objets simples ou très marqués. Cependant, elle apporte des informations prépondérantes sur sa répartition volumique, par extraction des valeurs et vecteurs propres de $I(O)$ ou par analyse des directions des axes de son squelette, notamment pour le choix d'un axe de coupe Δ . Cet axe de coupe, utilisé dans notre étude tomographique est, comme nous le verrons plus loin dans le chapitre, un des éléments importants de notre approche morphologique (§ 4.1.3.4).

4.1.3 Notre approche : reconstruction 3D à partir d'une analyse tomographique

4.1.3.1 Principe général

Découpons $Octree(O/W_l)$ en tranches régulières suivant une certaine direction Δ et analysons chaque tranche localement (Cf. notations § B.1). Ensuite, regroupons ces analyses locales pour obtenir une analyse morphologique globale. On peut définir une tranche (à une certaine altitude) comme une partie planaire composée d'éléments de O et de W_l . L'union de toutes les tranches reconstitue $octree(O/W_l)$.

En fait, l'analyse en tranches de $Octree(O)$ a été motivée par l'analyse des composants 2D de chaque tranche. En effet, avant de commencer une analyse volumétrique, nous nous



sommes restreints à une main planaire [5] et des objets planaires, ou $\ll 2.5D \gg^1$, pouvant être acquis par une simple image de contraste, dont on extrait les contours segmentés (figure 4.1). Une tranche et une main planaire, peuvent être la vue obtenue, si la caméra regarde la main et l'objet dans la direction de coupe. Une conséquence de la remarque précédente est l'application directe de ce raisonnement sur des données issues d'un système laser/caméra donnant des tranches segmentées. Notre nouveau centre d'intérêt est de saisir une tranche de *Octree*(O/W_l) avec une main planaire [8]. Ce découpage en tranches peut avoir son intérêt, notamment dans des applications médicales, où on travaille généralement sur des coupes tomographiques. De plus, une main planaire représente l'opposition naturelle doigts/pouce que l'on retrouve dans la plus part des mains robotiques.

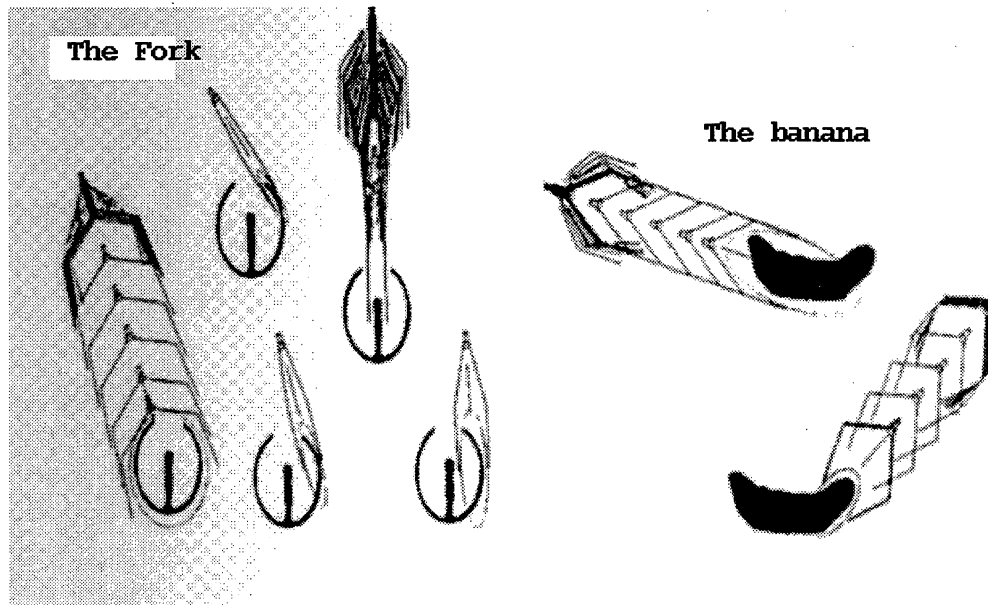


FIG. 4.1 - : Exemple de saisie sur des objets planaires [Bard 90].

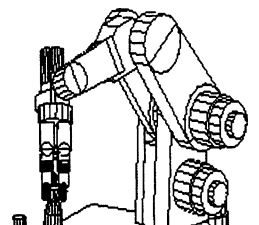
4.1.3.2 Modélisation des tranches : encapsulation par *Ellipses*

Une tranche de *Octree*(O) est approchée par un quadtree (équivalent 2D d'un arbre octal), noté $S_i(O)$, à l'altitude i ($i \in [1, n]$). Chaque $S_i(O)$ est composé d'un ensemble de composants connexes C , représentés par leurs contours fermés.

Les incertitudes issues du modèle volumique font qu'il n'est pas pensable de faire une analyse de type point/arête/face. Même si elles sont minimales, il nous intéresse peu de savoir que telle face est parallèle à telle autre, car en fait, il s'agit surtout d'extraire des renseignements particuliers de taille, de forme et même d'accessibilité.

Notre supposition initiale est donc de considérer un des composants C d'une tranche

¹ Les objets 2.5D sont des polyèdres de balayage, de représentation constante dans une certaine direction (dans notre cas Δ).



comme étant l'objet à saisir avec une main planaire.

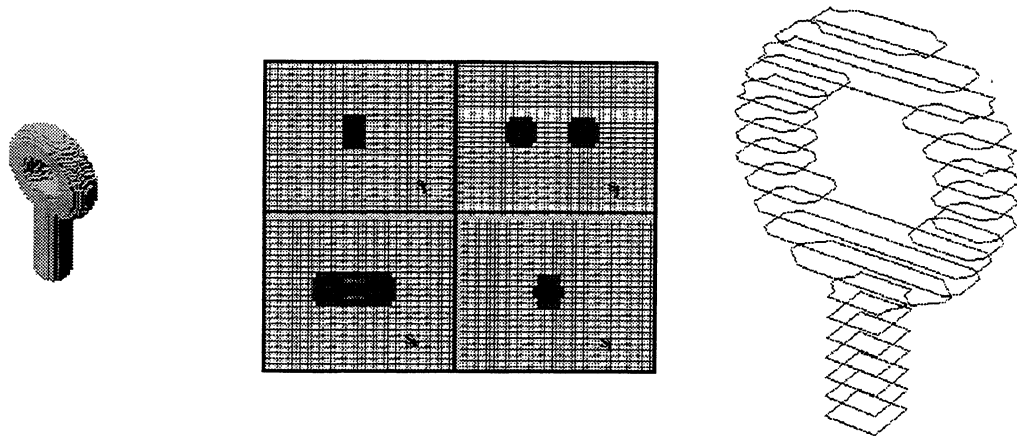


FIG. 4.2 - : Exemple d'une goupille G : $Octree(G)$; des quadrees à différentes altitudes, suivant un axe de coupe Δ (axe z); les composants C issus des coupes.

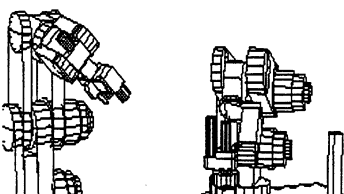
Chaque composant C est, soit un composant de l'objet à saisir et donc un obstacle pour les autres composants du même objet (figure 4.2), soit un composant de l'environnement et donc un obstacle à part entière.

C peut être approximativement représenté par un polygone. De la même manière que pour le modèle volumétrique global, il est possible d'obtenir la matrice « d'inertie » $2D$ de chaque composant C sur chaque tranche. L'hypothèse d'uniformité de matière est nécessaire. Cette matrice, par extraction de ses deux valeurs propres, respectivement λ_a et λ_b , et de ses deux vecteurs propres associés, respectivement $\vec{V}_a$ et $\vec{V}_b$, donne une indication sur la forme et l'orientation de C . En effet, en étudiant le rapport $val = \frac{\lambda_b}{\lambda_a}$ (si $\lambda_b \leq \lambda_a$), on peut déduire des informations sur sa taille et sa forme, notamment dès que $val \simeq 1$, C est assimilé à un cercle. De même, les vecteurs propres donnent des informations sur l'orientation de la forme de C , notamment si $val < 1$.

Il n'est pas question non plus de raisonner ici en termes de segments et de points sur chaque composant C , mais d'extraire un modèle symbolique. Ce modèle symbolique approprié, associé à chaque C est une ellipse, dont la dimension et l'orientation dépendent des valeurs et vecteurs propres associés. Pour que cette ellipse respecte vraiment les proportions/orientation de C , il faut qu'elle l'englobe (figure 4.3).

Les informations issues d'une ellipse sont intéressantes à plus d'un titre :

- Les vecteurs propres donnent directement l'axe de saisie par lequel il est intéressant d'accéder à l'objet. Reprenons l'exemple de la figure 4.3. Les axes de l'ellipse correspondent aux axes principaux du rectangle. Si la main arrive par un axe différent de ceux-ci, les risques d'obtenir une rotation de l'objet au moment de l'interaction,



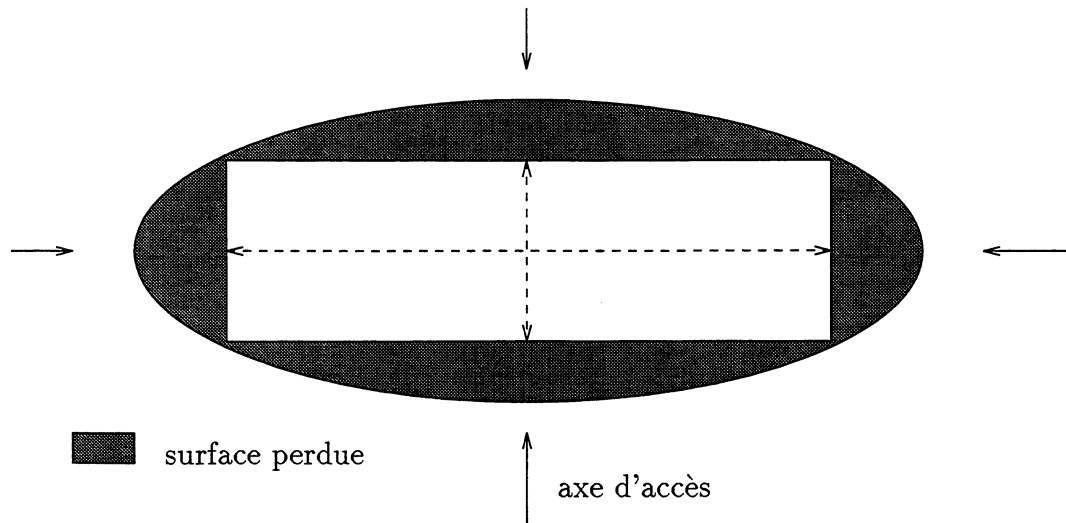


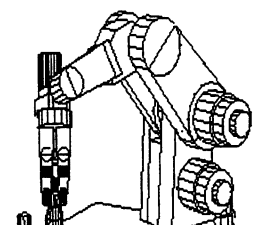
FIG. 4.3 - : Soit C un composant ayant la forme d'un rectangle. Son modèle symbolique est une ellipse respectant ses caractéristiques de longueur, de largeur et d'orientation (rapport conservé).

sont plus importants. La rotation sera inévitable si la main est une pince simple ou si les doigts sont rectangulaires. Ce qui est le cas pour la main OTD.

- Si C est un cercle (cas où $val \simeq 1$), l'ellipse contient l'information structurelle adéquate. De plus, en termes de surface, la perte d'information est minimum, et on peut considérer les 360 degrés d'accessibilité sur C . De même, si C représente une ellipse.

L'idée de BADLER [3], de représentation symbolique par des sphères (pour nous des cercles dans le cas $2D$), a été écartée, à cause de la perte des informations accessibles immédiatement. Il faut obligatoirement plusieurs cercles pour un composant C . Notamment l'accessibilité n'est plus représentée directement. Considérons une main planaire devant saisir une boîte rectangulaire. Si elle est représentée par un seul cercle, le risque est d'arriver ailleurs que sur un de ses côtés. Si elle est représentée par plusieurs cercles, une étude des positions des cercles les uns par rapport aux autres est nécessaire, pour récupérer les directions adéquates.

Construction d'une ellipse. L'idée d'englober un objet par une ellipse a déjà été utilisée par PERRAM [41], pour la navigation sans collision par champs de potentiels, où les obstacles $2D$ sont encapsulés par des ellipses. Nous reprenons l'idée ici de cette construction en nous basant sur le calcul de la matrice d'inertie géométrique $I(C)$ associée à un composant C (définition en annexe § A).



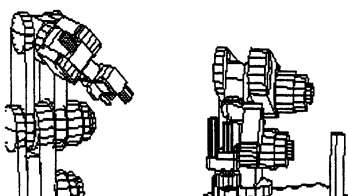
Le calcul de la matrice $I(C)$ et de son ellipse englobante est donné à titre indicatif en annexe (§ A). Le principe consiste à décomposer le polygone C en triangles, dont on calcule aisément les matrices d'inerties. La matrice finale étant la somme des matrices d'inerties de chaque triangle, pondérée par la masse de chaque triangle (ici la surface). Une fois la matrice $I(C)$ obtenue, il suffit d'extraire ses valeurs et vecteurs propres servant pour le calcul de l'ellipse (§ A.3). Le résultat donne une ellipse encapsulant le composant C , respectant les contraintes de forme. A partir de cet instant, le raisonnement ne se fait plus qu'avec ce modèle symbolique où E_c est l'ellipse associée à C .

Découpage d'un composant C . L'inconvénient d'une encapsulation avec une ellipse pour n'importe quel C (excepté un cercle ou une ellipse), est la « perte » d'information au niveau de sa surface, par rapport à celle de l'ellipse. La surface de l'ellipse englobante est d'autant plus grande par rapport à celle de C que celui-ci est « complexe ». Dès que C n'est plus convexe, la forme de l'ellipse, sa surface et même son orientation, en accord avec la matrice d'inertie, n'ont plus grand chose à voir avec C . Cette remarque peut s'appliquer aussi bien à un rectangle englobant.

Une évaluation de ce degré de représentation entre l'ellipse et son composant peut être calculé par le rapport $sval = \frac{\text{surface de } E_c}{\text{surface de } C}$. Plus $sval$ a tendance à se rapprocher de 1, plus l'encapsulation est bonne. Elle atteint 1 quand C représente un cercle ou une ellipse. Dès que le seuil descend en dessous de 65%, pour un composant non convexe, E_c n'est plus représentative de C . Ce seuil correspond à l'encapsulation d'un cercle, englobant un carré. La seule manière de résoudre ce problème est de découper, quand cela est « possible » C , et d'encapsuler récursivement chacun des composants issus du découpage. Il s'agit de découper à bon escient, c'est-à-dire dans l'optique de servir la saisie de l'objet. Une première méthode consiste à découper récursivement C , à partir de ses points concaves, jusqu'à l'obtention de nouveaux composants tous convexes, ou de taille trop petite (par rapport à un doigt) pour envisager un nouveau découpage. Une autre méthode, plus axée vers la saisie, consiste à se dire qu'il faut que le résultat de ce découpage apporte quelque chose à la saisie. En effet, le découpage de C donne au moins deux nouveaux composants. On peut les considérer comme des protubérances de l'objet, qui peuvent être très intéressantes pour la saisie. Les questions qui se posent, sont les suivantes :

- Est-ce que les nouveaux composants peuvent être saisis avec la main ?
- Ne sont-ils pas trop petits par rapport aux doigts de la main ?
- Sont-ils accessibles ?

L'algorithme de découpage que nous proposons essaye de répondre à ces questions. Il tient compte non seulement de l'objet à saisir mais aussi de la taille des doigts de la main. Le but est de pouvoir mettre un doigt de chaque côté du composant. L'épaisseur d'un doigt suffit, pour une saisie avec le bout des doigts. Il faut aussi que le résultat du découpage, fasse que l'efficacité de l'encapsulation soit meilleure pour les nouveaux composants issus du composant courant.



Dans une approximation polygonale, les protubérances d'un objet sont caractérisées par un changement de signe dans la courbure. Partant de cette remarque, notre découpage est le suivant :

1. La première étape de notre algorithme recherche les points concaves.
2. Pour savoir si de chaque côté d'une protubérance, il est possible de positionner un doigt, nous calculons d'abord son enveloppe convexe. La différence entre l'enveloppe convexe et le contour polygonal de C donne une estimation des « trous » dans lesquels on veut positionner des doigts. Si le trou est « assez grand », l'objet est susceptible d'être partagé en deux sous-composants. Les cas d'un, de deux ou de plusieurs « trous » détectés, correspondent à des traitements différents. En pratique, le but est de relier deux trous proches l'un de l'autre, pour former une protubérance, ou de partager C en deux composants, dont l'un au moins est intéressant pour la saisie.
3. Le processus est réitéré jusqu'à obtenir des composants convexes, des approximations elliptiques convenables, ou des objets dont la taille a atteint un minimum.

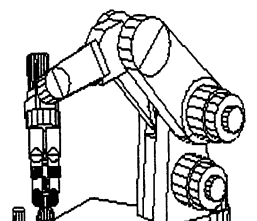
Chaque composant de chaque coupe subit le même traitement, dont le résultat est l'obtention d'un arbre binaire par composant. La racine est une approximation grossière du composant. Les feuilles sont des approximations plus précises des parties du composant, c'est-à-dire des protubérances de chaque composant C . La figure 4.4 illustre les différents cas de découpage d'un composant.

Par la suite nous ne raisonnons plus en termes de composants, mais en termes d'ellipses ou d'arbres d'ellipses, qui sont maintenant les représentations symboliques de chaque composant C . Mentionnons tout de même que chaque composant a un arbre différent : différence de niveau, de nombres d'ellipses.

Le découpage d'un composant en sous-composants convexes, n'est pas le but recherché. Il se peut très bien que le sous-composant soit concave, soit parce que son approximation par une ellipse est « correcte au sens de la saisie », soit parce que sa ou ses concavités ne sont pas intéressantes, toujours pour la saisie.

Accessibilité d'un composant dans une coupe. A ce niveau, si nous mettons à plat les arbres binaires en ne considérant que les feuilles, ou les racines, chaque ellipse est potentiellement saisissable. Elle donne des informations sur sa forme, par analyse de la longueur de ses axes, mais aussi les directions permettant d'y accéder, c'est-à-dire quatre directions prépondérantes pour une ellipse, et une multitude s'il s'agit d'un cercle. Chaque ellipse d'une même coupe, est soit une partie du composant (ou tout le composant), soit un obstacle. Pour une ellipse donnée, toutes les autres ellipses sont des obstacles.

A cause des obstacles, chaque ellipse ne peut pas tout le temps, être atteinte par un de ses deux axes (respectivement les multiples axes pour un cercle). Le tout est de déterminer ceux qui sont valides pour chaque ellipse. Soit le couple $(E(C), D(E)_i)$ qui décrit une ellipse E d'un composant C avec une direction D suivant l'axe i . $i \in [1, 4]$ pour une



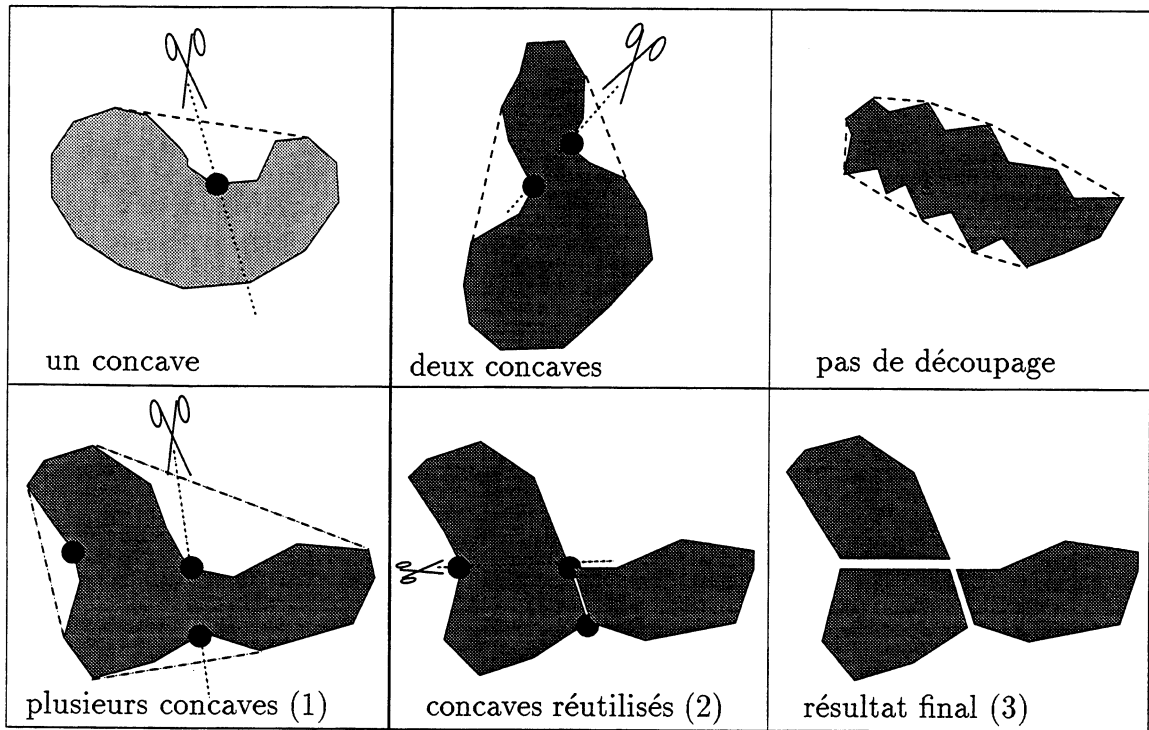


FIG. 4.4 - : Différents cas de découpage d'un composant en sous-composants.

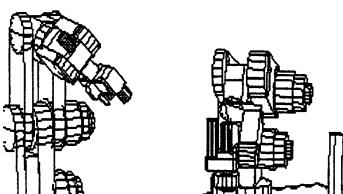
ellipse, et $i \in [1, D_c]$ pour un cercle. D_c est la discrétisation du nombre d'accès pour un cercle ².

Un $D(E)_i$ particulier est considéré comme valide, si E peut être atteinte sans collision avec une main planaire suivant la direction $D(E)_i$. L'accès à E est matérialisé par une région $R(D(E)_i)$, définie par le couloir le long de la direction $D(E)_i$. Si ce couloir n'intersecte aucune autre ellipse de la même coupe, $D(E)_i$ est valide. Toutes les ellipses de la coupe sont considérées: l'ellipse peut provenir, soit d'une autre partie du même composant, soit d'un autre composant, soit d'un vrai obstacle de W_l .

La largeur de ce couloir est bornée par la largeur de l'axe de l'ellipse perpendiculaire à la direction considérée (borne inférieure), et par la largeur de la main complètement ouverte (borne supérieure). Une largeur représentative correspond à la borne inférieure additionnée à deux fois l'épaisseur d'un doigt. Sa longueur correspond à la résolution de la coupe. Elle est au moins égale à la longueur maximale de la main. La figure 4.5 illustre un tel processus.

Ce procédé de recherche des accessibilités est appliqué à toutes les feuilles de tous les

² D_c est calculée comme la discrétisation moyenne correspondant à un écartement de l'épaisseur d'un doigt entre chaque direction. D_c dépend de la taille du cercle: $D_c = \frac{E_p \cdot 180}{r \cdot \pi}$, où E_p est le rayon d'un demi-doigt et r le rayon du cercle.



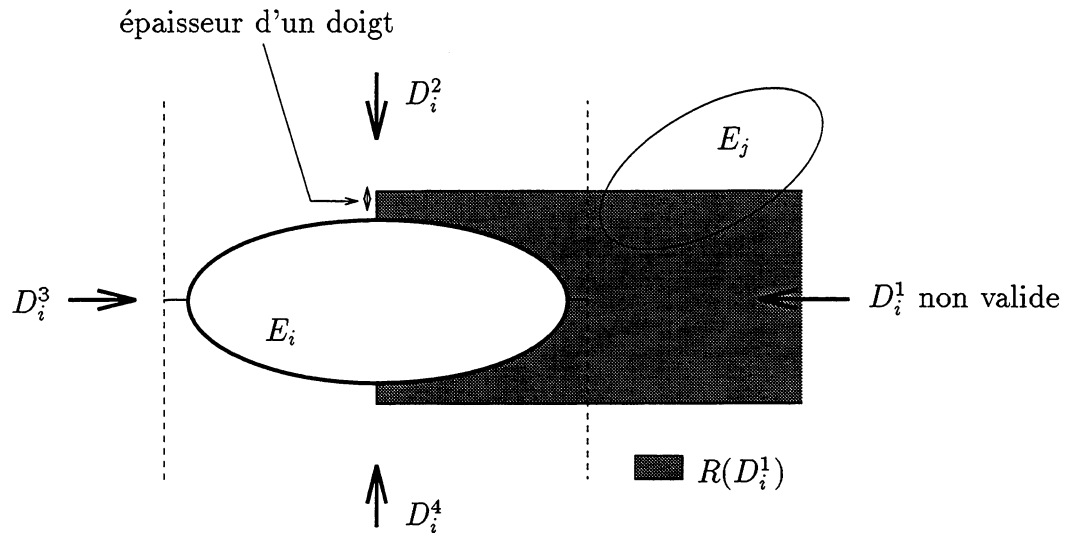


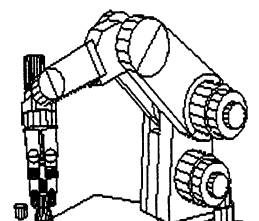
FIG. 4.5 - : Les directions d'accès valides associées à une ellipse E_i . D_i^1 , D_i^2 , D_i^3 et D_i^4 représentent les quatre directions d'accès associées à E_i . $R(D_i^1)$ est le « couloir » emprunté par la main, associé à E_i (notons que ce couloir a été élargi en rapport à l'épaisseur d'un doigt de la main). Dans le cas présent, la direction d'accès potentiel D_i^1 n'est pas valide à cause de l'ellipse E_j de S_i qui intersecte $R(D_i^1)$.

arbres d'ellipses d'une coupe et pour toutes les coupes). Certaines ellipses sont à la fois feuille et racine en même temps, pour les composants convexes par exemple. Le rôle de ce procédé est de fournir des « candidats de saisie potentiel $2D$ », c'est-à-dire des couples $(E(C), D(E)_i)$. Une ellipse peut appartenir à plusieurs couples : au plus quatre (pour une ellipse), et au plus D_c (pour un cercle).

Remarque : Ce candidat $2D$ est déjà un candidat $3D$ s'il s'agit de le saisir avec deux doigts. En effet, chaque coupe est extraite de $Octree(O)$ par intervalle d'une demi épaisseur de doigt. En négligeant l'encombrement du poignet, et en supposant que les doigts sont suffisamment longs, une saisie du bout de deux doigts en opposition est réalisable sur le composant, ou partie de composant, représenté par le candidat $2D$: $(E(C), D(E)_i)$. $\triangleleft$

Résolution d'une coupe. L'accessibilité de chaque ellipse est « locale » sur $Octree(O)$. Elle est globale si la représentation volumétrique contient tout l'environnement ($W_i = W$). Elle dépend de la résolution de la représentation volumétrique issue du modèle CAO ou des données sensorielles :

- Si elle vient d'un modèle CAO, un cube dont l'épaisseur correspond à celle de l'objet additionné à la taille de la pince, suffit pour l'accessibilité sur l'objet et son environnement local W_i .



- Dans le cas de données sensorielles, le volume est défini explicitement par la résolution des données elles-mêmes. Il correspond au champ de vision de la, ou des caméras s'il s'agit d'une reconstruction par balayage laser ou par stéréo.

Dans tous les cas de figure, il n'est pas pensable de travailler sur un environnement global. En effet, plus cet environnement est grand, plus les objets (dont l'objet à saisir) seront petits. La représentation volumétrique étant gourmande en mémoire, on ne peut pas discrétiser en fonction de la taille de l'environnement concerné dans *Octree(O)*.

Un résumé de l'analyse 2D globale est donné en annexe B.

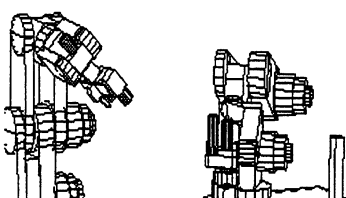
Aspects morphologiques des résultats de l'analyse 2D. L'étude du ratio $\frac{E_b}{E_a}$ où $E_{a/b}$ sont les demi-axes d'une ellipse (telle que $E_b < E_a$), ne nous donne que très peu de caractéristiques prononcées de taille et de forme. Les ellipses respectent les ratios des valeurs propres des matrices d'inerties associées. On peut tout de même envisager des prises par défaut, dont la finalité est d'épouser la forme de l'objet avec la main. La table 4.1 énumère les formes caractéristiques possibles. À titre indicatif, les différentes prises envisagées sont données dans la table 4.1. Elles ne tiennent pas compte, ni de la taille de la main, ni du type de tâche, ni des efforts. Elles correspondent aux types de prises les plus couramment utilisées quand on rencontre les formes énoncées. Néanmoins, rien n'empêche d'autres types de prises.

Ratio	Déduction sur la forme	Type de prise envisagée
$\frac{E_b}{E_a} \simeq 1$	Composant de forme « circulaire »	Type de saisie englobante
$\frac{E_b}{E_a} < 0.5$	Composant effilé (mince)	Type de saisie latérale si accès par le grand axe
		Sinon type de saisie du bout des doigts
Autre	Indéterminé (« patatoïde »)	Tout type

TAB. 4.1 - : Formes 2D caractéristiques issues d'une ellipse.

Sans considérer les cercles, la prise en compte de l'accessibilité apporte une vue différente sur la saisie pour une même forme et taille de l'objet. Le cas le plus typique concerne l'accès sur un objet de forme allongée, par le petit axe. Il ne donne pas les mêmes prises (type de saisie du bout des doigts) que par un accès sur son grand axe (type de saisie latéral).

Il est indispensable de ne pas dissocier les dimensions et les possibilités d'accessibilité sur l'objet. Cette analyse correspond tout à fait à notre modèle d'ellipses, et en fait toute son originalité.



4.1.3.3 Reconstruction 3D par *Cylindres Elliptiques*

La seconde étape de cet algorithme de reconstruction consiste à étendre le processus d'identification des candidats 2D au cas 3D. Cela revient en fait, à trouver des parties d'objet où il est intéressant de placer les doigts.

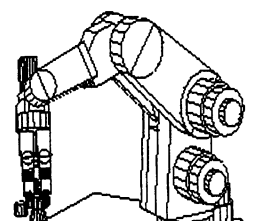
Ces parties ou protubérances de l'objet sont caractérisées par des zones homogènes qui ont une signification en termes de saisie, non seulement pour la tâche à effectuer, mais aussi en termes d'accès et de stabilité. Effectivement, à quoi sert de savoir qu'un objet peut être saisi par une de ses parties, si elle n'est pas accessible ou si le résultat de la fermeture des doigts entraîne une modification (importante) de position de l'objet, qui ne correspond plus à une tâche ultérieure pré-définie.

Le résultat de l'analyse « 2D » par coupes successives de *Octree(O)* donne une liste de candidats 2D $(E(C), D(E)_i)$ susceptibles d'être saisis par une main plane. Un moyen simple de trouver les protubérances d'un objet O , est de rechercher parmi ces candidats, ceux qui sont à peu près identiques sur chaque coupe. Ils ont alors une certaine épaisseur, permettant de placer plus de deux doigts. Cette épaisseur dépend du nombre de candidats identiques sur des couches (tranches) successives. Ils forment un candidat 3D.

Analyse de similarité sur deux candidats 2D. Intuitivement, deux candidats $(E_1(C_a), D(E_1)_i)$ et $(E_2(C_b), D(E_2)_k)$

de deux coupes successives S_j et $S_{j\pm 1}$ sont similaires si les deux ellipses E_1 et E_2 , représentant les deux candidats ont la « même » taille, la « même » position, la « même » orientation, et la « même » direction ou couloir d'accès valide. Ils représentent donc la « même » partie d'objet accessible dans deux coupes successives. En pratique, « même » correspond à « à un seuil pré-défini près ». Ce seuil est différent pour chaque critère définissant la relation globale de similarité :

1. **La taille.** Soient S_{E_1} et S_{E_2} les surfaces respectives de E_1 et E_2 : $|S_{E_1} - S_{E_2}| < \epsilon_s$. ϵ_s dépend de l'épaisseur d'un doigt. Il ne faut pas que la différence de surface entre deux ellipses de surface « identiques au seuil près », soit telle que l'on puisse permettre le positionnement d'un doigt.
2. **La position/orientation.** Soient F_{E_1} et F_{E_2} les foyers des ellipses E_1 et E_2 : $dist(F_{E_1}, F_{E_2}) < \epsilon_f$. $dist$ représente la distance entre les deux foyers projetées dans le plan de coupe Δ . ϵ_f dépend de l'angle maximum acceptable entre le vecteur passant par les centres des deux ellipses et Δ . Soit θ cet angle et D_{finger} la distance entre deux coupes d'où : $\epsilon_f = \frac{D_{finger}}{tg(\theta)}$. D_{finger} est l'épaisseur d'un demi doigt.
3. **La direction.** Soient $D(E_1)_i$ et $D(E_2)_k$ les deux directions : $angle(D(E_1)_i, D(E_2)_k) < \epsilon_d$. ϵ_d est un angle dépendant de la discrétisation des directions d'un cercle. Si D_c est le nombre de directions envisagé, ϵ_d est un angle inférieur à deux directions consécutives d'un cercle, soit : $\epsilon_d < \frac{2\pi}{D_c}$.



Remarque : si on compare les deux foyers des deux ellipses, le premier test de similarité est redondant avec le second. Cependant, il est nécessaire dans le cas de cercles, où les foyers sont confondus avec le centre. $\triangleleft$

Reconstruction de candidats 3D. Si au moins deux candidats 2D répondent à ces critères, ils sont considérés similaires et leur enveloppe englobante est le candidat 3D. L'enveloppe englobante est représentée par un « cylindre elliptique », dont la base est une ellipse, construite de la même manière pour l'encapsulation d'un composant, mais en considérant cette fois le composant résultat de la projection des deux ellipses E_1 et E_2 suivant Δ . Sa hauteur dépend du nombre N de candidats 2D : $Ep = D_{finger} \times (N - 1)$. Sa direction associée correspond aux directions des candidats 2D (figure 4.6). Soit (CE, D_i) ce candidat 3D formé par un cylindre elliptique CE et une direction d'approche D_i . Seuls

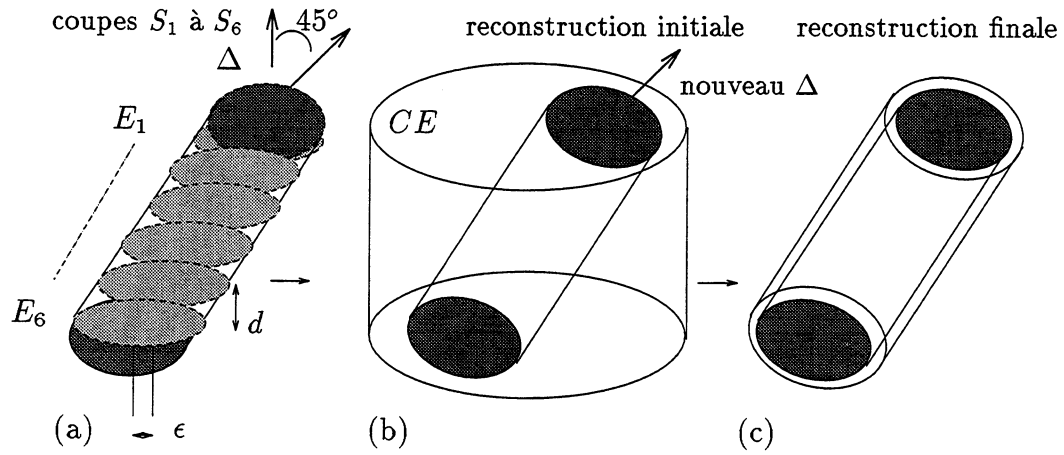
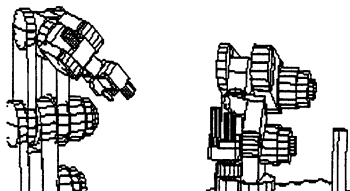


FIG. 4.6 - : Construction d'un candidat 3D à partir de candidats 2D : reconstruction d'un cylindre ayant un axe orienté selon un angle de 45° suivant Δ . Le seuil appliqué est $\epsilon = \frac{d}{\tan(45^\circ)}$. d est la distance entre deux coupes. Sa valeur correspond à une demi-épaisseur de doigt. Une nouvelle direction de coupe Δ est estimée en calculant la direction qui minimise la distance géométrique (aux moindres carrés) entre les centres des ellipses E_i ($i = 1, \dots, 6$).

des candidats 2D circulaires peuvent donner un candidat 3D cylindrique.

Ajout de directions d'accès à un candidat 3D. Soit (CE, D_i) , un candidat 3D. On peut lui rajouter des directions d'accès si son épaisseur lui permet une saisie à trois doigts. En effet, si CE a une épaisseur qui permet de mettre plus de deux doigts sur ses côtés, on peut le discrétiser en lui ajoutant d'autres directions d'accès, dans la même direction que D_i , mais à des altitudes différentes.

Cette discrétisation ne dépend que de l'épaisseur du cylindre et d'un doigt D_{finger} . Le



cylindre est alors discrétisé en N sous-cylindres ($N = \frac{Ep}{D_{finger}}^3$), auxquels on associe une direction d'accès. Cela revient, en fait, à transformer les candidats $2D$, qui ont eux-mêmes permis la création d'un candidat $3D$, en candidats $3D$.

De la même manière, on discrétise CE en M sous cylindres ($M = \frac{Ep}{2D_{finger}}$), auxquels on associe une direction d'accès. Cette fois-ci, (CE, D_i) est divisé en candidats $3D$ saisissables avec une main $3D$ (§ 5.3.2).

En analysant la position $3D$ d'un candidat par rapport à tous les autres candidats et les obstacles, il est intéressant de savoir si CE peut être accessible par le haut ou par le bas. Ces quatre nouvelles directions sont perpendiculaires à D_i : deux pour le haut et deux pour le bas ⁴. Pour cela, il suffit, comme pour un candidat $2D$, de regarder les couloirs $3D$ formés, en prolongeant le cylindre par le haut et par le bas, dans un certain voisinage. On élimine ensuite l'une et/ou l'autre des deux directions, si ce couloir a une intersection non vide avec l'un des cylindres elliptiques reconstruits, qu'il soit saisissable ou obstacle. Si CE est construit avec un cercle, il y aura non plus deux accès par bout, si le haut et le bas sont accessibles, mais autant d'accès que le permet la discrétisation d'un cercle (cf. la note de bas de page ²).

Qualité d'un candidat $3D$. La qualité d'un candidat $3D$, par rapport à la partie de *Octree*(O) qu'il représente, dépend de l'angle que fait son axe directeur par rapport à la direction de coupe Δ . Dans le cas de la figure 4.6, la qualité du candidat $3D$ construit à partir d'un cylindre est représentée par un angle de 45° .

Plus l'angle est grand, plus la qualité est médiocre. Mais dans tous les cas de figure, il ne peut pas dépasser θ qui est l'angle servant pour la détermination du seuil ϵ_f de similarité de position/orientation de deux candidats $2D$ (cf. § page 63).

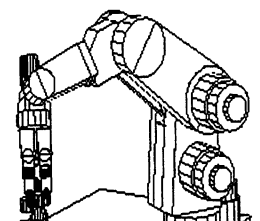
4.1.3.4 Les axes de coupe Δ

Le paragraphe précédent nous montre que le choix d'un axe de coupe Δ particulier est prépondérant et influence fortement la qualité de la reconstruction par cylindres elliptiques obtenue. Comme le montre la figure 4.6, si l'angle entre l'axe de coupe et le cylindre est de 45° , la qualité de la reconstruction est très mauvaise (la pire que l'on puisse obtenir).

Pour améliorer cette qualité, le seul moyen consiste à changer d'axe de coupe, et de réitérer sur le processus global de reconstruction. Une autre solution consiste à utiliser le bon axe de coupe dès le départ. Pour un objet aussi simple qu'un cylindre penché, il est très facile, par sa matrice d'inertie, d'obtenir l'axe prépondérant. Par contre, dès que l'objet devient plus complexe, le choix est moins évident. Par exemple, s'il a une ramification à droite et une autre identique à gauche, la matrice d'inertie ne suffit plus pour choisir le bon axe.

³Division entière.

⁴Un accès est orienté suivant le grand ou le petit axe de l'ellipse.



Le choix, dès le départ, du meilleur axe de coupe dépend des informations que l'on a sur l'objet, sur la tâche à effectuer, les efforts ultérieurs, ...

