Université de Toulouse

Habilitation à diriger les recherches

présentée devant

l'université Paul Sabatier de Toulouse

par

Daniel Sidobre

le

vendredi 13 novembre 2009

Manipulation robotisée et interaction

Jury :

Président :

Raja Chatila

Rapporteurs :

Bruno Siciliano

François Pierrot

Fathi Ben Ouezdou

Examinateurs :

Véronique Perdereau

Walter Rubio

Thierry Simeon

Remerciements

Dans un monde où le culte de l'individualisme ne cesse de prospérer, je voudrais remercier tous ceux qui de près ou de plus loin m'ont permis de réaliser les travaux que je présente ici.

Un classement familial et amical de tous ceux qui m'ont fait par leur amour, leurs enseignements, leurs conseils et leur expérience serait certainement une bonne approche pour n'oublier aucun des miens, parents, grands parents, fils, sœur, frères, amis... Comme tout classement, celui-ci trouve rapidement sa limite : je ne vois pas comment classer mes amies et amis, Michèle y occupe une place à part, mais la suite se complique.

Un classement géographique serait aussi possible, il suivrait mes déménagements et voyages, de Béziers à Marseille, Clumanc, La Saurine, Villespassans, Ferrière, Saint Chinian, Courniou, Saint Pons... Ca y est, la liste explose et ma mémoire revient trop doucement pour pouvoir espérer ne pas oublier un lieu. Un lieu essentiel où vivait celui qui a pu m'inspirer la construction d'un algorithme ou d'un robot comme le battement d'une aile de papillon peut déclencher une tempête.

Un classement scientifique et académique présenterait aussi un réel intérêt pour remercier mes instituteurs et notamment Jean Gareilla, mes professeurs du collège et des lycées, les universitaires, mais j'oublierais tous ceux que j'y ai côtoyés. Et notamment tous ceux qui, par leurs questions, leur attitude, leurs remarques ou leurs mauvais coups, m'ont formé. Je crois que ce mémoire doit beaucoup à celles et ceux qui ne comprenaient pas, posaient des questions incongrues, redemandaient des explications, car c'est là, j'en suis convaincu, lorsque l'enseignant est poussé dans ses retranchements, que l'élève comprend les concepts, les démonstrations, les hypothèses et les limites.

Un classement historique de tous ceux qui ont contribué à ce travail serait légitime, il se heurte toutefois à l'oubli. Nous ne savons pas qui a inventé la roue. N'y en a t-il qu'un d'ailleurs ? Considérons la roue du robot Jido, le rôle de l'inventeur est il plus important que celui de son concepteur qui a utilisé des matériaux et techniques mis au point depuis ? De même, sans mineur, sans forgeron, sans tourneur, sans transporteur, sans commerçant, cette roue et donc ce robot ne serait pas. Il est inutile de remercier les robots qui ne sont pas encore autonomes, mais, à travers eux, je tiens à remercier tous le personnel du service informatique et instrumentation et des autres services du LAAS.

Même après tous ces classements, j'en oublie encore beaucoup, doctorants, collègues et stagiaires. Essayons d'inverser ces classements et reprenons ici au LAAS. Je remercie toutes celles et tous ceux qui quotidiennement font fonctionner ce laboratoire et qui, par leur travail, transforment notre laboratoire en un environnement fonctionnel et agréable. Pour ce sourire échangé dans le couloir de la documentation, pour cette discussion autour d'un café, pour ce séminaire pointu ou celui-ci plus technique, pour ces débats sur la recherche, le CNRS ou l'université dans la salle de conférence ou à la Sorbonne, pour ces moments autour d'un bug ou d'une nouvelle fonctionnalité, pour l'accueil à la cafétéria, pour les jardins et tout le reste, merci. Merci de m'avoir aidé quotidiennement dans le travail qui m'a conduit à écrire ce mémoire.

Aussi, je souhaite faire le vœu que cette habilitation me permette de rendre un peu à tous.

Table des matières

Introduction **1**

1 Le concept de robot manipulateur . . . 2
2 Architecture mécanique des robots manipulateurs . . . 2
2.1 Conception mécanique . . . 4
2.2 Les capteurs . . . 5
2.3 La commande . . . 5
3 L'interaction . . . 6
4 Présentation du mémoire . . . 6

Chapitre 1 Commande **7**

1.1 Planificateur temporel de trajectoires . . . 7
1.2 Les mouvements à sept segments . . . 8
1.2.1 Le plan vitesse-accélération . . . 8
1.2.2 Méthode de base . . . 9
1.2.3 Mouvement à conditions initiales et finales quelconques . . . 9
1.2.4 Mouvements en temps imposé . . . 12
1.2.5 Mouvements en ligne droite . . . 12
1.2.6 Augmentation du temps de parcours et discontinuité . . . 13
1.2.7 Mouvements à accélération nulle au début et à la fin . . . 13
1.2.8 Planificateur de chemin et trajectoire . . . 13
1.2.9 Lissage d'un chemin issue d'un planificateur . . . 14
1.2.10 Suivi de courbe . . . 15
1.2.11 Mouvements en rotation . . . 15
1.3 Mouvements souples et retour visuel . . . 17
1.3.1 Description du système . . . 18
1.3.2 Asservissement Visuel 3D . . . 19
1.3.3 Schéma de commande . . . 19
1.3.4 Localisation d'un objet et auto-calibration main/caméra ou « hand-eye » 20
1.4 Commande avec retour visuel . . . 22

1.5 Localisation et modélisation d'objet par vision 23
1.5.1 Modélisation des objets 23
1.6 positionnement des caméras 24
1.7 Commande avec retour d'effort 24
1.7.1 Identification de la masse manipulée et des efforts de contact 24
1.7.2 Commande avec retour d'effort 25
1.8 Conclusion 26
1.8.1 Limiter la dérivé du jerk 27
1.8.2 Contrôle et manipulation 27
1.8.3 Lien planification commande 27

Chapitre 2 Planification de tâches de manipulation 29

2.1 Introduction 29
2.2 Qualité d'une prise et fermeture en force 30
2.2.1 Fermeture en force 31
2.2.2 Fermeture en force dans le plan 33
2.2.3 Fermeture en force dans l'espace 34
2.2.4 Équilibre et fermeture en force 34
2.2.5 Condition de fermeture en force 36
2.2.6 Algorithmes de vérification de la fermeture en force 36
2.2.7 Calcul d'une prise optimum 38
2.2.8 Choix du critère d'optimisation 41
2.2.9 Exemple 41
2.3 Planification des prises 43
2.3.1 Inertie ou guider la recherche des prises 44
2.3.2 Décomposition des objets complexes 46
2.3.3 Développements plus récents 47
2.3.4 Choix de la prise pour effectuer une tâche de manipulation 48
2.4 Le planificateur de tâche de manipulation 49
2.4.1 Planification de mouvements 49
2.4.2 Planificateur pour des tâches de manipulation interactive 50
2.4.3 Tâche de prise et dépose d'objets 51
2.4.4 Chaînes cinématiques fermées 52
2.4.5 Tâche d'échange d'objets 53
2.4.6 Prises contraintes par la tâche 54
2.4.7 Conclusion 55

Chapitre 3 Dynamique - frottements **57**
3.1 Le simulateur dynamique . . . 57
3.1.1 Géométrie et cinématique . . . 58
3.1.2 Dynamique d'un système mécanique . . . 58
3.1.3 Evolution d'un système mécanique . . . 58
3.1.4 Les percussions . . . 59
3.1.5 Percussion frontale entre deux billes . . . 60
3.1.6 Percussion entre plusieurs corps avec frottement . . . 60
3.1.7 Percussion dans un mécanisme . . . 61
3.1.8 Liaisons avec friction . . . 62
3.2 Frottements . . . 63
3.2.1 Le scanner de force de friction . . . 63
3.2.2 Exemples de mesures avec le scanner de force de friction . . . 69
3.2.3 Conclusion . . . 73

Chapitre 4 Interaction **77**
4.1 Jido sait donner un objet . . . 78
4.1.1 Filtrage de l'information de saisie . . . 79
4.1.2 Étude des informations échangées . . . 79
4.1.3 Interaction et contact . . . 80
4.2 conclusion . . . 83