Quelques axes sont intéressants à considérer :

- *Les axes d'inertie* : la matrice nous donne trois axes prépondérants (les vecteurs propres), qui correspondent à la répartition de la matière dans l'objet à saisir. Les valeurs propres associées déterminent l'élongation relative (en comparant les valeurs les unes par rapport aux autres) des axes, et permettent ainsi de les classer. La priorité sera donnée à l'axe dont la valeur propre correspondante est la plus petite. Il correspond à l'axe de plus longue protubérance :

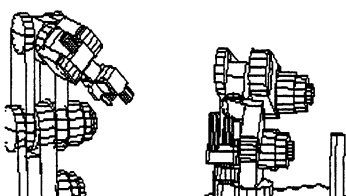
$$\begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix}$$

Matrice d'inertie d'une sphère
pas d'axe prépondérant

d'un cylindre
 λ_2 est prépondérant

d'un objet quelconque
le plus petit λ_i est prépondérant

- *L'axe œil/objet* : c'est un des axes qu'il ne faut pas négliger. Du point de vue du comportement humain face à la saisie, c'est l'axe qui est utilisé comme direction d'accès à l'objet dans sa partie globale [36]. Pour notre reconstruction en cylindres elliptiques, si cet axe influence notre choix, l'axe Δ sera alors choisi perpendiculairement à lui pour obtenir des directions d'accès dans la même direction.
- *Les directions des efforts à appliquer une fois l'objet saisi* : ce sont encore des axes qui ont une importance pour la stabilité. Ils peuvent être connus, si on a des informations sur le contenu d'un arbre d'assemblage correspondant à une tâche d'assemblage à effectuer [66]). Le positionnement des doigts doit pouvoir réagir et maintenir la stabilité main/objet par rapport aux forces réagissant dans les directions inverses. Si dès le départ, on obtient des directions d'accès dans le sens opposé aux efforts de réaction, le maintien de la stabilité en sera d'autant plus aisé.
- *Une symétrie particulière* : cette information est la plus intéressante dans le sens où la reconstruction par cylindres elliptiques doit refléter autant que possible la physionomie de l'objet à saisir. Cependant, cette information ne peut être qu'une donnée initiale connue, avant l'analyse de reconstruction.
- *Contraintes externes* : ces informations concernent le volume de travail du robot porteur de la main. Prenons pour exemple un robot Scemi (robot 6 axes). Son volume accessible nous montre que, lorsque l'objet est posé sur la table de travail, les accès parallèles à celle-ci, ne peuvent jamais être atteints par le robot. Pour ce type de robot, un axe de coupe Δ , perpendiculaire à la table, va fournir des accès qui ne sont donc pas réalisables, même si l'axe de coupe correspond à la physionomie de l'objet à saisir. Pour cet exemple, l'ajout de directions d'accès (si on a coupé avec un axe parallèle à la table) est nécessaire, notamment les accès par le haut de l'objet.



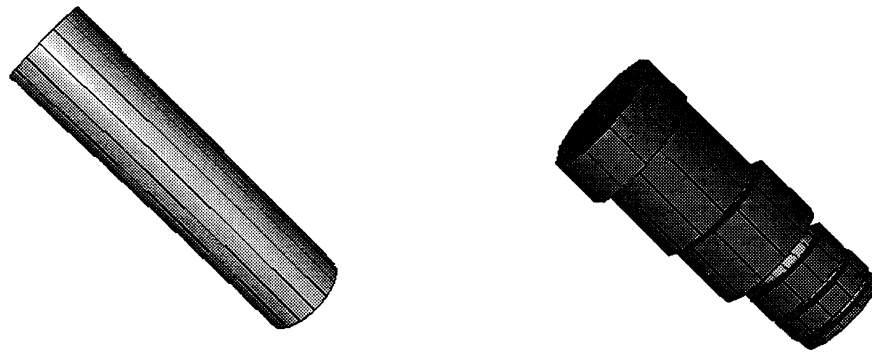
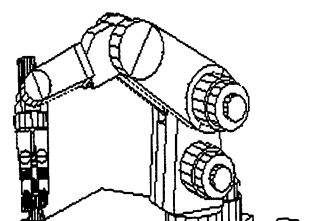


FIG. 4.7 - : Reconstruction d'un cylindre par une multitude de cylindres elliptiques, alors qu'un seul suffirait.

Il n'est pas évident de faire un choix, si toutes ou une partie des informations de direction décrites précédemment, sont disponibles. Certaines peuvent se contredire. Il est à noter tout de même, que les informations externes sont prioritaires sous peine de ne pouvoir accéder à l'objet. Une solution consiste à réunir toutes les directions de coupe, et en choisir une, qui satisfasse le plus de contraintes (en pratique, on prend une direction de coupe Δ qui se rapproche le plus, en moyenne, d'un maximum de directions imposées par les contraintes énoncées ci-avant). Une fois le choix plus ou moins bon d'un axe de coupe effectué, et une reconstruction accomplie, il suffit de tirer avantage au maximum des erreurs de reconstruction.

Lissage. L'information volumique récupérée d'une modélisation CAO ou d'un système de vision, en l'occurrence l'octree dans notre cas, doit être discrétisée. Cette discrétisation peut entraîner des pertes d'informations au niveau de la reconstruction. Cela se traduit par un surplus de cylindres elliptiques. Par exemple, l'octree représentant un cylindre, coupé suivant son axe principal, donne des quadrees de forme carrée. Le processus de recherche de similarité a échoué dans le sens où, au lieu de donner un seul cylindre elliptique, plusieurs petits cylindres non disjoints le remplacent. Un candidat $2D$ à un niveau i , correspondant à une coupe S_i , n'est pas similaire, pour une raison autre que son accessibilité, au candidat du niveau $i + 1$ et/ou du niveau $i - 1$. Dans ce cas, la chaîne est rompue et les reconstructions ne sont pas exploitables, ou seulement pour des saisies avec deux doigts (figure 4.7). La reconstruction donne un squelette dont les branches relient les « petits » cylindres elliptiques.

L'analyse $3D$ des cylindres elliptiques peut nous permettre de les regrouper pour palier cette mauvaise discrétisation de l'octree. Tout comme pour l'analyse de deux composants



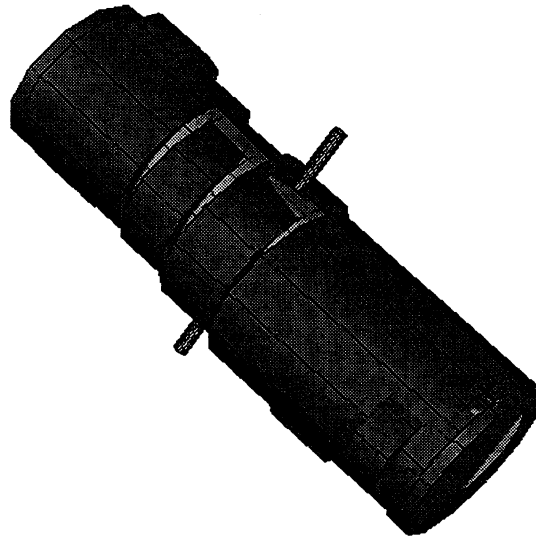
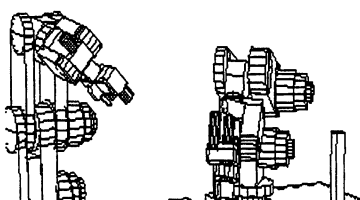


FIG. 4.8 - : Contre exemple à l'heuristique de sur-reconstruction. L'épingle en travers du cylindre a échappé à la reconstruction.

de saisie $2D$ $(E(C_{jS_i}), D(E)_k)$ et $(E(C_{oS_{i+i}}), D(E)_l)$, on peut lancer un processus de recherche de « voisins $3D$ » similaires. Il s'agit, en fait, d'une fonction de «lissage». Les conditions pour qu'un candidat $(CE_1, D(CE_1)_i)$ soit considéré comme étant similaire à un autre candidat $(CE_2, D(CE_2)_i)$, sont les suivantes :

1. CE_1 et CE_2 sont tels, qu'ils ne peuvent pas accueillir plus de deux doigts. Leur épaisseur respective est inférieure à l'épaisseur de deux doigts.
2. La projection du centre d'inertie de CE_1 dans la direction de coupe sur CE_2 doit être contenue dans l'ellipse CE_2 et vice versa.
3. La distance entre CE_1 et CE_2 ne doit pas dépasser une épaisseur de doigt, sinon on ne peut garantir que la partie d'objet entre les deux ellipses soit homogène (en forme) aux parties encapsulées par CE_1 et CE_2 .
4. Les conditions sur les volumes et directions d'accès sont les mêmes que pour l'analyse de similarité de deux ellipses.

Cette heuristique de « lissage » ne prend pas en compte le fait qu'il peut exister, entre deux cylindres à « assembler », une petite protubérance dans une direction perpendiculaire (cf. figure 4.8). Néanmoins, il est intéressant d'employer cette heuristique, car les cas de discrétisation non adéquate arrivent plus souvent (dans le type d'applications que nous visons) que des petites protubérances comme celles de ce contre-exemple.



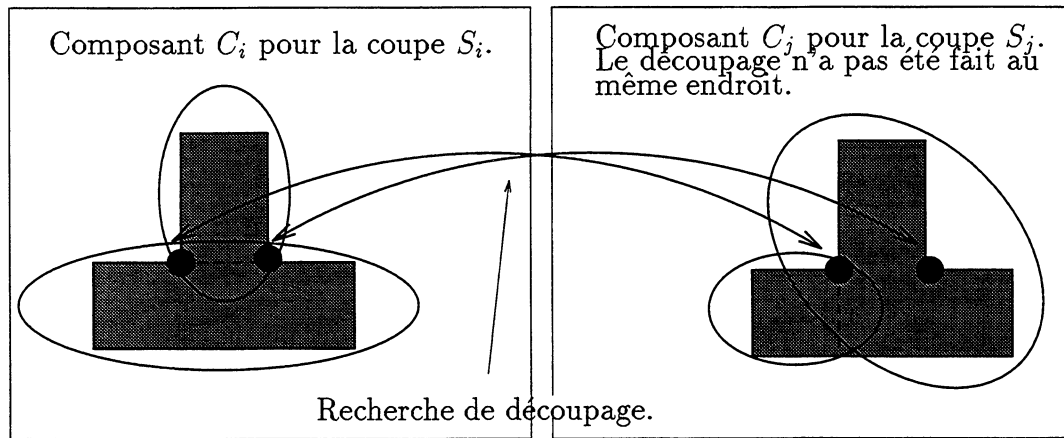


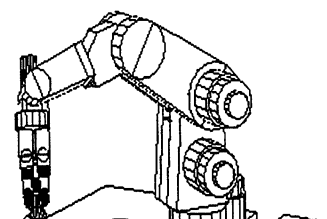
FIG. 4.9 - : Un découpage différent sur deux coupes consécutives donne deux arbres d'ellipses différents. On perd alors la protubérance à la reconstruction.

Une autre fonction de lissage peut être envisagée au moment de l'encapsulation en ellipses. En effet, les protubérances d'un objet, ne peuvent être extraites que si on obtient un découpage adéquat des composants C . Il s'agit alors de guider le processus de construction des ellipses dans les coupes voisines.

Supposons que sur deux coupes consécutives, on obtienne approximativement le même composant C . Pour obtenir une reconstruction optimum, il faut découper le composant au même endroit pour les deux coupes. Il s'agit alors d'utiliser les informations d'une coupe, pour traiter la coupe consécutive suivante. Notamment, la position des points concaves de découpage, pour le composant, peut être répercutée au niveau de l'analyse du composant C dans la coupe suivante (figure 4.9). Le principe consiste à regarder si dans la coupe suivante, on ne pourrait pas couper le composant approximativement au « même » endroit (en utilisant la même recherche de concavités). En essayant d'obtenir un même arbre d'ellipses pour deux composants consécutifs, cette méthode permet de faire un « lissage » dès le découpage. Elle a l'avantage de prendre en compte les petits protubérances, si elles apparaissent dans une coupe (et pas dans la coupe suivante).

4.1.4 Résultat de la reconstruction : le modèle morphologique

Soit $Octree(O)$ le modèle volumique de l'objet à saisir, et soit une liste de cylindres elliptiques $(CE, D(CE)_i)$. Chaque cylindre elliptique est la représentation partielle ou totale de O , où il est potentiellement intéressant de placer les doigts. En plus de cette information, chaque $D(CE)$ associé, donne le moyen d'accéder sans collisions à l'objet, tenant compte de sa forme et des obstacles. Cette information « locale » dépend du volume de $Octree(O/W_i)$. Chaque cylindre elliptique, par l'analyse de ses dimensions suivant l'axe de direction d'accès (épaisseur Ep , longueur Lo et largeur La), permet d'avoir une idée, a priori, sur la forme de la partie à saisir. En comparant ses dimensions



avec la taille de la main, on peut éliminer les cylindres elliptiques trop petits ou trop gros, qui correspondent à des parties non saisissables. En rajoutant les informations d'épaisseur dans le tableau 4.1, on obtient des caractéristiques sur la forme et taille des parties d'objet plus prononcées. Ces indications sont résumées dans le tableau 4.2. Chaque composant 3D

Ratio	Forme 2D	Forme 3D
$L_a \simeq L_o \simeq E_p$	« cercle »	« sphère »
$L_a \simeq L_o \neq E_p$	« cercle »	« cylindre »
$\frac{L_o}{L_a} < 0.5 \text{ et } E_p \gg L_a$ ou $E_p \ll L_a$	effilé (mince)	« épingle » en arrivant par le grand axe
$\frac{L_o}{L_a} < 0.5 \text{ et } E_p \equiv L_a$	effilé (mince)	« plat »
Autre	Indéterminé (« patatoïde »)	« patatoïde »

TAB. 4.2 - : Formes 3D caractéristiques issues d'un cylindre elliptique. L_a est la largeur ($L_a = E_a$), L_o la longueur ($L_o = E_b$) et E_p l'épaisseur d'e CE.

donne des informations morphologiques particulières, qui vont permettre une ou plusieurs préconfigurations de la main. La figure 4.10 illustre une reconstruction 3D pour une tasse.

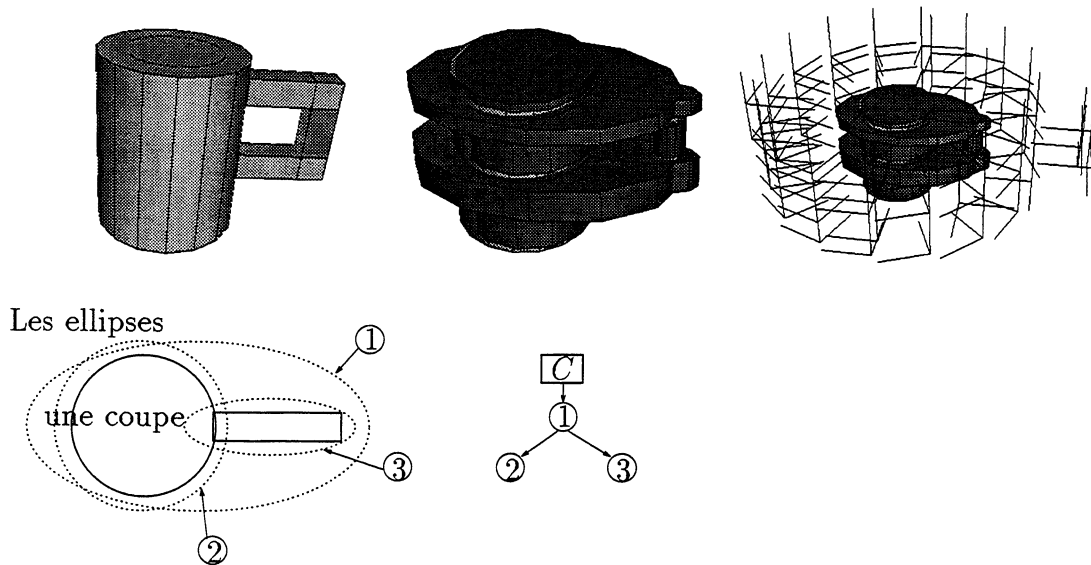
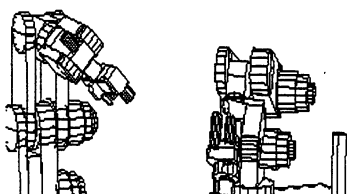


FIG. 4.10 - : Aspects morphologiques des résultats de la reconstruction 3D. Exemple sur une tasse, avec les accessibilités.



Chapitre 5

L'analyse de préconfiguration

Il s'agit de définir les préconfigurations d'une main robotique par rapport aux informations issues de l'environnement, c'est-à-dire de la tâche à effectuer et de chaque cylindre elliptique reconstruit.

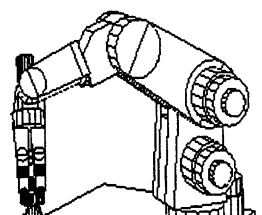
5.1 Les types de préconfiguration

Une préconfiguration est un arrangement des doigts de la main, avant leur fermeture sur l'objet. Elle est décomposée, en termes de *type de contact*, *d'orientation du poignet*, de *nombre de doigts* utilisés, et de *type d'opposition* entre les doigts (ou la paume). Ces différents paramètres sont choisis, en relation avec la représentation de l'objet, un composant de saisie 3D ($CE, D(CE)_i$), et en relation avec la taille de la main.

Par la suite, nous considérons que la main articulée avec laquelle on veut effectuer une préconfiguration, possède trois doigts. C'est le cas de la main MDS et de OTD. Néanmoins, si cette main possède plus de trois doigts, elle ne remet pas en cause notre approche. Le plus souvent, le quatrième doigt (et le cinquième) sert à renforcer la stabilité pour les cas de saisie à trois doigts.

5.1.1 Caractéristiques d'une préconfiguration

- **Le type de contact** : il décrit le contact requis entre un doigt et l'objet à saisir. Nous avons considéré trois types de contacts, qui correspondent à trois positions fondamentales des doigts sur l'objet :
 1. *Le contact du bout des doigts (tip)*. La partie du doigt concernée est l'extrémité de la pulpe de la phalange distale. Cette partie est dite terminale, terminopulpaire ou sub-terminale. Ce contact permet une grande dextérité de la main, notamment quand il s'agit de faire bouger les objets avec les doigts.
 2. *Le contact pulpaire (pad)*, est le contact le plus fréquemment utilisé pour les objets de forme plate (feuille de papier, pièce de monnaie, etc...). La partie



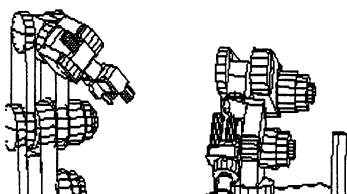
de la phalange distale concernée est la face palmaire de la pulpe. Cette partie est dite pulpaire, subtermino-latérale ou pulpo-latérale.

3. *Le contact palmaire (palm)* est un contact ni pulpaire, ni du bout des doigts. Il concerne les contacts sur les phalanges proximales, i.e près de la paume, ou la paume elle-même lorsque « l'anatomie » de la main le permet. Ce type de contact s'applique aux objets de diamètre important, ou aux prises demandant de la fermeté.
- **L'orientation du poignet** : elle est parallèle à l'axe d'accès $D(CE)$, et telle que le pouce puisse saisir un côté de CE et les autres doigts l'autre côté. Deux orientations sont possible (le pouce d'un côté ou de l'autre). Le choix de l'une d'elles, dépend essentiellement des contraintes cinématiques du bras porteur de la main. Il se peut que, d'un point de vue de la cinématique inverse, le bras porteur ne puisse pas se mettre dans une des deux orientations prévues.
 - **Le nombre de doigts** : il s'agit de pouvoir placer au moins deux doigts sur les côtés de CE . On peut aussi raisonner en termes de « doigts virtuels ». Un doigt virtuel est un ensemble de doigts qui ont la même configuration, et qui bougent de la même manière au moment de la fermeture des doigts sur l'objet. En pratique, la saisie d'un verre (à eau) se fait avec deux doigts virtuels : le premier est le pouce, l'autre est constitué des quatre doigts restants. Le nombre de doigts virtuels va de deux doigt quand il s'agit de refermer les doigts (sauf le pouce) contre le paume, jusqu'à un maximum correspondant au nombre de doigts réels ¹.
 - **Le type d'opposition** : chaque type correspond à une position particulière des phalanges distales. Ces phalanges (près de la paume) donnent l'orientation finale du doigt, par rapport aux autres doigts, et par rapport à la paume de la main. Cette opposition dépend du nombre de doigts utilisés. Les oppositions sont, soit entre chaque doigt (doigt/doigt, doigt/pouce ou doigts/pouce), soit entre un doigt et la paume de la main (doigt/paume). Le pouce est un doigt particulier en opposition naturelle avec les autres doigts. Il existe pour la main MDS et pour OTD. La notion de doigt virtuel est en étroite relation avec la notion d'opposition. En effet, quand on parle de deux doigts virtuels et que l'on utilise trois doigts réels, l'opposition est de type doigts/pouce ou doigts/paume.

En combinant les attributs de chaque caractéristique, on obtient la liste de toutes les préconfigurations possible pour une main donnée. Le tableau 5.1 décrit la liste de toutes les préconfigurations pour une main à trois doigts, sans tenir compte du type (prismatique et/ou rotoïde) des articulations de la main [6].

Les prises que nous avons passé en revue jusqu'ici, ne prennent pas en compte les *prises-actions*. Ces types de prises représentent l'activité la plus élaborée de la main, en pleine possession de son intégrité fonctionnelle, et s'apparentent plus à l'utilisation de la main comme moyen d'action, que comme outil de préhension. Par la suite nous n'utiliserons

¹Un doigt virtuel correspond à une saisie par apesanteur (figure 5.15)



N°	Virtuel/Réels	Contact	Opposition	Nom
P_1	3/3	tip	D_1/D_2 et D_1/D_3	tridigitale sphérique terminale
P_2		pad		tridigitale pulpaire sphérique
P_3		palm		palmaire sphérique
P_4	2/3	tip	D_1/D_i ($i = 2$ et 3)	tridigitale cylindrique terminale
P_5		pad		tridigitale pulpaire cylindrique
P_6		palm		palmaire cylindrique
P_7	2/2	tip	D_1/D_i ($i = 2$ ou 3)	bi-digitale terminale
P_8		pad		bi-digitale pulpaire
P_9				bi-digitale pulpo-latérale
P_{10}			D_2/D_3	bi-digitale latéro-latérale
P_{11}		palm		bi-digitale cylindrique
P_{12}	1/2	tip ou pad	$D_i/\text{pesanteur}$ ($i = 2$ et 3)	prise crochet (deux doigts)
P_{13}		palm	D_i/paume ($i = 2$ et 3)	digito-palmaire (sans pouce)
P_{14}	1/1	palm	D_i et $\text{paume}/\text{pesanteur}$	pesanteur (sans pouce)
P_{15}		tip ou pad	$D_i/\text{pesanteur}$ ($i = 2$ ou 3)	prise crochet (un doigt)

TAB. 5.1 - : Liste des préconfigurations pour une main à trois doigts. D_i est un doigt ($i \in \{1 \equiv \text{pouce}, 2, 3\}$).

pas ces types de prises. Les figures 5.1 à 5.15 illustrent la liste des préconfigurations du tableau 5.1.

5.1.2 Cas particuliers

Ils concernent les prises P_{12} à P_{15} .

Les *Prises digito-palmaires* (P_{13}) sont des prises-action. Le pouce reste libre pour une action éventuelle (comme allumer un briquet).

Les *Prises crochets* (P_{12} , P_{14} et P_{15}) opposent les doigts à la pesanteur. Pour sélectionner ce type de prise, l'objet doit disposer d'un trou ou d'une cavité. L'analyse des positions entre cylindres elliptiques peut les faire apparaître (figure 5.16).

5.2 Taxonomies des mains robotiques

En prenant en compte le type de main que l'on utilise, certaines des prises (numérotées de P_1 à P_{15}), décrites dans le tableau des préconfigurations ci-avant (cf. page 73) ne sont pas valides ou utilisables telles que. Nous allons décrire, pour chaque type de main (OTD, MDS et pour une pince à deux mors parallèles), les préconfigurations valides, tenant compte des caractéristiques physiques de la main et de notre modèle morphologique.

Il en est de même pour les notions de contact, d'opposition, et d'orientation, qui sont

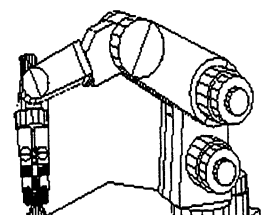
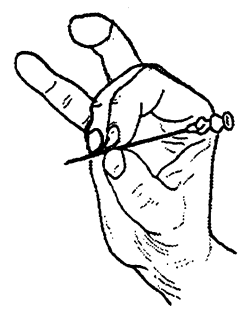
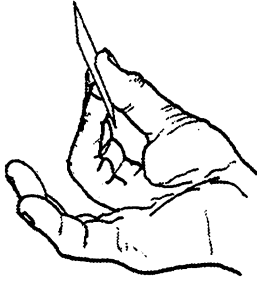
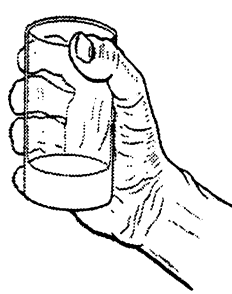
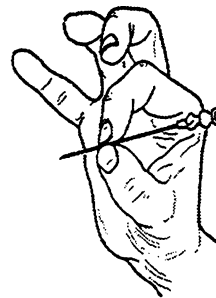
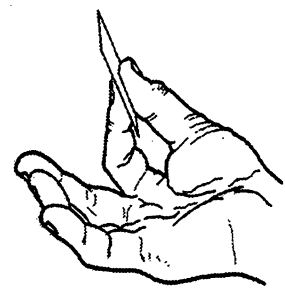
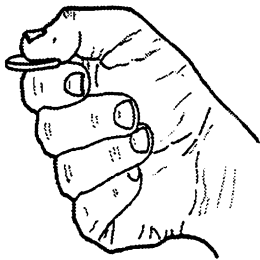
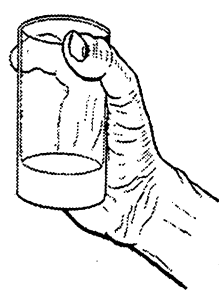
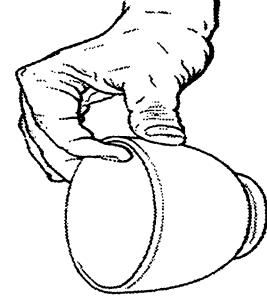
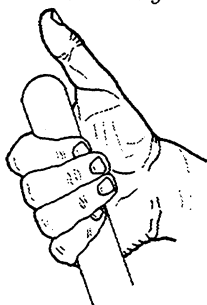
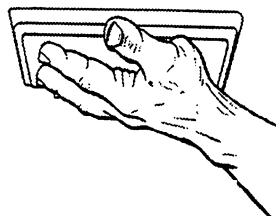
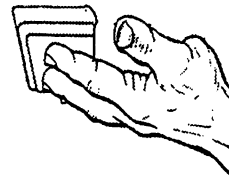
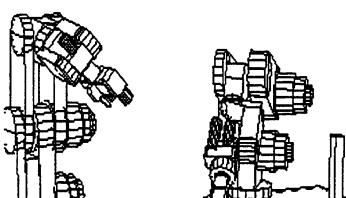


FIG. 5.1 - : P_1 FIG. 5.2 - : P_2 FIG. 5.3 - : P_3 FIG. 5.4 - : P_4 FIG. 5.5 - : P_5 FIG. 5.6 - : P_6 FIG. 5.7 - : P_7 FIG. 5.8 - : P_8 FIG. 5.9 - : P_9 FIG. 5.10 - : P_{10} FIG. 5.11 - : P_{11} FIG. 5.12 - : P_{12} FIG. 5.13 - : P_{13} FIG. 5.14 - : P_{14} FIG. 5.15 - : P_{15}

figures extraites de
[KAPANDJI 80].

en étroite relation avec la forme des doigts de chaque préhenseur, et avec leurs types d'articulation.



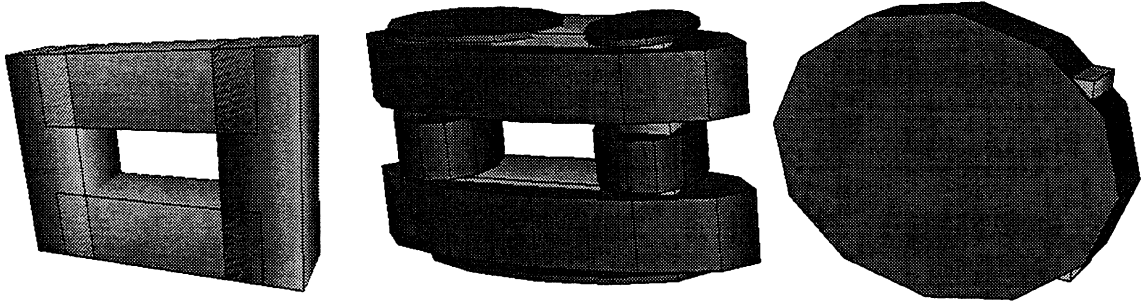


FIG. 5.16 - : Possible extraction des concavités en analysant les cylindres les uns par rapport aux autres. Le second exemple montre qu'une coupe dans certaines directions, n'apporte pas l'information du trou existant.

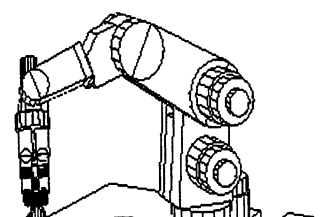
5.2.1 Le modèle de Otd

Rappelons que OTD est l'Organe Terminal Dextre que le Centre National d'Études Spatiales veut utiliser comme organe préhenseur, pour à la fois, être utilisé comme outil de maintenance dans une station orbitale, et comme outil de saisie d'échantillons planétaires. Cette main possède un total de huit degrés de liberté, trois pour « l'index » et le « majeur », et deux pour le pouce. Son équipement en capteurs comporte une caméra, des capteurs tactiles et de proximité [63].

L'originalité de cette main réside dans la possible opposition entre l'index et le majeur. C'est par cette opposition que les prises à deux doigts sont effectuées. Ces deux doigts, quand ils sont tournés vers le pouce, peuvent complètement se retourner pour permettre une saisie de type digito-palmaire (P_{13}) vers l'extérieur. L'opposition se situe par rapport au bord extérieur du poignet (figure 5.17-(5)). Les phalanges distales sont plates, permettant la saisie d'objets parallélépipédiques avec beaucoup de stabilité. Les prises à deux doigts s'apparentent à la saisie avec une pince à deux mors parallèles. Le pouce, quant à lui, reste fixe et ne peut pas s'orienter vers l'un des deux autres doigts.



FIG. 5.17 - : Le modèle de OTD avec ces principales originalités . Huit degrés de liberté dont deux pour le pouce. Image (2) : saisie bi-digitale. Image (3) : orientation sphérique. Image (4) : orientation cylindrique. Image (5) : orientation digito-palmaire.



Tenant compte de ces caractéristiques, le tableau 5.2 réactualise les préconfigurations possible pour la main OTD. Il s'agit des prises P_7 à P_{11} et P_{13} . Comme il n'est pas possible de rapprocher latéralement les doigts D_2 et D_3 , la prise P_{10} (bi-digitale latéro-latérale) est assimilée à la prise P_8 .

N^o	<i>Virtual/Réels</i>	<i>Contact</i>	<i>Opposition</i>	<i>Nom</i>
P_7 à P_{11}	2/2	tip/pad/palm	D_2/D_3 opposition index/majeur	prises bi-digitales
P_{13} bis	1/2	palm	$D_i/\text{poignet}$ ($i = 2$ et 3)	digito-palmaire (sans pouce)

TAB. 5.2 - : Ré-actualisation des préconfigurations pour OTD. D_1 , D_2 et D_3 sont respectivement le pouce, l'index et le majeur.

Les notions de *contact*, *d'opposition* et *d'orientation* du poignet ont une consonance particulière pour OTD, dans le sens où les parties des doigts en contact sont plates, et où il est possible d'opposer D_2 et D_3 .

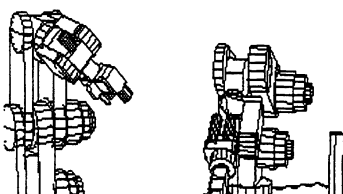
Les contacts. On ne peut vraiment distinguer, pour chaque doigt de la main OTD, que deux phalanges, dites distale et proximale. Les contacts seront palmaires, dès que la main (ou un doigt) est en contact avec une phalange proximale ou le poignet. Le contact sera au bout des doigts ou pulpaire, si les contacts entre sont situés seulement sur la phalange distale. Du bout des doigts si c'est la partie supérieure, pulpaire sinon.

Les Orientations. Elles concernent les articulations près du poignet. Étant donné que le pouce a une orientation fixe, on ne peut distinguer que quatre orientations possible (figure 5.17) :

- *Orientation² bi-digitale* : D_2 et D_3 s'opposent mutuellement (opposition doigt/doigt).
- *Orientation pulpo-latérale* : D_3 « regarde » D_2 , qui lui, est orienté parallèlement au pouce (opposition doigt/doigt particulière).
- *Orientation cylindrique* : la paire D_2/D_3 s'oppose à D_1 (opposition doigts/pouce).
- *Orientation sphérique* : D_2 (respectivement D_3) « s'oppose » à D_1 (opposition doigt/pouce).

Pour la prise P_{13} bis, c'est une orientation dont les directions sont inverses (pour D_2 et D_3) d'une opposition cylindrique. Bien qu'en théorie la prise P_9 soit réalisable, nous ne l'avons pas considérée en raison de la géométrie parallélépipédique des phalanges distales, qui rend ce type de prise très instable.

² ou *opposition*.



Orientations du poignet. L'orientation du poignet sert à positionner les doigts par rapport au cylindre elliptique. Cette orientation dépend du nombre de doigts réels utilisés. Pour trois doigts, un repère de position (appelé repère de prise) est placé au centre du triangle formé par les doigts. Pour deux doigts, le repère est placé entre les doigts. Ce repère, aligné sur l'accès au cylindre, met en position les doigts par rapport à la partie à saisir.

5.2.2 Le modèle de la main de Salisbury

La main MDS possède quant à elle, un degré de liberté de plus que OTD, (soit neuf ddl, trois pour chaque doigt) et des phalanges distales cylindriques à bout hémisphérique. C'est sur cette main que nous faisons nos expérimentations.

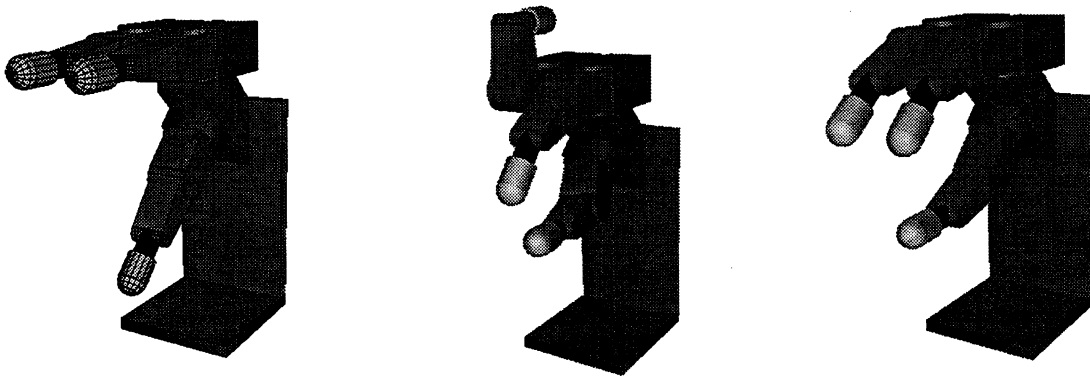
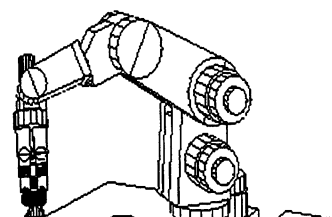


FIG. 5.18 - : Le modèle de la main de Salisbury. L'image (2) représente une prise bi-digitale. L'image (3) représente une prise cylindrique/sphérique.

Elle possède des différences majeures par rapport à OTD, en termes de mouvement des articulations, notamment sur les articulations proximales (figure 5.18). Contrairement à ce qu'on pourrait croire, les configurations possible sont moins « immédiates ». Par exemple pour obtenir une prise à deux doigts, le processus de préconfiguration est plus complexe. En fait, cette main n'est pas adaptée pour des prises à deux doigts. Par contre, une préconfiguration sphérique est identique à une préconfiguration cylindrique. La différence ne se fera qu'à la fermeture des doigts sur l'objet (§ 5.7).

La tableau des préconfigurations de la page 73 n'a pas besoin d'être réactualisé. Néanmoins, les notions de *contact*, *d'opposition* et *d'orientation* sont propres à la main MDS. D_1 représente le pouce, D_2 et D_3 représentent l'index et le majeur.

Les contacts. Cette main possède trois phalanges par doigt. Les contacts pulpaire et du bout des doigts concernent seulement les phalanges distales, et les contacts palmaires les autres. Un contact du bout des doigts aura lieu sur la partie hémisphérique



de la phalange distale, tandis qu'un contact pulpaire concerne la partie cylindrique de la phalange.

Les oppositions. On ne peut pas ici, toujours par comparaison avec OTD, parler de réelle opposition, en termes de déplacement des premières articulations, comme c'est le cas pour OTD. On peut seulement y associer la direction de fermeture probable des doigts pour la saisie. En effet, les articulations n'ont pas une orientation naturelle, du fait de la forme hémisphérique du bout des doigts, et du mouvement latéral des articulations proximales, exceptés pour les prises bi-digitales (figure 5.19) :

- *Orientation bi-digitale* : D_1 et D_2 (ou D_3) s'opposent mutuellement (opposition doigt/doigt) en faisant pivoter D_1 en face de D_2 (ou de D_3).
- *Orientation pulpo-latérale* : D_1 pivote sur le côté de D_3 (avec sa première articulation). Bien que possible, cette orientation ne sera pas considérée par la suite.
- *Orientation latéro-latérale* : D_2 et D_3 « regardent » D_1 (opposition doigt/doigt particulière). La direction de fermeture se fera D_2 vers D_3 et vice versa.
- *Orientation cylindrique et sphérique* : la paire D_2/D_3 s'oppose à D_1 (opposition doigts/pouce). La différence entre ces deux orientations est faite au moment de la fermeture où, pour une opposition sphérique D_2 et D_3 sont en mouvement respectivement vers D_1 , tandis que pour une orientation cylindrique, D_2 et D_3 avancent droit devant eux.

La distance entre D_2 et D_3 varie suivant la partie d'objet à saisir.

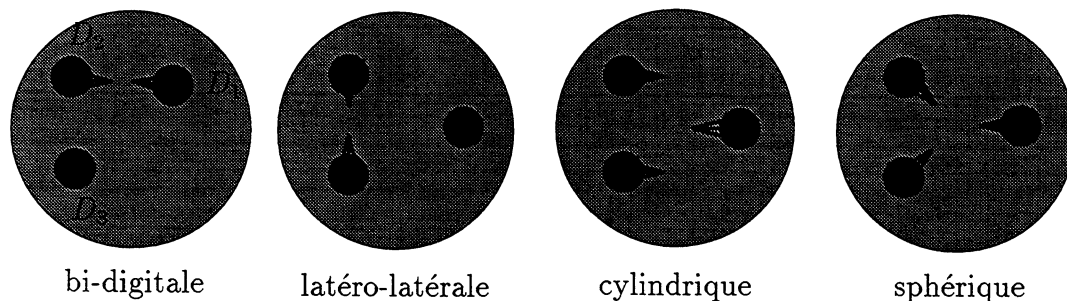
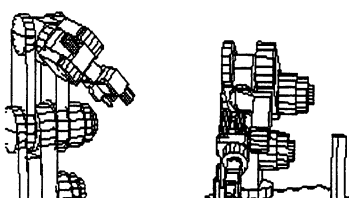


FIG. 5.19 - : Les orientations de la main de Salisbury (MDS). Les petits cercles représentent la position finale des bouts de doigts, et les flèches, les directions de mouvement pour la fermeture.

Orientations du poignet. cf. paragraphe page 77.



5.3 Modélisation d'une préconfiguration

Pour chaque main, la notion de contact, d'opposition et d'orientation change, mais globalement chaque notion garde le même rôle pour la préconfiguration de la main par rapport à l'objet. Considérons une main, un cylindre elliptique et une direction d'accès. Soient Ep , Lo et La , respectivement son épaisseur, sa longueur et sa largeur par rapport à sa direction d'accès. Une autre direction d'accès peut inverser la largeur et la longueur.

Il s'agit maintenant de trouver une préconfiguration de la dite main, par rapport au cylindre elliptique. Si on fait abstraction des contraintes de tâche, de stabilité, (etc...), il n'est pas possible de donner une seule préconfiguration pour chaque cylindre elliptique, ou du moins d'établir un classement de la meilleure préconfiguration à la moins bonne (cf. § 5.8), mais un ensemble des préconfigurations possibles. Cet ensemble dépend de la taille de l'objet par rapport à la taille de la main, et permet d'enlever les préconfigurations qui seront de toute façon inutilisables.

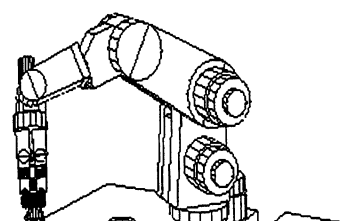
Ce premier filtrage permet par exemple, de ne pas envisager la saisie de gros objets du bout des doigts. On obtient toutes les préconfigurations possibles de la main par rapport à l'objet. Le filtrage par des informations globales est lié à la tâche à exécuter. En séparant les différents filtrages, on peut exécuter plusieurs tâches différentes sur le même objet sans avoir à refaire une analyse de préconfiguration. Les informations globales ne servent qu'à classer les prises.

5.3.1 La taille de la main

Une chose est importante à savoir si on veut saisir un objet, c'est si l'objet n'est pas trop gros ou trop petit. Il faut connaître les proportions de l'objet par rapport à la main (i.e. petit, « moyen » ou gros) et éliminer les objets trop petits ou trop gros.

Étant donné que notre modèle symbolique nous donne l'épaisseur, la largeur et la longueur de l'objet, nous comparons ces trois entités aux paramètres de la main, définissant sa taille : l'épaisseur d'un doigt Ep_d , la longueur des phalanges distales, proximales et près du poignet, respectivement Lp_d , Lp_p et Lp_o , la hauteur maximale d'encapsulation Hm_e , et pour certaines mains la distance minimum (ou fixe pour OTD) entre « l'index » et « le majeur » D_{im} , et entre « le pouce » et un doigt D_{pd} . Ces paramètres suffisent pour évaluer les proportions objet/main :

- L'épaisseur du doigt détermine si l'objet n'est pas trop petit.
- La longueur des phalanges distales et proximales, comparée à Lo détermine si l'objet est long ou court, permettant de savoir, par exemple, si on va pouvoir engendrer un contact du bout des doigts.
- La hauteur d'encapsulation maximale, comparée à La , détermine si l'objet n'est pas trop gros. Intuitivement, si la main peut englober l'objet à saisir ou non.



Comparaison	Proportions objet/main	prise envisagée
$La > Hm_e$	trop large	impossible
$Ep \leq \frac{Ep_d}{2}$	trop petit	impossible
$Lo < Lp_d/2$	petit	bout des doigts
$Lo < Lp_d$	moyen	tout
$Lp_d \leq Lo \leq (Lp_d + Lp_p)$		type
$(Lp_d + Lp_p) > Lo \wedge \frac{Lo}{2} \leq (Lp_d + Lp_p)$	grand	tout type
$\frac{Lo}{2} > (Lp_d + Lp_p)$	très grand	pas bout des doigts

TAB. 5.3 - : Proportion main/objet.

Attributs	OTD	MDS	Pince
Épaisseur distale (Ep_d)	0.020	0.0218	0.030
Longueur phalange distale (Lp_d)	0.060	0.0508	0.045
Longueur phalange proximale (Lp_p)	0.045	0.0508	0.000
Longueur phalange poignet (Lp_o)	0.045	0.0448	0.000
Hauteur maximale encapsulation (Hm_e)	0.154	0.1500	0.050
Distance Index/Majeur minimale (D_{im})	0.090	0.0250	0.000
Distance Pouce/doigt minimale (D_{pm})	0.090	0.0700	0.000

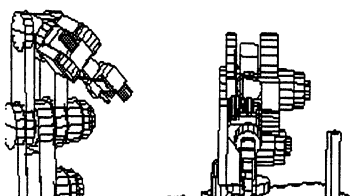
TAB. 5.4 - : Caractéristiques des organes préhenseurs OTD, MDS et pince à deux mors parallèles (en mètres).

- La distance minimale entre l'index et le majeur, comparée à Ep , nous permet de savoir si on peut saisir l'objet avec plus de deux doigts.

En comparant les paramètres de taille de la main et de l'objet, le tableau 5.3 évalue les proportions de l'objet par rapport à la main et indique, le cas échéant, si l'objet est saisissable ou non. À titre d'exemple, le tableau 5.4 donne (en mètres) les caractéristiques de taille de OTD, de la main de Salisbury et d'une pince à deux mors. L'utilisation, comme organe préhenseur, d'une pince à deux mors parallèles est donné plus loin au paragraphé 5.5.

5.3.2 Les préconfigurations d'un cylindre elliptique

Exemple sur une sphère. Avant de voir en détail, comment se fait le choix, pour chaque attribut, considérons l'exemple d'un objet sphérique. En supposant que le cylindre elliptique représente correctement la sphère (ce qui est le cas), l'épaisseur, la longueur et la



largeur de celui-ci sont équivalents ($Ep \equiv Lo \equiv La$). Pour une préconfiguration sphérique, chacun de ses attributs est choisi de la manière suivante :

- Nous utilisons trois doigts réels. Dans ce cas, nous pouvons aussi utiliser deux doigts réels et faire une prise bi-digitale. Le cas où l'on ne peut utiliser que deux doigts réels correspond à une sphère très petite (cf. tableau 5.3).
- Nous avons le choix entre les trois types de contacts : tip, pad et palm. Le choix spécifique de l'un d'entre eux, dépend de la taille de la sphère. Si la sphère est « grande », suivant nos critères énoncés précédemment, nous choisirons un contact palmaire. Si la sphère est petite, nous choisirons un contact du bout des doigts. Tout dépend en fait, de Ep , l'épaisseur du cylindre associé.
- Enfin, l'opposition préconisée, est tri-digitale sphérique. Elle correspond habituellement au type de saisie utilisée.

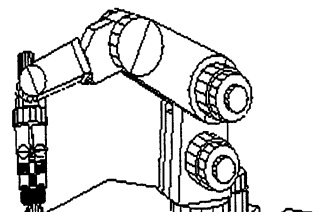
Même pour une sphère, nous ne pouvons pas, sans informations sur la tâche à effectuer, choisir une préconfiguration, étant donné que même si une opposition tri-digitale correspond tout à fait à la géométrie de l'objet, rien n'empêche le choix d'une prise bi-digitale ou cylindrique.

Revenons maintenant au cas général.

L'orientation du poignet. L'orientation du poignet dépend de l'axe d'accès au cylindre elliptique. Cette orientation sera telle que l'on puisse mettre d'un côté du cylindre le « pouce », et de l'autre, l'un ou les deux autres doigts. Il existe cependant des exceptions qui dépendent du type d'articulation de chaque main, et du type de prise envisagée (cf. § page 77 et § page 78). Il reste un degré de liberté quant au choix du côté où mettre le pouce. Ce degré de liberté restant n'est pas gênant, car la main est le plus souvent symétrique. Le pouce de nos deux mains, se trouve en face et au centre des deux autres doigts. Il en est de même si le pouce est excentré [35]. Deux informations peuvent influencer et contraindre le dernier degré de liberté :

1. L'encombrement. Mettre le moins de doigts possible du côté le plus encombré. Il est facile avec notre modèle symbolique d'obtenir cette information, en évaluant la position des autres cylindres elliptiques. – nous rappelons que la reconstruction de l'objet est totale, obstacles compris –
2. La tâche. Elle peut nous interdire une certaine orientation ou nous en proposer une meilleure, en évaluant la position finale de l'objet.

Choix du nombre de doigts. Le choix du nombre de doigts utilisés n'est contraint que si : $Ep \leq Ep_d$. Dès que trois doigts peuvent être utilisés, rien n'interdit la saisie avec deux doigts.



Choix du type de contact. Le choix du type de contact dépend, des proportions objet/main, et de la forme de l'objet suivant l'axe d'accès possible.

Dès que l'objet est petit, le bout des doigts est le seul contact possible. Dès qu'il est gros, le contact palmaire est conseillé, mais un contact du bout des doigts, bien que peu approprié, peut être utilisé. En effet, vue la proportion de l'objet, les risques de contacts palmaires sont importants. Si, néanmoins, on veut absolument un contact du bout des doigts, le risque, pour que le contact voulu à la fermeture des doigts ne soit pas conforme aux exigences énoncées, n'est pas à négliger.

De même, si on a affaire à un objet très plat, un contact pulpaire, en accord avec la physionomie de la préconfiguration, est plus conseillé qu'un contact palmaire.

Il n'existe pas d'adéquation parfaite, en relation avec la proportion objet/main et la forme intrinsèque de l'objet, donnant exactement le type de contact qu'il faut. Nous pouvons seulement réduire les contacts possibles, ceux qui seront à coup sûr mauvais, pour certains types ou formes marqués d'objets. Le tableau 5.5 synthétise ces cas, en relation avec notre modèle morphologique.

<i>Relations</i>	<i>Dépendances</i>	<i>Type de contact</i>
$\frac{L_o}{2} > (Lp_d + Lp_p)$	proportion = grand	pas de bout des doigts
$L_o < (Lp_d/2)$	proportion = petit	bout des doigts
$\frac{L_o}{L_a} < 0.5$ et $E_p \gg L_a$ ou $E_p \ll L_a$	forme = « épingle »	pulpaire
		par le grand axe
$\frac{L_o}{L_a} < 0.5$ et $E_p \equiv L_a$	forme = « plat »	bout des doigts sinon
		pulpaire (grand axe)
		bout des doigts (petit axe)

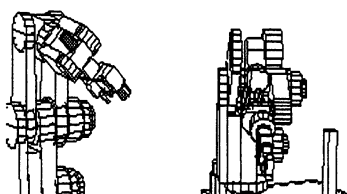
TAB. 5.5 - : Relations de contact et proportions main/objet.

Des informations supplémentaires venant de la tâche à accomplir peuvent influencer le choix d'un contact. Une tâche de précision commande des contacts du bout des doigts (tip) plutôt que palmaires (palm) pour permettre une manipulation plus aisée ultérieurement. Inversement quand il s'agit d'un tâche où les efforts seront importants.

Toutes les prises actions déterminent un type de contact particulier. Elles dépendent toutes d'objets particuliers.

Choix de l'opposition. Une fois que le nombre de doigts et le type de contact ont été choisis, il ne reste plus qu'à choisir une opposition en accord avec les choix précédents. Si l'objet est suffisamment quelconque pour autoriser tous les types de préconfigurations, seule la tâche peut nous permettre de faire un choix ou d'ordonner la liste des préconfigurations.

Néanmoins, la forme de l'objet nous permet de faire un dégrossissement sommaire. Si



l'objet a une forme sphérique (respectivement cylindrique), ce sont les prises tri-digitales sphériques qui seront prioritaires (respectivement les prises cylindriques). De même, les proportions de l'objet en relation avec la main nous permettent des déductions, notamment si l'objet est « petit » ou « grand ». Le tableau 5.6 énumère les cas typiques d'oppositions. Ces formes sont toutes identifiables par un cylindre elliptique.

<i>Formes d'objets</i>	<i>Contraintes</i>	<i>Types d'oppositions prioritaires</i>
Cylindre		tri-digitale cylindrique : P_4 à P_6 , P_{11}
Objet Plat		toute prise avec contact pulpaire sauf P_2
Épingle	accès grand axe	P_8, P_7
	accès petit axe	P_7, P_9, P_{10}
Feuille de papier		P_5, P_8, P_9, P_{10}
Disque	petit	P_9
		toute prise sauf tri-digitale
Sphère		tri-digitale sphérique : P_1 à P_3
	axe $-\vec{z}$	P_{12}, P_{14}, P_{15}

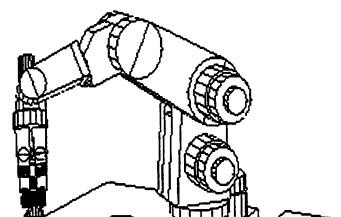
TAB. 5.6 - : Relations entre la forme des objets et les oppositions.

5.4 Exécution d'une préconfiguration

Considérons le choix d'une préconfiguration effectuée, il faut maintenant l'exécuter. Cette exécution consiste à calculer les configurations de chaque doigt, et la position de la main par rapport au cylindre elliptique, de telle manière que les contacts requis puissent être engendrés. Intuitivement, une préconfiguration idéale (ou une saisie idéale), est celle qui garde les articulations loin de leurs butées, et qui donne à la main un profil « aérodynamique naturel ». Plus formellement, les critères sont :

- Le poignet est orienté selon l'axe d'accès du cylindre elliptique, de telle manière que le pouce soit d'un côté ou de l'autre, du corps du cylindre.
- Les premières articulations (près du poignet) sont orientées selon le type d'opposition de la préconfiguration.
- Les articulations suivantes et la position de la main sont calculées en fonction du type de contact voulu.
- Pour obtenir un profil « aérodynamique naturel », les articulations proximales ont un profil convexe par rapport aux phalanges distales.

Soit Θ_i , $i \in [1, \dots, 9]$ les valeurs de chaque articulation où Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 représentent les articulations près du poignet pour les doigts de 1 à 3 (Θ_3 n'existe pas pour OTD),



$\Theta_4, \Theta_5, \Theta_6$ les phalanges intermédiaires, et $\Theta_7, \Theta_8, \Theta_9$ les phalanges distales. Les valeurs des configurations de chaque doigt, et du positionnement final de la main, sont définies de la manière suivante :

- Les valeurs de Θ_1 à Θ_3 sont pré-définies au départ, par le type d'opposition de la préconfiguration. En ce qui concerne la main de Salisbury, ces valeurs dépendent de l'épaisseur Ep du cylindre, tandis que pour OTD, elles sont pré-définies de manière arbitraire : à titre d'exemple, pour une préconfiguration sphérique les valeurs des premières articulations sont telles que $\Theta_1 = \Theta_2 = 60^\circ$.
- La position des autres articulations est donnée par le type de contact requis. Il détermine comment bouger les articulations jusqu'à ce que certaines distances entre elles soient atteintes. Ces distances sont extraites du cylindre elliptique.
- La position de la main par rapport au cylindre elliptique, doit permettre le type de contact considéré. Comme le cylindre elliptique est une approximation englobante de la partie ou de l'objet considéré, la seule certitude que l'on aie, est que si on referme les doigts en direction du centre du cylindre elliptique, on obtient un contact avec l'objet. La main est positionné par rapport au cylindre pour obtenir le contact requis.

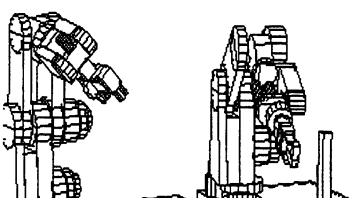
Pour une opposition et un nombre de doigts donnés, le type de contact de la préconfiguration détermine la position et la configuration des doigts.

Configuration des doigts avec un contact terminal. Le contact terminal concerne la zone du bout des phalanges distales. Le but est de pouvoir positionner cette zone de chaque côté du cylindre elliptique, c'est-à-dire sur l'arête perpendiculaire à la direction d'accès placée sur le bord du milieu du cylindre elliptique (figure 5.20). La distance observée, entre les bouts de doigts concernés (et en opposition), doit respecter la largeur La du cylindre CE . Enfin, pour obtenir un profil « naturel », et le maintien des articulations le plus loin possible de leurs butées, les phalanges intermédiaires doivent respecter la distance $La + \delta$. Le calcul exact de δ est donné en annexe (§ C.2.3).

Configuration des doigts avec un contact pulpaire ou palmaire. Le même calcul est effectué, à la différence près que la zone concernée n'est pas la même. Elle se trouve au milieu des phalanges distales. Pour un contact pulpaire, on a $\delta = 0$ (figure 5.20). Avec un objet trop petit, on ne peut pas obtenir une zone de contact palmaire. Pour un contact palmaire, les contacts sur les phalanges proximales sont obtenus par une stratégie de fermeture adéquate (§ 5.7.1).

Les configurations terminales, pulpaires ou palmaires par accès par le haut (ou le bas) d'un cylindre elliptique, sont calculées comme précédemment.

Position de la main. Une fois les configurations de chaque articulation calculées, la zone de contact envisagée est positionnée en face du centre du cylindre elliptique. Ceci



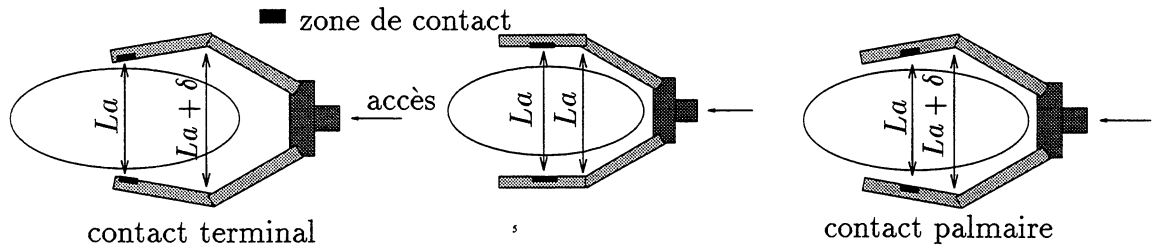


FIG. 5.20 - : Configuration des doigts suivant le type de contact.

dans le souci de pouvoir garantir un contact entre les doigts et l'objet au moment de la fermeture. La zone de contact palmaire, identique à un contact pulpaire, pour le calcul d'une préconfiguration, est différente dans le cas du positionnement du poignet. Elle se situe au niveau de l'articulation distale. Elle renforce l'obtention de contacts palmaires au moment de la fermeture des doigts. Le calcul de la position de la main est donné en annexe (cf. § C.2.4).

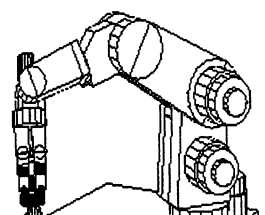
Suivant la grosseur du cylindre, il se peut qu'une phalange touche virtuellement le cylindre elliptique. Dans ce cas, la distance entre la main et le cylindre elliptique est augmentée, jusqu'à non contact. Les besoins mathématiques nécessaires, se réduisent au calcul de l'intersection d'une droite avec une ellipse (§ A.4).

Cas particuliers. Bien que les prises latéro-latérales et crochets n'aient pas été prises en compte dans nos expérimentations (respectivement P_{10} , P_{12} , P_{14} et P_{15}), elles peuvent être utiles pour certaines architectures mécaniques de mains articulées (comme OTD). Pour ces prises, la préconfiguration des doigts est particulière: les doigts restent droits. Les articulations intermédiaires et distales ont pour valeur zéro. Seules les articulations proximales changent suivant la largeur de l'objet. En annexe C, le calcul exact des paramètres pour chaque préconfiguration, est donné pour les mains OTD et MDS.

5.5 Exemple pour une pince simple à deux mors parallèles

On pourrait penser que, pour une pince à deux mors parallèles, il n'existe pas de préconfigurations. En effet, elles sont très peu nombreuses, étant donnée la morphologie de cette pince. Seules les préconfigurations bi-digitales peuvent être exécutées. Cette section a quand même sa raison d'être, pour montrer la généricité de notre approche, qui peut fonctionner pour tous les types de pinces, dès que celles-ci possèdent plusieurs degrés de liberté.

Considérons le cas d'une telle préconfiguration. Les deux mors de la pince sont apparentés à deux doigts de longueur distale L_{pd} . Le tableau 5.4, donne les différentes valeurs



utilisées pour sa préconfiguration. Elle possède deux articulations et un degré de liberté dont l'ouverture va de 0 (pince fermée) à Hm_e (pince ouverte). Les préconfigurations se réduisent à des prises bi-digitales terminales, pulpaire et palmaire. Chaque mors est découpé en trois zones, correspondant aux trois types de contacts : la zone près du poignet correspond aux contacts palmaires, jusqu'à la zone terminale, qui correspond aux bouts des mors (contact terminal). Cette pince peut saisir n'importe quel cylindre elliptique dès que $La < Hm_e$. L'analyse de préconfiguration est décrite par le tableau 5.7. L'orientation

Conditions	Déductions	Préconfigurations
$La > Hm_e$		impossible
$Lo < (Lp_d/2)$	Objet petit	terminale (P_7)
$Lo < Lp_d$ ou $(Lo/2) < Lp_d$	Objet moyen	P_7, P_8, P_{11}
$(Lo/2) > Lp_d$	Objet grand	P_8, P_{11}
Valeur ddl	$\Theta_1 = La$	

TAB. 5.7 - : Relations entre préconfigurations et proportions pince/objet. Cas de la pince à deux mors parallèles.

s'apparente à celle d'une main dextre : les deux mors saisissent le cylindre de chaque côté de celui-ci. De même, le calcul de la position se fait simplement en calculant la distance minimum du poignet au cylindre, de la manière suivante :

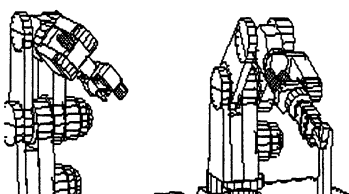
$$D_{poignet/CE} = \begin{cases} D_{zone} - (Lo/2) & \text{si } D_{zone} > (Lo/2), \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad D_{zone} = \begin{cases} Lp_d & \text{terminale} \\ \frac{Lp_d}{2} & \text{pulpaire} \\ \frac{4Lp_d}{3} & \text{palmaire} \end{cases}$$

où $D_{poignet/CE}$ est la distance recherchée et D_{zone} , la position de la zone de contact d'un mors par rapport au poignet.

5.6 Préconfigurations avec une main idéale minimale

Que ce soit pour OTD ou MDS, certaines des préconfigurations se ressemblent étrangement. On ne fait la différence qu'à l'exécution du mouvement de fermeture des doigts sur l'objet.

Une préconfiguration idéale est une préconfiguration qui amène la main au bon endroit et qui prédit le bon contact, la bonne opposition, etc La préconfiguration engendre non seulement les bonnes positions des doigts et des contacts, mais les directions des efforts appliqués des doigts sur l'objet sont conformes à la prise en vigueur. Typiquement, pour une prise sphérique, ces efforts doivent être dans un même plan, vers le centre de l'objet (ou de la partie) à saisir. Pour une prise cylindrique, ces efforts sont tels que,



leurs directions sont parallèles, toujours dans le même plan (cf. paragraphe 5.8.4.1). Pour obtenir ces préconfigurations idéales, les articulations de la main près du poignet sont prépondérantes, dans le sens où ce sont celles-ci qui donnent au mouvement la direction des efforts finaux. En effet, le mouvement des deux dernières articulations s'effectue dans le plan donné par la première articulation. De ce fait, un changement de direction des forces appliquées par un doigt, ne peut se faire que si les articulations près du poignet le permettent.

Après ces considérations, la main « idéale » est celle qui possède des doubles articulations près du poignet, soit deux articulations, une comme OTD en rotation autour de l'axe du doigt, et une comme la main MDS, en rotation perpendiculairement à l'axe du doigt (§ 7.3.4, figure 7.16). La fermeture s'effectue alors avec les deux dernières phalanges.

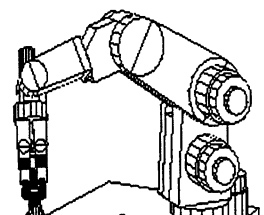
5.7 Stratégies de fermeture des doigts

Les aspects liés aux contacts main/objet (stabilité en particulier) mettent en jeu non plus le modèle reconstruit (approximatif) mais le modèle volumique ou CAO. Le principe consiste à simuler à cet effet la fermeture avec des « capteurs tactiles », toujours dans le but de laisser le moins de place à l'incertitude au moment de la fermeture des doigts. Cette simulation nous sert à nous rapprocher le plus possible de la prise envisagée, notamment en termes d'opposition et de contact. En effet, on ne referme pas les doigts sur l'objet de la même manière, si c'est une prise sphérique ou cylindrique, ou si c'est un contact du bout des doigts ou un contact pulpaire. Ces capteurs virtuels indiquent le moment où les doigts rencontrent l'objet, et évaluent la zone de contact entre le doigt et l'objet modèle. Il s'agit de la simulation de mouvements « gardés »³.

Le résultat est une configuration de contact entre la position de préconfiguration et la position de contact. La trajectoire entre ces deux positions peut classiquement être calculée en supposant que les phalanges partent et arrivent en même temps. Cette trajectoire est possible car le cylindre elliptique est une approximation englobante de la partie à saisir. Néanmoins, le contact entre les doigts et l'objet peut intervenir avant la consigne de position finale estimée. Au contraire, il se peut qu'il n'y ait pas de contacts, une fois la trajectoire de fermeture calculée. Pour palier ce genre de situation, une commande de fermeture « gardée » est nécessaire (sur la main réelle), pour obtenir le contact ou s'arrêter avant le contact. Cette commande gardée se fait en autorisant une force (ou couples) maximum à atteindre une fois le contact obtenu. Elle peut être détectée par un capteur « interne », ou si le contrôle/commande le permet (changement de couple « anormale » sur les articulations). L'intensité dépend du type de prise envisagée (cf. paragraphe 5.8.4.1). La simulation de mouvements est réalisée par la fonction « interactions main/objet » (chapitre 6).

La fermeture des doigts, ne concerne normalement que les phalanges distales et proximales. Un cas particulier cependant, associé à la main MDS et aux préconfigurations

³Par arrêt sur contact.



sphériques, nous oblige à bouger les phalanges près du poignet, pour obtenir la saisie correspondante.

5.7.1 Stratégies en termes d'opposition

Chaque préconfiguration est orientée, de telle manière que les doigts « regardent » vers un point central. Pour une prise sphérique, ce point est le milieu du CE correspondant, tandis que pour une prise cylindrique, il est situé à l'infini. Il suffit alors, qu'au moment de la fermeture, les doigts suivent la direction donnée par la préconfiguration, c'est-à-dire que les efforts appliqués par les doigts sur l'objet aux points de contacts requis, soient orientés vers ce point central. Une stratégie simple est un chemin en ligne droite. Cette stratégie est utilisée pour les phalanges près du poignet et dans le cas particulier de la main de Salisbury avec une prise sphérique. Pour toutes les autres prises, les phalanges sont déjà orientées d'une manière cohérente.

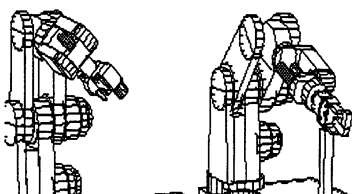
5.7.2 Stratégies en termes de contacts

Chaque type de contact possède sa propre stratégie de fermeture. Elle agit sur les phalanges distale et proximale :

- *Fermeture terminale.* Ce type de fermeture est envisagé pour un contact du bout des doigts. Elle consiste à effectuer un mouvement des phalanges distales vers l'objet à saisir. La direction de la force exercée par les doigts sur l'objet a une orientation marquée vers le centre de la main.
- *Fermeture pulpaire.* Pour un contact pulpaire, la partie inférieure de la phalange proximale doit atteindre l'objet avant sa partie supérieure. Pour cela, on affecte un mouvement de fermeture sur les phalanges proximales, tout en effectuant un mouvement d'ouverture sur les phalanges distales (mouvement de moindre ampleur). Cette opération a pour but de faciliter l'obtention d'un contact sur toute la phalange ou sur sa partie inférieure. Elle correspond à un mouvement rectiligne de la zone de contact pulpaire sur le doigt, vers le centre de la partie (ou de l'objet) à saisir.
- *Fermeture palmaire.* Une fermeture des phalanges proximales est engendrée jusqu'au contact, et dans un deuxième temps, un mouvement de fermeture des phalanges distales est effectué. L'effet de ce mouvement en deux temps, est englobant.

Un échec peut intervenir si un contact pulpaire est détecté alors qu'un contact terminal est attendu, ou inversement. Cet échec a deux répercussions :

1. Il peut servir de critère de qualité de la préconfiguration, et influencer le choix d'une nouvelle préconfiguration. Si, avec la stratégie de fermeture associée, on n'obtient pas le bon contact, la préconfiguration envisagée n'est pas la « meilleure ». Le choix d'une autre, en concordance avec le contact obtenu, sera alors entrepris. Cependant, globalement, c'est-à-dire par rapport à la tâche à exécuter, le contact obtenu (même



si ce n'est pas celui que l'on attend) peut permettre la réalisation ultérieure de la dite tâche.

2. Il permet la mise en œuvre d'une stratégie de rattrapage (ou de re-placement). Cette stratégie de re-placement est envisagée, si une seule préconfiguration est possible, ou si le contact obtenu est proche du contact désiré, notamment terminal vers pulpaire ou inversement.

5.7.3 Stratégies de re-placement

Elles ne sont envisagées qu'en dernier recours, et seulement pour des contacts terminaux vers pulpaire et vice versa. En effet, le re-placement peut, lui aussi échouer, à cause de la géométrie de l'objet ou des débattements autorisés des phalanges. Néanmoins, elle est intéressante à mettre en œuvre (car simple) dès que les contacts estimés sont proches du résultat attendu.

terminal $\rightarrow$ **pulpaire**. Le principe est d'obtenir un contact sur toute la phalange distale, ou plus bas sur cette même phalange. On écarte (ouverture) la phalange distale du contact, d'un certain angle, et on approche (fermeture) la phalange proximale du même angle vers l'objet. Le débattement (angle) utilisé dépend de la distance du contact obtenu au contact envisagé. Le but est d'amener la zone de contact pulpaire de la phalange le plus près de la zone de contact sur l'objet. L'angle de débattement est calculé ainsi (figure 5.21) :

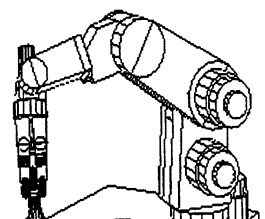
$$\Theta_{dbat} = a \sin\left(\frac{d_1 \sin(\Theta_{dist})}{d_2}\right) \quad (5.1)$$

où Θ_{dbat} est l'angle de débattement à enlever à la phalange distale, et à ajouter à la phalange proximale, d_1 la distance de l'articulation à la zone de contact sur la phalange, d_2 la distance de l'articulation à la zone pulpaire, et Θ_{dist} l'angle de la phalange distale au moment du contact.

pulpaire $\rightarrow$ **terminal**. C'est une stratégie inverse. On écarte la phalange proximale et on approche la phalange distale de l'objet. L'équation (5.1) se ré-écrit en permutant d_1 et d_2 dans la formule.

5.8 Prise en compte des contraintes de tâche

Notre contexte d'utilisation a une orientation marquée vers l'étude de problèmes liés à la robotique non manufacturière, et à la prise en compte d'environnements partiellement structurés (voire complètement non structurés). Une des principales applications porteuses de la manipulation dextre concerne le domaine spatial. Dans ce cadre, les tâches de



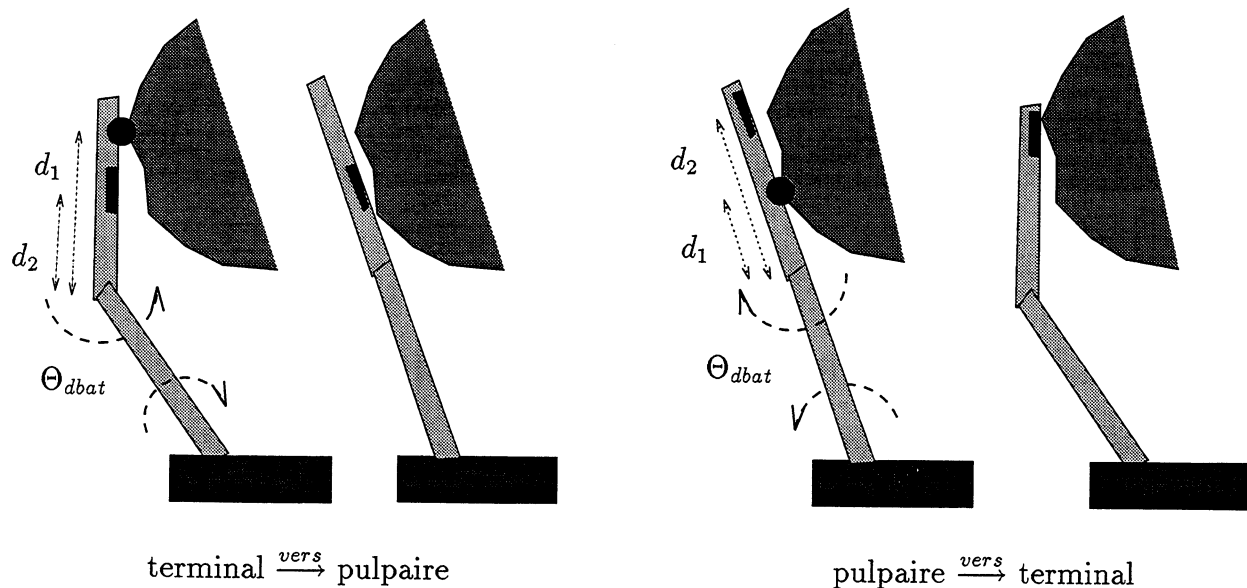


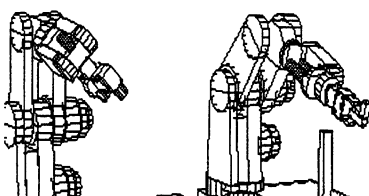
FIG. 5.21 : Stratégies de re-placement.

manipulations sont variées. Cela va de la maintenance en station orbitale, où il faut manipuler des objets non ORU⁴ (objets non standard), des câbles, des protections thermiques, jusqu'à la collecte d'échantillons planétaires. Les exigences principales se concentrent sur des tâches de manipulation, d'assemblage, d'actionnement de mécanismes et de collecte (ou « prendre et poser »). Cela commence par la saisie d'objets divers, pour lesquels il faut prendre en compte, à la fois des connaissances a priori, des données perceptives et l'existence d'imprécisions dans les modèles utilisés. Seules les connaissances a priori n'ont pas encore été intégrées dans notre système.

Jusqu'à présent, notre système a orienté d'une manière satisfaisante la saisie d'un objet, en donnant une liste de cylindres elliptiques avec leurs accès possible, où il est potentiellement intéressant de placer les doigts. À chacun de ces cylindres, sont associées la ou les préconfigurations susceptibles de répondre aux besoins d'une tâche, dont les contraintes n'ont pas encore été spécifiées et utilisées, c'est-à-dire des contraintes fonctionnelles d'accessibilité, de position, de stabilité, et de forces à appliquer. Dans le cas de la stabilité, les préconfigurations sont telles que les directions des efforts à appliquer convergent vers une stabilité intrinsèque, c'est-à-dire que la somme de ces efforts, en termes de direction, doit être nulle (cf. § 5.8.4.1).

Pour prendre en compte des informations de tâches, certains utilisent un système expert. C'est le cas de CUTKOSKY [16] avec son système « Grasp-Exp » ou celui de BEKEY [81]. Cependant, cette expertise se place dans un environnement particulier, tel la manipulation de marteaux, tournevis et autres outils couramment utilisés en environnement manufacturier.

⁴Orbit Replaceable Unit.



Notre but est, non pas de se placer dans un environnement particulier, mais de prendre en compte les informations minimales permettant d'obtenir un planificateur automatique à la fois robuste et simple.

5.8.1 Connaissances a priori

Elles concernent l'accessibilité et la stabilité.

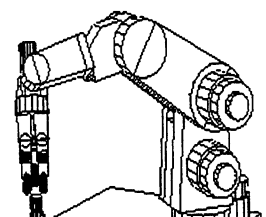
Considérons un objet O à saisir dont on connaît le poids. Cet objet est lourd. Supposons que la tâche demande, une fois l'objet saisi, de le manipuler avec précision. Ces deux informations nous servent à définir les contacts requis pour la saisie. D'un côté, étant donné que l'objet est lourd, plus il y a de contacts, mieux les problèmes de stabilité seront résolus, et donc un contact palmaire est préconisé. D'un autre côté, la précision requiert de la manipulabilité, incompatible avec un contact palmaire.

- Quelle information est prioritaire?
- N'y-a-t-il pas une prise permettant de faire un compromis entre ces deux informations?

Autant de questions et réponses que d'informations à prendre en compte.

Trois types d'informations attachées à n'importe quelle tâche doivent servir de référence au choix d'une prise, pour obtenir une automatisation minimale :

1. L'accessibilité de la prise pour l'ensemble bras/main. Elle fait intervenir la cinématique du robot porteur et le planificateur de trajectoires pour les mouvements de transferts.
2. Les collisions engendrées par la tâche. Il s'agit du volume accessible de l'objet. Une fois la saisie effectuée, les doigts ou la main ne doivent pas (ou le moins possible) interférer avec une partie de l'objet qui sera en contact ultérieurement avec son prochain support. Cette information est importante si c'est un assemblage à réaliser. Elle permet d'écarter les cylindres elliptiques non valides.
3. La résistance aux efforts. Le but est d'obtenir la préconfiguration qui convergera, vers la prise la plus stable possible. Le résultat n'est pas de s'assurer de la stabilité finale, elle est impossible à garantir sans prendre en compte des contraintes physiques et dynamiques, mais de donner une mesure de qualité sur chaque préconfiguration. Le choix se porte sur celle qui s'approche le plus de la stabilité optimale. Nous avons déjà eu un aperçu d'une possible mesure de qualité en appliquant une stratégie de fermeture (cf. § 5.7), indispensable pour obtenir l'opposition et le contact désirés. De plus, elle permet de faire un choix sur les cylindres elliptiques, du plus fiable au plus faible.
Il s'agit aussi d'analyser les positions des « zones de saisie » par rapport au centre de gravité de l'objet.



5.8.2 Accessibilité pour la main

La première information concerne l'accessibilité de la main à l'objet. Toutes les directions inaccessibles, d'un point de vue de la cinématique inverse du robot R porteur de M , seront écartées, c'est-à-dire les candidats 3D extérieurs au volume de travail de R . Le fait qu'un repère d'accès et son repère de prise associé (cf. § C.2.4, pour son calcul exact par rapport à CE et à P), ne soient pas accessibles par le robot R , à cause des obstacles de W , concerne exclusivement le planificateur de trajectoire avec évitement d'obstacles. Il n'entre pas dans nos attributions de gérer cette question. En revanche, notre planificateur de saisie prend en compte les obstacles de W_l au voisinage de l'objet.

5.8.3 Collisions engendrées par la tâche : le volume accessible

Dans ce paragraphe, nous faisons l'hypothèse que nous connaissons les parties de l'objet qui seront en contact avec son support, une fois la tâche terminée. À cet effet, soit nous avons une ou plusieurs boîtes, enveloppant les parties inaccessibles (informations fournies en entrée du système), soit nous faisons une analyse des contacts objet/support en position finale, pour obtenir de manière automatique les boîtes enveloppantes, dans le cas d'un environnement CAO (cf. § 7.3.5).

Les hypothèses étant établies par une analyse 3D, il suffit d'écarter les composants 3D (CE, D) dont l'intersection avec la ou les boîtes englobantes est non vide. Si toutes les intersections sont non vides, un classement du cylindre le moins contraint (intersection la plus petite) au plus contraint, est effectué. L'ajout de directions à un cylindre elliptique, prend ici toute son importance (§ page 64). Il se peut très bien qu'un cylindre ait une intersection non vide, mais un de ses sous cylindres, correspondant à une direction ajoutée, ait lui une intersection vide. Le fait d'ajouter des directions supplémentaires, permet de gérer implicitement la position de l'intersection entre la boîte enveloppant une position inaccessible et un cylindre elliptique.

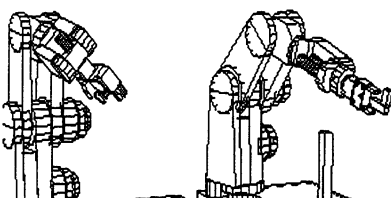
5.8.4 Qualité d'une préconfiguration

Choisir une solution particulière depuis une liste de préconfigurations possibles demande de raisonner aussi sur les contraintes de stabilité.

5.8.4.1 Implication d'une préconfiguration sur la stabilité

Une préconfiguration, et sa stratégie de fermeture associée, permettent, dans des conditions optimales de saisie, d'obtenir une prise dont les directions des efforts appliqués au moment de la saisie effective, convergent vers un point, appelé le point de convergence. Ces conditions optimales sont les suivantes :

- Une préconfiguration cylindrique sur un objet cylindrique, une prise sphérique sur une sphère, etc



- L'application d'efforts perpendiculairement aux surfaces en contact.
- On suppose que la gravité de l'objet est compensée par son support.
- L'objet ne bouge pas au moment de la saisie.

Pour garantir la stabilité, la somme des forces et des moments doit être nulle : $\sum \vec{F} = \vec{0}$ et $\sum \vec{M} = \vec{0}$.

Pour les prises à deux doigts et pour les prises sphériques, ces conditions sont respectées, si les efforts appliqués sont égaux pour chaque doigt.

Ce n'est pas le cas pour une prise cylindrique, où le point de convergence est à l'infini, et où les efforts appliqués par le pouce doivent contre-balancer les efforts des deux autres doigts. Si m est l'effort minimum à appliquer pour le pouce, cet effort doit être de $\frac{m}{2}$ sur les autres doigts, pour garantir la stabilité d'une saisie optimale telle qu'elle a été définie.

Cette valeur m sera utilisée par la suite (§ 5.8.4.2) pour calculer la qualité d'une préconfiguration par rapport à sa préconfiguration optimale associée.

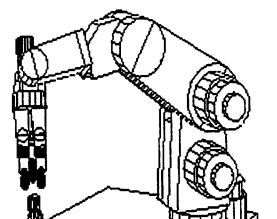
5.8.4.2 Degré de stabilité

On ne peut pas appliquer une méthode classique pour évaluer la stabilité associée aux solutions possibles (c'est-à-dire des conditions de « force-closure » [68] [69] [80]). En effet, la connaissance exacte (au moins aux environs des contacts) de l'objet est requise pour entreprendre ce type d'analyse. De plus, la notion de points ou faces n'existe pas dans notre modèle. En conséquence, nous avons choisi heuristiquement d'évaluer « le degré de stabilité » qui peut être associé à une préconfiguration et sa stratégie de saisie. Ce degré de stabilité est évalué en analysant les critères de stabilité pour une « préconfiguration nominale », notée $N_{grasp}(P)$.