Chapitre 5 Conclusion **85**
5.1 Prospective . . . 86
5.1.1 Manipulation à deux bras . . . 86
5.1.2 Les mains artificielles . . . 87
5.1.3 Perception . . . 87
5.1.4 La commande des machines au contact de l'homme . . . 87
5.1.5 L'interaction . . . 88
5.2 Conclusion . . . 88

Bibliographie **89**

Table des figures

1 Jido apporte une bouteille 1
2 Segway RMS 100 2
3 Main Schunk SAH au bout du bras de Jido 3
4 Bras 4
5 Robot Nao 5

1.1 Plan vitesse-accélération 9
1.2 Les sept segments d'un déplacement 10
1.3 Plan vitesse-accélération : déplacement de X_0 à X_f 10
1.4 Plan vitesse-accélération : déplacement avec conditions initiales et finales quelconques, La vitesse maxi est atteinte en D. 11
1.5 Planification d'un mouvement entre trois points 14
1.6 Mouvement avec arrêt au sommet B à gauche, le sommet B est coupé au centre et dépassé à droite. 15
1.7 Scène associée à une tâche de manipulation avec les repères utilisés 18
1.8 Schéma de commande pour le bras manipulateur utilisant un schéma d'asservissement visuel 3D 20
1.9 Schéma de commande pour le bras manipulateur en utilisant un filtre de Kalman étendu (EKF) pour estimer la position de la cible 21
1.10 Mesure des efforts sur Jido 24
1.11 Résultat d'identification de la masse (m) et de la position du centre de gravité (Gx, Gy et Gz) 25
1.12 Appui puis déplacement sur la surface d'un carton. Les consignes sont en vert et les mesures en bleu. 26
1.13 Déplacement avec dérivée du jerk bornée 27

2.1 (a) Paramètres θ_1 et θ_2 pour une droite Δ_g du plan. (b) Représentation des droites dans le plan θ_1, θ_2. 33
2.2 Position des axes centraux dans le plan 34
2.3 Position des axes centraux dans l'espace (les axes centraux sont représentés par leur intersection avec une sphère de rayon donné). 35
2.4 36
2.5 Temps de calcul pour une prise à quatre doigts définissant une fermeture en force 38
2.6 Temps de calcul pour une prise à quatre doigts ne définissant pas une fermeture en force 38
2.7 Prises optimum sur des ellipsoïdes. 39

2.8 Critère d'optimisation F_{obj} en fonction du nombre d'itération pour la prise de la figure 2.7b 40
2.9 Prises optimum sur des super-quadriques. 42
2.10 Critère d'optimisation F_{obj} en fonction du nombre d'itération pour la prise de la figure 2.9b 43
2.11 In a) Scaled spaceship model, b) Grasp found for the planner c) Grasp zoom and d) Grasp zoom seen from above. The grasp is found near the mass center as it is the most logical point to see how forces act on the object 45
2.12 The figure shows a service robot in a kitchen and how the grasp planner can find a solution for an object in different situations, for example a banana on the table surrounded by obstacles and a banana inside a mug 46
2.13 Découpe d'une bouteille en deux éléments 48
2.14 a) Prise calculée pour une bouteille, le choix de la prise sur le bas du goulot est dû au critère de choix d'une prise qui favorise les prises proches du centre de gravité. b) Prise en présence d'obstacles. c) Deux prises sur une même bouteille 48
2.15 a) Décomposition d'une tasse b) Saisie de la tasse par sa anse c) Décomposition d'un verre d) Saisie du verre par son pied 49
2.16 Le modèle original est à gauche, la décomposition convexe approchée du maillage est au centre et les enveloppes convexes des parties convexes à droite. 49
2.17 Architecture modulaire pour un planificateur de manipulation interactif 51
2.18 Machine à état pour une tâche de prise et dépose d'un objet 52
2.19 Actions pour une tâche de prise et dépose d'un objet. 53
2.20 Division des systèmes en chaînes actives et passives pour les tâches de manipulation 54
2.21 Echange d'un verre 55

3.1 Le cadre vu de derrière avec les deux fibres croisées contraignant à la tige arrière du chariot. Le filament assurant la mise à la masse du chariot est visible. 64
3.2 Shéma de la suspension avec trois fibre parallèles et une orthogonale pour contraindre le chariot à un mouvement à deux degrés de liberté : la pointe de la sonde peut se déplacer dans le plan défini par les trois points d'attachement. (b) Vue du chariot avec les armatures des condensateurs. Pour donner une idée de l'échelle, la distance entre la pointe et le centre de rotation est de 30 mm et la longueur des fibres est 80 mm. 65
3.3 Schéma de l'appareil vue de dos. On voit l'actionneur unipolaire de la direction normale et l'actionneur bipolaire différentiel de la direction tangente. Le guidage précis du chariot permet d'utiliser un interféromètre pour mesurer les déplacements latéraux. 66
3.4 (a) Actionneur à peigne unipolaire. (b) Actionneur à bipolaire différentiel. 67
3.5 Déformation et chargement d'une fibre de suspension. 67
3.6 Vue de l'instrument avec le microscope au premier plan et son miroir de renvoi ainsi que l'échantillon. La pointe de la sonde à l'intérieur de la cavité du chariot peut être observée avec le microscope pour contrôler le contact entre l'échantillon et la sonde. Les deux fibres de verre de l'avant sont visibles mais partiellement cachées par le dispositif de blocage du chariot utilisé pour le montage de la sonde et le transport. 68
3.7 (a) Mesures effectuées avec la liaison immobile. (b) Vue agrandie entre les instants 10 et 12 s. (d) Spectre de puissance jusqu'à 25 Hz 69

3.8 Liaison mica/mica. (a) Réponse à une force tangentielle périodique d'une période de plus de deux secondes. (b) Un détail de la même courbe grossi environs cent fois entre les instants 1.83 et 1.85 s (mesures brutes). 71
3.9 (a) Enregistrement dans le domaine temporel d'un hystérésis à large échelle pour un même effort normal (la force tangentielle est en trait tireté, le déplacement tangentiel en trait plein). (b) Quatre boucles dans le plan déplacement-force obtenues avec la même force tangentielle, mais des efforts normaux différents. $Fc = 50$ Hz. 72
3.10 Le comportement de la liaison laisse apparaître un Hystérésis à plusieurs échelles. (a) la tension tangentielle (trait tireté) et le déplacement correspondant (trait plein). (b) Boucle d'hystérésis principale (18 nm), (c) boucle secondaire (2 nm), (d) deuxième niveau de boucle secondaire (70 pm), $F_c = 8.3$ Hz. 73
3.11 (a) et (b) Effet de la force normale sur le déplacement à deux échelles différentes. (c) Agrandissement de (a) quand la force normale devient grande. (d) La force de friction tangentielle devient petite quand le déplacement tangent est maximum en (b). $Fc = 8.3$ Hz. 74
3.12 (a) Une force tangentielle périodique est appliquée sur une liaison en acier. Au début le déplacement maximum est lisse, par exemple (b) entre les instants 27 et 30 s, le dernier maximum (c) juste avant que la liaison glisse est très actif entre les instants 37 et 40 s (mesures brutes). 75
3.13 Comparaison des domaines de travail pour les FFM, LFA, SFA et la présente réalisation du FFS 76