Notamment, ce degré de stabilité répond à la question : *l'objet ne risque-t-il pas de s'échapper au moment de la saisie ?*

Soit (EC, D) un candidat de saisie 3D à partir duquel P a été défini. Soit le plan de saisie PS qui est normal à D . PS partage CE en deux parties symétriques dans la direction normale à D . Soit δ_{PS} représentant l'intersection de PS et de CE . δ_{PS} est un rectangle, composé de quatre segments, notés s_1 à s_4 . $N_{grasp}(P)$ est obtenu en localisant le contact virtuel v_i doigt/objet sur δ_{PS} . À ce contact virtuel est associé son contact réel r_i , localisé sur le modèle octree de l'objet O . Les contacts virtuels et réels sont uniques dans le sens où une stratégie de fermeture est associée à chaque préconfiguration. Par exemple, une préconfiguration P_7 (bi-digitale terminale) génère deux contacts virtuels v_1 et v_2 , situés sur le milieu des deux segments opposés s_1 et s_3 . Intuitivement, sur le milieu des côtés de (CE, D) .

Contribution de la gravité. Le premier critère évalue la contribution de la gravité. Appliquant ce critère, la qualité de $N_{grasp}(P)$ augmente quand la distance de PS au



centre de gravité de l'objet O diminue. Le centre de gravité géométrique, en supposant que l'objet ait une masse homogène, est facilement calculé à partir du modèle octree de O .

Cette contribution permet de faire un premier classement des cylindres elliptiques.

Contribution des forces de serrage. Ce second critère est basé sur l'évaluation des forces qui sont théoriquement générées par les doigts sur l'objet. Soit r_i le point de contact réel impliquant le doigt D_i et l'objet O , et $\vec{R}_i$ le vecteur normal associé à r_i . r_i est calculé en utilisant le modèle octree, en coupant $octree(O)$ avec le plan PS ⁵. Le vecteur mouvement $\vec{V}_i$ peut être défini par le vecteur $v_i \vec{r}_i$.

Le doigt D_i ne glissera pas sur la surface de O au point r_i si la loi de Coulomb est respectée, c'est-à-dire si le vecteur $-\vec{V}_i$ est dans le cône de friction $(\vec{R}_i, 2\phi)$. En conséquence, la qualité du point de contact r_i dépend essentiellement de l'angle θ entre $\vec{V}_i$ et $\vec{R}_i$. La figure 5.22 illustre un tel raisonnement. Si $\vec{V}_i$ est en dehors du dit cône ($\theta \geq \phi$), la préconfiguration est rejetée.

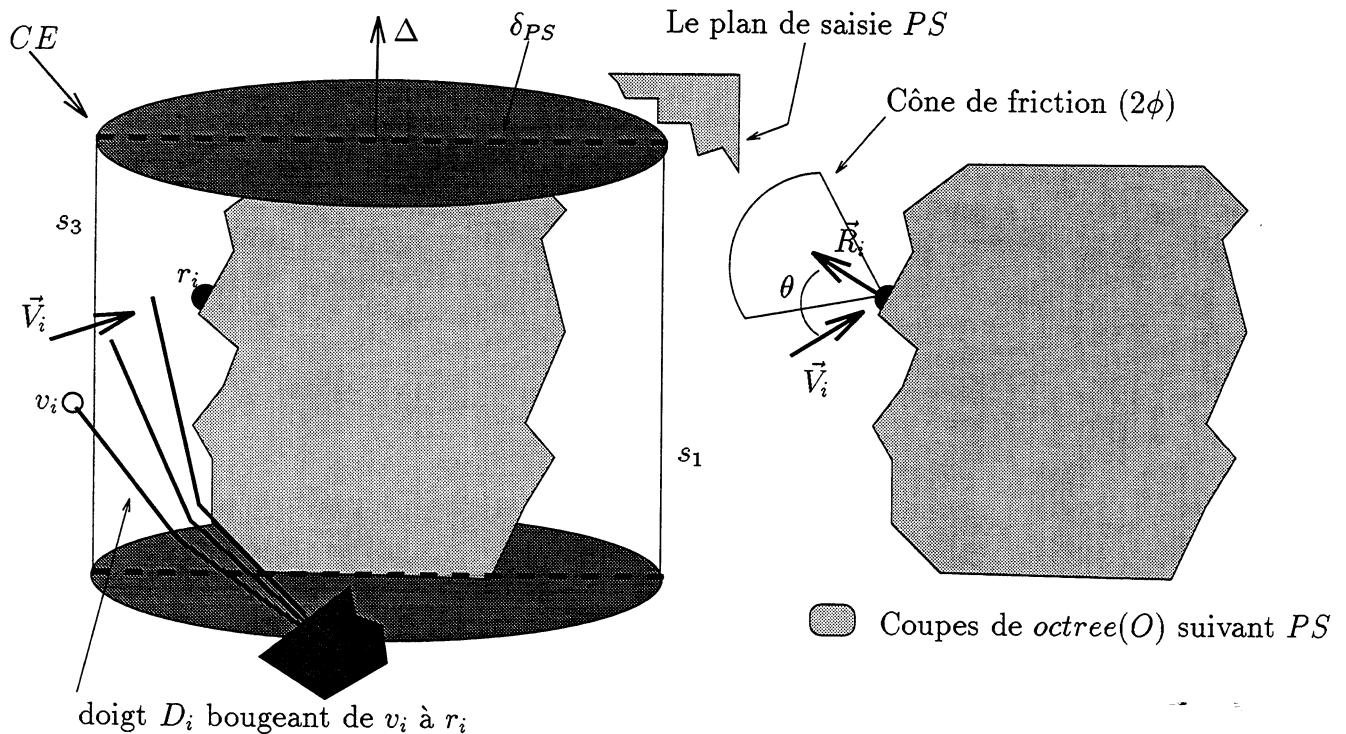
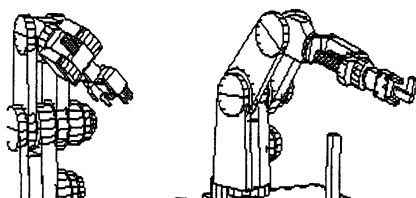


FIG. 5.22 - : Analyse de stabilité d'une préconfiguration

⁵Pour obtenir $\vec{R}_i$ il faut être capable d'extraire la normale au voisinage du point de contact r_i . Une méthode consiste à récupérer les huit voisins au point de contact sur l'octree, et à faire une estimation par interpolation pour obtenir la courbure et la normale. Le modèle doit être assez précis au voisinage de la surface (§page 125). Cette contribution des forces n'a pas été expérimentée.



Quand $\theta < \phi$, r_i est un point de contact acceptable. Cependant, à cause de la présence des incertitudes géométriques, plus θ est petit, meilleure sera la qualité de $N_{grasp}(P)$. De ce fait, on se rapprochera d'une saisie optimale (cf. § 5.8.4.1).

Ce second critère permet de faire un tri sur les préconfigurations associées à un cylindre elliptique.

Contribution des moments. Ce troisième critère vient s'ajouter au second, dans le sens où, dès que les points r_i sont acceptables, on peut calculer le moment généré par les doigts en contact avec l'objet. Ce moment tient compte, non seulement de la direction des efforts à appliquer $\vec{V}_i$, des points de contacts r_i , mais aussi de la valeur de la force m_i appliquée par chaque vecteur $\vec{V}_i$ (§ 5.8.4.1). Ce moment est calculé comme suit :

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i \wedge \vec{r}_i$$

où M est le moment, n le nombre de contacts, et $\vec{r}_i$ représente la position du point de contact.

Identiquement au second critère, la contribution des moments permet un classement des préconfigurations associées à un cylindre.

Ces critères d'évaluation du « degré de stabilité » d'une préconfiguration (gravité, forces et moments), sont très utiles pour rejeter des solutions instables évidentes pendant le processus de choix d'un cylindre elliptique et une de ses préconfigurations associées. Après ce premier filtre, des critères de stabilité plus fiables doivent être évalués pour déterminer les paramètres d'exécution d'une saisie particulière. Ce problème est abordé dans le chapitre 6, notamment par la prise en compte des interactions main/objet à l'aide de contraintes physiques.

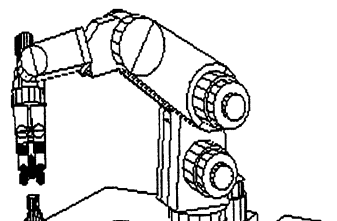
Stabilité pour une pince à deux mors. Dans ce cas l'analyse qualitative se réduit à calculer l'angle entre les normales aux faces de contact de l'objet et celles des mors.

5.9 Résumé

La figure 5.23 schématise toutes les étapes de planification de la saisie, rappelant les hypothèses fournies en entrée, l'enchaînement des processus de reconstruction et les sorties de notre système. Il s'agit de l'enchaînement de quatre modules.

Module A. Venant d'un système CAO ou d'un système sensoriel, les données de l'environnement sont transformées en octree.

Module B. L'octree contenant O et W_l , est découpé suivant un axe Δ . Cet axe peut être arbitraire. Dans ce cas, l'axe de œil/objet ou l'axe de pesanteur est choisi.



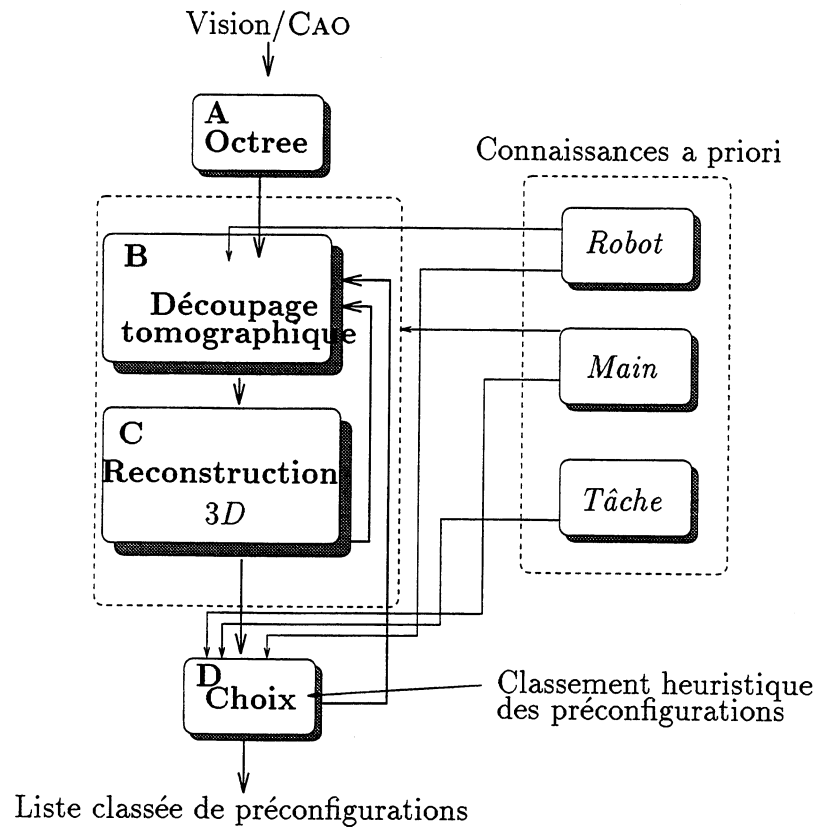


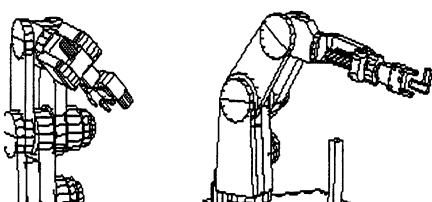
FIG. 5.23 - : Schéma du planificateur de préconfiguration.

Il peut être issu de données fournies par l'octree (matrice d'inertie) ou à partir de contraintes externes. Le choix d'un « mauvais » axe ne remet pas en cause la saisie ultérieure. Chaque tranche de *Octree*(O/W_l) est analysée pour obtenir des composants de saisie 2D : les ellipses et leurs directions d'accès.

Module C. La liste des composants 2D permet de reconstruire des composants 3D : les cylindres elliptiques. En analysant les composants 3D, on peut choisir un nouvel axe de coupe et réitérer jusqu'à satisfaction. On est satisfait quand les composants 3D sont accessibles, et sont une assez bonne représentation de l'objet (ou de la partie) reconstruit(e). À chaque composant 3D est associé sa liste de préconfigurations.

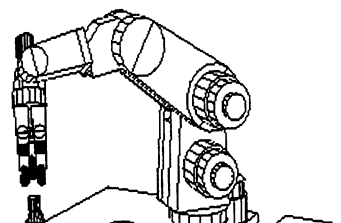
Module D. Il permet de classer les composants 3D et les préconfigurations associées, par rapport à des informations globales sur l'objet, l'environnement et la main. Les critères de stabilité, les contraintes externes de la tâche et du robot (main et bras), le volume utile, permettent d'effectuer ce tri.

Certaines informations triant les cylindres et les préconfigurations pourraient être prises en compte bien avant, dans le planificateur de préconfiguration, notamment les informations spécifiques à la tâche. Cependant, c'est leur spécificité qui nous l'interdit. La planification



de saisie de l'objet O , en respectant l'ordre des différents modules, est indépendante de la tâche à effectuer.

Une fois ces quatre modules activés, on obtient une liste, classée par ordre d'importance, des zones où il est intéressant de placer les doigts. Sur chaque zone, une ou plusieurs préconfigurations, elles aussi classées par ordre d'importance, permettent de définir la stratégie de fermeture des doigts. Chaque préconfiguration donne un type de positionnement des doigts autour de l'objet, un type de contact, et une stratégie de fermeture adéquate permettant de garantir, par rapport au modèle symbolique, la fermeture sur l'objet réel avec le contact requis. Le tout selon des critères de qualité pour la stabilité. Des résultats pour les différents modules sont exposés au chapitre 7.



Chapitre 6

Vers la manipulation : interactions main/objet

Notre but est de prendre en compte des contraintes physiques sur les objets pour la gestion des interactions.

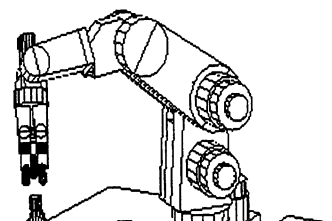
6.1 La méthode

Les incertitudes de modélisation et/ou de position entre la main et l'objet, de direction et/ou d'intensité des forces engendrées par les doigts et par l'objet, font que la stabilité de l'interaction main/objet est difficile à obtenir. L'idée de base consiste à modéliser explicitement aussi bien les interactions locales sur les objets (e.g. gravité), que celles survenant au moment du contact entre les objets ¹ (e.g. le frottement, les collisions, etc.), à l'aide des lois de la mécanique du point matériel.

En effet, il s'agit d'interactions entre masses. Ces masses peuvent être discrétisées, pour faire apparaître des composants macroscopiques uniques et simples. Ce composant dans notre cas, est une sphère (une sphère peut être vue comme un point matériel avec un rayon d'interaction et une masse). Il suffit ensuite, de gérer les interactions entre des sphères. Cette décomposition ne permet pas de réduire la complexité intrinsèque algorithmique globale, mais elle a le mérite de pouvoir traiter des contacts palmaires et pulpaire sans l'augmenter. Cette décomposition est « matérialisante », c'est-à-dire qu'elle respecte la géométrie de l'objet. Un contact complexe est alors implicitement, traité comme de multiples contacts sphère/sphère. Notre but est d'approcher un comportement réel en simulant les interactions entre les sphères. Ces simulations nous apportent des renseignements quant à la probabilité de réussite sur la saisie. Nous discutons plus en détail ce point au paragraphe 7.4.2.

Dans un second temps, il faut associer cette modélisation aux concepts de planification. En effet, cette modélisation « physique » permet de déterminer le mouvement a

¹La main est considérée comme un objet à part entière.



priori de l'objet dans la main, soit au moment de la saisie dans un contexte de recherche de stabilité, soit pour amener l'objet dans une position compatible avec une tâche pré-définie, dans un contexte de manipulation. Le planificateur définit, lui, les contraintes liées à la tâche, à l'accessibilité et au positionnement des doigts pour initialiser, et espérer faire converger vers la « meilleure prise possible » la simulation « physique ».

Cette fonction « interactions main/objet » consiste à combiner les résultats du système de recherche de stratégies de saisie, basé sur la notion de préconfiguration, et d'une méthode de génération de mouvements, basée sur la modélisation physique de la main et de l'objet à saisir :

La première étape prépare l'exécution de la saisie en utilisant le « planificateur de préconfiguration ». Elle consiste à positionner la main et à configurer les doigts autour de l'objet, en prenant en compte les contraintes d'accessibilité et cinématiques. Toutes les informations associées à une préconfiguration sont prises en compte : le type de contact (palmaire, pulpaire et/ou du bout des doigts), le type de saisie (sphérique, cylindrique, ...), et la stratégie de fermeture associée.

La seconde étape simule l'exécution de la saisie en utilisant « un générateur de mouvements physiques », tout en respectant les contraintes issues de la première étape. Ce générateur de mouvements « physiques » permet d'atteindre l'objet avec la main articulée, et s'assure de la stabilité de l'ensemble main/objet [39].

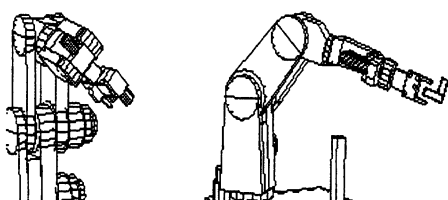
Le générateur de mouvements physiques et son modèle sont détaillés dans la suite. Utilisant ce modèle à chaque pas de temps, le générateur physique calcule les interactions entre les objets (ici la main et l'objet à saisir), en termes des forces appliquées sur chaque objet, pour déterminer leurs nouvelles positions. Il itère jusqu'à la stabilisation de l'ensemble main/objet.

6.2 La modélisation physique

6.2.1 L'idée de base

Les modèles géométriques ne peuvent pas être utilisés pour calculer des interactions physiques complexes, ceci parce que les effets engendrés par ces interactions résultent de l'intégration d'équations différentielles, associant des paramètres tels la distribution des forces et des positions, notamment dans le cas de déformations. Prendre en compte ces caractéristiques implique la construction de modèles appropriés, qui obéissent à la physique Newtonienne.

Des approches mettant en évidence ces propriétés ont déjà été développées dans le cadre de l'animation graphique sur ordinateur. Le résultat est la production de scènes « réalistes » de comportement d'objets en milieu naturel. L'idée de base de ces approches consiste à considérer les mouvements et déformations des objets physiques comme le résultat de l'application de lois, associant des ensembles de forces sur la structure intrinsèque

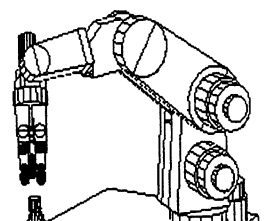


des objets. Une manière pratique d'obtenir un comportement est, à la fois, la discrétisation appropriée des objets de la scène, et l'association d'un ensemble d'équations différentielles à chaque composant du modèle. Ces équations combinent deux variables duales : la force et la position (ou la vitesse). Des techniques de discrétisation uniformes des objets [95], et orientées tâche [57], ont été proposées dans la littérature. LAUGIER [38] [52] a montré qu'une discrétisation orientée tâche est une meilleure adaptation du processus d'interaction robot/environnement. Dans cette approche, chaque objet est représenté par des particules élémentaires interconnectées, ayant les propriétés suivantes (modèle Cordis-Anima [57]) :

- Chaque particule peut être vue comme une masse ponctuelle, qui obéit à la dynamique Newtonienne, et qui est entourée d'une sphère élastique non inter-pénétrable.
- Un ensemble de particules respecte la masse, l'inertie, et l'occupation spatiale d'un objet modélisé.
- Les particules sont inter-connectées. Chaque connexion représente un comportement entre deux particules, auquel on associe une loi d'interaction physique. Cela va d'un comportement visco-élastique, à un comportement modélisant la friction.

En conséquence, un modèle physique $\Phi(W)$ d'un ensemble W d'objets en interaction, est représenté par un réseau, où chaque nœud n_i définit un composant d'un objet, et chaque arc a_{ij} représente une loi d'interaction physique. Dans ce modèle, chaque nœud n_i est caractérisé par une paire (p_i, m_i) , où p_i et m_i sont respectivement la position et la masse d'une particule. Chaque arc a_{ij} définit une équation d'interaction entre deux particules n_i et n_j du type : $F_i = -F_j = \phi(p_i, p_j)$, où $\phi(p_i, p_j)$ représente une loi d'interaction élémentaire, et F_i la force appliquée par n_i sur n_j , résultant de ϕ_{ij} . D'un point de vue algorithmique, on calcule la position p_i de chaque nœud n_i en concordance avec les lois de la physique Newtonienne, et avec les forces obtenues par les connecteurs associés a_{ij} , a_{ik} , ... Un arc a_{ij} représente la fonction qui produit une force suivant la caractéristique de ϕ_{ij} et les positions courantes p_i, p_j .

Les applications robotiques diffèrent des applications d'animation sur ordinateur. Les objets sont articulés par des chaînes complexes quasi-rigides. Les objets se déforment d'une manière limitée. Les collisions et phénomènes de friction sont de prime importance pour la génération du mouvement, notamment pour l'étape de stabilité. Ces caractéristiques ont nécessité le développement de constructions plus appropriées pour modéliser les composants quasi-rigides (i.e. les phalanges de la main), les articulations de la main, et les interactions complexes, notamment les contacts palmaire et pulpaire. L'idée de base est l'utilisation de modèles physiques pour la représentation des contacts, et des comportements au moment de la saisie effective. Le but est dans un premier temps, le rejet des prises non stables (phase « hors ligne »). Dans un second temps, l'utilisation du modèle physique permet, et ce dans une optique « contrôle d'exécution » (phase « en ligne »), la possibilité de prévoir des phases réactives à un comportement donné ou attendu.



6.2.2 Modélisation des objets

Pour implanter ces idées, nous avons développé quelques constructions de base, dérivées du concept proposé en [57] et [38] : les relations linéaires/angulaires basées sur des ressorts/amortisseurs [40] [50]. Les principes de modélisation ont été développés par JOUKHADAR. Le lecteur peut se référer à [39] pour plus de détail.

Relations « ressort linéaire ». Il s'agit de relations entre des masses adjacentes, qui essaient de garder une distance constante entre elles. Ce type de relation se rapproche du comportement d'un ressort associé à un amortisseur, liés en parallèle. Le ressort empêche un mouvement relatif des deux masses, et l'amortisseur empêche le ressort d'osciller autour de sa position d'équilibre. La forme algébrique de cette relation est donnée par l'équation :

$$\vec{F}_a = (-\lambda\Delta p - \mu\dot{p})\vec{k}_a \text{ avec } \Delta p = p - p_0, \quad (6.1)$$

où $\vec{F}_a$ est la force appliquée par la relation sur la particule a , λ la raideur du ressort, qui représente la rigidité de l'objet simulé par opposition à la traction, Δp la différence entre la position relative actuelle des deux particules p et leur position à l'état d'équilibre p_0 , μ la viscosité de la matière, $\dot{p}$ la vitesse relative des deux particules, et enfin $\vec{k}_a$ le vecteur directeur, dont la direction est la droite formée par les deux particules. On note cette relation par R_L (figure 6.1.(a)).

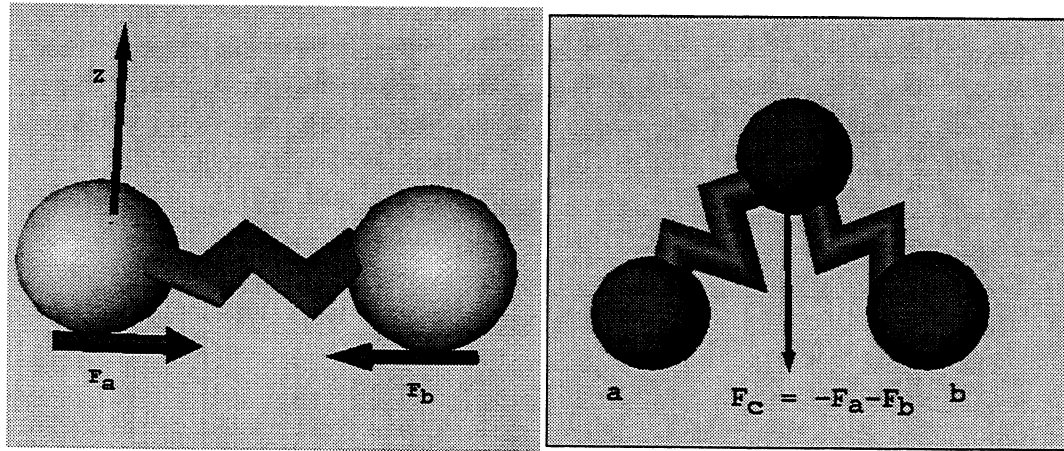
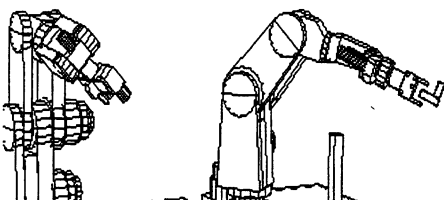


FIG. 6.1 - : Relations de type ressort linéaire et de type ressort angulaire.

Relation « ressort angulaire ». Ce type de relation concerne trois masses voisines adjacentes. Elle essaie de fixer l'angle entre deux masses par rapport à une troisième. Cette relation, notée R_A , s'approche du comportement d'un ressort de torsion (figure 6.1.(b)), centré en une masse, et dont les deux extrémités sont dirigées vers les deux autres masses. Par analogie au cas précédent, la forme algébrique de cette relation est donnée par la formule suivante :

$$\vec{F}_a = (-\lambda\Delta\theta - \mu\dot{\theta})\vec{k}_a \text{ et } \Delta\theta = \theta - \theta_0, \quad (6.2)$$



où $\vec{F}_a$ est la force appliquée par cette relation sur la particule non centrale a , λ la raideur du ressort représentant la rigidité de l'objet simulé, par opposition à la flexion, θ l'angle actuel entre les deux masses, $\Delta\theta$ la différence entre θ et leur angle à l'équilibre θ_0 , μ la viscosité de cette relation, $\dot{\theta}$ la vitesse angulaire de la relation, et $\vec{k}_a$ le vecteur directeur perpendiculaire à la relation liant la particule centrale et la particule a .

Pour garantir l'équilibre à θ_0 , la masse centrale doit être soumise à une force égale à l'inverse de la somme des forces qui agissent sur les deux autres masses. Si $\vec{F}_a$ est la force agissant sur la particule a , et si $\vec{F}_b$ est la force agissant sur la particule b , la force agissant sur la particule centrale c est : $\vec{F}_c = -(\vec{F}_a + \vec{F}_b)$ (figure 6.1.(b)).

Dans le cas d'une relation de « ressort de torsion », un arc peut avoir maintenant trois composants. Il est noté a_{ijk} . La fonction de force associée, notée ϕ_{ijk} , a elle aussi, trois composants.

Ces deux types de relations sont définies par deux constantes λ et μ , dont les rôles sont prépondérants :

- (λ). Facteur de rigidité. Si λ augmente, les efforts à fournir pour déformer les positions relatives entre les particules doivent être plus importants, et la vibration d'une particule autour de sa position d'équilibre plus rapide.
- (μ). Viscosité nominale interne. Si μ augmente, la vibration d'un élément autour de sa position d'équilibre diminue.

À partir de ces deux types de relations élémentaires, on peut représenter les articulations rotoïdes et prismatiques d'un robot.

6.2.3 Modélisation de la main articulée

Les articulations de la main doivent être modélisées. Une représentation d'une articulation prismatique peut être facilement construite à partir d'une combinaison de relations linéaires et angulaires. De manière classique, pour représenter une articulation, il faut munir une relation angulaire d'un vecteur $\vec{n}$, qui détermine la direction positive de rotation, et permet de distinguer l'angle $\theta = 0$ de l'angle $\theta = 2\pi$.

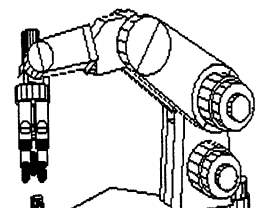
En résumé, la force d'une articulation est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_a = (-\lambda(\theta - \theta_0) - \mu\dot{\theta})\vec{k}_a$$

où

$$\theta = \begin{cases} \arccos(2\pi - \vec{i} \cdot \vec{j}) & \text{Si } (\vec{i} \wedge \vec{j}) \cdot \vec{n} < 0 \\ \arccos(\vec{i} \cdot \vec{j}) & \text{Sinon} \end{cases} \quad \vec{k}_a = \vec{n} \wedge \vec{j}$$

où $\vec{i}$ et $\vec{j}$ sont les vecteurs dirigés de la masse centrale (articulation) vers les deux masses adjacentes d'une relation angulaire. Cette force dépend de θ_0 . Son but est d'amener l'articulation à la position pour laquelle $\theta = \theta_0$. Une représentation de la main MDS est donnée figure 6.2.



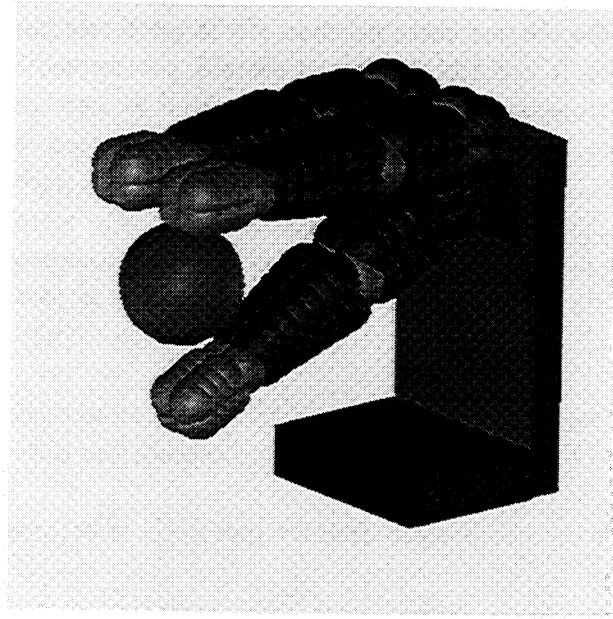


FIG. 6.2 - : Représentation de la main de Salisbury par des particules élémentaires.

6.2.4 Interactions main/objet

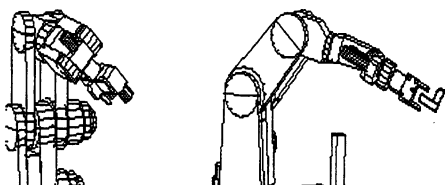
Quand les objets sont en mouvement, ils peuvent interagir les uns par rapport aux autres. On distingue dans la suite trois types d'interaction entre les objets : la collision entre deux objets, le frottement entre deux objets en contact, et l'interaction entre un objet et le milieu dans lequel il évolue (viscosité). Ces interactions rajoutent des relations fictives entre les composants. On associe à chaque relation une nouvelle fonction ϕ , qui dépend du type d'interaction. Ces relations ne sont valides que le temps de l'interaction.

La collision. La collision entre deux objets est considérée comme le résultat de l'interaction entre leurs particules élémentaires. Deux masses ponctuelles appartenant à deux objets différents sont en collision si la distance entre elles est plus petite que la somme des rayons des zones qui les entourent. Les déformations des objets au moment du contact sont à l'origine de la force de la collision. Ces déformations changent la position d'équilibre des relations internes (R_L et R_A), et produisent une force visco-élastique dont la forme est :

$$\vec{F}_c = \begin{cases} (-\lambda\Delta d - \mu\dot{d})\vec{k} & \text{If } \Delta d < 0 \\ \vec{0} & \text{Else} \end{cases} \quad (6.3)$$

où λ est une constante qui représente la rigidité de la collision, Δd la variation de la distance entre les deux particules, μ une constante représentant la dissipation de l'énergie, $\dot{d}$ la vitesse relative des particules, et $\vec{k}$ un vecteur dirigé d'une particule vers l'autre.

Chaque particule physique représente une grande quantité de vraies particules. Quand deux particules sont en collision, elles s'interpénètrent. Cette interpénétration n'est que



le résultat d'une déformation locale de ces deux particules. Cela justifie le choix de la forme de la force de collision. Si $\mu = 0$ alors la collision entre les particules est purement élastique. Si $\lambda = 0$ alors la collision est purement plastique.

La complexité d'un test de collision entre deux objets est de l'ordre de $O(n^2)$, si n est le nombre de particules les constituant. Comme seules les particules de la surface de l'objet peuvent entrer en collision avec d'autres particules, une solution pour réduire cette complexité est d'effectuer une décomposition hiérarchique de l'objet, proche d'une décomposition « octree » dont l'élément de base est la sphère. Cette décomposition n'intervient qu'une seule fois au moment de la construction de l'objet, et n'est valide que si les déformations de l'objet ne sont pas trop importantes. En l'effectuant, on réduit la complexité à $O(n)$. Le lecteur peut se référer à [39] pour plus de détails.

Le frottement Quand des corps entrent en collision, on doit tenir compte du frottement. Le frottement est une notion statistique. Cependant, cette force peut être considérée, pour la plupart des applications, comme proportionnelle à la norme de la force normale $|F_n|$ appliquant un corps contre un autre (lois de Coulomb), suivant la direction de la vitesse relative d'un objet par rapport à l'autre. Ce qui nous intéresse, c'est l'interaction entre les masses ponctuelles, et dans ce cas, on sait que la direction du mouvement est toujours dans le plan tangent au point d'interaction entre deux particules.

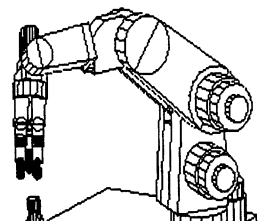
La force de frottement entre deux masses ponctuelles est proportionnelle à la force normale exercée par l'une sur l'autre. Sa direction est inverse à la direction de la vitesse relative des deux masses. Au cas où la vitesse relative des deux objets ne serait pas nulle, cette force peut être donnée par la relation suivante :

$$\vec{F}_{fc} = -c |\vec{F}_n| \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|}$$

où $\vec{F}_{fc}$ est la force de frottement cinétique, c le coefficient cinétique du frottement, $\vec{F}_n$ la force normale exercée par l'une des deux masses sur l'autre, et $\vec{V}$ la vitesse relative des deux masses ponctuelles.

Si la vitesse relative des deux masses est nulle (objet sur un support par exemple), on remplace le coefficient cinétique du frottement c par le coefficient statique du frottement s (normalement $s > c$). Dans ce cas, la direction de la vitesse n'est pas définie, mais a potentiellement la même direction que la force tangente exercée par l'une des deux masses sur l'autre. La force de friction statique peut être alors donnée par la relation suivante :

$$\vec{F}_{fs} = -s \frac{|\vec{F}_n|}{|\vec{F}_t|} \vec{F}_t$$



En résumé, la force de frottement est donnée par :

$$\vec{F}_f = \begin{cases} -c |\vec{F}_n| \frac{\vec{V}}{|\vec{V}|} & \text{Si } \vec{V} \neq 0 & (\text{Cas de glissement}) \\ -s |\vec{F}_n| \frac{\vec{F}_t}{|\vec{F}_t|} & \text{Si } |\vec{F}_t| > |s \vec{F}_n| & (\text{Cas intermédiaire}) \\ -\vec{F}_t & \text{Sinon} & (\text{Cas d'adhérence}) \end{cases} \quad (6.4)$$

La viscosité de l'environnement d'évolution. Le milieu dans lequel le mouvement a lieu (air, eau, vide, etc...) essaie toujours d'empêcher ou de freiner le mouvement. Comme pour le frottement, la viscosité du milieu est le résultat de collisions des millions de particules qui forment le milieu, et les particules de l'objet. La prise en compte de la viscosité du milieu explique à elle seule le mouvement de rotation des objets en chute libre. Cependant, pour la saisie, on peut la relativiser, car les mouvements sont lents. Ce qui est important, c'est savoir que l'objet tombe. De plus, même si nous sommes amenés à saisir des objets dans des milieux différents (air, vide), l'influence de ces milieux, notamment le vide, se répercute sur les masses. Nous négligeons par la suite ce type de paramètre.

6.2.5 Mécanismes de génération du mouvement

Soient W un ensemble d'objets en interaction, $\Phi(W)$ leur modèle physique, et F une force externe appliquée à certains composants de $\Phi(W)$. Le comportement dynamique de W après application de F peut être simulé à une fréquence donnée (pas de temps), par application de l'algorithme itératif suivant :

1. Calcul des forces associées à chaque arc a_{ij} dans $\Phi(W)$, par l'évaluation des fonctions d'interaction ϕ_{ij} . Nous avons vu précédemment que ϕ_{ij} peut avoir des formes différentes suivant le type d'interaction : R_A (eq. 6.2), R_L (eq. 6.1), friction (eq. 6.4), et collision (eq. 6.3).
2. Calcul de la nouvelle position p_i à associer à chaque particule élémentaire (ou nœud n_i) dans $\Phi(W)$ en utilisant la loi générale de la dynamique :

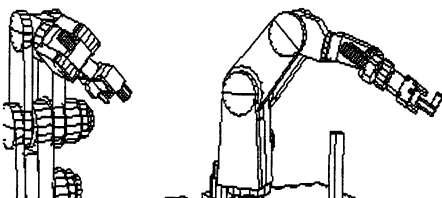
$$\sum_{\forall a_{ik}} F_{ik} = m_i \cdot \gamma_i = m_i \cdot (d^2 p_i / dt^2) \quad (6.5)$$

En pratique, cette expression est évaluée en la formulant par différence finie [39] :

$$\vec{P}_t = \frac{\Delta t^2}{m} * \vec{F}_{ext} + 2\vec{P}_{t-1} - \vec{P}_{t-2} \quad (6.6)$$

où $\vec{P}_t$ est la position de la particule à l'instant t , Δt est le pas de temps, et $\vec{F}_{ext}$ est la somme de toutes les forces (externes) appliquées sur la particule considérée.

Soit $\Phi(M, W)$ le modèle physique associé au système composé de la main M et de son environnement W . $\Phi(M, W)$ est obtenu en combinant $\Phi(M)$ et $\Phi(W)$, utilisant des lois d'interaction de contact appropriées (cf. § 6.3). Un mouvement de M réagissant avec



W peut être engendré en associant une « force de propulsion » F à M , et en appliquant l'algorithme précédent sur $\Phi(M, W)$. En pratique, F résulte de l'application d'un contrôle sur M . Une solution simple consiste à générer une force de propulsion F constante sur certaines particules de $\Phi(M)$, notamment sur les particules situées sur les bouts des doigts.

6.3 Planification globale de saisie

Notre but est de résoudre les problèmes spécifiques qui n'ont pu être résolus par le planificateur de préconfiguration, notamment les problèmes de stabilité. Ils nous permettront, soit de valider ou d'invalider telle ou telle prise choisie par le planificateur de préconfiguration, soit d'engendrer des comportements réagissant à des interactions main/objet probables qui ne tendent pas vers la stabilité. Le problème consiste à exprimer dans le modèle physique, les informations associées à une préconfiguration : le type de contact, le type de prise, et une position approximative des doigts sur l'objet. Il s'agit de converger vers une certaine configuration des doigts autour de l'objet, et de s'y maintenir en s'assurant de la stabilité du système main/objet. L'approche utilisée pour la planification globale de saisie est la suivante :

- Utilisation du planificateur de préconfiguration pour amener la main H suivant une configuration initiale près de l'objet O .
- Expression des informations du planificateur de préconfiguration dans le modèle du planificateur physique.
- Utilisation du générateur de mouvements pour évaluer la prise engendrée.

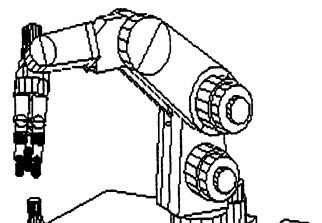
6.3.1 Description « physique » d'une tâche de saisie

Il s'agit de faire mouvoir un objet par rapport à une tâche donnée. On veut amener la main à une position donnée au contact de l'objet et/ou manipuler l'objet jusqu'à une position connue, en manœuvrant l'ensemble main/objet.

6.3.1.1 Le mouvement de la main articulée

Plusieurs manières peuvent être envisagées pour bouger une main articulée. À la manière d'une approche potentielle [47], où la main est attirée par une force attractive, une première solution consiste à rajouter fictivement des bouts de doigts (une sphère par doigt), où l'on espère obtenir un contact. Cette opération ne peut être envisagée que si la position finale des doigts sur l'objet est connue. Par notre planificateur de préconfigurations, la stratégie de fermeture permet de connaître approximativement cette position finale. Il suffit de relier ensuite les sphères fictives aux sphères de la main qui correspondent aux contacts estimés entre les doigts et l'objet, par une relation de type R_L .

Les solutions pour engendrer la trajectoire d'un objet (une main) attiré par sa représentation virtuelle (une sphère), sont multiples. Elles déterminent la vitesse de déplacement



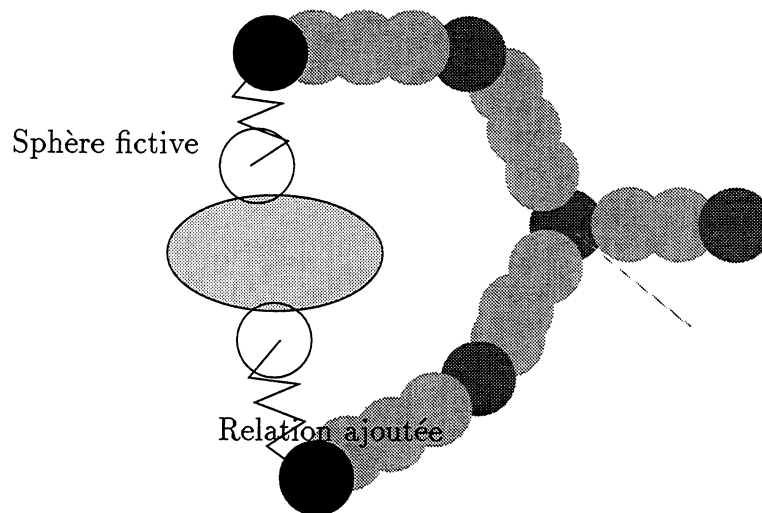


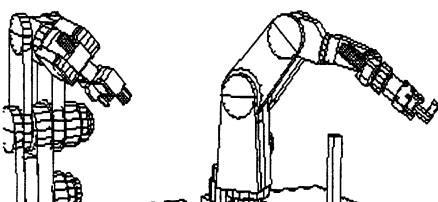
FIG. 6.3 - : Planification du mouvement d'une main articulée attirée par des bouts de doigts fictifs.

et les forces engendrées, et dépendent des paramètres associés aux relations R_L rajoutées. L'objet fictif doit avoir une « masse infinie », pour que l'objet physique ne subisse de façon certaine que les forces engendrées par les relations. La longueur de stabilisation p_0 de chaque relation R_L doit être nulle. Les paramètres λ et μ de chaque relation dépendent de chaque objet à mouvoir. μ doit être assez grand, pour empêcher les oscillations près du but, et λ doit avoir une valeur lui permettant de rendre la relation assez rigide pour attirer l'objet (ou la main), et assez élastique pour ne pas « casser » les relations formant l'objet. Si la sphère fictive est choisie à l'intérieur de l'objet à saisir, le doigt appliquera une force constante sur l'objet.

Cette méthode subit les mêmes problèmes des méthodes à champs de potentiels dès qu'il y a des obstacles. On n'est pas sûr de trouver une trajectoire en présence d'obstacles, sauf si l'objet peut effectivement glisser sur les dits obstacles. Ce glissement est facilement réalisable, en ne considérant que les forces de glissement dans l'application de la force de frottement, quand l'objet entre en contact avec un obstacle. Dès que la longueur courante de chaque relation R_L ajoutée est nulle, le but est atteint. Néanmoins, les différents paramètres restent difficiles à estimer pour obtenir le mouvement et les forces voulues. Dans nos expérimentations (cf. § 7.4), les paramètres ont été estimés de manière arbitraire.

6.3.1.2 Comportement dynamique des forces

Considérons que la main articulée ait subi le type de mouvement décrits dans le paragraphe précédent. La main a été attirée jusqu'à l'objet sous l'influence de ses doigts virtuels. Les doigts sont maintenant au contact de l'objet, faisant subir une force constante



à l'objet. On peut arranger les paramètres pour que cette force soit nulle, et qu'elle ne dépasse pas une certaine intensité pour chaque doigt.

Il faut s'assurer de maintenir le contact et la stabilité de l'ensemble main/objet, c'est-à-dire assurer la cohésion et la synchronisation des doigts les uns par rapport aux autres, pour que la force résultante du système main/objet soit nulle.

Contrôle des forces. Prenons l'exemple de trois particules, assimilées à des bouts de doigts en contact avec l'objet. Si on relie toutes les particules deux à deux par une relation R_L , on s'assure que la somme des forces extérieures reste nulle à chaque instant, suivant le principe de l'action/réaction. En effet, chaque relation engendre deux forces opposées et égales, définissant les forces de raideur qui apparaissent à chaque extrémité des relations R_L . La figure 6.4 illustre un tel exemple pour trois points de contact : on lie chaque paire de points par une relation de type R_L , et on applique les forces résultantes de ces relations à la main réelle.

La longueur de stabilisation de chaque relation permet de définir la force constante appliquée par les doigts (deux à deux) sur l'objet. Si cette longueur correspond exactement à la taille de l'objet suivant la direction d'application des forces pour chaque doigt, la force appliquée par les doigts est nulle. En définissant une longueur plus petite que la taille de l'objet, on contrôle exactement la direction et l'intensité des forces appliquées par chaque doigt sur l'objet (cf. § 6.3.2).

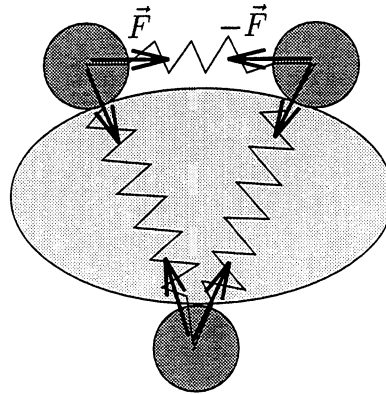
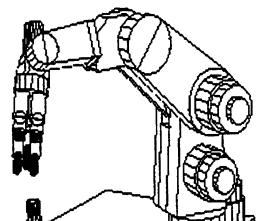


FIG. 6.4 - : Relations de type R_L entre les points de contact pour garantir que la somme des forces extérieures soit nulle. Dans ce cas, la longueur de stabilisation des relations est égale à la distance entre les sphères.

Effets des moments. Pour obtenir la stabilité de l'ensemble main/objet il faut aussi s'assurer que la somme des moments est nulle (§ 5.8.4). L'ensemble des relations R_L rajoutées entre les particules de la main en contact, ne fait que garantir que la résultante des forces soit nulle. En effet, l'objet peut se mouvoir sous l'effet des moments. Comme les forces s'annulent, le résultat de la simulation dynamique nous permet de connaître



le comportement de l'objet subissant des moments non nuls. Le moyen de prendre en compte les moments, est de les prévoir au préalable (§ 7.3.4). Cependant, nous sommes pour l'instant passif quant à leurs effets.

Contacts non prévus. Une propriété intéressante des modèles physiques, quand l'objet bouge et entre en contact avec une partie de la main qui n'a pas été prévue par le planificateur de préconfiguration, est son habileté à prendre « implicitement » en compte les nouvelles interactions dans le processus de stabilisation. Par exemple, le contact souhaité est « bout des doigts », et à un moment donné, le contact établi est un contact pulpaire sur un doigt. Dans un tel cas, pour converger vers la stabilité, il faut alors rajouter des relations entre les particules en contact. C'est un aspect pratique des modèles physiques, car on travaille au niveau des particules, et pas au niveau de l'objet lui-même. Il est facile à chaque instant de connaître les particules en contact. On peut donc « réagir », en rajoutant automatiquement des liaisons permettant d'assurer des forces externes nulles, dès que des contacts non prévus apparaissent.

6.3.2 Modélisation des contraintes du planificateur de préconfiguration

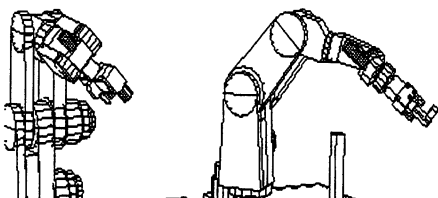
Nous allons donner dans ce paragraphe les éléments permettant de faire le lien entre le planificateur de préconfiguration, et le planificateur physique, en utilisant les notions de mouvement de la main, de maintien et stabilité, énoncées dans les paragraphes précédents.

Pour une prise suggérée par le planificateur de préconfiguration, les paramètres les plus importants issus de son analyse, sont décrits, dans le tableau 6.1. Notamment, sont décrits la forme de l'objet à saisir fo , le nombre de doigts nd utilisés, le type de contact espéré tc , le type de prise tp , et la stratégie de fermeture sf dépendante de tc et tp .

<i>Description</i>	<i>Attributs</i>
La forme de l'objet à saisir fo	épaisseur Ep , largeur La , longueur Lo
Le nombre de doigts nd	deux doigts D_2 ou trois D_3 (Pouce, Index, Majeur = Po, In, Ma)
Le type de contact tc	bout tip , pulpaire pad ou palmaire $palm$
Le type de prise tp	sphérique Sp cylindrique Cy , ...
Stratégies de fermeture sf	$SF_{tc/tp}$

TAB. 6.1 - : Liste des informations importantes issues de la préconfiguration.

Chaque attribut a une influence, soit sur une éventuelle « relation » entre un doigt et un autre, soit sur la valeur d'équilibre p_0 de cette relation. Le terme relation, ici, décrit l'opposition des doigts entre eux. Par exemple, une prise sphérique décrit l'opposition,



deux-à-deux, du pouce, de l'index et du majeur. Une prise cylindrique décrit l'opposition du pouce au couple {index, majeur}. Nous allons nous servir de cette opposition, pour rajouter des liaisons de type R_L entre chaque doigt, et sur les couples {doigt.objet}, en « espérant » obtenir une prise compatible avec la préconfiguration obtenue, et en « espérant » converger vers une prise stable. Deux étapes distinctes décrivent la planification de saisie :

- $Etape_1(E_1)$: les doigts sont attirés vers l'objet jusqu'au contact, en accord avec la notion de mouvement, décrite au paragraphe 6.3.1. Le type de contact à réaliser détermine les particules des doigts à connecter à des particules fictives près de l'objet, en utilisant des relations R_L appropriées. Les particules fictives placées près de l'objet, sont déterminées par la stratégie de fermeture associée au type de contact, et au type de prise. Celle-ci permet de connaître la position approximative des doigts autour de l'objet. Cette étape permet de rapprocher la main de l'objet jusqu'au contact. Les relations rajoutées entre l'objet et la main contraignent la configuration finale des doigts autour de l'objet.
- $Etape_2(E_2)$: Les doigts sont au contact de l'objet et bougent de manière compliant, pour maintenir le contact, et pour obtenir l'équilibre du système main/objet. Ce comportement est obtenu en connectant les particules des doigts entre elles, en utilisant les relations R_L . Le choix des particules à connecter dépend du type de contact. Les caractéristiques des relations dépendent du type de prise à obtenir.

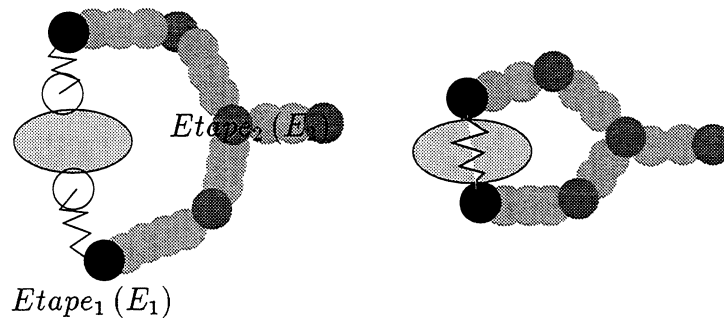
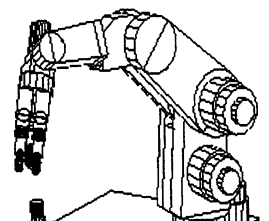


FIG. 6.5 - : Les étapes de la stabilité: (E_1) la main s'approche au contact de l'objet par rapport à sa préconfiguration, (E_2) compliance de l'ensemble main/objet.

La figure 6.5 illustre les deux étapes de la planification. Il est à noter que le résultat de ces deux étapes ne converge pas obligatoirement vers une prise stable. Il se peut que la prise à engendrer ne convienne pas. Les causes sont multiples : le type de prise ne convient pas; le type de contact n'est pas adapté; la configuration initiale est mauvaise; il n'y a tout simplement pas de prise stable.

Le paragraphe ci-après décrit les influences de chaque attribut sur les liaisons connectant les doigts et l'objet. Une sphère et un cylindre servent d'exemple.



6.3.2.1 Exemple sur une sphère et un cylindre

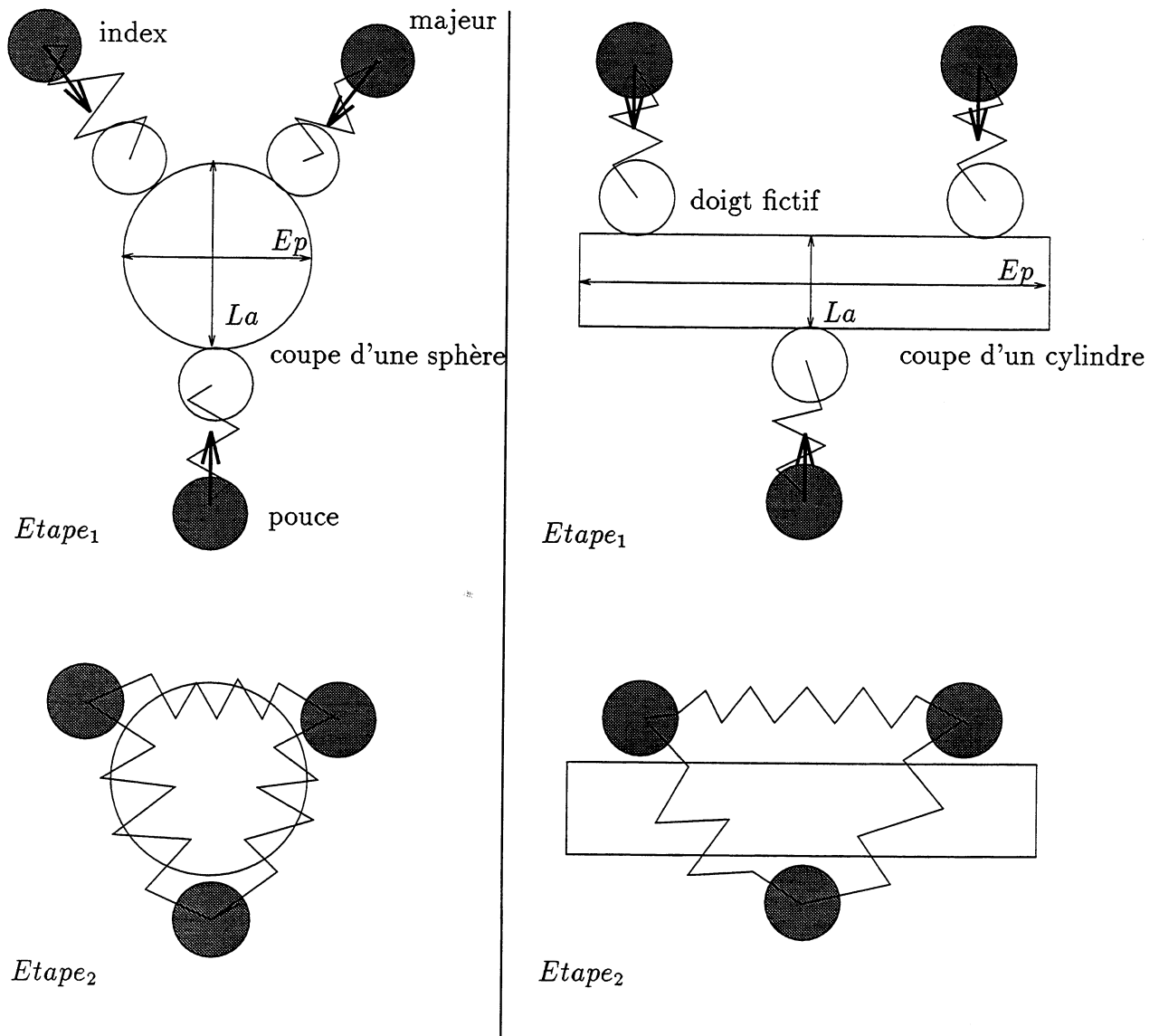
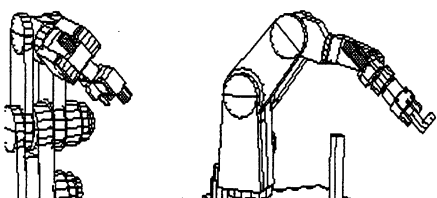


FIG. 6.6 - : Description des étapes de liaisons sur une sphère et un cylindre, pour des saisies sphérique et cylindrique du bout des doigts.

Considérons une main préconfigurée autour d'un objet. On associe à chaque type d'attribut de préconfiguration, un ou plusieurs attributs physiques :

- Le nombre de doigts D_2 ou D_3 détermine sur quels doigts les liaisons de type R_L vont être ajoutées.
- Les relations de type R_L relient les doigts aux doigts fictifs pour l'étape E_1 . Elles dirigent les doigts suivant la stratégie de fermeture envisagée, qui elle-même dépend



du type de prise et de contact. Le paramètre p_0 (eq. 6.1) de ces relations est toujours égal à zéro. Pour la sphère, la fermeture des doigts se dirige vers le centre de celle-ci, tandis que pour le cylindre, le pouce s'oppose aux autres doigts.

- La taille de l'objet détermine les valeurs de stabilisation de chaque relation R_L dans l'étape E_2 . p_0 dépend du type de prise, et correspond à une combinaison de Ep , La , Lo . Pour une prise cylindrique Cy , la valeur initiale est $p_o = La$ pour les liaisons R_L entre les couples $\{Po, In\}$ et $\{Po, Ma\}$, et de $p_o = Ep$ pour la relation R_L reliant le couple $\{In, Ma\}$. Cela permet de garder l'opposition entre le pouce et les deux autres doigts. Pour une prise sphérique Sp , la valeur initiale est constante : $p_o = \frac{Ep}{4}\sqrt{10}$ ($Ep \equiv La \equiv Lo$, les angles du triangle reliant les trois bouts de doigts $\equiv 120^\circ$).

Ces contraintes garantissent que la saisie obtenue est conforme à la prise et à la tâche souhaitées. La figure 6.6 montre un exemple d'une telle association, pour un contact du bout des doigts sur une sphère (respectivement un cylindre). La figure 6.7 illustre la dépendance entre le type de contact et les positions des relations R_L .

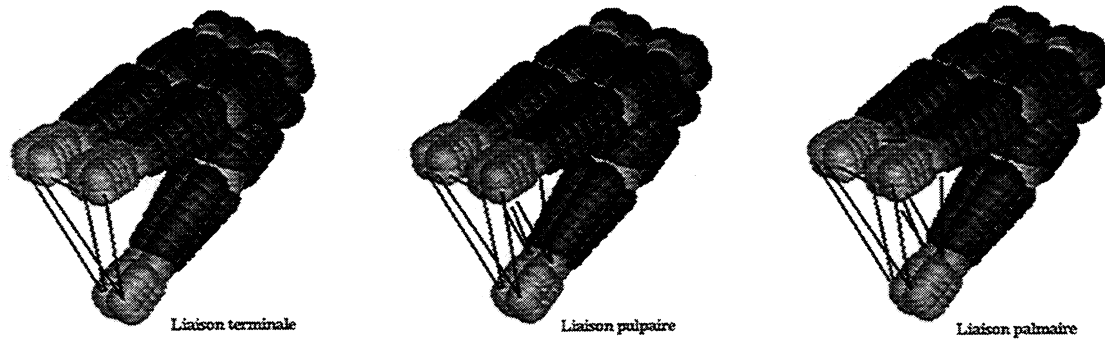
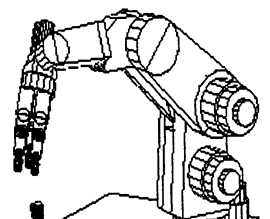


FIG. 6.7 - : Les relations R_L dépendent du type de contact souhaité : (1) contact Bt , (2) contact Pu , (3) contact Pa .

6.4 Conclusion

La méthode présentée ici a permis de prendre en compte les interactions physiques, entre notre main articulée et des objets. Cette méthode est basée sur la formulation de contraintes physiques appliquées à une main robotique et à des objets pendant la phase de saisie. De plus, la connexion avec le planificateur de préconfigurations a été réalisée, pour prendre en compte toutes les contraintes, permettant ainsi une approche globale dans la résolution d'une opération de saisie. En effet, des relations entre les doigts ont été ajoutées, pour prendre en compte les problèmes de stabilité, de forces engendrées par les doigts au moment de la fermeture sur l'objet, et les contraintes supplémentaires venant du planificateur de préconfiguration. Cette connexion n'existe à l'heure actuelle qu'en simulation. Elle peut être comparée aux stratégies de pré-placement des doigts autour de



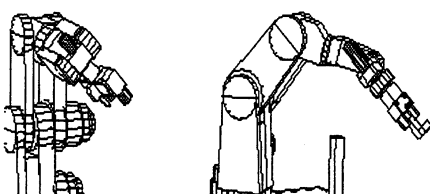
l'objet, et aux stratégies de fermeture associées. En fait, des points de contrôle sur la main et sur l'objet permettent de réaliser cette connexion. Ces points de contrôle dépendent du type de contact, du type de prise, et de la géométrie de la partie à saisir.

Outre cette connexion permettant une approche globale, une propriété significative de notre système, est son habileté à prendre en compte des contacts palmaires et pulpaire, sans augmenter sa complexité. Chaque interaction se situe au niveau du composant d'un objet. Un contact complexe est décomposé implicitement en de multiples contacts sphère/sphère. Un intérêt de cette méthode est la connaissance de la position des objets à chaque instant. Ce qui est pratique, même si on possède une commande très évoluée. Une main articulée n'est pas moins que trois robots interagissant dans le même espace. Il est très difficile de synchroniser les doigts, de telle manière qu'ils arrivent en même temps au contact. Cette non synchronisation peut entraîner un changement de position de l'objet. De plus, le comportement du système main/objet n'est pas toujours celui escompté au départ. Cette connaissance des positions permet d'éviter la boucle fastidieuse mettant en action un processus basé sur des capteurs (caméra, laser, ...), permettant de récupérer la nouvelle position de l'objet, une fois la stabilisation effectuée.

Néanmoins, le problème essentiel de ce genre de méthode est le besoin d'identification des paramètres du modèle. Chaque paramètre est en relation avec les autres paramètres du modèle. Le problème consiste à trouver ces relations. Pour exemple, on peut penser que l'élasticité/rigidité des objets est en relation avec la rigidité de la collision.

Un deuxième problème associé à cette méthode, concerne la modélisation automatique d'objets « physiques ». La décomposition en « octree » décrite au paragraphe page 104, pour réduire la complexité du traitement des collisions, nous fait entrevoir la possibilité d'obtenir directement à partir d'informations perceptives le modèle « physique » des objets à saisir. Cependant, ce n'est pour l'instant qu'une perspective. Il faut notamment gérer les relations entre sphères, la rigidité, la viscosité, la masse, ... Pour cela, des informations initiales précises sur l'objet sont nécessaires, tels sa matière et son poids.

Pour l'instant, la construction des objets et l'ajustement des paramètres, sont effectués à la main. Les paramètres dépendent par la suite du type de contrôle/commande de la main articulée. Néanmoins, les modèles physiques permettent l'existence d'un lien naturel entre la planification et le contrôle. Il se concrétise par la « manipulation » de forces et par l'identification des transitions entre les différents comportements.



Chapitre 7

Intégration et expérimentations

L'exposé de notre approche a été fait dans le cadre général de prises mettant en jeu des objets de formes quelconques, et de trois outils préhenseurs, dont une pince simple à deux mors parallèles et deux mains articulées : OTD et la main MDS. La diversité des outils et des objets permet de tester la faisabilité de notre approche, et montrer sa généralité, tant dans les types d'outils utilisés que dans les types d'objets à saisir. Ce chapitre relate les expérimentations qui ont été effectuées pour valider notre approche et discuter de ses limites.

7.1 Intégration

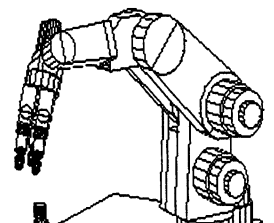
Cette approche a été développée dans une optique d'intégration globale, et ce, dès le départ : intégration avec la vision, où la connexion concerne l'utilisation en entrée d'un modèle volumique ; intégration vers le contrôle/commande, où la connexion concerne l'utilisation par les modèles physiques de paramètres communs, telles les forces. Pour la planification, cette intégration a été réalisée, notamment avec le démonstrateur du projet SECOND (§ 7.1.2).

7.1.1 La Plateforme

Dans le cadre de nos développements, nous avons eu la chance de posséder un réel environnement de programmation orienté pour la robotique, et propice à l'intégration. Cet environnement est composé d'une pince à deux mors parallèles, montée sur un robot SCEMI (6 ddl +1 pour la pince), de caméras montées sur un autre robot SCEMI, une main articulée de type « SALISBURY » à poste fixe (pour l'instant), d'une station Silicon Graphics et d'un système de CAO/Robotique : ACT ¹. L'intérêt est de pouvoir contrôler directement à travers le réseau Ethernet via ACT, que ce soit le robot SCEMI avec le système de contrôle/commande KALI ², ou la main articulée avec le système de contrôle

¹ACT est développé par la société Aleph Technologies.

²KALI est développé par McGill Research Center for Intelligent Machines.



commande ORCCAD [88]. Tout ces systèmes sont suffisamment ouverts (bibliothèques de fonctions en langage C) pour permettre l'implantation, l'intégration et la communication avec notre planificateur de saisie.

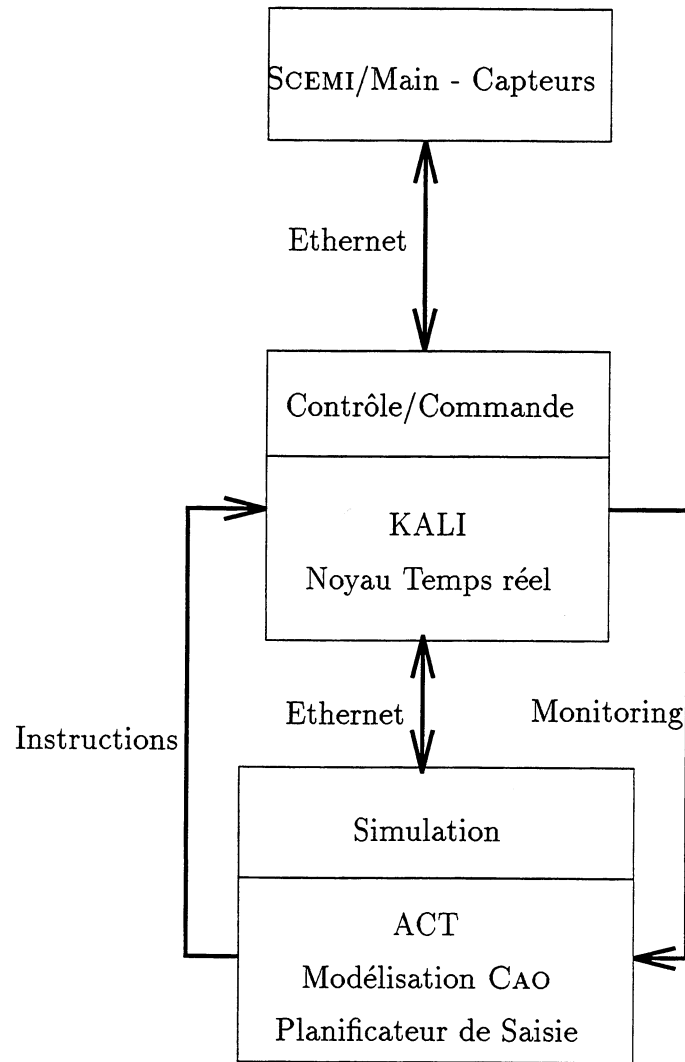
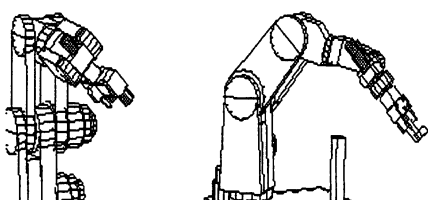


FIG. 7.1 - : Environnement de programmation.

Les expérimentations ont été faites en simulation à partir du système ACT, et validées sur le robot SCEMI pour ce qui concerne la saisie avec une pince à deux mors, et sur la main articulée pour ce qui concerne les préconfigurations. Le contrôle/commande de la main articulée étant en cours d'élaboration, les interactions main/objet n'ont pu être réalisées qu'en simulation (§ 7.4). La figure 7.1 illustre l'environnement d'étude.



Le fait que la main articulée soit à poste fixe, n'est pas un problème en soit. Notre but est de séparer au niveau de la saisie, la partie planification de saisie avec la main, et la partie planification de mouvement pour amener la main en position. Le lien se fait au niveau du poignet, qui oriente la main en position. La saisie effective ne se fait par la suite, qu'avec les doigts. Néanmoins, dans une perspective de réalisation de tâches de compliance ou de manipulation, un système bras/main doit être réalisé.

7.1.2 Démonstrateur du projet Second (film pair)

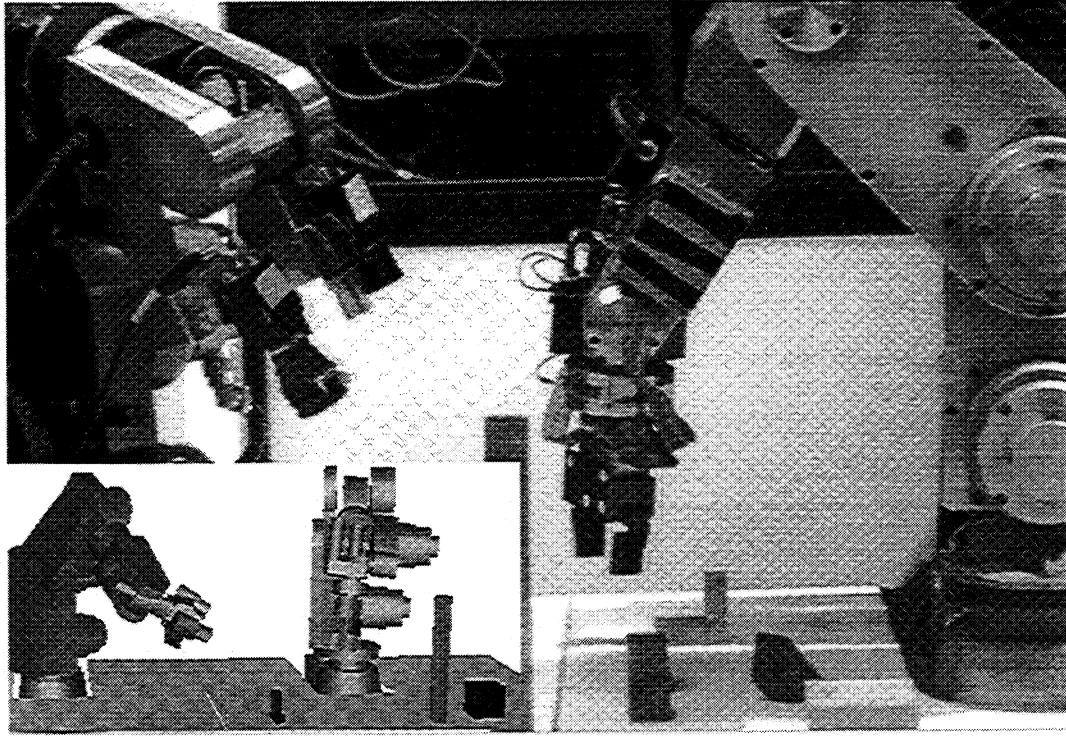
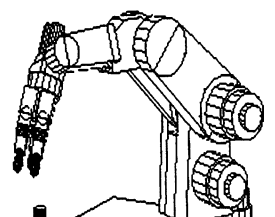


FIG. 7.2 - : Plateforme du démonstrateur du projet SECOND.

Dans le cadre du projet SECOND [7], nous nous sommes orientés vers une tâche de « prendre et poser » dans une scène partiellement structurée (la reconstruction avec un modèle volumique est simulée pour les obstacles inconnus). L'objectif est de réaliser l'intégration de la vision (stratégies perceptives de l'Université d'Oxford et reconstruction volumique de l'Université de Gênes), de la planification (trajectoires sans collisions : méthode coordonnée de deux robots de l'université de Karlsruhe, et méthode mixte), et de l'exécution d'une tâche de saisie, dans un environnement partiellement connu. La scène est constituée des deux robots Scemi de la plateforme du LIFIA. Le premier R_v observe la zone de travail et le second R_f réalise la tâche souhaitée avec une pince à deux mors (figure 7.2). Notre planificateur de saisie, pour cette tâche, est le maillon principal entre la vision et la planification du robot : il analyse la saisie d'un objet de type L dont la position est connue, en donnant la position de pré-saisie et la position finale de saisie de



l'objet, tenant compte des obstacles au voisinage (figure 7.3-(1)). Cette analyse sert pour la planification et l'exécution effective de la saisie :

- La position de pré-saisie est le but à atteindre par le robot R_f , avant l'action de saisie proprement dite. Elle est sélectionnée par l'opérateur parmi les positions de pré-saisie possibles (figure 7.3-(2)). La décision du choix d'une des pré-saisies reste à implanter. Les connaissances a priori sur le robot (facilité de mouvement quand le poignet n'est pas orienté parallèlement à la table), sur la pince (§ page 95), et sur la tâche (pose de l'objet suivant l'axe $\vec{z}$), nous permettrait pour cette expérience de choisir automatiquement un accès par le haut.
- La position de saisie permet, avec l'aide de marques sur la pince, d'amener le robot R_f par asservissement visuel, jusqu'à la position finale de saisie [71].

Ce démonstrateur nous a révélé les problèmes réels quant à l'intégration et l'interaction entre les différents modules. Notamment, les principaux problèmes viennent du calibrage des différents outils (robots, caméras, ...), et de l'identification entre le monde simulé et le monde réel. Le démonstrateur final doit intégrer la main MDS avec les interactions main/objet, le positionnement précis de l'objet à saisir, par la perception et la reconstruction volumique des obstacles et de l'objet. Le « film » décrit en préambule (§ page ii), montre le résultat de cette intégration.

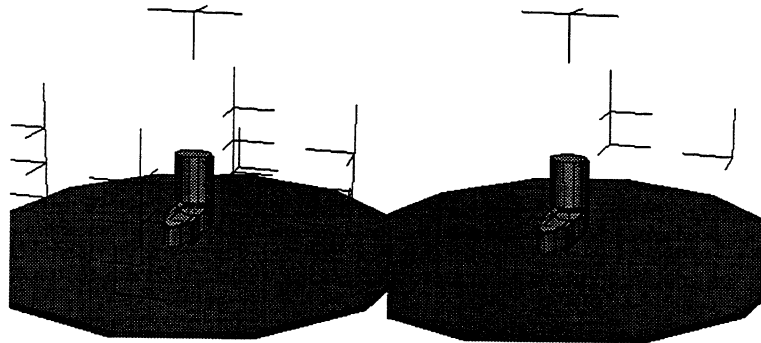
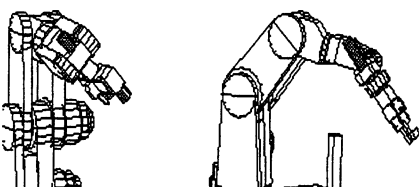


FIG. 7.3 - : Analyse de pré-saisie l'objet de type L . Image 1 : analyse sans tenir compte de l'accessibilité du robot. Image 2 : accès de saisie possibles pour le système bras/pince.

Dans le cas d'une reconstruction à partir de la vision, la connexion de notre planificateur avec un modèle visuel n'a pas fonctionné. Probablement parce que le module de reconstruction visuel n'était pas assez robuste, et que les paramètres de calibrage (robot et caméra) n'étaient pas assez précis. Les causes sont difficiles à évaluer. Néanmoins, l'enseignement à tirer de cette expérience, montre le besoin d'intégration entre la planification de saisie et la perception. Cette intégration doit se faire au niveau du partage des modèles, des requêtes venant de la planification pour obtenir la zone à reconstruire, des requêtes de la vision pour les localiser, et savoir où placer les caméras. Les problèmes concernent le



calibrage, le positionnement de l'objet dans la scène et dans son voisinage. La reconstruction à partir de la vision, de voxels ou d'octrees, est possible, avec des résultats satisfaisant d'un point de vue de la précision [93]³.

7.1.3 Comparaison avec des systèmes existants

Dans l'état de l'art décrit au chapitre 2, un certain nombre de systèmes se rapprochent du nôtre. Notamment, ils essayent eux aussi d'avoir une analyse globale et une intégration, pour la résolution du problème de la saisie : RAO [81][54], IKEUCHI [24][45], STANSFIELD [89][92], POLLARD [79][78], CUTKOSKY [16][30] et VERCELLI [99] [27]. Nous avons axé notre comparaison sur les aspects qui vont de la récupération des données à la réalisation effective. Elle concerne le type de mains utilisées, les données fournies en entrée, les types d'objets, les modèles utilisés, les critères d'accessibilité, les types de prises, la stabilité, les critères de tâches et enfin, des expériences entreprises.

Le tableau 7.1 résume les comparaisons entre les différentes approches. Notre originalité face à ces approches concerne une résolution du problème de la saisie dans sa globalité, et ce, dès le départ. Peu de systèmes ont cette démarche, exceptée POLLARD.

7.2 La reconstruction du modèle morphologique

C'est la partie de notre approche qui prend le plus de temps. En effet, le principe consiste à découper le modèle volumique (un arbre octal) en tranches. Chaque tranche est ensuite analysée, pour en extraire les composants. Il s'agit du traitement d'une image $2^p * 2^p$, où p est la profondeur de l'arbre octal.

Ensuite, chaque composant doit être encapsulé par un arbre binaire d'ellipses, et chaque arbre analysé. Les étapes de l'algorithme sont résumées en annexe B.

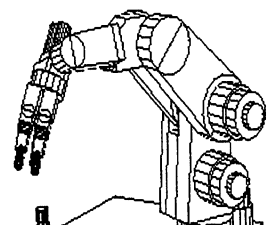
Le succès d'une reconstruction dépend de l'adéquation entre les différents paramètres de la reconstruction : l'axe de coupe, les paramètres utilisés pour l'analyse de similarité (§ page 63), et la profondeur de l'arbre octal par rapport à la taille de l'objet à encapsuler.

7.2.1 La reconstruction à partir d'un modèle Cao

C'est avec ce type de modèle que nous avons fait la plupart de nos expérimentations (cf. § 7.1.2). Celles-ci ont montré que la précision de l'objet discrétisé dans l'octree est un élément prépondérant pour obtenir une bonne reconstruction. Cette précision dépend du volume que représente l'arbre octal, ainsi que de sa profondeur.

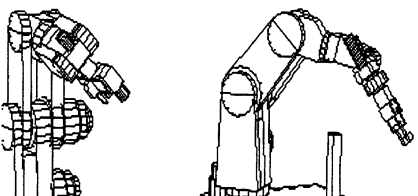
La principale contrainte concerne les accessibilités au voisinage de l'objet. Le volume de l'objet et le volume de la pince doivent être contenus dans le volume de l'octree. Ceci pour que l'analyse d'accessibilité au niveau de l'objet ait un sens pour la planification de mouvement sans collision. La précision obtenue dépend de la grosseur de l'objet et de

³Dans le cas de SZELISKI [93], l'objet est seul dans la scène.



	Main	Données	Objets	Envir.	Const.	Accès	Prises	Stabilité	Tâche	Exécution
1	Humaine	Opérateur	Manu.				Taxo. ↪ tâche		Système Expert	Simul.
	2 doigts		Cube					Poids	soulever	oui
2	Humaine	Vision	Cylindre	objet seul	Cylindre Généralisé		7 prises			Simul.
	pince 3 dli	Vision	Cailloux	Non Struct.	contour souple			3 points mous ↪ position		oui
3	Mds	Cao	Polyèdres	Structuré	faces	C-space ↪ machine parallèle	bout des doigts	3 points friction ↪ position		Simul.
4	Usc Hand	Vision	Canon.	objet seul	Cylindre Géné.	local ↪ tâche	7 prises	Poids	Système Exp. 7 tâches	
5	Mds	Vision	Canon./ tasse	objet seul	Boite Englob.		3 prises	Poids	Soulever	oui
6		Cao	Indifférent	objet seul	octree	local	6 prises			Simul.
7	Générique Mds, OPD,	Cao/ Vision	Indifférent	(Non) Struct.	Cylindre Elliptique	local/ global	pré-config.	mesures Quant.	Poids/ Volum.	Simul./oui Simul.

TAB. 7.1 - : Comparaisons entre systèmes de planification de saisie. (1) Cutkosky et al., (2) Ikeuchi et al., (3) Pollard, (4) Rao et al., (5) Stansfield, (6) Vercelli, (7) notre approche.



la longueur de la pince. Si on ne connaît pas le volume de l'objet (la taille de sa boîte englobante), ou si l'objet est très gros, la précision s'en ressentira. Une bonne adéquation entre place mémoire occupée par l'octree, complexité de recherche dans un arbre octal, taille d'un doigt et précision, donne une profondeur de 6 (mesure empirique). Par exemple, pour un objet de 10cm de côté, une feuille de l'arbre octal représente environ 1.5mm, pour un cube octree de 100 de côté (unité octree). Les figures 7.4 à 7.11 montrent différents objets reconstruits avec les axes de coupes pertinents et les temps moyens de calcul.