4.1 Jido apporte une bouteille 77
4.2 Graphiques illustrant les changements dans la force lorsque l'homme saisit l'objet que le robot lui tend. Les enregistrements correspondent à 1.28 s. La transformé de Fourier fait apparaître une nette variation des faibles fréquences (inférieures à 15 Hz). 78
4.3 Echange de Bidule 79
4.4 Vue éclatée de Bidule : en orange le capteur de force 6D, les poignées bleus sont fixée au moyens de bagues visées sur le capteur de force, le calculateur Gumstick et la carte d'acquisition sont à gauche et la batterie à droite. 80
4.5 En haut : exemple d'ondelette de Morlet, en bas : sinusoïde 80
4.6 Fonction sinus de fréquence variable j'usqu'à 500 et constante ensuite. Une fenêtre d'analyse est tracée en rouge entre les instants 200 et 400. 81
4.7 Comparaison entre une transformé de Fourier fenêtrée rapide et une transformé en ondelette. Le temps est représenté horizontalement en seconde et les fréquences sont représentée verticalement en hertz. En haut, la transformé en ondelettes. En bas, le transformée de Fourier fenêtrée. 82
4.8 Deux personnes s'échangent Bidule, ici Bidule et les deux personnes sont équipées de marqueurs pour la capture de mouvement. 83
4.9 Forces mesurées avec Bidule lors d'un échange. En haut, forces dans les directions X et Y. En bas transformée en ondelettes (horizontalement le temps en s et verticalement les fréquences en Hz) : à gauche lignes correspondant à des valeurs de coefficients et à droite représentation colorées des coefficients. 84

5.1 Projet de robot manipulateur mobile à deux bras 85
5.2 Projet de robot manipulateur mobile à deux bras du projet ASSIST 86

Introduction

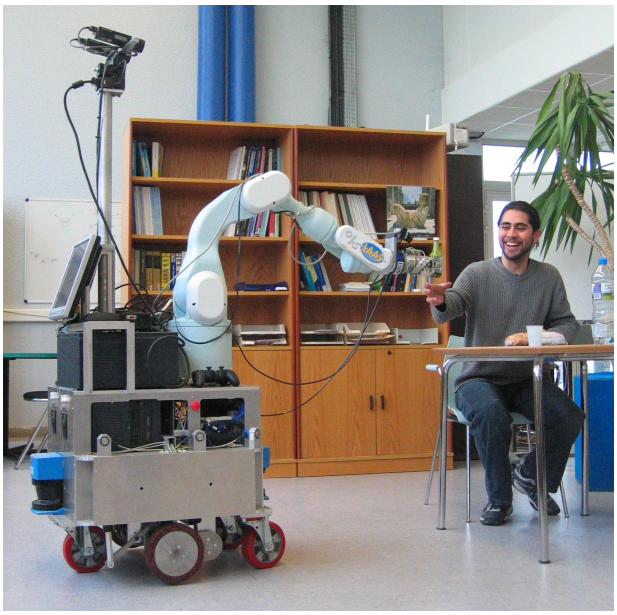


FIGURE 1 – Jido apporte une bouteille

Depuis l'origine des temps l'homme rêve de vivre plus longtemps et surtout d'utiliser ce temps pour des activités agréables. Une première étape est constituée par la découverte puis l'utilisation à grande échelle des outils : bifaces, haches, couteaux, bistouris, marteaux, charrues, crayons... La deuxième étape est liée à la mécanisation de ces outils pour exercer des forces plus importantes (roues, poulies, vis-écrou, engrenages...) ou obtenir un mouvement continu (manivelles, pompes). Ces mécanismes ont ensuite été actionnés directement par des moteurs : moulins à vents, moulins à eau, machine à vapeur, moteurs à explosion, moteurs électriques, moteurs piézoélectriques... Les mouvements ont ensuite été contrôlés par la machine elle même : machines-outils à commande numérique, pilotes automatiques en aviation, contrôle des processus...

La prochaine étape, objet principal de ce mémoire, est de faire choisir par la machine la tâche à accomplir puis de lui faire définir la manière de réaliser cette tâche et enfin de lui faire effectuer cette tâche. La contrainte essentielle est liée à l'objectif originel : aider les humains à vivre agréablement et longtemps. Les robots que nous souhaitons construire devront donc évoluer et interagir parmi nous, les humains, pour effectuer des tâches de manipulation d'objets et d'outils.

FIGURE 2 – Segway RMS 100

1 Le concept de robot manipulateur

Les premiers robots manipulateurs étaient en fait des bras manipulateurs équipés d'une commande leur permettant de répéter une trajectoire apprise.

De nos jours un robot est constitué de systèmes physiques, de programmes et de connaissances. Les systèmes physiques peuvent être classé en structure mécanique, actionneurs, capteurs, sources d'énergie, calculateurs et réseau de communication. L'architecture informatique comprend au moins 3 niveaux : le système d'exploitation de chaque calculateur, un système assurant la communication et la synchronisation de ces différents calculateurs et fournissant des outils de supervision et de développement et des programmes "utilisateurs". Les connaissances correspondent aux différents modèles du robot, aux connaissances sur l'environnement (cartes, modèles) et aux « savoir faire ».

2 Architecture mécanique des robots manipulateurs

Les robots devant évoluer parmi les humains, une question importante est de savoir s'ils doivent être à l'image de l'homme avec deux bras, deux jambes, deux mains et une tête ou plus fonctionnels. Par exemple, avec des roues, des bras, des mains et des caméras. Cette question n'a, bien sûr, pas de réponse, les deux approches vont certainement se développer en parallèle. Un lien peut probablement être établi entre ces deux approches et le fait qu'un robot ressemblant à l'homme est plus familier s'il ressemble vraiment à un humain où s'il en est relativement éloigné [Mori, 1970]. Entre les deux se trouvent les monstres.

Les japonais ont clairement choisi la voie bipède au travers de programmes qui, pour l'essentiel, visent à créer des robots-assistants compagnons. Une des applications visées concerne l'aide aux personnes âgées.

Les difficultés pour maîtriser la marche d'un robot ainsi que le coût supérieur des jambes par rapport aux roues laissent une large place pour des robots manipulateurs à roues. Dans le domaine industriel notamment où les locaux peuvent être adaptés pour accueillir les robots, les robots à roues vont se développer plus rapidement.

Du point de vue du chercheur, l'utilisation d'une plate forme instable comme les robots marcheurs ou les robots à deux roues tels que les segway (figure 2) complique le travail de mise au point des algorithmes de manipulation.

Depuis que l'industrie utilise des robots, elle les isole dans des cages pour des raisons de sécurité. Le besoin de robots pour des productions de plus petites séries croit et nécessite une présence rapprochée de l'homme pour assurer une préparation rapide et fiable de la tâche. Par exemple, le constructeur Kuka développe un bras léger et peu dangereux pour l'homme pour

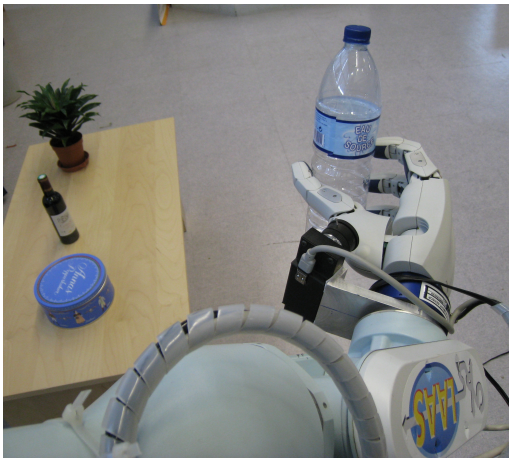


FIGURE 3 – Main Schunk SAH au bout du bras de Jido

des applications où robots et hommes se côtoieront. Ces nouveaux bras manipulateurs devront aussi être facilement déplaçables pour être rapidement productif là où une tâche est à effectuer.

Certaines tâches peuvent être réalisées avec un seul bras et un seul préhenseur, mais le plus souvent deux bras sont nécessaires. Dans le cas des applications industrielles actuelles, l'utilisation d'un seul bras par tâche est le résultat d'un long processus d'industrialisation qui a décomposé le processus en sous tâches. Ces sous tâches ont ensuite été choisies pour être réalisées par un seul bras manipulateur. En dehors de ce type de contexte particulier, la plupart des tâches nécessitent un deuxième bras.

Industriellement, les bras manipulateurs sont surtout utilisés pour des séries importantes justifiant le plus souvent le développement de préhenseurs dédiés. Certains de ces préhenseurs sont particulièrement sophistiqués avec des mécanismes déformables (compliant en anglais) pour faciliter la saisie, des dispositifs de sécurité pour limiter les surcharges, ou la possibilité de saisir un grand nombre d'objets simultanément. Les équipementiers proposent de nombreuses solutions modulaires pour concevoir et réaliser ces préhenseurs interchangeables.