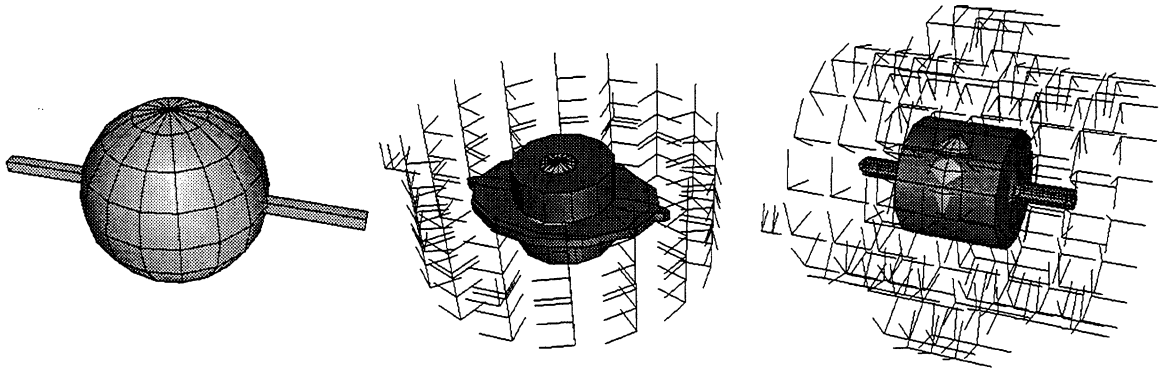
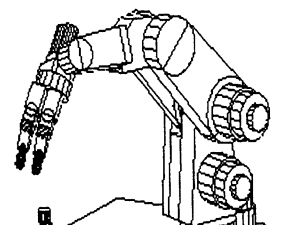


FIG. 7.4 - : Représentation d'une sphère munie de deux protubérances. 90 coupes ont été nécessaires sur l'axe $\vec{z}$ (image 2) et $\vec{x}$ (image 3). Temps de construction moyen de l'octree: [60] ms. Image 2: temps de construction moyen des ellipses [1120] ms; temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques [740] ms. Image 3: temps de construction moyen des ellipses [880] ms; temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques [2450] ms.

L'axe de coupe choisi dans le cas de ces reconstructions, provient essentiellement de la matrice d'inertie de l'objet. Dans la figure 7.4, l'axe de coupe de la troisième image ($\vec{x}$) est meilleur que celui de la seconde ($\vec{z}$). Cependant, la reconstruction de la seconde image montre clairement que les accès dans l'axe perpendiculaire doit tenir compte des ergots accrochées à la sphère.

Dans la figure 7.6, l'axe choisi n'est pas le meilleur pour une saisie de l'objet par un de ses bouts. Le choix d'une zone potentielle de saisie par des contraintes de tâche, peut nous permettre de choisir le nouvel axe de coupe et ainsi obtenir une meilleure reconstruction pour la partie à saisir.

Cette reconstruction issue d'un modèle CAO nous renforce dans l'idée que la reconstruction à partir de la vision est possible. En effet, tant qu'il s'agit de construire des objets canoniques suivant leur axes prépondérants (cylindre, parallélépipède, ...), les octrees rendent une image fidèle. Par contre, les octrees sont très sensibles au déplacement (rotations/translations) [25]. A tel point, qu'un cylindre octree devient une sorte de cylindre généralisé à base rectangulaire après une transformation homogène (figure 7.7),



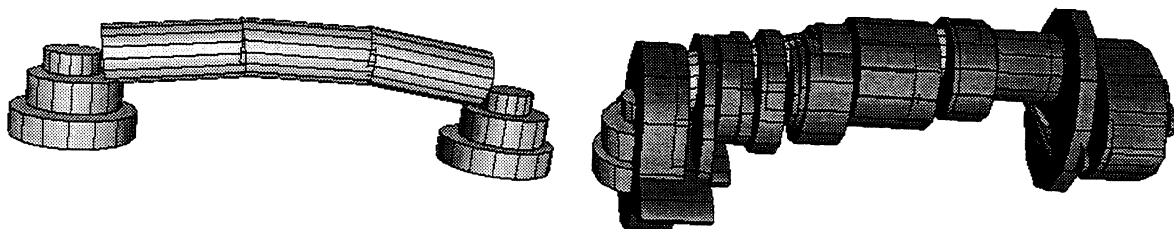


FIG. 7.5 - : Représentation d'un combiné téléphonique. 120 coupes suivant sa plus grande longueur. Temps de construction moyen de l'octree: [3190] ms. Temps de construction moyen des ellipses [2430] ms. Temps de reconstruction moyen des cylindres elliptiques: [4760] ms.

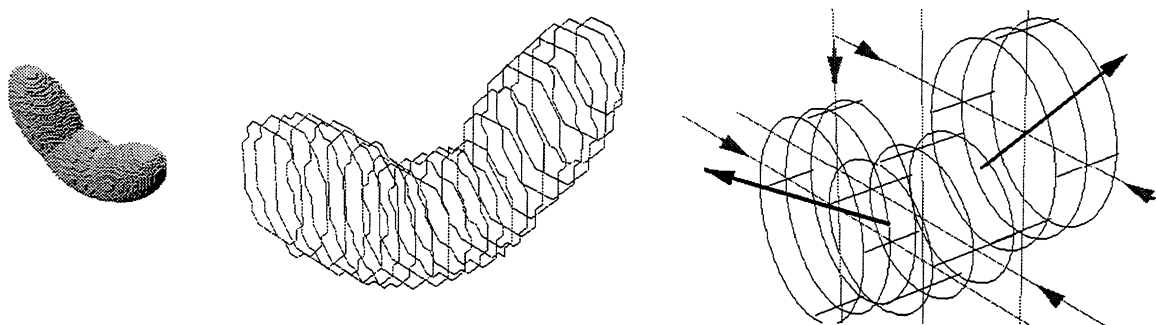
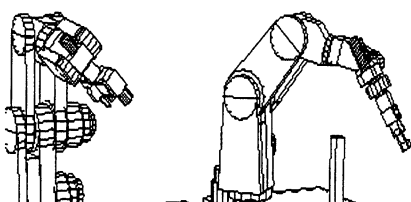


FIG. 7.6 - : Reconstruction d'une « banane ». L'axe de coupe choisi est $\vec{x}$. La reconstruction des deux bouts de la « banane » donne deux nouveaux axes permettant une meilleur reconstruction de chacun d'eux: directions (0.822 0.0 - 0.569) et (0.849 0.0 0.528).

même avec une bonne information de base ⁴. Cette sensibilité au déplacement peut être comparée au bruit inhérent si le modèle est extrait de la perception.

Reconstruction de formes quelconques. Le cas où on ne sait pas faire la part de l'objet dans un volume octree, reflète la saisie d'échantillons planétaires: les objets à saisir ne sont pas connus [9]. La figure 7.10 « simule » le cas. Il s'agit de saisir des formes patatoïdales. Dans ce cas précis, tous les cylindres elliptiques reconstruits sont potentiellement saisissables. Pour ce type d'application, l'axe de coupe choisi n'est pas spécialement crucial pour la reconstruction. Cependant, des coupes suivant l'axe naturel de saisie du bras/main facilite la saisie de la forme patatoïdale.

⁴Sauf dans le cas où l'on accepte d'avoir un octree « énorme », c'est-à-dire avec une profondeur d'arbre très grande.



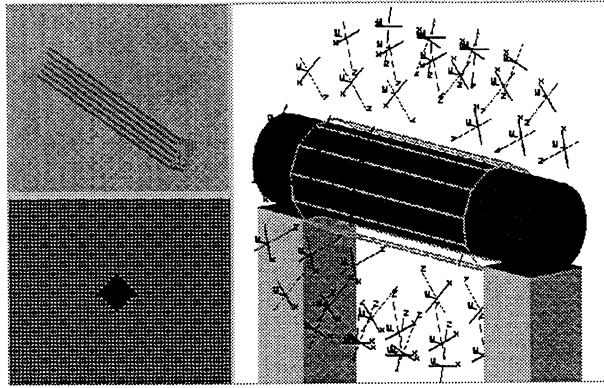


FIG. 7.7 - : Reconstruction d'un cylindre ayant subi une rotation (haut-gauche). Bien que la coupe ressemble plus à un parallélépipède qu'à un cylindre (bas-gauche), les proportions permettent d'obtenir un cylindre elliptique correct par rapport à son modèle CAO (droit).

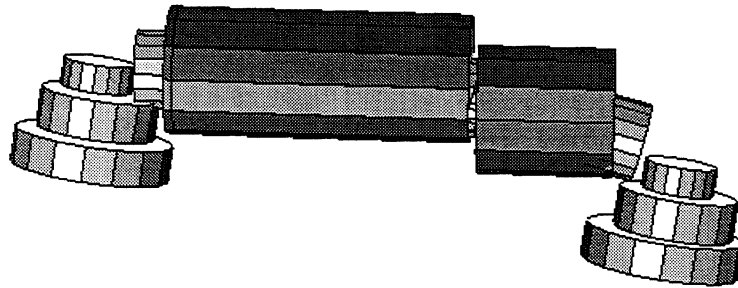
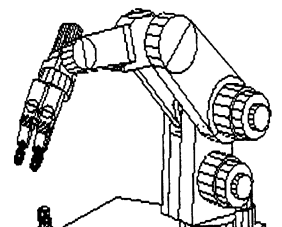


FIG. 7.8 - : Représentation d'un combiné téléphonique après « lissage ».

Limites de la reconstruction.

Le lissage. Comme nous avons pu l'observer, la reconstruction effective du combiné téléphonique (figure 7.5), n'est pas réellement bonne. Cette reconstruction « passable » provient pour une part importante de la « mauvaise » construction en octree. Cependant, la reconstruction effectuée n'empêche pas de trouver une saisie. Les expérimentations nous montrent qu'une fonction de lissage est nécessaire. D'autant plus que nous espérons par la suite, utiliser des données perceptives, qui ne seront pas toujours aussi « belles » qu'une octree synthétique. Nous avons déjà exposé deux manières d'effectuer un lissage pendant ou après reconstruction (§page 67). Cependant, sans changer l'algorithme de reconstruction, on peut ajuster les paramètres



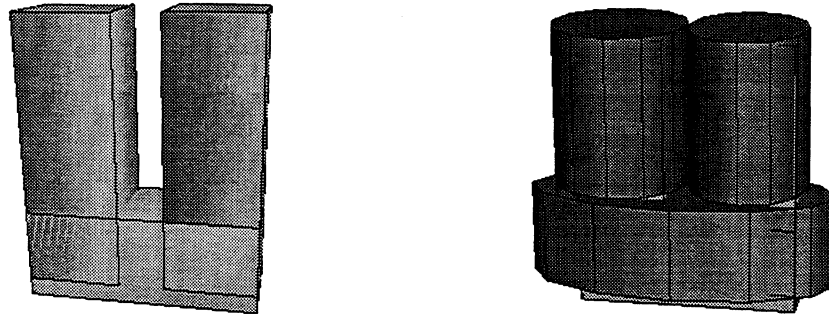


FIG. 7.9 - : Bien qu'un doigt puisse passer entre les deux ergots du U, les prises par le haut ne sont pas valides. Les deux cylindres elliptiques s'intersectent.

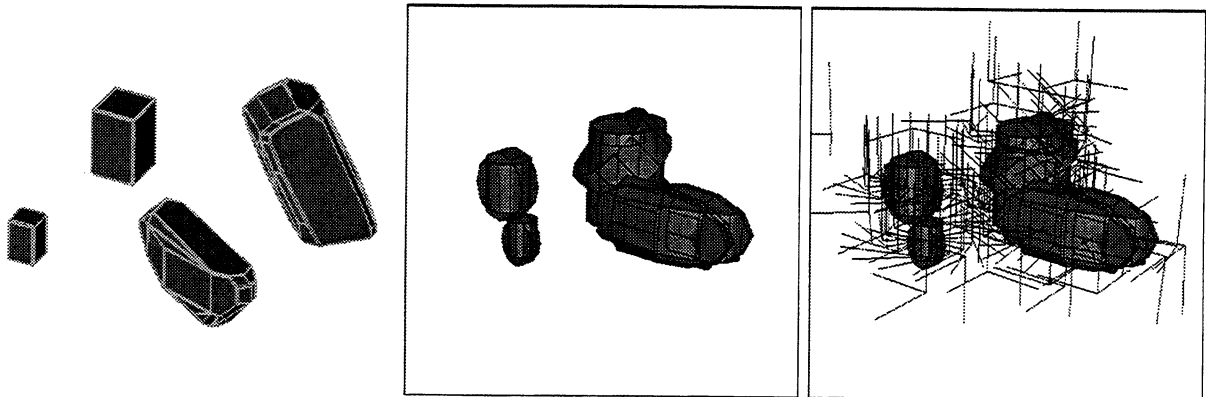
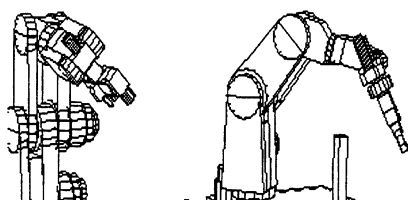


FIG. 7.10 - : Reconstructions de formes patatoïdales. Si on ne peut distinguer l'objet à saisir dans le modèle volumique, tous les cylindres elliptiques reconstruits (suivant différentes coupes) sont potentiellement saisissables.

utilisés pour la recherche de similarités (§ page 63), et obtenir une reconstruction correspondant mieux à ce qu'on attend, notamment pour le combiné (figure 7.8).

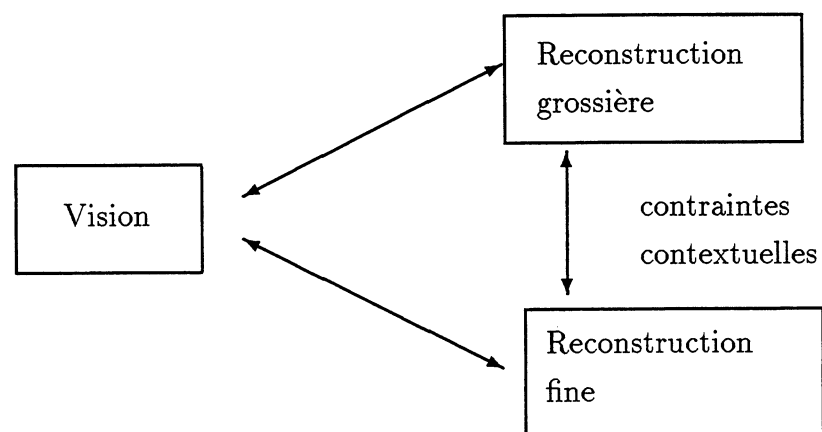
Cet ajustement, c'est-à-dire l'augmentation de la tolérance au niveau des seuils de similarité, peut être envisagé systématiquement quand on pré-suppose que le modèle volumique est bruité, ou quand l'objet est gros. Inversement, quand le modèle est très précis, on diminue cette tolérance (§ page 125).

Occupation spatiale. Supposons deux ergots proches sur un objet ou sur deux objets différents, tels qu'un doigt puisse quand même passer entre les deux. La reconstruction va donner deux cylindres elliptiques, qui malheureusement vont avoir une intersection non vide (figure 7.9). En effet, il y a une perte d'espace entre le cylindre elliptique et la partie qu'il est censé représenter.



7.2.2 Enseignements sur la reconstruction.

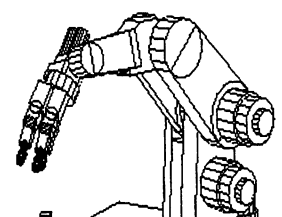
Les expériences avec des modèles CAO, et les expériences effectuées dans le cadre du projet SECOND, pour une reconstruction avec la perception, nous orientent vers une reconstruction à deux vitesses. Pour avoir des critères qualitatifs de stabilité, de tâche intéressants et/ou des reconstructions plus fines, il est important de pouvoir analyser très précisément les zones de contact des doigts. Notamment il faut avoir une bonne évaluation des proportions, des obstacles aux alentours des zones de contact, et pouvoir extraire les normales aux surfaces de contacts (§ 5.8.4). Pour une reconstruction à partir de données visuelles, les images traitées, en termes de nombres de pixels, sont toujours les mêmes. Plus la partie à reconstruire est petite plus le système perceptif peut s'approcher de la zone et avoir une meilleure résolution, en termes de modèle et de détails reconstruits.



1. La première reconstruction nous permet, par l'intermédiaire de l'objet et de son voisinage, l'obtention des zones potentielles de saisie : les cylindres elliptiques, ainsi que les accessibilités. Dans ce cas, on augmente les seuils de tolérance sur la recherche de similarité.

2. La seconde reconstruction se concentre ensuite sur la zone potentielle choisie. La précision obtenue sera meilleure car la zone de saisie sera plus petite que l'objet et son voisinage. Dans ce cas, les seuils de tolérance sont diminués.

Cette reconstruction à deux niveaux de précision, permet par la suite, d'obtenir une meilleure reconstruction de la zone à saisir (ainsi avoir moins de pertes de volume, tel le cas de la figure 7.9), et d'extraire des informations qualitatives, pour une analyse de stabilité plus fine, c'est-à-dire pour obtenir des informations de courbure plus fines au voisinage des points de contact. En effet, bien qu'une analyse de stabilité ne suffise pas pour engendrer une saisie stable, elle est nécessaire pour nous rapprocher de la solution. De plus, elle doit être, autant que possible, robuste aux incertitudes. Des contraintes contextuelles nous permettent de choisir une zone potentielle de saisie. Cette reconstruction est pertinente dans le cas d'environnements très contraints. C'est le cas, quand le voisinage de l'objet est dense (figure 7.11), ou que l'objet est gros.



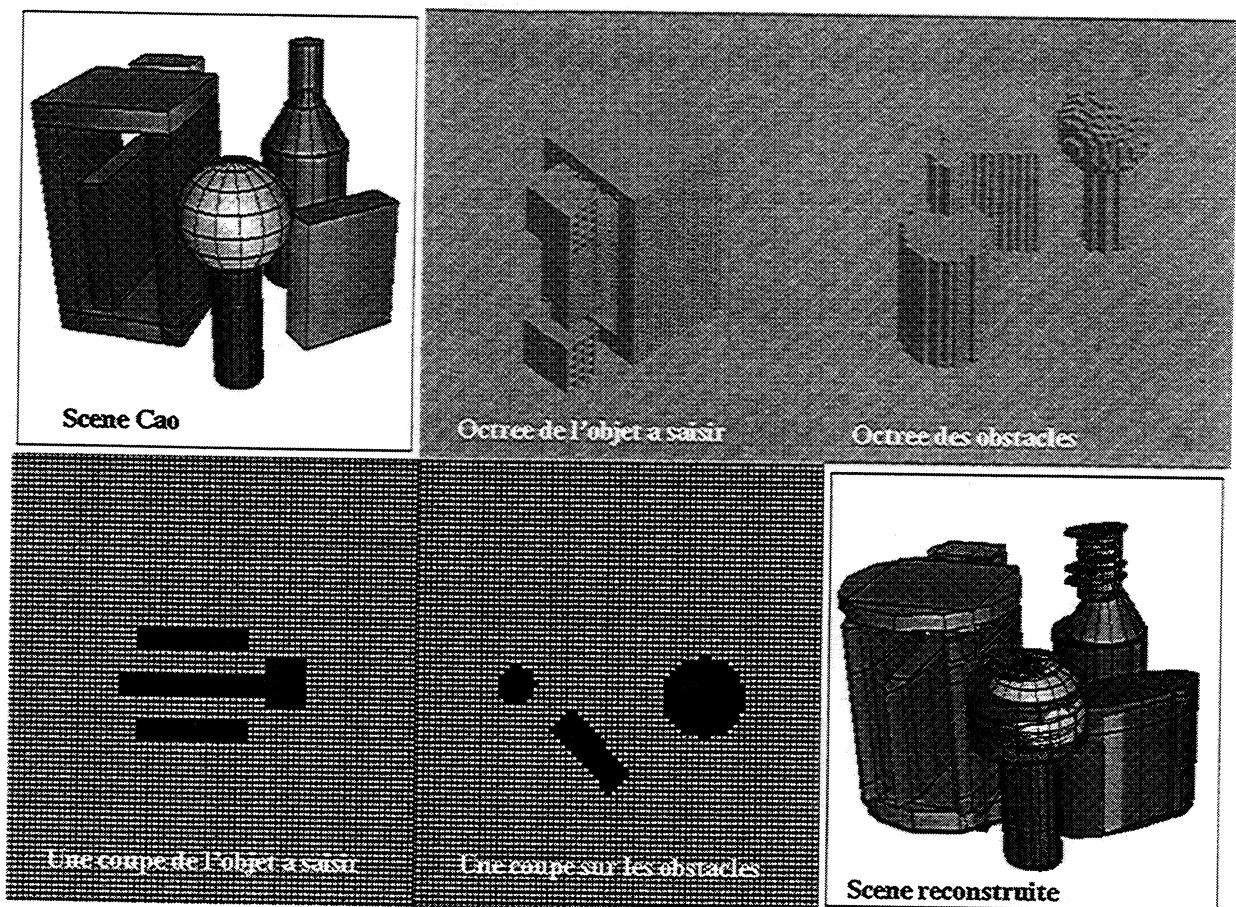


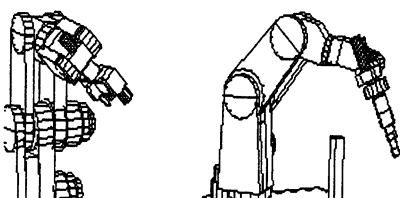
FIG. 7.11 - : Cas d'un environnement dense.

La reconstruction que nous utilisons pour planifier une opération de saisie, nous permet déjà de prendre en compte les incertitudes au niveau de la construction en modèle volumique. En effet, les cylindres elliptiques représentent des parties homogènes *englobantes* respectant les proportions de ces parties. De plus, un modèle volumique construit à partir de voxel, permet d'envisager une analyse probabiliste pour prendre en compte les bruits inhérents à la construction à partir d'un système perceptif.

7.3 Préconfiguration et mouvement jusqu'au contact

7.3.1 Les mouvements de transfert

L'analyse d'accessibilité pour l'objet et pour son voisinage, ne prend en compte que la main articulée. Ayant choisi une zone de saisie, et considérant la main montée sur un bras de robot, les mouvements jusqu'au contact se décomposent en des mouvements de grande amplitude jusqu'à un repère d'accès placé à la limite de la zone reconstruite, en un mouvement amenant les doigts à la zone de préconfiguration, et enfin un mouvement



des doigts pour la fermeture de sur l'objet. La préconfiguration des doigts, quant à elle, peut se faire à n'importe quel moment entre la position de départ et l'arrivée à la zone de pré-saisie.

Le passage par un repère placé en limite de zone reconstruite, permet d'emprunter pour la main, le couloir sans collision calculé lors de la reconstruction. Il faut noter que le mouvement rectiligne est sans collision pour la main, mais pas obligatoirement pour le bras support. Le passage par un repère intermédiaire peut être supprimé, si le planificateur sans collision a le moyen d'atteindre la zone de préconfiguration. Néanmoins, cette zone de préconfiguration est contrainte, par l'objet et son voisinage. Cette dernière remarque nous a fait opter pour une approche globale en ce qui concerne les mouvements de grande amplitude, et pour une approche locale dès que la main pénètre dans le volume de reconstruction. Ces deux types d'approches sont disponibles dans l'environnement CAO-Robotique ACT. Il s'agit de la méthode des contraintes et de la méthode mixte de planification de trajectoires sans collisions (§ 2.5).

Dans le cas de nos expérimentations avec une main placée en bout d'un bras de robot, la cinématique du bras nous a permis d'éliminer les accès, repères de préconfiguration et repères en limite de zone associés, qui n'étaient pas accessibles (figure 7.12).

7.3.2 Préconfigurations : expériences et limites

Les préconfigurations possibles dépendent des proportions de l'objet et de la main. Comme il n'existe que peu de préconfigurations pour une main articulée, on aurait tendance à penser que ce sont toujours les mêmes qui reviennent. En effet, dès que l'objet a une taille moyenne, toutes les préconfigurations possible sont valides (figure 7.13-(2) et (3)). Un classement est effectué suivant les proportions du cylindre elliptique. Cependant, dès que l'objet a des proportions spécifiques (il ne peut pas accueillir trois doigts ou il est gros, par exemple) ou qu'il a des protubérances marquées, le nombre de préconfigurations diminue très vite (figure 7.13-(1) ou (4)).

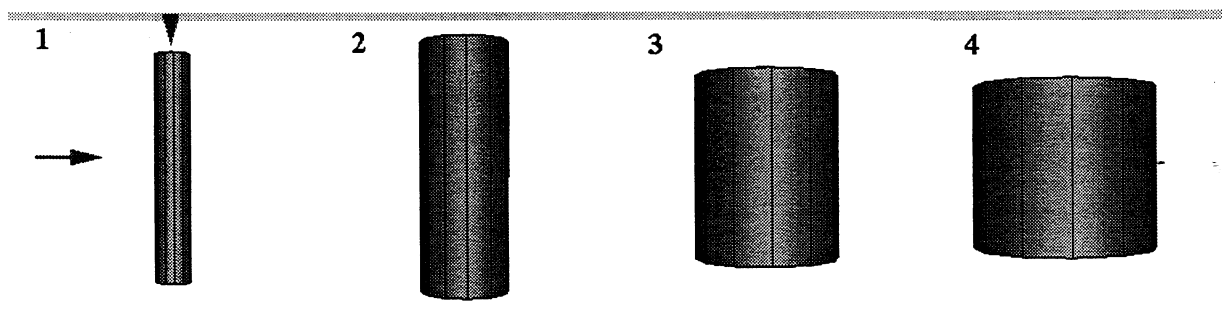
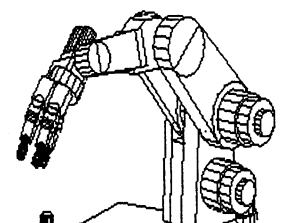


FIG. 7.13 - : Exemples de préconfigurations possible sur différentes tailles de cylindres elliptiques (pour MDS). (1) Épingle : préconfiguration de type $P_{7,10}$ pour le côté, et $P_{7,8,10}$ pour le haut. (2) Cylindre long et (3) « Sphère » : tout type. (4) Cylindre trop gros.



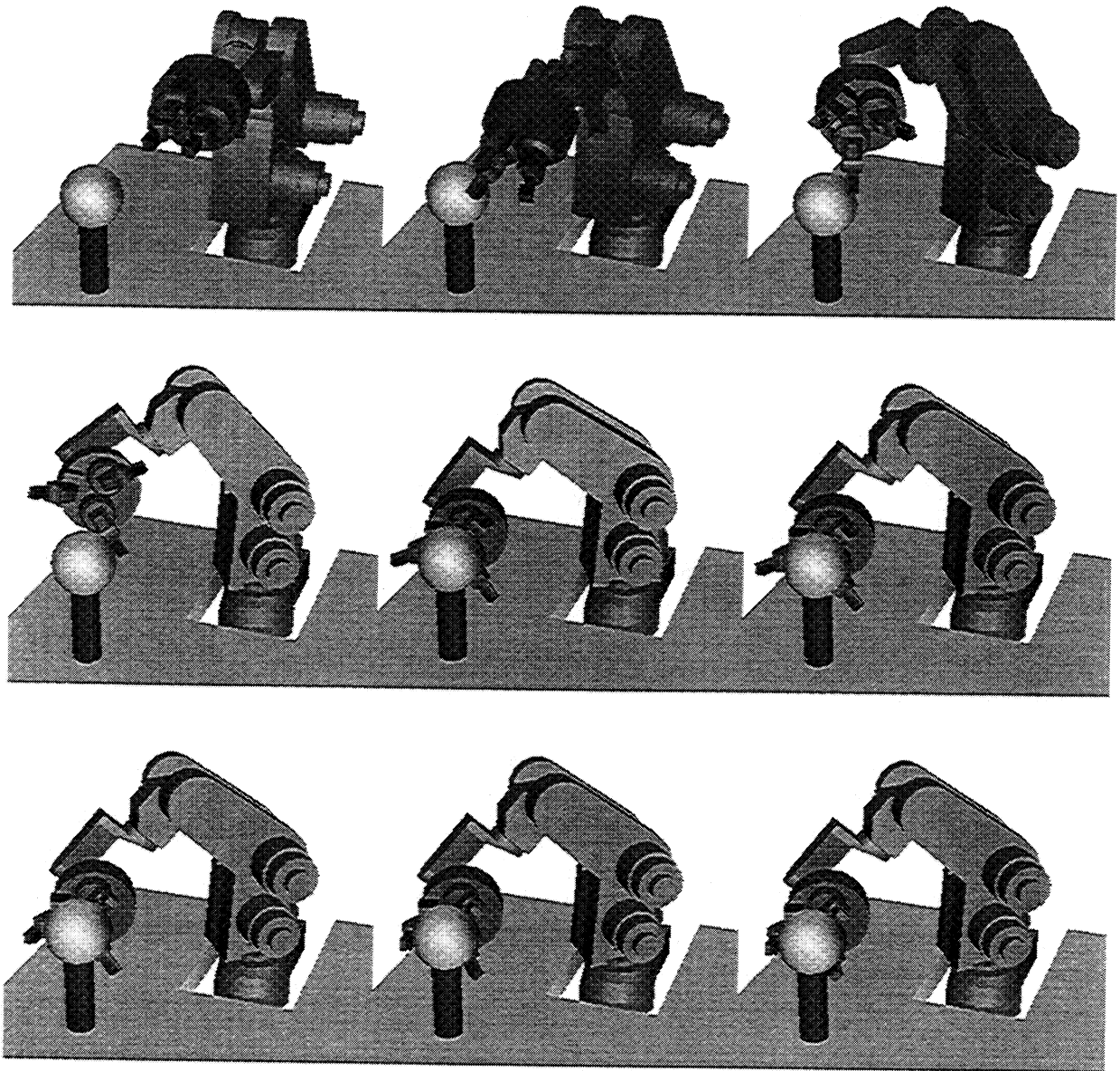
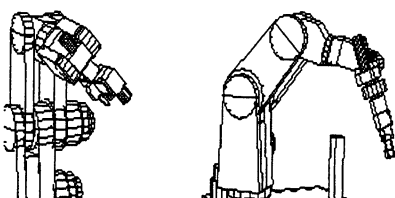


FIG. 7.12 - : Mouvement, préconfiguration, et saisie « sphérique » du système bras/OTD sur un « pommeau ».

La distinction entre chaque préconfiguration ne s'arrête pas à engendrer des valeurs articulaires pour le type de main considéré. En effet, intégrer dans une préconfiguration, non seulement les configurations de la main, mais aussi la position de la main par rapport à l'objet, les types de contacts, de prises et les stratégies de fermeture associées, revient en fait à avoir une préconfiguration unique, pour un objet, ou la partie où l'on veut placer les doigts.



7.3.3 Le mouvement de préconfiguration.

Il s'agit des mouvements des doigts pour la préconfiguration. Le mouvement des doigts pour la fermeture effective est simulée par le générateur physique (§ 7.4).

Pour une pince à deux mors parallèles, si cette pince est asservie, son ouverture dépend de la largeur du cylindre elliptique.

Chaque préconfiguration donne la position et orientation des doigts par rapport à l'objet à saisir. Le calcul de ce repère de préconfiguration est donné en annexe C. Le calcul de la trajectoire des doigts entre leur position initiale et leur position avant fermeture est faite par la méthode locale des contraintes (figure 7.14). Le mouvement produit est envoyé à la commande en position, disponible sur la main MDS à poste fixe (figure 7.15).

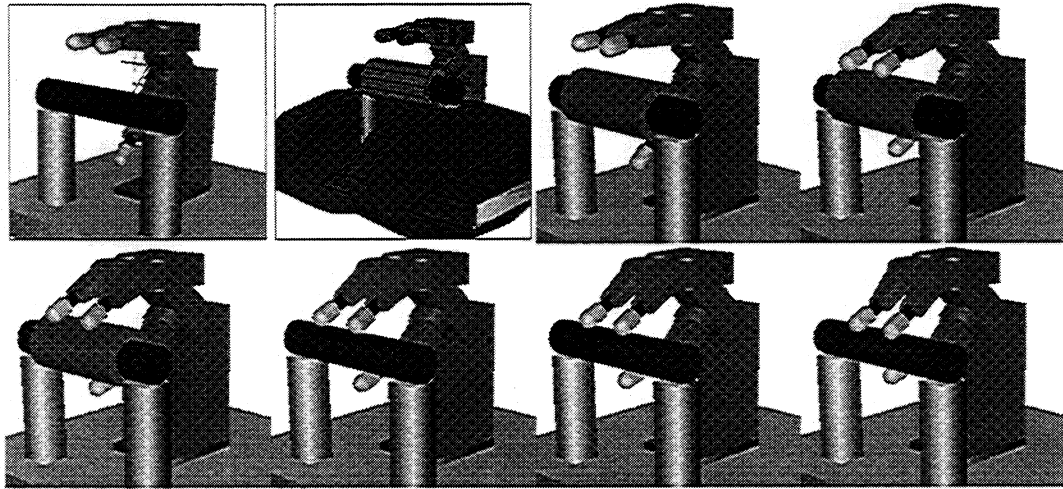
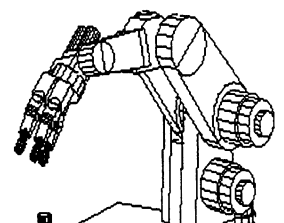


FIG. 7.14 - : Exemple de préconfiguration pulpaire sur un cylindre, en simulation. L'image 2 montre la reconstruction avec les obstacles. La reconstruction du modèle pour l'octree est de [290] ms, les ellipses [2810] ms, et pour les cylindres elliptiques [2380] ms. La table et les piliers sont modélisés par un seul cylindre elliptique. Les images (3) à(8) illustrent une saisie pulpaire, jusqu'au contact.

7.3.4 Être plus robuste face aux incertitudes : «Move/Explore»

Le mouvement de fermeture des doigts doit amener à une position stable. Le planificateur de préconfiguration associe à chaque préconfiguration une stratégie de fermeture des doigts, qui respecte les contraintes de contact et de type de prise. Néanmoins, il s'agit là d'une mesure qualitative de fermeture. Cette mesure qualitative est transformée en une trajectoire quantitative, en termes de forces, positions et vitesses, par les modèles physiques (§ 6). Cependant, il faut remarquer que l'approche que nous avons choisie, basée sur des observations venant de neuro-psychologie, réduit considérablement la complexité de la recherche de prise. Cela implique pour une préconfiguration, un recouvrement d'un grand nombre de prises possibles. Pour arriver à une prise stable, le besoin se fait sentir



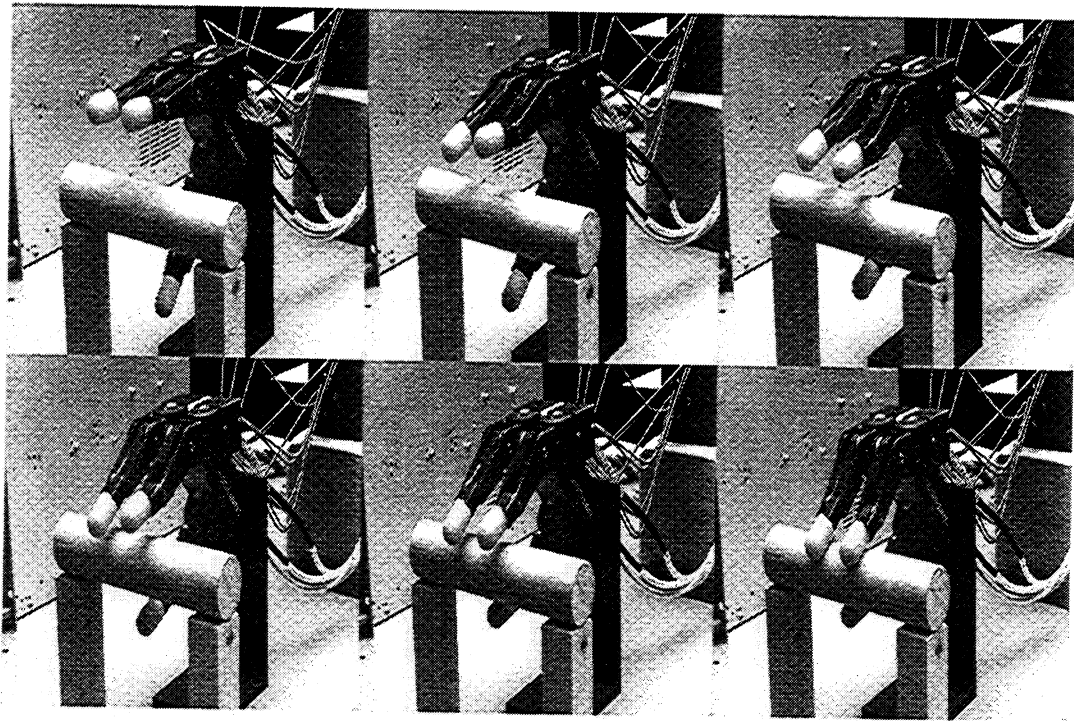


FIG. 7.15 - : Exemple de préconfiguration pulpaire et fermeture jusqu'au contact sur un cylindre, avec la main MDS.

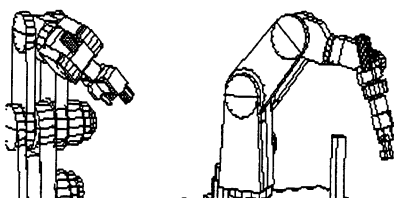
d'affiner la stratégie de fermeture.

Nous avons expérimenté une stratégie locale de type « Mouvement » et « Exploration ». Pour cela, nous avons besoin de la normale à la surface de l'objet au contact. Elle peut être calculée, de manière plus ou moins grossière, sur le modèle octree de l'objet. Pour les besoins de nos expérimentations, nous avons utilisé des objets canoniques, dont la normale au point de contact est facilement identifiable.

Les hypothèses de cette recherche sont celles d'une prise nominale :

- Les directions des forces appliquées par les doigts sont supposées être dans la direction inverse de la normale externe à la surface de l'objet (cas d'un cône de friction nul). Les contacts sont équivalents à des points de contact sans friction.
- Les efforts appliqués par chaque doigt dépendent du type de prise (§ 5.8.4.1).
- La normale à la surface de contact sur l'objet est connue.

Suivant ces hypothèses, nous pouvons calculer les forces et moments, appliqués aux points de contact par les doigts sur l'objet. Le but de cette expérience étant de se rapprocher d'une position des doigts répondant aux critères d'équilibre : $\sum F = 0$ et $\sum M = 0$. Le mouvement des doigts se fait en essayant de minimiser la somme des forces et des



moments aux points de contact.

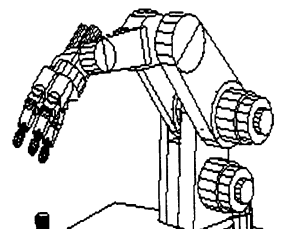
Le principe consiste à bouger chaque doigt indépendamment des autres, en suivant la surface de l'objet. Un doigt changera de position s'il minimise les dites sommes. La figure 7.16 illustre une exécution pour une prise nominale sphérique avec une main idéale (§ 5.6).

Les résultats de cette expérience nous ont mieux fait comprendre le mécanisme des stratégies de fermeture, associées à une préconfiguration. Notamment, si les efforts associés aux doigts ne correspondent pas à la prise envisagée (§ 5.8.4.1), soit la minimisation n'est pas possible (boucle infinie), soit elle se stabilise loin d'une position d'équilibre, et ce, pour une prise quelconque (figure 7.17).

Bien que l'algorithme proposé soit sujet à des « puits de potentiels »⁵, il s'avère nécessaire de prévoir entre la préconfiguration et la fermeture effective, ce type de recherche. Pour le contrôle d'exécution, si la solution de stabilité est très éloignée de la position courante de fermeture, l'échec est plus que probable. Néanmoins, notre algorithme peut être amélioré :

- Sur le même principe du mouvement d'un doigt, on peut envisager de faire varier la force appliquée pour chaque doigt. Cela permet ainsi d'obtenir les rapports des efforts entre les doigts. Cependant, la fonction à minimiser devient plus complexe. En plus de faire tendre les forces et moments résultants vers 0, il faut minimiser la somme des forces appliquées par les doigts sur l'objet.
- L'ajout des cônes de friction peut permettre, par la suite, la recherche locale de conditions « force-closure ». Il reste à définir quelles sont les conditions qui permettent de se rapprocher d'une position force-closure. Pour cela, on peut utiliser la proposition décrite par PONCE [80], en bougeant les doigts de telle manière que les cônes de friction ouverts aient une intersection non vide. Néanmoins, il n'est pas évident de généraliser un tel critère pour des saisies pulpaire et palmaire. En effet, les contacts deviennent multiples, surfaciques, et la condition de « force-closure » énoncée ci-avant n'est pas valide.
- La prise en compte de contacts multiples, telles les prises palmaires et pulpaire, peut nous indiquer le sens du mouvement de l'objet, en calculant la direction résultante des forces appliquées. Si elle est « sortante », c'est-à-dire vers l'extérieur des doigts, les chances d'échappement de l'objet seront plus grandes que si elle est « rentrante », c'est-à-dire orientée vers la paume de la main. Ces limites restent à définir.

⁵ Les forces s'annulent mais pas les moments ou inversement.



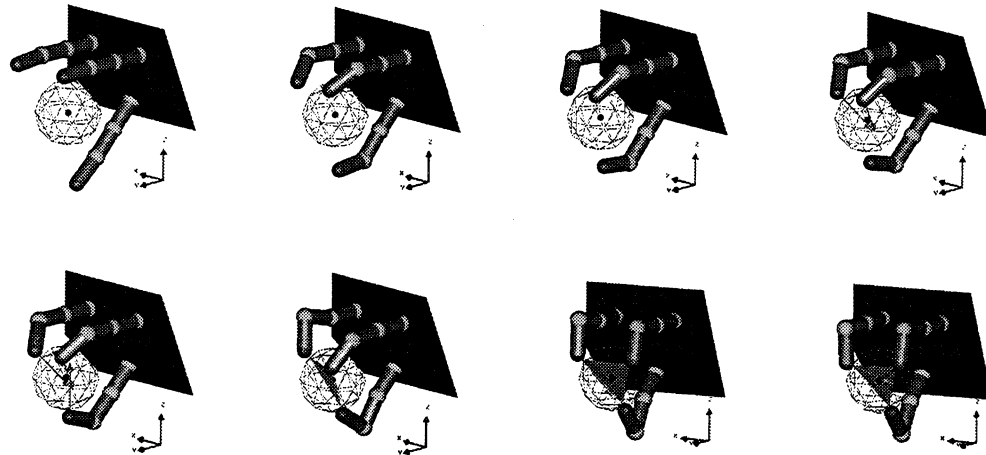


FIG. 7.16 - : Exemple de recherche d'une stratégie de fermeture pour une main idéale, pour la saisie d'une sphère. Les images (1) à (5) montrent les doigts attirés par le centre de la sphère jusqu'au contact. L'image (8) correspond à une position de contact nominale, où les forces et les moments s'annulent. Dans cet exemple les efforts appliqués par les doigts sont identiques.

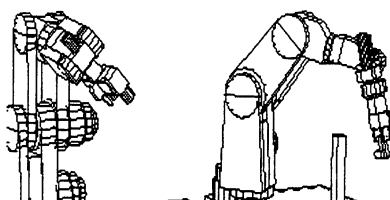
7.3.5 Les contraintes de tâche: cas d'un assemblage (film impair)

Modélisation des contacts. La première information pertinente, dans le cas d'un assemblage, concerne les contacts entre l'objet à saisir et son support d'assemblage, une fois celui-ci réalisé. L'analyse de ces contacts, nous permet d'écarter les zones à ne pas saisir. La connaissance même de l'objet et de son support, sous la forme d'une union (et/ou intersection) d'objets canoniques dont on connaît les faces, les arêtes et les points, est nécessaire.

Le principe consiste à analyser chaque type de contact entre l'objet et son support, et à coller au niveau de l'objet un volume représentant le contact établi. Il s'agit en fait, d'une représentation 3D de l'incertitude au niveau du contact. Par exemple, si le contact est un point, sa représentation et son incertitude au niveau du modèle sont représentées par une sphère englobante. Le tableau 7.2 illustre la correspondance entre les contacts et les incertitudes de contact (volumes).

Le rajout de primitives géométriques simples, collées à l'objet à saisir, nous permet de définir la zone de saisie potentielle (un cylindre elliptique), dont l'intersection est vide avec ces nouvelles primitives. Elles servent en quelque sorte d'obstacles. Si aucune intersection est vide, le choix se porte sur celle dont l'intersection est la plus petite. Dans ce cas encore, la direction d'accès est choisie pour éviter le contact avec les doigts.

Le film décrit en préambule montre la séquence complète de saisie et de réalisation de



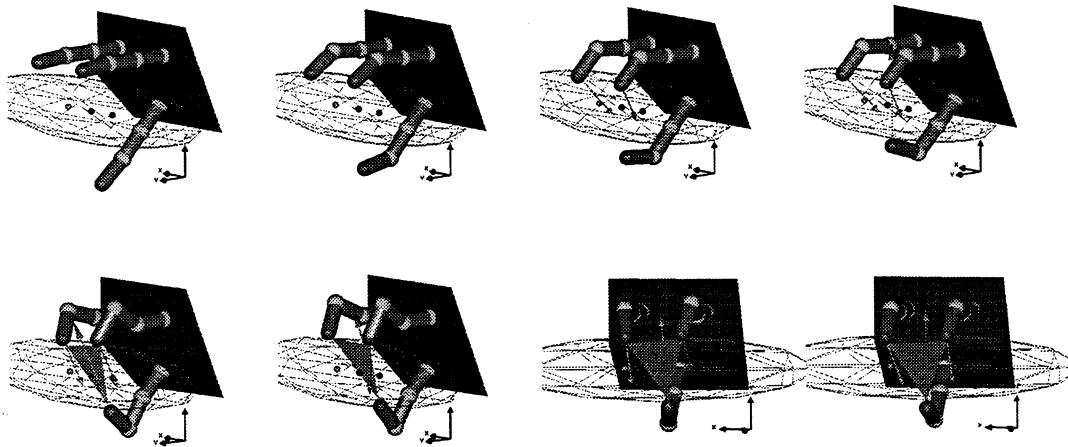


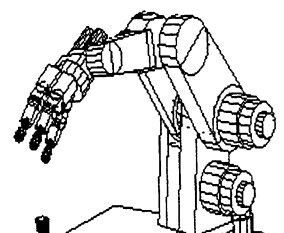
FIG. 7.17 - : Exemple de recherche d'une stratégie de fermeture pour une main idéale, pour la saisie d'une ellipsoïde, dont les caractéristiques sont proches d'un cylindre. Les images (1) à (5) montrent les doigts attirés par les bords du cylindre, jusqu'au contact. L'image (8) correspond à une position de contact nominale, où les forces et les moments s'annulent. Dans cet exemple les efforts appliqués par le pouce annulent la somme des efforts appliqués par les autres doigts.

<i>Contact</i>	<i>Représentation de l'incertitude géométrique</i>	
Point	~	Sphère
Ligne	~	Cylindre
Plan	~	Parallélépipède
Cylindrique	~	Cylindre (englobant)
Sphérique	~	Sphère (englobante)
Union de contacts simples	~	Union de primitives

TAB. 7.2 - : Correspondance entre un type de contact et une primitive géométrique servant d'obstacle (et modélisant l'incertitude de contact), pour le choix d'une zone potentielle de saisie, dans le cas d'un assemblage.

la tâche (§ page ii), tenant compte des contacts entre la tasse et la bouteille (figure 7.18-1). Le contact entre la bouteille et la tasse a été modélisé automatiquement comme un cylindre (figure 7.18-2). Les cylindres elliptiques reconstruits tiennent compte de cet obstacle fictif⁶. Le choix de l'accès par le haut de la bouteille, et le choix de la préconfiguration

⁶La partie rattachant le corps au goulot de la bouteille n'a pas été modélisée en octree. C'est pourquoi, il n'y a pas de reconstruction en cylindre elliptique pour cette partie de la bouteille.



associée, ont été réalisés par l'opérateur. Les mouvements sont réalisés par la méthode des contraintes. Une fois la bouteille saisie, aucune analyse quantitative de stabilité n'est effectuée.

Accessibilité. On peut prendre en compte le phénomène d'accessibilité de l'objet par rapport à la tâche finale à réaliser en ne connaissant que la position finale de l'objet dans son environnement. De la même manière que nous avons réalisé la reconstruction de l'objet dans son environnement courant de saisie, on peut le faire dans son environnement terminal. Cela consiste à ôter du volume reconstruit, l'octree correspondant à l'objet, et à reconstruire le volume avec des cylindres elliptiques. La principale particularité de ces cylindres est qu'ils ne correspondent qu'à des obstacles. On place ensuite les zones potentielles de saisie dans cet environnement terminal, et on analyse les accessibilités 3D. Le résultat donne une zone potentielle de saisie, c'est-à-dire un cylindre elliptique et son accès, compatibles à la fois avec l'environnement de saisie, et avec l'environnement de réalisation de la tâche. Cette partie n'a pas été implantée dans notre système.

Efforts. Une seconde information, associée à une tâche d'assemblage, concerne les efforts et les mouvements d'assemblage entre l'objet et son support. Ils sont décrits comme des mouvements gardés suivant une certaine direction. Dès qu'il existe plus d'une direction dans laquelle les doigts doivent garantir la stabilité, une saisie force-closure est nécessaire. Les mouvements de l'objet peuvent influencer la direction d'accès à l'objet. Dans le cas d'une insertion, il est intéressant de saisir dans la direction d'insertion. Cela permet d'éliminer (en partie) les moments qui peuvent se créer entre le contact objet/support et objet/main.

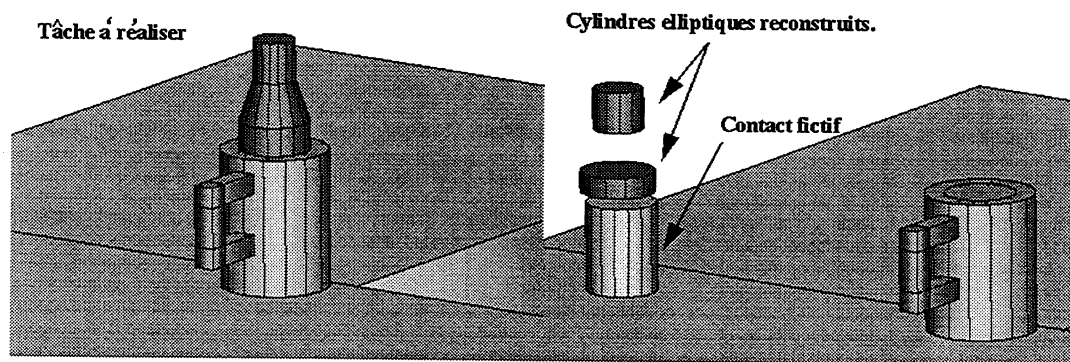
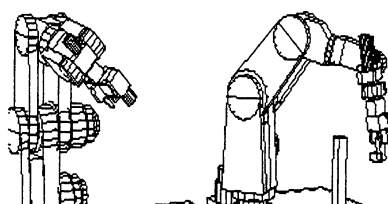


FIG. 7.18 - : Exemple d'un emboîtement d'une bouteille dans une chope. Bien que non réaliste, cet exemple montre la partie de l'objet à ne pas saisir (image 2). Cette partie a été analysée comme un contact cylindrique.



7.3.6 Discussion

Si on analyse globalement les expériences réalisées pour des tâches différentes, chaque tâche a ses propres contraintes, qui influencent plus ou moins une bonne position et/ou orientation des doigts par rapport à l'objet. Dans un but d'automatisation, il est difficile d'évaluer leur importance respective par rapport à l'axe de coupe à choisir, au cylindre elliptique et à la direction de prise. Notamment, elles évoluent suivant la tâche à effectuer. On peut automatiser ces choix pour des critères généraux qui ne dépendent pas ou peu des tâches à réaliser :

- Choix d'un axe de coupe. Le plus souvent il s'agit de l'axe de plus grand volume : vecteur propre correspondant à la plus petite valeur propre. Il privilégie les prises à trois doigts. Le choix d'un autre vecteur propre privilégie les saisies à deux doigts. Le choix d'un autre axe de coupe (§ 4.1.3.4) dépend de la tâche à réaliser ou des contraintes fonctionnelles. Par exemple, pour le robot SCEMI et pour un objet posé sur la plateforme expérimentale de nos expériences, les accès parallèles à la table ne sont pas possibles. S'il s'agissait d'un robot très redondant, cette contrainte n'existerait pas.
- Choix d'une direction d'accès et d'un cylindre elliptique. Des critères qualitatifs de stabilité et de contraintes sur les parties de l'objet à ne pas saisir, soit par rapport au type d'assemblage à réaliser, soit par rapport à la position finale de l'objet dans l'environnement, permettent de donner une préférence à un cylindre et à une direction associée. Néanmoins, il faut donner un ordre de priorité sur chaque critère qualitatif. L'ordre logique, en termes de restriction ferme de l'espace de choix, fait intervenir les parties d'objets inaccessibles en premier. Par la suite, même si le ou les accès associés au cylindre choisi, sont très mauvais, en terme qualitatif de stabilité, une procédure «Move/Explore» peut augmenter la qualité de saisie (cf. § 7.3.4).

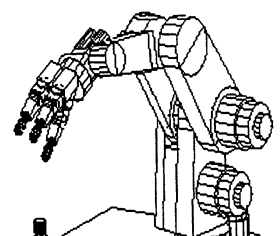
Cette automatisation n'a pas été implantée dans notre planificateur, elle reste à l'expertise de l'utilisateur.

7.4 Interactions main/objet : expérimentations

Les simulations décrites dans cette section montrent les possibilités offertes par les modèles physiques, pour tester la faisabilité des prises choisies.

7.4.1 Simulation de la saisie d'un cylindre avec la main Mds

Une représentation approximative de la main de Salisbury est présentée figure 7.19. Cette main a été modélisée avec 200 sphères, 200 liaisons de type *RL*, et 300 relations de type *RT*. Le nombre important de relations angulaires a permis d'augmenter la rigidité de la représentation. Le cylindre a été modélisé avec 20 sphères, 19 liaisons *RL* et 20 liaisons



RT. Les supports ne sont pris en compte dans la simulation que pour contre-balancer le poids du cylindre.

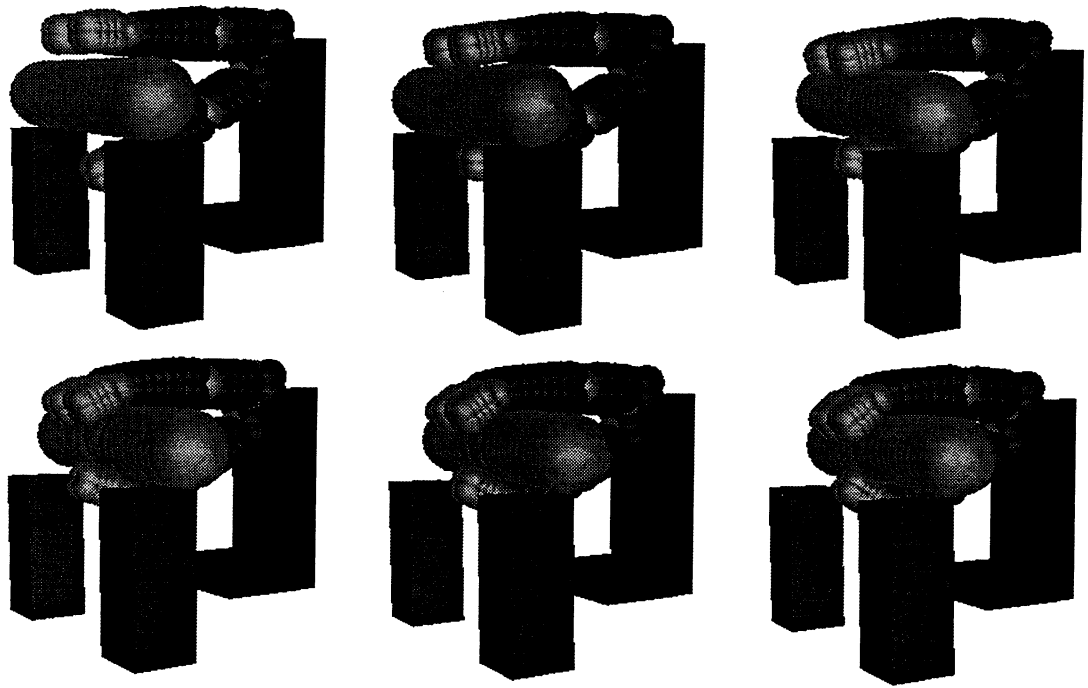
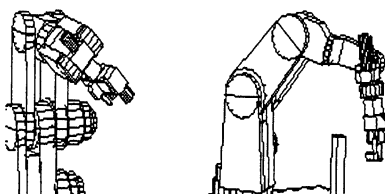


FIG. 7.19 - : Re-positionnement de la main avant la saisie. Ce re-positionnement entraîne une saisie palmaire.

La figure 7.19 montre un exemple dans lequel la main articulée essaie de saisir le cylindre. Cet objet va glisser vers l'intérieur de la main, ce qui a pour résultat un contact palmaire. Pour obtenir ce contact, les bout de doigts sont attirés les uns vers les autres par des relations « terminales » (figure 6.7), pour que les forces d'interaction poussent l'objet à l'intérieur de la main, multipliant ainsi les contacts entre celle-ci et l'objet. Dans ce cas, le cylindre entre en collisions successives avec la main jusqu'à stabilisation. Il est géométriquement coincé dans la main. La prise palmaire ne pouvait pas être prise en compte sans considérer toutes les contacts possibles, calculés par le modèle physique.

En réajustant les coefficients physiques (rigidité, viscosité interne, et friction), le résultat de la même expérience donne un contact pulpaire. Dans ce cas, le cylindre se stabilise (fig. 7.20). En réalité, les paramètres physiques sont des constantes, qui dépendent des caractéristiques de l'objet réel. Cependant, cette expérience montre l'importance d'une bonne évaluation des paramètres de simulation par rapport aux paramètres réels.

De même, les exemples des figures 7.21 et 7.19 montrent l'importance d'une bonne évaluation des paramètres du modèle, mais les relativise face à un bon placement initial de la main par rapport à l'objet. Dans les deux cas de figure, et avec les mêmes paramètres, les comportements obtenus sont différents. Dans un cas on obtient un échec, dans l'autre



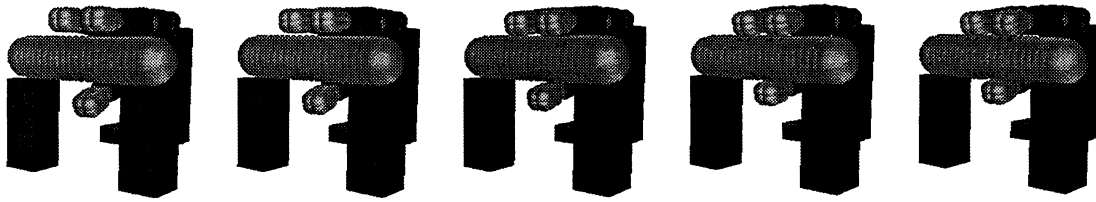


FIG. 7.20 - : Saisie pulpaire d'un cylindre. Les paramètres liés à la friction ont été augmentés par rapport à la figure de saisie palmaire (figure 7.21).

un succès pour la saisie de l'objet. Même si dans le second cas, l'objet a bougé.

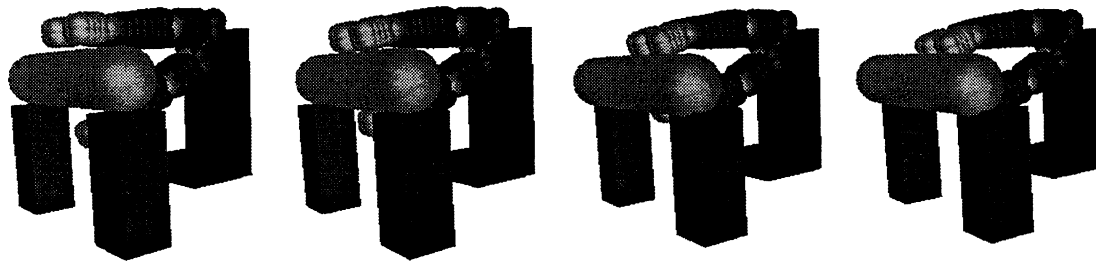
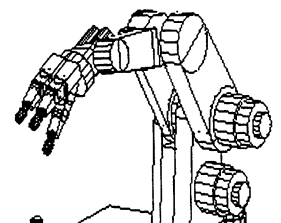


FIG. 7.21 - : Glissement d'un cylindre au moment de la saisie avec une main articulée. Glissement causé, soit par de mauvais paramètres de contrôle (ici, les paramètres liés à la rigidité), soit par une mauvaise configuration initiale avant la saisie.

Notre principal problème avec la main de Salisbury, se situe au niveau de la rigidité des phalanges. La figure 7.19.(6) montre que les phalanges se déforment. Pour obtenir une plus grande rigidité avec notre modèle, la fréquence d'échantillonnage doit être diminuée en rapport avec l'augmentation de la rigidité voulue. C'est un des défauts de notre approche. Un remède possible est la diminution du nombre de sphères, mais il implique une augmentation des incertitudes. Une autre possibilité concerne le mixage d'éléments solides (rigides), dont on connaît les paramètres physiques, avec des sphères, matérialisées seulement au niveau des contacts possibles et des déformations. Cette démarche a déjà été adoptée avec succès pour la robotique mobile [50].

7.4.2 Discussion : gestion des incertitudes

Le but initial du planificateur physique est la simulation de la saisie sous certaines contraintes. Ces contraintes sont exprimées par le planificateur de préconfiguration. Pour l'instant, la simulation physique de la fermeture des doigts sur l'objet, nous permet d'évaluer si une prise exprimée à partir du planificateur de préconfiguration est valide ou non. Même si elle est valide en simulation, sa réussite quant à son exécution réelle n'est pas assurée. La question que nous nous posons après les expérimentations effectuées, est la



suivante :

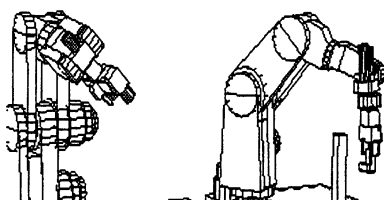
Comment la simulation d'interactions entre objets que l'on discrétise sous la forme de composants sphériques, peut être représentatif de la réalité malgré les incertitudes?

Dans une optique d'exécution sur main réelle, il est nécessaire d'identifier les paramètres utilisés pour la simulation avec ceux, pas forcément les mêmes, utilisés pour le contrôle/commande de la main elle-même. Il en est de même avec l'objet de saisie simulé et l'objet réel utilisé. Bien que cette identification ne soit pas évidente, les paramètres « manipulés » sont de même nature (i.e. forces, positions, raideur, ...). Néanmoins, l'approche « matérialisante »⁷ que nous avons choisie, introduit des incertitudes au niveau de la représentation géométrique de l'objet. La phalange distale de la main MDS est modélisée par quatre rangées de sphères, pour sa partie pulpaire. Un contact pulpaire est alors représenté par des contacts sur deux rangées de sphères. En réalité, un contact pulpaire est effectif suivant la force et l'élasticité du doigt.

Par la suite, pour contraindre la main à se fermer, en fonction du type de prise nous rajoutons des liaisons entre les doigts et le bord de l'objet. Le fait de choisir une sphère plutôt qu'une autre sur le bord de l'objet, peut entraîner un comportement différent quant au résultat final de la fermeture. Deux cas de figure se présentent :

1. La saisie converge vers la stabilité. Il est alors intéressant de définir, de la même manière que pour la recherche de zones force-closure, des « zones » de contact sur l'objet et sur les doigts, et/ou des intervalles d'effort, émises par les relations rajoutées entre les doigts, qui auront les mêmes répercussions au niveau de la stabilité, en termes de comportement. Il suffit de réitérer la simulation, en changeant le placement des relations (autour de la « bonne position ») reliant le doigt à l'objet, ou en changeant les paramètres de raideur ou de longueur de stabilisation (c'est-à-dire des efforts appliqués par les doigts), autour de la valeur originale. Cependant, ce type d'expérience est coûteux en temps de calcul.
2. La saisie diverge. Les causes de cette divergence sont multiples. Néanmoins, une des causes majeures concerne la passivité, dans notre simulation, par rapport aux moments. L'algorithme « Move/Explore » décrit au chapitre précédent (§ 7.3.4), peut éviter ce mauvais résultat. Son application permet de connaître la position effective des doigts, pour laquelle les moments sont minima. De nouvelles relations ajoutées entre les doigts, permettent alors de contraindre leur mouvement vers cette position.

⁷La discrétisation respecte la géométrie de l'objet.



Chapitre 8

Conclusion

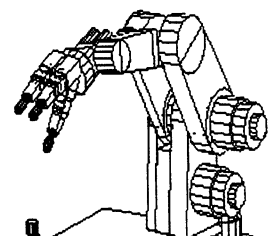
La planification de saisie autonome, à l'aide d'outils de préhension variés incluant des outils de type « main articulée », est un problème complexe à plusieurs facettes (géométrie → accessibilité et stabilité; physiques → interactions et contrôle), que nous avons étudié dans le cadre de ce mémoire de thèse. La planification de saisie a été abordée, dès le départ, dans une optique « d'intégration globale ». Intégration en amont avec la vision, par l'utilisation d'un modèle volumique, pour obtenir des informations géométriques sur des zones intéressantes où poser les doigts. Intégration en aval avec le contrôle par l'utilisation de modèles physiques, pour réaliser la fermeture des doigts sur l'objet. Notre contribution principale porte sur trois points essentiels :

1. L'analyse morphologique des objets guidée par la tâche de saisie :

Nous avons tout d'abord défini les besoins inhérents à l'obtention d'un modèle susceptible d'aider à la saisie des objets. Cela s'est concrétisé, au niveau de la recherche d'informations sur les objets, par la notion de cylindre elliptique, modèle géométrique symbolique donnant, à la fois les zones potentielles de saisie sur les objets par ses proportions, et les accessibilités sur l'objet lui-même et dans son voisinage, par ses directions d'accès. Ce modèle peut être aussi bien issu de la perception que d'un modèle CAO classique.

2. Le choix de préconfigurations de l'outil de préhension :

Les observations en neuro-physiologie nous ont permis de réduire la complexité de la recherche de prise. La préconfiguration est le moyen efficace permettant de traiter, en même temps, de grands groupes de solutions. Notamment parce que les préconfigurations en saisie humaine (i.e. avec un outil de préhension très complexe) représentent une vingtaine de postures main/objet pour tout type d'objet. À partir d'une zone potentielle de saisie, des informations qualitatives de stabilité ou de tâche, permettent de choisir efficacement une préconfiguration, pour une zone potentielle de saisie donnée, et d'engendrer une stratégie de fermeture des doigts.



L'analyse morphologique et le choix de préconfiguration ont été implantés sur le système de CAO-Robotique ACT, et testés sur la main de Salisbury à poste fixe.

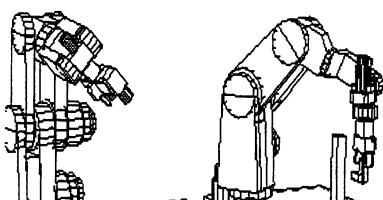
3. *L'étude des interactions physiques main/objet :*

Nous nous sommes ensuite intéressés au problème des interactions entre les doigts et l'objet, au moment de la fermeture effective de ceux-ci. Les modèles physiques ont permis de simuler efficacement ce phénomène. Ils nous ont permis de prendre en compte des interactions complexes, comme les contacts pulpaux ou palmaires, et les déformations, induite par les efforts de serrage des doigts. Ils ont permis de faire le lien avec les contraintes issues de la préconfiguration : les types de prises, les types de contact, et les stratégies de fermetures associées. De plus, les modèles physiques sont un lien naturel avec le contrôle. Les mêmes entités sont manipulées : les forces et les transitions entre les différentes phases des comportements. L'approche a été implantée en simulation, ainsi que l'intégration avec la planification de préconfiguration.

Il convient de souligner que cette approche est générique pour le type d'objets à saisir, et pour le type d'outils de préhension : aucune hypothèse de forme n'est nécessaire pour l'objet ; tout type de préhenseur peut être considéré sur le plan expérimental (main articulée ou pince classique en particulier).

Cette approche pour la résolution de la saisie autonome devra être complétée dans le futur, en apportant des améliorations et développement complémentaires, sur les points suivants :

- En premier lieu, ils concernent l'améliorer notre analyse morphologique. Un processus décisionnel permettra de mieux prendre en compte les contraintes du contexte de la saisie (i.e. de la tâche à accomplir), et de trouver le bon axe de coupe, induisant la bonne zone de saisie, et la préconfiguration associée.
- Notre système a été conçu avec un objectif d'intégration. Un premier niveau d'intégration se situe au niveau des échanges de modèles avec la vision. Notamment, nous avons déjà évoqué le problème dans le paragraphe 7.2.2, où le besoin d'une reconstruction à deux vitesses a été montré comme nécessaire. Il s'agit de récupérer un modèle « faible » pour l'analyse des proportions, et un modèle précis pour les zones de contact.
- Un second niveau d'intégration concerne le contrôle. Les modèles physiques forment un lien naturel, mais qui souffre d'une absence d'identification entre les paramètres de la simulation et ceux du contrôle. Il s'agit de faire cette identification, pour rapprocher simulation et exécution.
- Les incertitudes doivent être prises en compte, pour rendre robuste la simulation des interactions. Cela se traduit, en itérant sur les mêmes simulations avec des paramètres différents. Les résultats donneront des probabilités de réussites d'un même



comportement pour des intervalles sur chaque paramètre. Il s'agit aussi de prendre en compte les incertitudes pendant l'exécution, en analysant les comportements avec des capteurs tactilo-kinesthésiques.

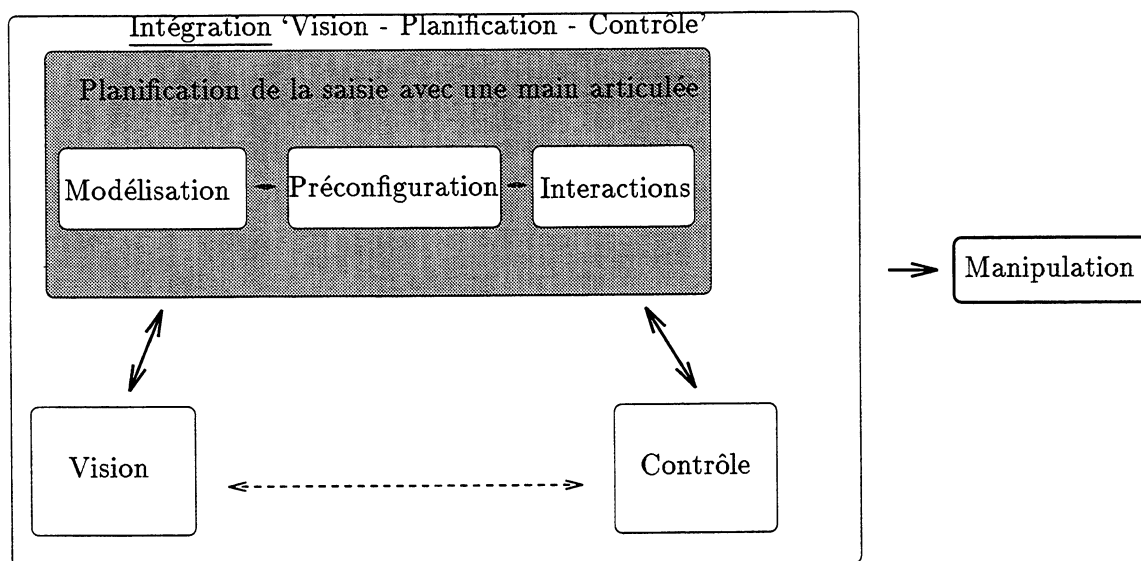
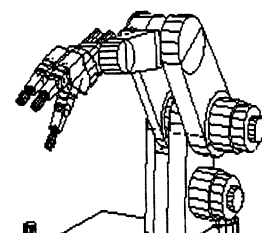


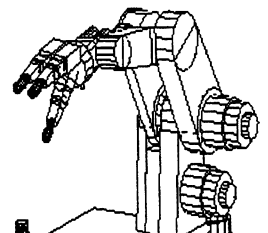
FIG. 8.1 - : Perspectives futurs : une intégration globale pour aboutir à la manipulation.

Notre approche pour la réalisation de la saisie autonome est une boîte. Cette boîte ne peut évoluer que par une réelle interaction et intégration, avec les différents modules en aval et en amont. C'est dans ce sens que nous nous emploierons à la progression de notre approche, et ce, vers une intégration globale, pour aboutir à l'étape ultérieure qu'est la manipulation (figure 8.1).

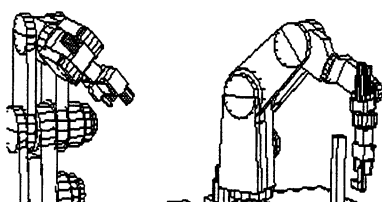


Bibliographie

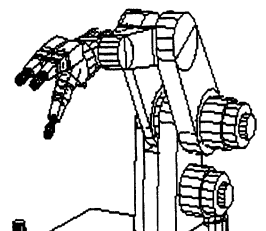
- [1] J.M. Ahuactzin, E.G. Talbi, T. Chatroux, P. Bessiere, and M. Mazer. A massively parallel implementation of the ariadne's clew algorithm. *International Workshop on Intelligent Robotic Systems*, July 1993.
- [2] M.A. Arbib. *Handbook of Physiology – The Nervous System II* édité par V.B. Brooks, chapter Perceptual structures and distributed motor control, pages 1449–1480. American Physiological Society, Bethesda, 1981.
- [3] N. Badler, J. O'Rourke, and H. Toltzis. A spherical representation of a human body for visualizing movement. *Proceedings of the IEEE*, 67(10), October 1979.
- [4] B.S. Baker, S. Fortune, and E. Grosse. Stable prehension with a multi-fingered hand. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St Louis, March 1985.
- [5] C. Bard. Saisie automatique pour main articulée. Master's thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, June 1989.
- [6] C. Bard, J.Troccaz, and G. Vercelli. Shape analysis and hand preshaping for grasping. In *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1991.
- [7] C. Bard, C. Laugier, C. Milési-Bellier, J.Troccaz, B. Triggs, and G. Vercelli. Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision based sensing. *International Journal of Robotics Research*, 1994. To appear in 1994.
- [8] C. Bard and J. Troccaz. Automatic preshaping for a dextrous hand from a simple description of objects. In *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1990. Tsuchiura, Japan.
- [9] C. Bard and J. Troccaz. Grasp planning in spatial environment. In *Artificial Intelligence, Robotics and Automation, in Space*. CNES, Cepadues Editions, Toulouse, September 1992.
- [10] J. Barraquand and J.C. Latombe. A monte-carlo algorithm for path planning with many degrees of freedom. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 1990.



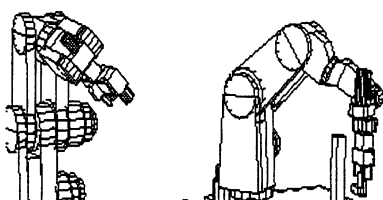
- [11] C. Bellier, C. Laugier, E. Mazer, and J. Troccaz. Planning/executing six d.o.f. robot motions in complex environments. In *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, November 1991.
- [12] A. Bicchi, J.K. Salisbury, and D.L. Brock. Experimental evaluation of friction characteristics with an articulated robotic hand. In *Second International Symposium on Experimental Robotics*, Springer Verlag, Toulouse, June 1991.
- [13] A. Blake. Computational modelling of hand-eye coordination. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, pages 351–360, 1992.
- [14] H. Blum. A transformation for extracting new descriptors of shape, symp on models for the perception of speech and visual form. *Symp. on models for the perception of speech and visual form*, November 1964.
- [15] B. Borovac, D. Seslija, and S. Stankovski. Soft sensed grippers in assembly process. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1283–1288, Nice, May 1992.
- [16] M.R. Cutkosky. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3):269–279, June 1989.
- [17] M.R. Cutkosky and R.D. Howe. Human grasp choice and robotic grasp analysis. In *Dextrous Robot Hands*. S.T. Venkataraman and T. Iberall, Springer-Verlag, 1989.
- [18] M.R. Cutkosky and P.K. Wright. Modeling manufacturing grips and correlations with the design of a robot hand. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, April 1986.
- [19] P. Dario and G. Buttazzo. An anthropomorphic robot finger for investigating artificial tactile perception. *International Journal of Robotics Research*, 6(3), 1987.
- [20] J. Paillard et D. Beaubaton. Problèmes posés par les contrôles moteurs ipsilatéraux après déconnexion hémisphérique chez le singe. In *Les syndrômes de disconnexion calleuse chez l'homme*, pages 137–171. B. Scott et F. Michel, Lyon, 1975.
- [21] B. Faverjon. Obstacle avoidance using an octree in the configuration space of a manipulator. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1984.
- [22] B. Faverjon and J. Ponce. On computing two-finger force-closure grasps of curved 2d objects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, April 1991.
- [23] R.S. Fearing. Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands. AI-Memo 809, Artificial Intelligence Lab., M.I.T. Cambridge, November 1984.



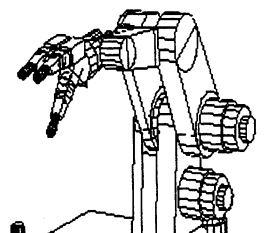
- [24] C. Francois, K. Ikeuchi, and M. Hebert. A three-finger gripper for manipulation in unstructured environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 1991.
- [25] G. Garcia. Contribution à la modélisation d'objets et à la détection de collisions en robotique à l'aide d'arbres octaux. *Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique*, Septembre 1989. Thèse de Doctorat.
- [26] E. Grosso, G. Sandini, and M. Tistarelli. 3d object reconstruction using stereo and motion. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-19(6), Nov/Dec 1989.
- [27] E. Grosso and G. Vercelli. Grasping strategies for reconstructed unknown 3d objects. In *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, Japan, 1991.
- [28] K. Gupta. Fast collision avoidance for manipulator arms: A sequential search strategy. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, February 1990.
- [29] H. Hanafusa and H. Asada. Stable prehension by a robot hand with elastic fingers. In *7th Int. Symp. on Industrial Robots*, Tokyo, October 1977. also published in *Robot Motion: Planning and Control*, edited by Brady and al., MIT Press, 1982.
- [30] R.D. Howe, N. Popp, P. Akella, I. Kao, and M.R. Cutkosky. Grasping, manipulation, and control with tactile sensing. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 1990.
- [31] A.R. Iberall. A neural model of human prehension. *University of Massachusetts, Amherst*, January 1987. PhD thesis.
- [32] T. Iberall. The nature of human prehension: three dextrous hands in one. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, March 1987.
- [33] T. Iberall and D. Lyons. Towards perceptual robotics. COINS Technical Report 84-17, Laboratory for Perceptual Robotics, Dept of Computer and Information Science, University of Massachusetts, Amherst, August 1984.
- [34] A. Ijel. Intéraction entre la perception et l'action en robotique. *Institut National Polytechnique de Grenoble, LIFIA*, 1991. Thèse de Doctorat.
- [35] S.C. Jacobsen and al. The utah/mit dextrous hand: work in progress. *International Journal of Robotics Research*, 3(4), Winter 1984.
- [36] M. Jeannerod. *Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects*, chapter Attention and Performance, pages 153-168. Erlbaum, Hillsdale, 1981.



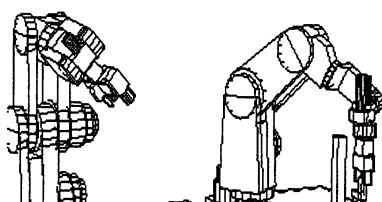
- [37] M. Jeannerod. The timing of natural prehension movements. *Journal of Motor Behavior*, 16(3):235–254, 1984.
- [38] S. Jimenez, A. Luciani, and C. Laugier. Physical modeling as an help for planning the motion of a land vehicle. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, November 1991.
- [39] A. Joukhadar and C. Bard. Modélisation physique pour la planification de saisie avec une main articulée. Rr-2247, INRIA Rhône-Alpes, Grenoble, France, Avril 1994.
- [40] A. Joukhadar, C. Bard, and C. Laugier. Planning dextrous operations using physical models. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994.
- [41] H.G. Petersen J.W. Perram and J.A. Campbell. A general method for constructing collision free trajectoiries for structured three dimensional robots moving in a variable environment. Technical report, Odense University, DK 5230 Denmark, 1988.
- [42] M. Kaneko, H. Maekawa, and K. Tanie. Active tactile sensing by robotic fingers based on minimun external sensor realization. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1289–1294, Nice, 1992.
- [43] M. Kaneko and K. Tanie. Contact point detection for grasping of an unknown object using joint compliance. In *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1990.
- [44] S.B. Kang and K. Ikeuchi. Grasp recognition using the contact web. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1992.
- [45] S.B. Kang and K. Ikeuchi. Toward automatic robot instruction from perception - recognizing a grasp from observation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993.
- [46] I. A. Kapandji. *Physiologie articulaire*, volume 1. Maloine S.A, 27 Rue de l'Ecole-de-Médecine 75006 Paris, 1980.
- [47] O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98, Spring 1986.
- [48] V. M. Kvgié. Comuting of the sub-optimal grasing forces for manipulation of a rough object by multifingered robot hand. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994. under review. To appear.
- [49] C. Laugier. Raisonement géométrique et méthodes de décision en robotique. appli-cation à la programmation automatique des robots. *Institut National Polytechnique de Grenoble, LIFIA*, Decembre 1987. Thèse d'État.