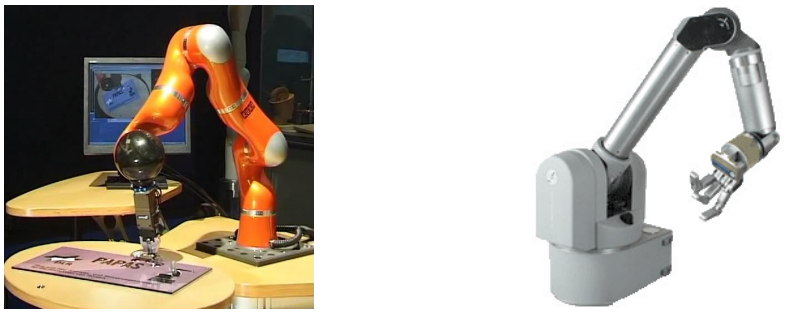
Mais, dès que la robotique s'insère dans notre environnement quotidien, les préhenseurs ne peuvent plus être adaptés à chaque objet et doivent devenir des préhenseurs universels. De ce point de vue, une école bio-inspirée, aidée par les besoins de prothèses de main, ne jure que par l'imitation de la main humaine qui serait « parfaite ».

Je suppose qu'il vous est déjà arrivé de trouver des limites à vos mains : difficulté à bien écrire, douleur lors du transport d'objet, manque de précision pour effectuer un assemblage. Sans parler de la sensibilité à la chaleur, au froid, aux produits chimiques ou de la transmission des virus et bactéries.

Une deuxième tendance vise à diminuer le nombre d'actionneurs pour diminuer les coûts et simplifier la commande. Ces préhenseurs sous-actionnés devraient aussi avoir de nombreuses applications.

Prévoir ce que seront les préhenseurs des robots de service est impossible à l'heure actuelle, mais l'utilisation de plusieurs doigts et de nombreux capteurs semble certaine.

Concernant la tête, la position des calculateurs ne nécessite pas une tête, par contre l'idée d'un *mini-bras* équipé de capteurs est très intéressante. Cette tête permet d'orienter les capteurs vers une cible et dans une moindre mesure de contourner des obstacles. Lorsque le robot est en présence d'humains, l'orientation de la tête informe sur le centre d'intérêt du robot et donc des actions qu'il effectue. De même, la communication entre humains passe beaucoup par le regard.



(a) Robot lightweight (Kuka) (b) Bras WAM (Barrett)

FIGURE 4 – Bras

Ceci nous incite à équiper nos robots de têtes destinées à la communication. Dans ce cas, un écran peut compléter avantageusement cette tête.

Toutefois, rien n'interdit de placer des capteurs (vision ou autre) ailleurs qu'au niveau de la tête. Par exemple une caméra placée dans la main pourraient mesurer la position relative de l'objet et de la main.

Maintenant que nous avons une vue générale de la machine que nous souhaitons construire, nous allons essayer de voir d'un point de vue mécanique, automatique et informatique ce que pourrait être un robot manipulateur dans l'avenir.

2.1 Conception mécanique

Les principales évolutions de la mécanique des robots et surtout des bras et préhenseurs seront dues à l'industrialisation et à l'influence des tâches que les robots devront accomplir.

Le prix des premiers préhenseurs universels à 3 doigts dépasse les 30000 euros et celui d'une main à 4 doigts est encore plus élevé. Une partie de ce prix correspond aux études et sera amortie sur des séries plus importantes après industrialisation. Mais les solutions actuelles demeureront chères : il est indispensable de proposer des solutions plus simples comme par exemple le remplacement des liaisons par roulement par des liaisons déformables [Lotti *et al.*, 2005] et le développement d'actionneurs mieux adaptés ou de capteurs plus simples.

Le principe des robots industriels, calqué sur celui de la machine-outil, est d'obtenir la précision par la rigidité du système. Ce concept donne des robots massifs et peu performants. Du point de vue robotique, l'utilisation de capteurs extéroceptifs donne la possibilité d'obtenir la précision requise par la mesure directe de la position et des efforts. Il devient alors possible d'utiliser des robots moins rigides. Ceci induit toutefois une complexification de la commande qui doit à la fois intégrer la dynamique et les capteurs extéroceptifs.

La technologie retenue pour les bras légers *Lightweight robot* de Kuka [1] (figure 4a), et les bras WAM de Barrett (figure 4b) introduit une certaine élasticité au niveau des transmissions. Dans le premier cas, ce sont des réducteurs Harmonic Drive [2] connus pour leur manque de rigidité qui sont utilisés. Dans le deuxième cas, ce sont des transmissions par câbles qui ont été retenues.

L'architecture générale conduit à un système à deux bras et deux mains monté sur une plate-forme mobile. Le robot devrait donc comporter deux axes pour la base, sept pour chaque bras et de douze à vingt pour chaque main. Soit au total un système d'au moins quarante

1. Kuka company http ://www.kuka.com/
2. Harmonic Drive company http ://www.harmonicdrive.net/

FIGURE 5 – Robot Nao

degrés de liberté auxquels il faut ajouter les mobilités de la *tête* portant les capteurs. Un robot manipulateur sera donc une machine complexe.

2.2 Les capteurs

Tout d'abord les capteurs, ils sont loin d'être opérationnels, s'il est possible, dans la littérature, de trouver beaucoup d'exemples de caméras 3D capables de mesurer la position relative de deux objets, trouver un système utilisable sur un robot mobile manipulateur à un coût raisonnable relève encore du rêve. Les problèmes d'éclairages, de vitesse de traitements, de calibration, de fiabilité des algorithmes rendent l'utilisation sur un robot réel très pénible et toujours très en deçà des espérances. Telle démonstration qui fonctionne très bien le matin, se retrouve complètement ébloui l'après-midi quand les nuages ont disparu, telle autre fonctionne très bien avec une personne mais pas avec une autre, des lunettes, des cheveux longs ou des manches de chemises colorées pouvant en être la cause.

2.3 La commande

La manipulation correspond à l'interaction entre un robot manipulateur et son environnement. L'environnement est notamment constitué d'objets, de mécanismes, de robots et d'humains. De ce point de vue, la commande en manipulation fait apparaître une particularité : sa fonction est de contrôler l'interaction entre un manipulateur et plus précisément l'objet ou l'outil manipulé et l'environnement du manipulateur.

L'interaction peut être définie en terme de positions relatives, d'efforts transmis et d'actions accomplies. Les positions et efforts correspondent plutôt à des interactions instantanées, alors que la description de la tâche est plus globale et nécessite une description de plus haut niveau. Par exemple, pour couper un fruit en deux il faut contrôler les efforts et les positions, mais la fin de la tâche correspond au moment où les deux morceaux sont complètement détachés. Ceci ne peut s'exprimer en terme de position et force relatives entre robot et pièces.

Les capteurs intrinsèques mesurent des paramètres internes du robot tels que les positions et vitesses relatives au niveau des liaisons. Les quantités extérieures au robot sont mesurées par des capteurs extrinsèques tels que caméras ou télémètres. Une caméra, par exemple, peut mesurer une position relative entre l'outil et l'environnement.

Le cas du capteur d'effort est un peu différent, placé entre le poignet et la main il mesure les forces entre ces deux éléments. Mais comme la dynamique de la main peut être déterminée à chaque instant, il est possible d'en déduire les efforts de l'environnement sur la main. Le capteur d'effort devient alors un capteur extrinsèque. Avec des bras récents dont la conception permet de mesurer les efforts aux niveaux des actionneurs, on retrouve la même mesure de la

force d'interaction à partir de mesure interne. Cette fois il faut un modèle dynamique du bras. Les résultats obtenus avec le bras léger de Kuka dans le cadre du projet européen PHRIENDS permettent de construire un robot moins dangereux car déterminant les efforts extérieur sur tout le bras, il peut s'arrêter au contact d'un obstacle.

Ici encore nous ne faisons qu'entrevoir à quoi pourra ressembler la commande des robots manipulateurs. Cet exemple d'utilisation de capteurs d'efforts à la fois pour la sécurité, mais aussi pour le contrôle d'un effort de contact, illustre la complexité et la multiplicité des fonctions à assurer. Dans ce cas, seul les capteurs d'efforts sont utilisés, ce qui limite la vitesse du manipulateur. L'utilisation de capteurs de vision et/ou de télémètres permettrait d'assurer qu'il n'y pas d'obstacle proche du manipulateur et que ce dernier peut donc aller plus vite. Malheureusement, les capteurs de vision posent encore de nombreux problèmes pour être exploités efficacement à faible coût.

Pour conclure, disons que la commande sera complexe et utilisera les retours en force et en vision au sens large.

3 L'interaction

Les robots devront interagir entre eux et avec les humains. De nombreux concept de robots manipulateurs vont se développer : des robots ludiques comme le robot NAO (Voir figure 5) de l'entreprise Aldebaran Robotics [3], des robots spécialisés qui seront plutôt des machines, des robots de services personnels et des robots de service industriel.

L'interaction est un problème central car elle regroupe les problèmes sociaux liés à la place de la machine et à leur acceptabilité. Elle représente aussi de nombreux défis pour comprendre les besoins des hommes et les réaliser. Elle se décline en de nombreuses variantes suivant la nature des humains. En présence de professionnels, pour des robots de service industriel par exemple, l'homme pourra apprendre à utiliser le robot et tous deux, homme et robot, connaîtront le but commun de production. Dans ce cas, des collaborations complexes pourront être développées. Dans le cas d'un robot de service personnel, l'interaction devra être beaucoup plus intuitive.

4 Présentation du mémoire

Dans les chapitres suivants, nous allons présenter nos travaux de recherches en les présentant par thèmes : la commande, la planification de tâche de manipulation, la dynamique et les frottements et enfin l'interaction. Nous essayerons ensuite de conclure en traçant quelques perspectives.

3. Entreprise Aldebaran Robotics http ://www.aldebaran-robotics.com/

1

Commande

La commande des bras manipulateurs, même restreint à la robotique de service, est un vaste domaine. L'objectif de ce chapitre se limite à présenter les travaux que nous avons effectués.

Dans la première partie, nous présentons un planificateur de mouvement souples développé pour assurer la sécurité et le confort des hommes qui devront cohabiter ou interagir avec les robots. Après une présentation détaillée de ce planificateur, nous présentons son utilisation en planification et à l'intérieur des boucles de commande.

Dans la deuxième partie, nous présenterons quelques résultats en commande avec retour visuel et retour en force.

1.1 Planificateur temporel de trajectoires

Les mouvements souples que nous proposons ici sont constitués par des suites de cubiques particulières. Ces cubiques sont associées à des lois de parcours qui définissent des trajectoires. Ils fournissent une piste pour construire des planificateurs de trajectoires à partir des planificateurs de chemins.

Plusieurs idées nous ont conduit à développer ces trajectoires.

En observant les mouvements humains, Flash et Hogan [Flash and Hogan, 1985] ont proposé de contrôler le jerk pour obtenir des mouvements souples qui imitent les mouvements humains. Sur le plan de la sécurité et du confort des utilisateurs, les mouvements souples apportent une réponse intéressante. La limitation de la vitesse et donc de l'énergie cinétique permet de limiter la gravité des blessures. La limitation de l'accélération et du jerk rend les mouvements du robot prévisibles et augmente le confort des utilisateurs.

Du point de vue commande aussi, les mouvements souples apportent des possibilités nouvelles en permettant d'aller au delà de l'étude de convergence locale par un calcul complet du mouvement à effectuer à chaque instant. Imaginons le cas où le mobile doit être amené en X_f avec la vitesse V_f à partir de la situation X_f et $V_f - \varepsilon$. C'est à dire que le mobile se trouve au point désiré mais avec une vitesse légèrement plus faible. Le mobile doit donc ralentir, s'arrêter, repartir en arrière et réaccélérer pour pouvoir atteindre l'état souhaité. Le mouvement souple donne directement la solution. Comme le temps est pris en compte, nous espérons pouvoir plus facilement traiter des commandes ayant des constantes de temps très différentes comme la vidéo et les capteurs de forces.

Dans le domaine industriel aussi, il est bien connu que le contrôle du jerk permet de diminuer l'usure et d'améliorer la durée de vie et les performances des machines. L'usinage des surfaces

paramétriques telles que les NURBS [4] nécessitent des contrôleurs plus performants capables de minimiser l'erreur de positionnement par rapport à la courbe suivie et de contrôler la vitesse d'avance de l'outil [Mohan *et al.*, 2008, Yong and Narayanaswami, 2003].

L'amélioration de la précision d'usinage et de l'état de surface passe par un meilleur contrôle de la vitesse et donc de l'accélération et du jerk. De nombreux travaux sont conduits pour améliorer l'usinage de ces surfaces.

Nous allons présenter ces mouvements souples dans le cas unidimensionnel, puis nous étendrons l'étude aux mouvements multidimensionnels et aux cas particuliers du mouvement cartésien. Pour une présentation plus détaillé le lecteur peut se reporter aux travaux d'Ignacio Herrera-Aguilar et de Xavier Broquère [Herrera-Aguilar, 2007, Broquere *et al.*, 2008].

1.2 Les mouvements à sept segments

L'utilisation de fonctions polynomiales ou splines pour décrire la trajectoire d'un robot est bien connue [Khalil, 2002]. L'idée de base de l'approche que nous présentons ici a été introduite par Castain et Paul dans [Castain and Paul, 1984], ils utilisent six segments de cubiques et une borne pour l'accélération. Liu dans [Liu, 2002] introduit la méthode de base avec sept segments cubiques pour la génération des mouvements d'un servomoteur dans un seul sens en utilisant des contraintes sur le jerk, l'accélération et la vitesse. Macfarlane et Croft dans [Macfarlane et al., 2003] proposent une méthode plus générale utilisant 7 segments quintiques.

Notre contexte applicatif est relatif au mouvement des machines en présence d'humains. Les mouvements de ces machines doivent respecter des contraintes d'acceptabilités et de sécurité. Ces contraintes se traduisent par des limites sur le jerk, l'accélération et la vitesse. La solution que nous proposons est bien adaptée à ce contexte. Elle est optimale en temps par rapport aux contraintes. Elle permet un calcul direct. De nombreuses autres approches sont basées sur une minimisation [Engelbrecht, 2001] et ont des objectifs différents comme l'explication du mouvement des mammifères où la reproduction du mouvement humain.

Nous présentons d'abord la méthode de base qui correspond au déplacement entre deux positions à l'arrêt.

1.2.1 Le plan vitesse-accélération

Les mouvements souples qui sont bornés en jerk, accélération et vitesse définissent un sous ensemble des mouvements qu'il est intéressant de représenter dans le plan vitesse-accélération (figure1.1). Cette représentation permet de visualiser les caractéristiques de ces déplacements :

- vitesse minimum $V_{\min}$ à gauche et maximum $V_{\max}$ à droite ;
- accélération maximum $A_{\max}$ en haut et minimum $A_{\min}$ en bas ;
- le point central A représente les états stationnaires où la vitesse et l'accélération sont nulles et pour lesquels la position reste constante ;
- l'arc de parabole de droite CDE correspond à une évolution à jerk minimum qui fait évoluer le système de l'accélération maximale à l'accélération minimale. Cette courbe est donc orientée. De même la courbe de gauche HIJ correspond à une évolution à jerk maximal ;
- le segment de droite horizontal IAD correspond aux évolutions à accélération nulle, c'est à dire à vitesse constante. En ces points, le système peut évoluer indéfiniment pour effectuer

4. Non-Uniform Rational B-Splines, ces fonctions s'imposent pour décrire les surfaces au niveau des système de conception assisté par ordinateur (CAO ou CAD en anglais).