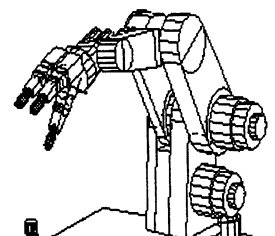
- [50] C. Laugier, C. Bard, M. Cherif, and A. Joukhadar. Solving complex motion planning problems by combining geometric and physical models: the cases of a rover and of a dexterous hand. *Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, February 1994. San Fransisco.
- [51] C. Laugier, A. Ijel, and J. Troccaz. Combining vision based information and partial geometric models in automatic grasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 1990.
- [52] C. Laugier, S. Jimenez, and A. Luciani. Predicting the dynamic behaviour of a planetary vehicle using physical models. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, July 1993.
- [53] S.J. Lederman. The intelligent hand: an experimental approach to human object recognition and implication for robotic design. In *International Conference of Artificial Intelligence*, volume 1, pages 774–785, Chambéry, France, Aout 1993.
- [54] H. Liu, G. A. Bekey, R. Tomovic, and W. J. Karplus. Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990.
- [55] T. Lozano-Pérez. Automatic planning of transfer movements. *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, SMC-11(10), 1981. also published in: *Robot Motion: Planning and Control*, edited by Brady and al., MIT Press, 1982.
- [56] T. Lozano-Pérez, J.L. Jones, E. Mazer, P.A. O'Donnell, W.E.L. Grimson, P. Tournassoud, and A. Lanusse. Handey: a task-level robot system. In *4th Int. Symp. in Robotics Research*, Santa Cruz, August 1987.
- [57] A. Luciani and al. An unified view of multiple behaviour, flexibility, plasticity and fractures: balls, bubbles and agglomerates. *IFIP WG 5.10 on Modeling in Computer Graphics*, 1991.
- [58] D. Lyons. A simple set of grasps for a dextrous hand. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, April 1985.
- [59] D. Lyons. Tagged potential field: an approach to specification of complex manipulator configurations. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St Louis, March 1986.
- [60] X. Markenscoff, L. Ni, and C.H. Papadimitriou. The geometry of grasping. *International Journal of Robotics Research*, 9(1):61–74, February 1990.
- [61] M.T. Mason. Manipulator grasping and pushing operations. *Massachusetts Institute of Technology*, June 1982. PhD thesis, also published as a technical report of the AI Lab., AI-TR-690.



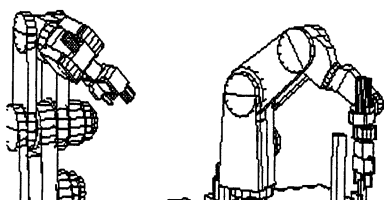
- [62] M.T. Mason and J.K. Salisbury. *Robot hands and the mechanics of manipulation*. Artificial Intelligence. MIT Press, 1985. Compilation of Mason's and Salisbury's Ph.D Theses.
- [63] M. Maurette. Cnes research for orbital and planetary robots. In *Artificial Intelligence, Robotics and Automation, in Space*, pages 43–52. CNES, Cépadues Éditions, Toulouse, September 1992.
- [64] E. Mazer, J. Troccaz, and al. Act: a robot programming environment. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, April 1991.
- [65] A. Montavert. Contribution au traitement de formes discretes. squelettes et codage par graphe de la ligne médiane. *Institut National Polytechnique de Grenoble*, Octobre 1987. Thèse de Doctorat.
- [66] J. Najera, C. Laugier, and P. Farrouch. Planification de mouvements fins et raisonnement géométrique dans l'espace des contacts. *Premières Rencontres Nationales de Jeunes Chercheurs*, Septembre 1992.
- [67] J.R. Napier. The prehensile movements of the hand. *Jour. of bone and joint surgery*, 38B(4), November 1956.
- [68] Van Duc Nguyen. The synthesis of force-closure grasps in the plane. AI-Memo 861, Artificial Intelligence Lab., M.I.T. Cambridge, September 1985.
- [69] Van-Duc Nguyen. Constructing stable grasps in 3d. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, March/April 1987.
- [70] V.D. Nguyen. Constructing force-closure grasps. *International Journal of Robotics Research*, 7(3), June 1988.
- [71] University of Grenoble and al. Second: Sensory controlled dextrous robots. Intermediate report, year 2, Projet Esprit3-Bra Second 6769, June 1994.
- [72] Y.C. Park and G.P. Starr. Finger force computation for manipulation of an object by a multifingered robot hand. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 930–935, Scottsdale, Arizona, May 1989.
- [73] Y.C. Park and G.P. Starr. Grasp synthesis of polygonal objects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1574–1580, Cincinnati, Ohio, May 1990.
- [74] J. Pertin-Troccaz. Modélisation du raisonnement géométrique pour la programmation des robots d'assemblage. *Institut National Polytechnique de Grenoble*, Mars 1986. Thèse de Doctorat.



- [75] J. Pertin-Troccaz. On-line automatic robot programming: a case study in grasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, March/April 1987.
- [76] J. Pertin-Troccaz. Grasping: a state of the art. *The Robotics Review*, Spring 1989.
- [77] N.S. Pollard. The grasping problem toward task-level programming for an articulated hand. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technologie, March 1989.
- [78] N.S. Pollard. Planning grasps for a robot hand in the presence of obstacles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1993.
- [79] N.S. Pollard and T. Lozano-Pérez. Grasp stability and feasibility for an arm with an articulated hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1990.
- [80] J. Ponce and B. Faverjon. On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects. Uiuc-bi-ai-rcv-93-05, University of Illinois, The Beckman Institute, April 1993.
- [81] K. Rao, G. Medioni, H. Liu, and G. A. Bekey. Shape description and grasping for robot hand-eye coordination. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 22-29, February 1989.
- [82] A.A.G Requicha and H.B Voelcker. Solid modeling: a historical summary and contemporary assesment. *IEEE Computer Graphics*, March 1982.
- [83] D. Reznik and V. Lumelsky. Sensor-based motion planning for higly redundant kinematic structures: II. the case of a snake arm manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1993.
- [84] D. Reznik and V. Lumelsky. Multi-finger "hugging": A robust approach to sensor-based grasp planning. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1994.
- [85] J.K. Salisbury. *Robot hands and the mechanics of manipulation*, chapter Kinematic and force analysis of articulated hands. Artificial Intelligence. MIT Press, 1985.
- [86] J.K. Salisbury and J.J. Craig. Articulated hands: force control and kinematics issues. *International Journal of Robotics Research*, 1(1), Spring 82.
- [87] J.T. Schwartz and M. Sharir. On the piano movers' problem ii: General properties for computing topological properties of real algebraic manifolds. *NYU, Report 41*, February 1982.
- [88] D. Simon, B. Espiau, E. Castillo, and K. Kapellos. Computer aided design of a generic robot controller handling reactivity and real-time control issues. research report 1801, INRIA, November 1992.



- [89] S. A. Stansfield. Robotic grasping of unknown objects: a knowledge-based approach. Technical Report SAND89-1087.UC-32, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1990.
- [90] S. A. Stansfield. Haptic perception with an articulated, sensate robot hand. Technical Report SAND90-0085.UC-406, Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1991.
- [91] S.A. Stansfield. Knowledge-based robotic grasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 1990.
- [92] S.A. Stansfield. Experiments in robotic sensorimotor control during grasp. *IEEE Transactions on Systems, Mans, and Cybernetics*, 23(3), May/June 1993.
- [93] R. Szeliski. Real-time octree generation from rotating objects. Technical report, Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Lab, Cambridge, April 1990.
- [94] M. Taylor, A. Blake, and A. Cox. Visually guided grasping in 3d. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 761–766, May 1994.
- [95] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, and K. Fleischer. Elastically deformables models. *Computer Graphics*, volume 21, Number 4, july 1987.
- [96] P. Tournassoud, T. Lozano-Pérez, and E. Mazer. Regrasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, March/April 1987.
- [97] J.C. Trinckle, J.M. Abel, and R.P. Paul. Enveloping, frictionless, planar grasping. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Raleigh, March/April 1987.
- [98] E. Trucco. Automatic acquisition of volumetric models from slice data. Technical Report 519, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, December 1990.
- [99] G. Vercelli, R.Zaccaria, and P. Morasso. Grasp planning via analogic simulation. In *Proceedings of IEEE Intl. Workshop on Intelligent Motion Control*, 1990. Istanbul, Turkey.
- [100] P. Violero, I. Mazon, and M. Taix. Automatic planning of a grasp for a “pick and place” action. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, Ohio, May 1990.
- [101] T. Yoshikawa and K. Nagai. Analysis of multi-fingered grasping and manipulation. In *Dextrous Robot Hands*, pages 187–208. S.T. Venkataraman and T. Iberall, Springer-Verlag, 1989.



Annexe A

Construction des ellipses

A.1 Définition

Le moment d'inertie d'un solide S à densité de masse, par rapport à un point O (resp. un plan Π) est l'intégrale généralisée $\int_S r^2 dm$, où r est la distance d'un point générique P du solide au point O (resp. au plan Π). Si S est un solide homogène, le moment d'inertie est dit moment d'inertie géométrique du solide.

La matrice d'inertie d'un solide S en O dans une base orthonormée $[\vec{e}_i]$ est une matrice symétrique dont les termes diagonaux sont les moments d'inertie de S par rapport aux axes $(O, \vec{e}_i)$; ses termes non diagonaux sont les opposés des produits d'inertie. Par définition, une matrice d'inertie est diagonalisable avec des vecteurs propres orthogonaux, et des valeurs propres toujours positives. Ce qui fait qu'elle définit une ellipse (une ellipsoïde en dimension trois). Tout axe (ou droite) $(O, \vec{u})$, tel que $\vec{u}$ soit un vecteur propre non nul de la matrice d'inertie, est appelé axe (ou droite) principal d'inertie en O .

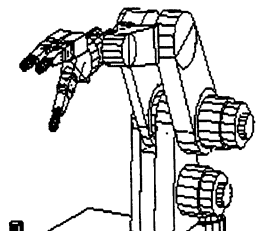
La matrice d'inertie est représentative de la distribution de la matière (du volume pour un solide homogène) au sein d'un solide S .

A.2 Matrice d'inertie d'un composant C

Les calculs du centre et de la matrice d'inertie d'un composant de l'objet C sont basés sur un découpage du polygone associé en triangles élémentaires plus simples à traiter.

Nous disposons alors d'une décomposition du premier polygone ou composant C en sous-polygones convexes, dont les centres et matrices d'inertie permettront de déterminer ceux du polygone initial.

Il est alors facile de calculer le centre de gravité de chaque triangle: partant d'un sommet quelconque, il est aux deux tiers de la médiane; puis des sommes pondérées de ces centres de gravité permettent de déterminer celui de chaque sous-polygone convexe,



et enfin celui du premier polygone.

Quant à la matrice d'inertie, chacun de ses coefficients est calculé en sommant les contributions de tous les triangles, puisqu'il s'agit d'intégrales doubles sur la surface du polygone initial. Rappelons que les deux coefficients diagonaux et le coefficient non diagonal de cette matrice sont obtenus respectivement par :

$$\iint_S x^2 dS, \quad \iint_S y^2 dS \quad \text{et} \quad \iint_S xy dS$$

où S désigne la surface de l'objet considéré. En triant les 3 sommets du triangle traité par abscisse croissante : A, B et C, on obtient, en notant tM_iM_j le trapèze défini par les points M_i, M_j et leurs projetés sur l'axe (Ox), et en notant x_k et x_l les variables x ou y :

$$\iint_S x_k * x_l dS = \left| \iint_{tAB} x_k * x_l dS + \iint_{tBC} x_k * x_l dS - \iint_{tAC} x_k * x_l dS \right|$$

En prenant pour équation de la droite passant M_i et M_j : $y = m * x + p$, où $m = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}$ et $p = y_i - m * x_i$, k valant i ou j , on obtient : $\iint_{tM_iM_j} x^2 dx dy = \int_{x_i}^{x_j} dx \int_0^{m x + p} x^2 dy$.

De là, en intégrant par parties, on trouve :

$$\begin{aligned} \iint_{tM_iM_j} x^2 dx dy &= \frac{1}{3} (y_j x_j^3 - y_i x_i^3) - \frac{1}{12} \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right) (x_j^4 - x_i^4) \\ &= 0 \quad \text{si} \quad x_j - x_i = 0 \end{aligned}$$

et de même :

$$\begin{aligned} \iint_{tM_iM_j} y^2 dx dy &= \frac{1}{12} \left(\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i} \right) (y_j^4 - y_i^4) \\ &= 0 \quad \text{si} \quad y_j - y_i = 0 \end{aligned}$$

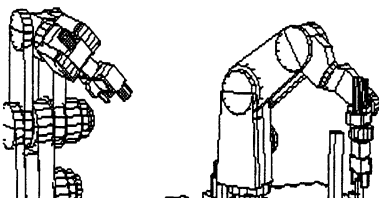
et

$$\begin{aligned} \iint_{tM_iM_j} xy dx dy &= \frac{-1}{3} (y_j x_j^3 - y_i x_i^3) \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right) + \frac{1}{12} \left(\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right)^2 (x_j^4 - x_i^4) + \frac{1}{2} (y_j^2 x_j^2 - y_i^2 x_i^2) \\ &= 0 \quad \text{si} \quad x_j - x_i = 0 \end{aligned}$$

Il ne reste plus alors qu'à retrancher aux valeurs obtenues pour ces coefficients le produit des coordonnées adéquates du centre d'inertie de l'objet pondéré de sa masse (ici de sa surface), pour obtenir les coefficients recherchés.

A.3 Longueurs des axes

Dans le calcul de E_a et E_b (les longueurs des demi-axes), il est nécessaire de vérifier que l'objet est bien entièrement contenu dans l'ellipse.



Pour cela, E_a et E_b sont respectivement initialisés par les racines carrées des valeurs propres de la matrice d'inertie, respectivement $\sqrt{\lambda_b}$ et $\sqrt{\lambda_a}$ ¹, racines de son polynôme caractéristique (du second degré). On garantit par là, que l'ellipse initiale est incluse dans le polygone traité C .

Ensuite, pour chaque point du contour de coordonnées (x_i, y_i) dans un repère centré sur le centre de gravité du polygone et dont les directions principales sont les vecteurs propres de la matrice d'inertie $\vec{V}_a$ $\vec{V}_b$, on évalue l'équation suivante :

$$\sigma = x_i^2/E_a^2 + y_i^2/E_b^2$$

où si σ est plus grand que 1, c'est que le point est en dehors de l'ellipse de demi-axes E_a et E_b . On multiplie alors les valeurs courantes de E_a et E_b par $\sqrt{\sigma}$, ce qui fait que l'ellipse passe maintenant par ce point.

Lorsque le processus s'arrête, tous les points du contour se trouvent bien à l'intérieur de l'ellipse (un au moins est sur le contour de l'ellipse, le dernier point donnant un $\sigma \geq 1$).

A.4 Intersection d'une ellipse et d'une droite

Pour déterminer l'intersection d'une ellipse et d'une droite, on se place dans le repère associé à l'ellipse, c'est-à-dire le repère orthonormé direct dont le centre est le centre de l'ellipse, et dont le premier vecteur de base est orienté suivant le grand axe de l'ellipse. Dans ce repère, l'équation de l'ellipse est donc :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

où a et b désignent respectivement les longueurs du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipse. L'équation de la droite est mise sous la forme :

$$\alpha x + \beta y + \gamma = 0$$

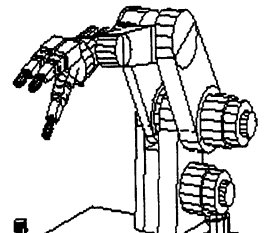
Si $\beta \neq 0$ (cas d'une droite non verticale), on peut alors extraire y de la seconde équation, qui est du premier degré, et le remplacer par sa nouvelle expression dans la première, d'où :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(\alpha x + \gamma)^2}{b^2 \beta^2} = 1$$

De là, en développant et en factorisant, on obtient :

$$\left(\frac{1}{a^2} + \frac{\alpha^2}{b^2 \beta^2}\right) x^2 + \frac{2\alpha\gamma}{b^2 \beta^2} x + \left(\frac{\gamma^2}{b^2 \beta^2} - 1\right) = 0$$

¹ $E_a = \sqrt{\lambda_b}$ et $E_b = \sqrt{\lambda_a}$: l'inversion doit être respectée pour obtenir une ellipse dont le plus grand axe correspond à la plus grande longueur du composant C .



ou encore, en multipliant chaque membre de l'équation par $b^2\beta^2$ qui est non nul :

$$\left(\frac{b^2\beta^2}{a^2} + \alpha^2\right)x^2 + 2\alpha\gamma x + (\gamma^2 - b^2\beta^2) = 0$$

On a donc obtenu une équation du second degré, dont le discriminant réduit est :

$$\Delta' = \alpha^2\gamma^2 - \left(\frac{b^2\beta^2}{a^2} + \alpha^2\right)(\gamma^2 - b^2\beta^2)$$

$$\Delta' = -\frac{b^2\beta^2}{a^2}\gamma^2 + \frac{b^4\beta^4}{a^2} + \alpha^2b^2\beta^2$$

$$\Delta' = \frac{b^2\beta^2}{a^2}(b^2\beta^2 + a^2\alpha^2 - \gamma^2)$$

Grâce à cette dernière expression du discriminant, on trouve que l'intersection entre l'ellipse et la droite n'est pas vide si et seulement si $b^2\beta^2 + a^2\alpha^2 - \gamma^2 > 0$, auquel cas les points d'intersection ont pour abscisse les racines de l'équation du second degré, à savoir :

$$\frac{a}{a^2\alpha^2 + b^2\beta^2}(-a\alpha\gamma \pm b\beta\sqrt{b^2\beta^2 + a^2\alpha^2 - \gamma^2})$$

leur ordonnée étant obtenue en remplaçant la valeur de leur abscisse dans l'équation de la droite.

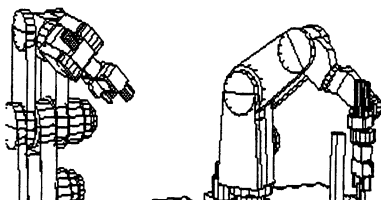
Reste à traiter le cas où $\beta = 0$. Il est résolu simplement en extrayant x de l'équation de la droite : $x = -\frac{\gamma}{\alpha}$, et en le remplaçant dans l'équation de l'ellipse, d'où :

$$\frac{\gamma^2}{a^2\alpha^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

et de là :

$$y^2 = \frac{b^2}{a^2\alpha^2}(a^2\alpha^2 - \gamma^2)$$

Ainsi l'intersection n'est pas vide si et seulement si $a^2\alpha^2 - \gamma^2 > 0$, et les points d'intersection ont pour ordonnée les racines carrées de l'expression ci-dessus, et pour abscisse : $x = -\frac{\gamma}{\alpha}$. En fait, seul nous intéresse de savoir si il y a intersection ou non entre un doigt du robot (représenter par une droite) et un cylindre elliptique dont on prend l'équation de l'ellipse correspondante à l'altitude requise.



Annexe B

Algorithme de modélisation des coupes

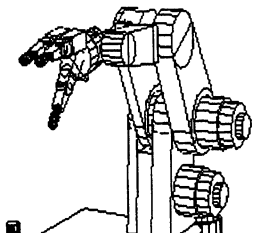
B.1 Notations

- D_{finger} : Épaisseur d'un doigt.
 $Octree(O)$: L'arbre octal correspondant à l'objet O .
 Δ : L'axe de coupe.
 D_c : Nombre d'accès pour un cercle.
 $S_i(O)$: La tranche d'altitude i sur $Octree(O)$.
 C_{S_i} : Un composant d'une coupe S_i .
 $tree(C)$: l'arbre binaire associé à C_{S_i} .
 $E(C)$: Une ellipse E de $tree(C)$.
 $D(E)_k$: Une direction d'accès de E ($k \in [1, 4/D_c]$).
 $(E(C_{S_i}), D(E)_k)$: Un candidat de saisie 2D d'une coupe S_i .
 EC, EC_i : Un cylindre elliptique particulier.
 $D(CE)_i$: Une des quatre directions d'accès de CE ($i \in [1, 4/D_c]$).
 $CE, (CE, D(CE)_i)$: Un candidat de saisie 3D.

B.2 Étapes de la modélisation 2D

Algorithme. Soit $Octree(O)$ la représentation volumétrique à analyser.

1. $S_i(O)$ = Découpage de $Octree(O)$ suivant l'axe Δ ($i \in [1, n]$). L'intervalle entre chaque coupe est de l'ordre de la demi épaisseur d'un doigt.
2. Pour chaque C_{S_i} appartenant à $S_i(O)$ construire $tree(C)$ où $tree()$ est une procédure dont le résultat est l'ensemble de tous les candidats avant leur évaluation à l'accessibilité. La procédure $tree$ est décrite dans la figure B.1.



```

Algorithme tree(Composant C)
debut
   $E = \text{Encapsuler } C;$ 
  Ajouter  $E$  dans  $\text{Arbre}_C;$ 
  si  $E$  non representative et  $C$  (non convexe et non taille mini) alors
    si  $\exists$  point(s) concave(s) de saisie alors
       $(C_1, C_2) = \text{Decoupage de } C;$ 
       $\text{tree}(C_1);$ 
       $\text{tree}(C_2);$ 
    fin si
  fin si
fin

```

FIG. B.1 - : Procédure « Tree ».

3. Évaluer les accessibilités pour tous les candidats $(E(C_{js_i}), D(E)_k)$:

- (a) Évaluer chaque $D(E)_k$ de $E(C_j)$ feuilles de $\text{tree}(C_j)$ par rapport à toutes les autres feuilles de $\text{tree}(C_j)$ et des autres feuilles des $\text{tree}(C_l)$ ($l \neq j, k \in [1, 4/D_c]$).
- (b) Évaluer chaque $D(E)_k$ de $E(C_j)$ racine de $\text{tree}(C_j)$ par rapport à toutes les autres racines des $\text{tree}(C_l)$.

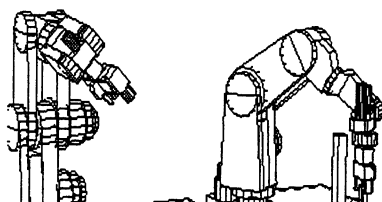
Le résultat final est un ensemble $(E(C_{js_i}), D(E)_k)$ de candidats $2D$ pour la saisie sur chaque $S_i(O)$ de $\text{Octree}(O)$. Chaque élément est accessible au sens de la saisie $2D$.

Complexité. Soient n le nombre de coupes pour un octree, p le nombre maximum de composants par coupe et m le nombre maximum de décompositions d'un composant C . La complexité est de l'ordre de $n * p$ fois, la construction d'un arbre binaire pour chaque composant C , c'est-à-dire $n * p * O(m * \log_2 m)$. Dans les plus mauvais cas de figure cette complexité est de l'ordre de $O(k^3 * \log_2 k)$, si $k = \max(n, p, m)$. En pratique, chaque octree est décomposé en moyenne par une centaine de coupes.

Cette complexité en théorie, est polynomiale. Pour fixer les idées, soit l'exemple d'une chope à bière : pour 100 coupes; chaque coupe possède au plus deux composants, et chaque composant est décomposé en au plus deux sous composants. D'où une complexité moyenne en pratique de $100 * 2 * 2 * \log_2(2) = 400$ opérations.

B.3 Modélisation 3D

Algorithme. Soit n arbres binaires où chaque nœud d'un arbre est un $(E(C), D)$. Seules les racines et les feuilles des arbres sont analysées, respectivement aux autres racines et



aux autres feuilles.

Chaque $(E(C), D)_i$ d'une S_i , est comparé à chaque $(E(C), D)_{i+1}$ appartenant à une coupe S_{i+1} . Si ils sont « semblables », et qu'ils n'appartiennent pas déjà à un composant 3D, un nouveau composant 3D est créé. Si l'un (ou l'autre) des composants 2D appartient déjà à un composant 3D, l'autre (ou l'un) vient s'ajouter au composant 3D. L'algorithme B.2 décrit cette situation.

Algorithme *Creation_composant_3D*

debut

pour Chaque $(E(C), D)_i$ ($i \in [1, n]$) *alors*

pour Chaque $(E(C), D)_{i+1}$ *alors*

si $(E(C), D)_i \equiv (E(C), D)_{i+1}$ *alors*

si $(E(C), D)_i$ ou $(E(C), D)_{i+1} \in$ a un *CE* *alors*

Ajouter $CE = CE \cup \{(E(C), D)_i\}$ ou $\{(E(C), D)_{i+1}\}$;

fin si

sinon

Creer $CE = \{(E(C), D)_i, (E(C), D)_{i+1}\}$;

Ajouter CE a la liste des composants 3D ;

fin si

fin pour

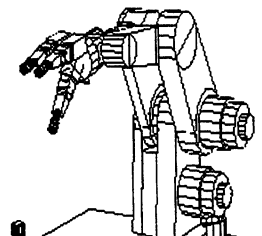
fin pour

fin

FIG. B.2 - : Procédure « *Creation_composants_3D* ».

Le résultat donne une liste de composants 3D où il est intéressant de poser les doigts. Ensuite, chaque composant 3D est analysé pour connaître les préconfigurations possibles associées. L'étape suivante consiste à classer les composants suivants les contraintes de qualité de stabilité et suivant la tâche à envisager.

Complexité. Il s'agit là, de la comparaison d'un élément d'un arbre binaire (une feuille) à toutes les feuilles d'un autre arbre binaire. Soient n le nombre maximum de coupes, p le nombre maximum de composants par coupe, et m le nombre maximum de feuilles d'un arbre. La complexité est alors évaluée à $n * p$ fois, la comparaison de deux feuilles d'un arbre binaire $O(m^2)$. En pratique, et pour une tasse, la complexité moyenne est de l'ordre de $100 * 2 * 2^2 = 800$ opérations.



Annexe C

Calcul des préconfigurations

Les calculs des degrés de liberté d'une main articulée et de sa position par rapport à un cylindre elliptique EC , sont basés sur la symétrie des doigts par rapport au repère du poignet (centré entre les doigts). Pour chaque préconfiguration, les valeurs des degrés de liberté sont initialisées à zéro et calculées du poignet vers les phalanges distales.

C.1 Notations

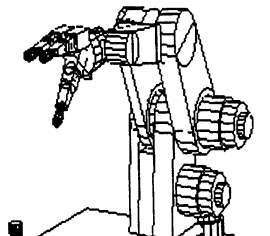
Rappel sur les notations :

- $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$: Phalange près du poignet.
- $\Theta_4, \Theta_5, \Theta_6$: Phalange proximale (intermédiaire).
- $\Theta_7, \Theta_8, \Theta_9$: Phalange distale.
- $\Theta_1, \Theta_4, \Theta_7$: Valeurs pour l'index.
- $\Theta_2, \Theta_5, \Theta_8$: Valeurs pour le majeur.
- $\Theta_3, \Theta_6, \Theta_9$: Valeurs pour le pouce.
- Ep_d : Épaisseur phalange distale.
- Lp_d : Longueur phalange distale.
- Lp_p : Longueur phalange proximale.
- Lp_o : Longueur phalange près poignet.
- Hm_e : Hauteur maximale encapsulation.
- D_{im} : Distance Index/Majeur minimale.
- D_{pm} : Distance Pouce/doigt minimale.

C.2 Calcul des articulations pour une préconfiguration

Chaque articulation est pré-définie arbitrairement ou calculée de la manière suivante :

$$\Theta_i = \text{acos}\left(\frac{A}{B}\right)$$



où $i \in [1..9]$, A dépend de la position et de l'opposition du doigt face à un autre doigt (ou paume) et des informations de taille du cylindre elliptique, et B de la longueur des articulations ¹. La figure C.1 illustre le calcul d'une préconfiguration.

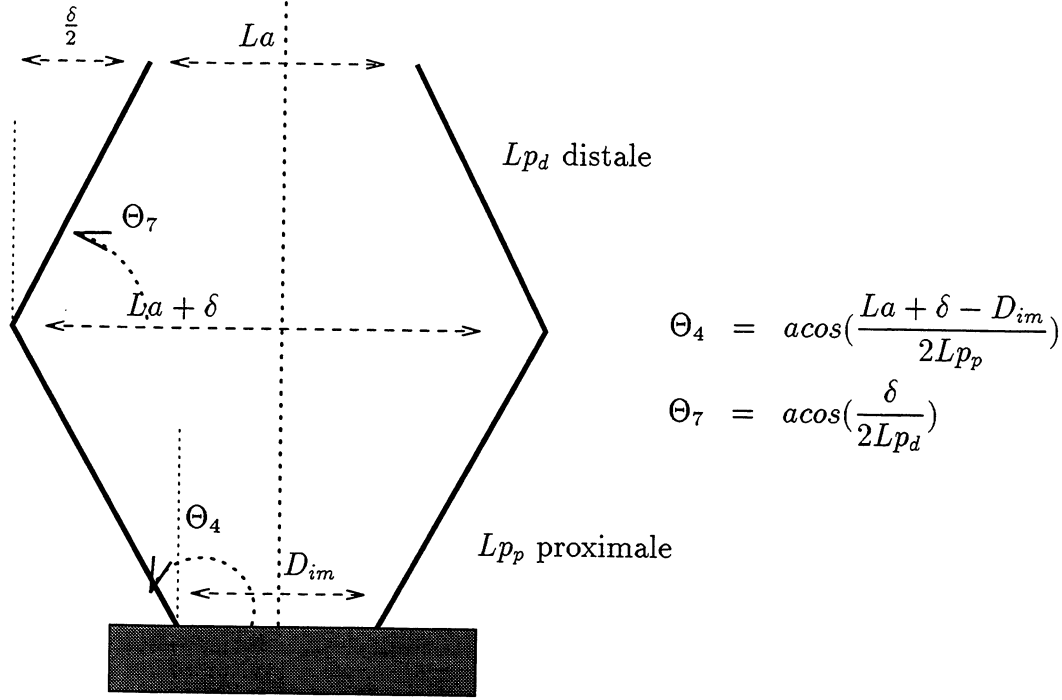


FIG. C.1 - : Exemple de calcul des configurations distales et proximales pour une préconfiguration.

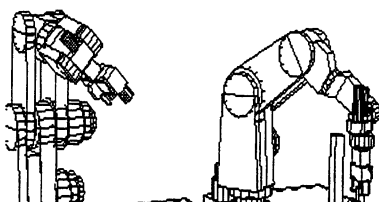
A titre d'exemple, nous donnons le calcul de A et B pour les prises sphériques P_1 , P_2 et P_3 de OTD et de la main de Salisbury. Les valeurs de toutes les articulations, pour chaque préconfiguration P_i , et pour chaque préhenseur, sont répertoriées dans différents tableaux de la section ci-après (§ C.3).

C.2.1 P_1 à P_3 pour Otd

Il s'agit de prises sphériques dont la fermeture de chaque doigt se dirige vers le centre de la sphère (comme s'il s'agissait d'une vraie sphère). Pour OTD, l'orientation des articulations sont pré-définies et telles que $\Theta_1 = \Theta_2 = 60^\circ$. Les autres articulations sont calculées, pour que la distance de chaque articulation au centre de la sphère soient égales.

Calcul pour la préconfiguration P_1 . La distance de l'articulation distale (pour l'index ou le majeur) au centre de la sphère (représenté par le centre de EC) est : $\sqrt{\frac{La^2 + D_{im}^2}{2}}$. Pour obtenir une préconfiguration "naturelle", cette distance est augmentée de δ pour les

¹acos retourne arc cosinus, dans la plage $[0, \pi]$



phalanges intermédiaires (§ C.2.3). Pour le pouce, cette distance est $\frac{La}{2}$. Soit les valeurs des 8 articulations pour P_1, P_2 et P_3 :

P_1	Pouce	Index	Majeur
Ph. Poignet		60°	60°
Ph. Proximale	$acos(\frac{La+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{\sqrt{La^2+D_{im}^2}+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{\sqrt{La^2+D_{im}^2}+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$
Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_2	valeurs de P_1 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$		
P_3	valeurs de P_1 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$		

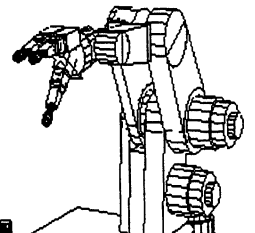
C.2.2 P_1 à P_3 pour la main de Salisbury

Contrairement à OTD, les valeurs des articulations qui concernent l'orientation de chaque doigt doit être calculée explicitement. De la même manière, elles sont calculées, telles que la distance aux bouts des doigts, entre le majeur et l'index (ces deux doigts s'opposent latéralement par construction: Θ_1 et Θ_2 rapprochent ou éloignent les deux doigts latéralement), soit égale à la même distance du centre du cylindre au pouce (dont la distance est égale à $\frac{La}{2}$). d'où :

$$\Theta_1 = \Theta_2 = acos(\frac{(\sqrt{(\frac{La}{\cos(60^\circ)})^2 - La^2}) - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)}) \text{ et } \Theta_3 = 0$$

Soit le calcul associé à la préconfiguration P_1 . L'orientation des doigts étant fixée (la distance entre le bout des doigts et le centre de la sphère est: $\frac{La}{2\cos(60^\circ)}$). Les phalanges intermédiaires et distales doivent pouvoir encapsuler EC et la distance (la plus courte) entre la droite formée par les bouts de doigts (index et majeur) et le centre de EC doit être au moins de $\frac{La}{2}$. On rajoute δ à La , pour les phalanges intermédiaires (aspect naturel de la préconfiguration). d'où les valeurs des 9 articulations pour les préconfiguration P_1 à P_3 :

P_1	Pouce	Index	Majeur
Ph. Poignet	0	$acos(\frac{(\sqrt{(\frac{La}{\cos(60^\circ)})^2 - La^2}) - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$	$acos(\frac{(\sqrt{(\frac{La}{\cos(60^\circ)})^2 - La^2}) - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$
Ph. Proximale	$acos(\frac{La+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{La+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{La+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$
Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_2	valeurs de P_1 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$		
P_3	valeurs de P_1 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$		



Les calculs précédant, ne prennent pas en compte l'épaisseur des doigts. La largeur d'un cylindre elliptique (La) doit être ajoutée à la valeur de la demi-épaisseur d'un doigt pour être certain que celui-ci est à l'extérieure du cylindre. D'où $Le = La + \frac{E_{pd}}{2}$ où Le est la nouvelle valeur prise en considération.

C.2.3 Calcul de δ

δ est une distance rajoutée, permettant de donner à la main un aspect naturel. Cet aspect naturel est important, notamment au moment de la fermeture des doigts, il diminue les risques de glissement de l'objet vers l'extérieure de la main. La main, au moment de la fermeture des doigts vers l'objet doit avoir une configuration plutôt englobante. Les risques de glissement vers l'extérieure entraînent des modifications majeure dans la planification de la saisie de l'objet, étant que l'objet s'échappe de la main. On peut penser qu'à contrario, si l'objet glisse vers l'intérieure de la main, les contacts résultant entre l'objet et la paume permettront, si on les détecte, de stopper le glissement ou de le rattraper plus facilement.

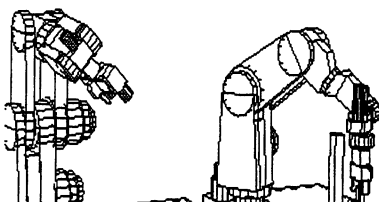
Cette distance rajoutée n'est pas calculée au hasard, mais tend à maintenir une configuration plutôt englobante et essaye de maintenir les doigts le plus loin de leurs butées. Elle est calculée par rapport à la hauteur englobante maximale permise pour la main Hm_e et la largeur à encapsuler Le . soit la valeur calculée :

$$\delta = \begin{cases} \frac{Hm_e - Le}{2} & \text{si } Hm_e > Le \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

C.2.4 Position du poignet

Une fois la main pré-configurée, il faut "placer" le poignet suivant la direction d'accès à une distance pré-calculée pour que les doigts, une fois la fermeture commencée, puissent rentrer en contact avec l'objet au bon endroit (contact terminal, pulpaire ou palmaire). Ce placement est une distance du repère d'accès (dont la position dépend du volume octree reconstruit) à un repère prise. Cette distance dépend de la longueur du cylindre, de la distance de la zone de contact au poignet et de la longueur de la phalange distale. Pour calculer ce repère de prise, la zone qui doit être en contact doit être le plus près possible de l'axe perpendiculaire à la direction d'accès sur le cylindre elliptique. Cette zone, pour un contact terminale est en bout de phalange distale. Pour un contact pulpaire, elle se situe au milieu de la phalange distale. Pour un contact palmaire, la zone de contact pour calculer la préconfiguration est différente de la zone de contact pour calculer la position du poignet. Elle se situe sur l'articulation de la phalange distale.

Soit D_{ac} la distance entre le repère d'accès et le centre du cylindre elliptique et soit D_{zb} la distance de la zone de contact à la base. Le calcul de D_{zb} est une combinaison de sinus et cosinus des articulations et des longueurs des phalanges distales et proximales (le repère base est situé au niveau de l'articulation de la phalange proximale). Le calcul de



la distance entre le repère d'accès et le repère de prise est le suivant :

$$D_1 = D_{ac} - \sqrt{(D_{zb})^2 - \left(\frac{Le}{2}\right)^2}$$

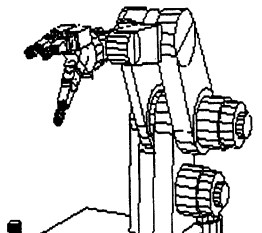
$$D(R_{\text{accès}}, R_{\text{prise}}) = \begin{cases} D_1 & \text{si } L_{pd} > (Lo/2) \\ D_1 - \frac{Lo}{2} & \text{si } L_{pd} < (Lo/2) \end{cases}$$

où $R_{\text{accès}}$ est le repère d'accès, et R_{prise} le repère prise.

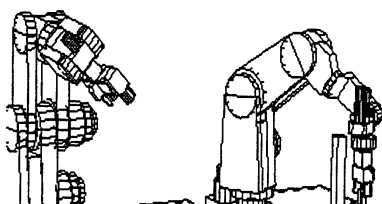
C.3 Résultats pour chaque préconfiguration

C.3.1 valeurs pour Otd

P_1	OTD	Pouce	Index	Majeur
	Ph. Poignet	inexistant	60°	60°
	Ph. Proximale	$acos(\frac{Le+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{\sqrt{Le^2+D_{im}^2+\delta-D_{pm}}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{\sqrt{Le^2+D_{im}^2+\delta-D_{pm}}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_2	valeurs de P_1 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_3	valeurs de P_1 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_4				
	Ph. Poignet		0	0
	Ph. Proximale	$acos(\frac{Le+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{Le+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{Le+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_5	valeurs de P_4 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_6	valeurs de P_4 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_7, P_{10}				
	Ph. Poignet		90°	90°
	Ph. Proximale	0	$acos(\frac{Le+\delta-D_{im}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{Le+\delta-D_{im}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	0	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_8	valeurs de P_7 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_{11}	valeurs de P_7 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_9				
	Ph. Poignet		0	90
	Ph. Proximale	0	0	$acos(\frac{(2Le)+\delta-D_{im}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	0	0	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$



P_{12} tip	OTD	Pouce	Index	Majeur
	Ph. Poignet		0	0
	Ph. Proximale	0	$acos(\frac{Le+\delta-D_{im}}{2L_{pp}})$	$acos(\frac{Le+\delta-D_{im}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	0	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_{12} pad	valeurs de P_{12} (tip), avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_{13}	valeurs de P_{12} (tip) avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_{15} tip				
	Ph. Poignet		0	0
	Ph. Proximale	0	0	$acos(\frac{Le+\delta-D_{pm}}{2L_{pp}})$
	Ph. Distale	0	0	$acos(\frac{\delta}{2L_{pd}})$
P_{15} pad	valeurs de P_{12} (tip), avec $\delta = 0$ et $\Theta_9 = 0$			
P_{14}	valeurs de P_{15} (tip) avec $\Theta_9 = 0$			



C.3.2 Valeurs pour la main de Salisbury

P_1	Salisbury	Pouce	Index	Majeur
	Ph. Poignet	0	$acos(\frac{(\sqrt{(\frac{Le}{\cos(60^\circ)})^2 - La^2}) - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$	$acos(\frac{(\sqrt{(\frac{Le}{\cos(60^\circ)})^2 - La^2}) - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$
	Ph. Proximale	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$
	Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$
P_2	valeurs de P_1 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_3	valeurs de P_1 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_4				
	Ph. Poignet	0	0	0
	Ph. Proximale	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$
	Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$
P_5	valeurs de P_4 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_6	valeurs de P_4 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_7				
	Ph. Poignet	20°	0	0
	Ph. Proximale	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	0
	Ph. Distale	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	0
P_8	valeurs de P_7 avec $\delta = 0$ et Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_{11}	valeurs de P_7 avec Θ_7 à $\Theta_9 = 0$			
P_{10}				
	Ph. Poignet	0	$acos(\frac{Le - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$	$acos(\frac{Le - D_{im}}{2(Lp_o + Lp_p + Lp_d)})$
	Ph. Proximale	0	0	0
	Ph. Distale	0	0	0

P_{12} tip	Salisbury	Pouce	Index	Majeur
	Ph. Poignet	0	0	0
	Ph. Proximale	0	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$	$acos(\frac{Le + \delta - D_{pm}}{2Lp_p})$
	Ph. Distale	0	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$	$acos(\frac{\delta}{2Lp_d})$
P_{12} pad	valeurs de P_{12} tip avec $\delta = 0$ et $\Theta_8 = \Theta_9 = 0$			
P_{13}	valeurs de P_{12} tip avec $\Theta_8 = \Theta_9 = 0$			
P_{14}	valeurs de P_{12} tip avec $\Theta_5 = \Theta_7 = \Theta_8 = \Theta_9 = 0$ (un seul doigt)			
P_{15}	valeurs de P_{13} avec $\Theta_5 = 0$ (un seul doigt)			