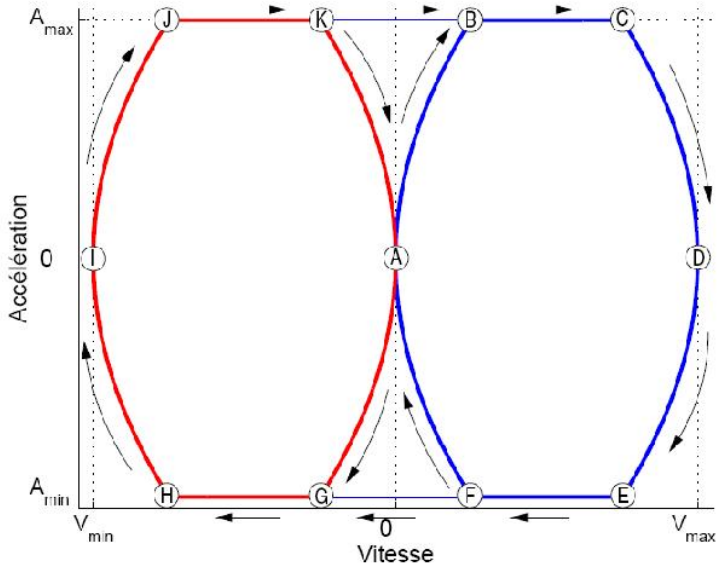


FIGURE 1.1 – Plan vitesse-accélération

un déplacement de longueur quelconque ;
- les points qui ne sont pas sur ce segment correspondent à des états évolutifs. Par exemple, à partir du point C la seule évolution possible est un mouvement à jerk minimal pour faire diminuer l'accélération et faire évoluer la vitesse vers la vitesse maximale.
- les mouvements qui respectent les contraintes du mouvement souples restent à l'intérieur de ce diagramme.

1.2.2 Méthode de base

Considérons un déplacement unidirectionnel d'une position initiale X_0 à une position finale X_f satisfaisant les contraintes du mouvement souple optimum. À chaque instant, soit le jerk, soit l'accélération soit la vitesse est saturé.

La figure 1.2 montre l'évolution de la position, de la vitesse, de l'accélération et du jerk au cours d'un tel mouvement. La figure représente un déplacement relativement long qui permet au mobile d'atteindre la vitesse maximale $V_{\max}$.

Ce déplacement peut aussi être représenté sur un diagramme vitesse-accélération (figure 1.3) qui fait mieux apparaître les limites du mouvements. De T_0 à T_1, déplacement à jerk maximal le long d'une parabole. De T_1 à T_2, déplacement à accélération maximale. De T_2 à T_3, déplacement à jerk minimal pour atteindre la vitesse maximum. De T_3 à T_4, déplacement à vitesse maximale. Ensuite on a un mouvement d'arrêt symétrique du mouvement d'accélération avec un mouvement à jerk minimal de T_4 à T_5, un mouvement à accélération minimale de T_5 à T_6 et enfin un mouvement à jerk maximal de T_6 à T_7.

1.2.3 Mouvement à conditions initiales et finales quelconques

Considérons un mouvement défini par des conditions initiales et finales quelconques :

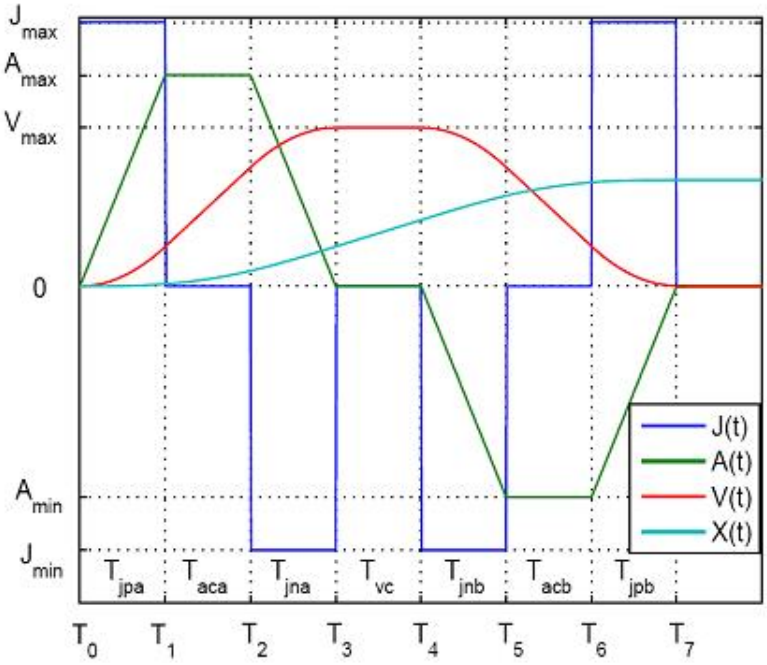


FIGURE 1.2 – Les sept segments d'un déplacement

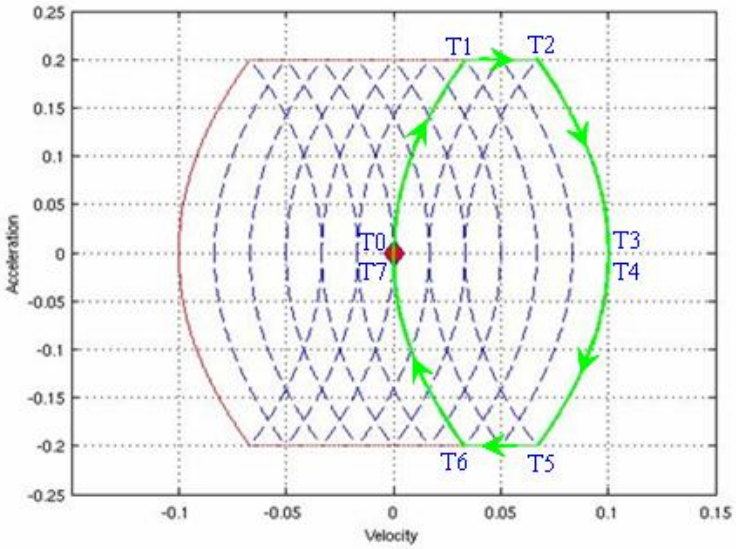


FIGURE 1.3 – Plan vitesse-accélération : déplacement de X_0 à X_f

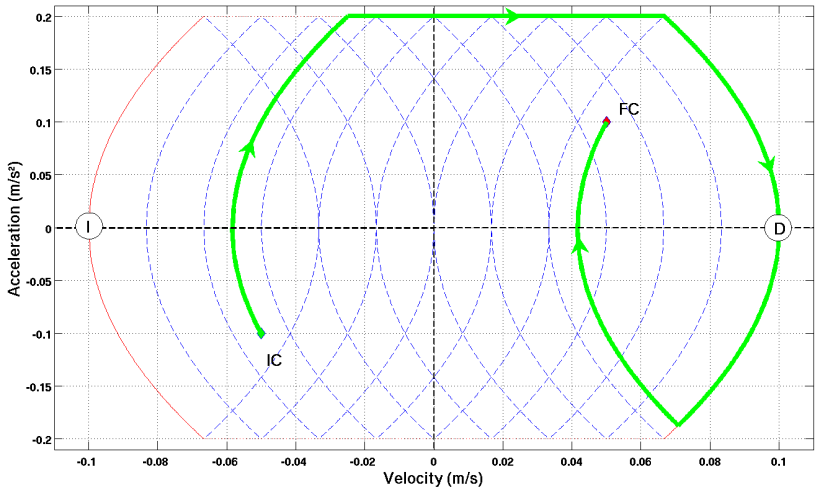


FIGURE 1.4 – Plan vitesse-accélération : déplacement avec conditions initiales et finales quelconques, La vitesse maxi est atteinte en D.

$$\begin{array}{ll} A(T_0) = A_0 & A(T_f) = A_f \\ V(T_0) = V_0 & V(T_f) = V_f \\ X(T_0) = X_0 & X(T_f) = X_f \end{array}$$

T_0 et T_f représentent les instants initial et final du déplacement, $A(t)$, $V(t)$ et $X(t)$ représentent respectivement les accélérations, vitesses et positions en fonction du temps t.

Si le mouvement est optimal, alors à chaque instant au moins une contrainte du mouvement est saturée. A partir de cette propriété, Ignacio Herrera-Aguilar a montré qu'un déplacement optimal comporte au plus sept déplacements élémentaires qui saturent l'une des contraintes.

La démonstration repose sur la remarque que depuis n'importe quel état du diagramme vitesse-accélération on peut atteindre les points I et D par au plus 3 déplacements élémentaires. De même, n'importe quel état du diagramme peut être atteint à partir des points I et D par au plus 3 déplacement élémentaires.

On obtient alors les deux types de parcours possibles à sept segments :

départ à jerk maximal	**départ à jerk minimal**
1. jerk maximal	1. jerk minimal
2. accélération maximale	2. accélération minimal
3. jerk minimal	3. jerk maximal
4. vitesse maximale (point D)	4. vitesse minimale (point I)
5. jerk minimal	5. jerk maximal
6. accélération minimale	6. accélération maximale
7. jerk maximal	7. jerk minimal

Il existe un troisième type de mouvement qui correspond à un mouvement qui commence sur l'un des deux parcours précédents puis commute sur le deuxième type de parcours en un point commun. En fait ce parcours hybride n'est possible que pour une longueur de déplacement particulière que nous allons noter l_c.

On peut alors montrer que pour un déplacement de longueur inférieure à l_c, la solution optimale correspond à un parcours avec départ à jerk minimal. De même pour un déplacement

de longueur supérieure à l_c, la solution optimale correspond à un parcours avec départ à jerk maximal.

Le calcul complet des solutions optimales a été effectué par Xavier Broquère pendant son stage de master [Broquère, 2007]. Nous disposons maintenant d'une fonction écrite en langage C qui permet de calculer directement le mouvement optimal en sept segments pour un mouvement entre deux situations quelconques.

La première étape du calcul consiste à calculer la longueur critique l_c. Si la longueur de déplacement correspond à cette longueur, le calcul est terminé. Si la distance à parcourir est inférieure à la distance critique, on se ramène au cas positif en considérant le problème symétrique définie par les opposés des positions, vitesses et accélérations. L'algorithme pour le cas positif est présenté dans [Broquère, 2008].

Le cas le plus difficile est celui où le chemin est définie par trois paraboles qui s'intersectent. La solution correspond alors à l'une des racines d'un polynôme de degré 6. Nous utilisons la méthode itérative de Newton-Raphson pour calculer cette racine.

L'algorithme fait apparaître une quarantaine de cas que nous avons résolu un par un en utilisant des outils de calculs symboliques.

1.2.4 Mouvements en temps imposé

On ne désire pas toujours effectuer un mouvement en temps minimal. Par exemple, pour effectuer un déplacement en temps minimal sur une ligne droite, l'un des axes va effectuer le déplacement en temps minimal et les autres axes devront chacun effectuer leur déplacement dans ce même temps. De même, pour un robot manipulateur constitué d'une base, de deux bras et de deux mains, la synchronisation des différents éléments nécessite de maîtriser le temps de parcours des trajectoires.

En général, il existe une très grande infinité de solutions, même en conservant le concept des sept cubiques. Nous présentons dans un premier temps la solution pour le cas simple du mouvement en ligne droite. Nous présentons ensuite une solution pour les cas où l'accélération est nulle au début et à la fin du mouvement en temps imposé.

1.2.5 Mouvements en ligne droite

Le mouvement est obtenu par la combinaison linéaire du mouvement des axes. Soit la direction de déplacement définie par le vecteur $n = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i n_i$ où $\sum_{i=1}^{N} \alpha_i^2 = 1$. Les vecteurs n_i sont les N vecteurs directeurs unitaires de l'espace considéré. Le mouvement est alors entièrement définie par les instants de commutations qui sont identiques pour tous les axes et par les différents jerks reliés linéairement par $J_{iM} = \alpha_i J_{\max}$. $J_{\max}$ correspond au jerk maximum sur la droite.

Le mouvement optimal est alors directement obtenu par :

$$J_{\max} = \min_{1 \leqslant i \leqslant N} \frac{1}{\alpha_i} J_{iM} \tag{1.1}$$

$$A_{\max} = \min_{1 \leqslant i \leqslant N} \frac{1}{\alpha_i} A_{iM} \tag{1.2}$$

$$V_{\max} = \min_{1 \leqslant i \leqslant N} \frac{1}{\alpha_i} V_{iM} \tag{1.3}$$

Pour chaque segment, l'une des fonctions vitesse, accélération ou jerk de l'un des axes est

saturée. Les autres se trouvent à l'intérieur de leur domaine de validité. Cette technique de calcul peut aussi être employée dans l'espace articulaire.

1.2.6 Augmentation du temps de parcours et discontinuité

Considérons un cas simple, un déplacement effectué à vitesse $V_{\max}$ durant un temps T entre deux points relativement proches x_0 et x_f. Nous souhaitons étudier le comportement du système lorsque l'on augmente le temps de parcours T.

Pour une faible augmentation du temps de parcours, le système décélère puis réaccélère. Si la distance entre x_0 et x_f est inférieure à la distance nécessaire pour arrêter le système et le ramener à $V_{\max}$ alors il existe un seuil à partir duquel apparaît une discontinuité. Au delà de ce seuil, le mobile est obligé de s'arrêter, revenir en arrière puis réaccélérer pour atteindre la vitesse finale $v_{\max}$.

Ce type de discontinuité pose de nombreux problèmes pour effectuer des déplacements en temps imposé. Il existe toutefois plusieurs classes de mouvements qui ne présentent pas ces problèmes. C'est par exemple le cas du problème élémentaire où les conditions initiales et finales correspondent à l'arrêt du mobile. Il en est de même si le déplacement est de longueur supérieure à la distance nécessaire pour, à partir de l'arrêt, atteindre la vitesse maximum et s'arrêter à nouveau. Haschke, dans [Haschke *et al.*, 2008], utilise uniquement des mouvements qui vont jusqu'à l'arrêt pour replanifier en temps réel la trajectoire à partir de l'état instantané du système.

Malheureusement ces cas particuliers ne permettent pas de traiter de manière satisfaisante les problèmes de suivi de trajectoire, de poursuite d'une cible mobile ou d'interaction avec des humains.

Nous allons maintenant voir comment utiliser ces résultats pour l'étude des mouvements à accélération nulle au début et à la fin.

1.2.7 Mouvements à accélération nulle au début et à la fin

Considérons les mouvements définis par une accélération nulle au début et à la fin. Ils sont définis par :

$$\begin{array}{cc} A(T_0) = 0 & A(T_f) = O \\ V(T_0) = V_0 & V(T_f) = V_f \\ X(T_0) = X_0 & X(T_f) = X_f \end{array}$$

Nous souhaitons que le mobile effectue ce déplacement dans un temps $T_c > T_{\min}$. $T_{\min}$ est le temps minimum obtenu par l'algorithme du paragraphe 1.2.3.

Nous avons vu au paragraphe précédent qu'il peut exister un intervalle pour lequel il n'existe pas de solutions. Nous pouvons aussi déterminer un temps T_a pour lequel le mobile a le temps de s'arrêter. Au delà de cette durée T_a, il existe toujours au moins la solution qui consiste à augmenter le temps d'arrêt.

Notons T_l le temps limite pour lequel apparaît la discontinuité qui interdit de trouver une solution en diminuant la vitesse et impose d'atteindre l'arrêt pour revenir en arrière.

Nous pouvons trouver une solution de parcours sur l'axe pour un temps $T_c \in [T_{\min}, T_l] \cup [T_a, \infty[$.

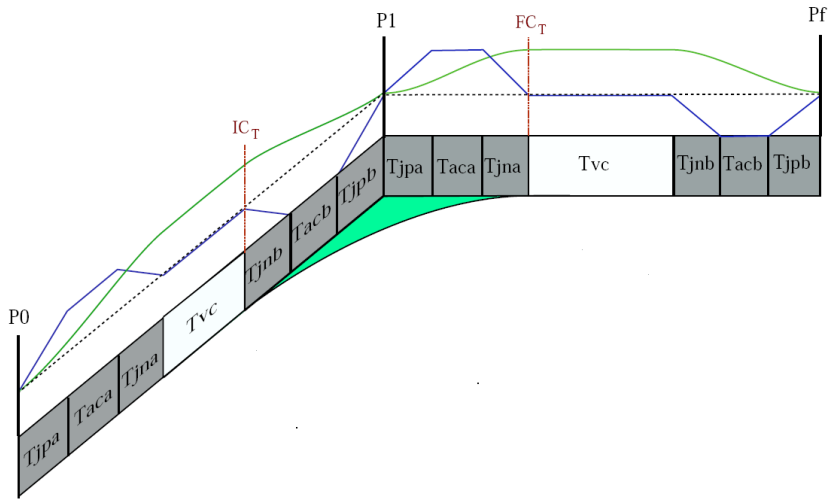


FIGURE 1.5 – Planification d'un mouvement entre trois points

1.2.8 Planificateur de chemin et trajectoire

Les recherches dans le domaine de la planification de chemin ont atteint une très grande maturité [Kavraki and LaValle, 2008]. De même les techniques de commandes des systèmes mécaniques permettent de contrôler les mouvements des robots dans de nombreuses situations [Wankyun Chung and Hsu, 2008]. Comme un chemin ne définit que la géométrie du déplacement à effectuer, il est nécessaire de lui ajouter une loi d'évolution temporelle pour obtenir une trajectoire sur laquelle le robot peut être contrôlé.

La recherche d'une trajectoire peut être effectuée en deux étapes : la recherche d'une ligne brisée définie par une suite de points, puis la synthèse d'un chemin respectant des contraintes de dérivabilité et d'une loi d'évolution temporelle. Une autre solution consiste à construire un arbre d'accessibilité de proche en proche, les arcs correspondant à des trajectoires respectant les contraintes.

Les mouvements souples que nous proposons, définis par des suites de cubiques limitant le jerk, l'accélération et la vitesse permettent de vérifier les contraintes cinématiques directement. La résolution du problème est alors ramené à la recherche d'un chemin sous la forme de courbes particulières. Ces courbes sont définis par une suite de points et les bornes en jerk, accélération et vitesse.

Parmi les diverses stratégies possibles, nous avons développé une approche de lissage autour de la ligne brisée fournie par le planificateur. Cette ligne brisée, solution du planificateur de chemin, définit un mouvement souple de très mauvaise qualité car il nécessite l'arrêt du mouvement en chaque sommet. Nous proposons de rechercher autour de ce chemin initial des trajectoires sans collision plus efficaces.

Nous présentons cette approche dans le paragraphe suivant.

1.2.9 Lissage d'un chemin issue d'un planificateur

Considérons la sortie d'un planificateur de mouvements constituée d'une suite de mouvements en ligne droite. Selon les limites des mouvements souples, pour parcourir ce chemin, le mobile doit s'arrêter en chacun des sommets de la ligne brisée. Considérons deux segments consécutifs (voir figure 1.5, la partie centrale de chacun de ces segments est parcourue à vitesse constante.

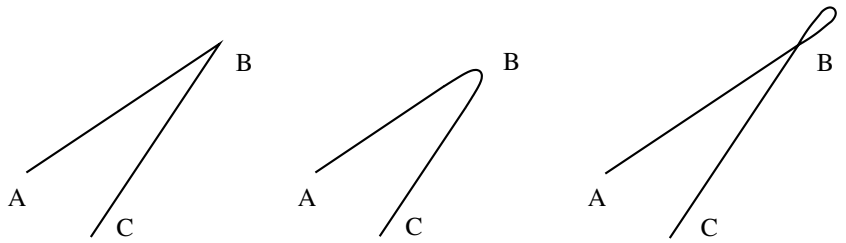


FIGURE 1.6 – Mouvement avec arrêt au sommet B à gauche, le sommet B est coupé au centre et dépassé à droite.

Considérons le point IC_T qui est le dernier point à vitesse constante du premier segment et le point FC_T qui est le premier point à vitesse constante du deuxième segment, nous pouvons rejoindre ces deux segments par un mouvement souple optimal. Ceci revient à couper le virage au point $P1$. Les conditions initiales et finales du mouvement sont définies par l'état du système aux points IC_T et FC_T.

Comme l'accélération est nulle en IC_T et FC_T nous pouvons appliquer la procédure de calcul définie en 1.2.7 pour chaque axe. Nous choisissons ensuite le plus petit temps compatible avec tous les axes pour définir la trajectoire.

Si ce chemin obtenu après lissage ne comporte pas de collision, il définit une solution.

Dans le cas où le lissage d'un sommet engendre une collision, de nombreuses stratégies sont possibles : utiliser la trajectoire initiale, rechercher des points de passage dans le voisinage du sommet ou imposer une vitesse de passage au sommet par exemples.

Nous avons commencé à explorer ces stratégies très prometteuses. Beaucoup de travail reste à faire pour traiter de façon satisfaisante l'ensemble des situations. La démarche proposée, calcul d'un chemin brisé puis lissage, ne fonctionne que si la vitesse maximum est atteinte. Ce qui correspond à des segments longs et donc à un espace peu encombré. Si les segments sont courts, il faut relâcher la contrainte de suivi des segments de droites et s'appuyer sur les points pour construire une trajectoire constituée de mouvements souples.

La continuité de l'approche depuis la planification du mouvement que nous venons d'évoquer jusqu'à la commande du système doit nous inciter à poursuivre ces travaux.

1.2.10 Suivi de courbe

Pour de nombreuses applications comme la manipulation d'un outil, la maîtrise de la courbe réalisée est importante. Le problème consiste alors à trouver une approximation aussi précise que nécessaire de la courbe par des suites de segments de mouvements souples. Très souvent ce problème n'admet pas de solution satisfaisante.

Les contraintes géométriques et cinématiques ne sont pas toujours compatibles. Par exemple, dans le cas d'une courbe définie par une ligne brisée, il est impossible de suivre la courbe avec une vitesse non nulle au niveau des sommets. Suivant l'application, il peut être préférable de respecter la géométrie ou de respecter une condition de parcours à vitesse constante. Dans le premier cas, la vitesse de parcours varie et s'annule au niveau des sommets. Dans le deuxième cas, la courbe est modifiée au niveau des sommets, soit en coupant les sommets (figure 1.6), soit en effectuant une boucle externe.

La prise en compte de ces contraintes géométriques et cinématiques dès l'étape de planification semble une meilleure approche. Lorsque le chemin est fortement contraint comme dans le cas de l'usinage de surfaces, cette approche pourrait être mise à profit pour construire un système

complet et homogène allant du calcul des trajectoires à leur réalisation sur les machines.

1.2.11 Mouvements en rotation

Les rotations posent de nombreux problèmes dont les principaux sont :
- il n'existe pas de formalisme mathématique unique adapté au traitement de tous les problèmes relatifs aux rotations ;
- les métriques de l'espace des déplacements sont définies à l'aide d'un facteur d'échelle liant rotation et translation ;
- l'interpolation d'un mouvement entre 3 orientations est relativement délicate.

Représentation des rotations

Tout d'abord il faut différentier deux cas de rotations spatiales :
- les systèmes qui reviennent dans leur état initial après avoir effectué un mouvement d'un tour ;
- les systèmes qui ne reviennent pas à leur état initial après avoir effectué un mouvement d'un tour.

Parmi les systèmes qui reviennent à leur état initial on peut citer les rotors de machines, mais la plupart du temps les systèmes ne reviennent pas à leur état initial. L'association d'un mouvement de translation au mouvement de rotation (système vis-écrou, roues, vrille d'un avion...) fait que le système global ne revient pas dans son état initial après un tour. Il en est de même pour les systèmes qui sont constitués d'un objet rigide relié par un fil à l'élément de référence (combiné téléphonique, appareils électriques branchés sur un réseau électrique de distribution...).

Représentation des rotations unidirectionnelles : il existe deux représentations des rotations : l'angle et les cosinus directeurs. Ces derniers sont plus facilement manipulés sous la forme d'un nombre complexe unitaire (a + i b). Les angles sont mesurés en radian même si beaucoup utilisent encore le degré égal à $\pi/180$ radian. La représentation par les cosinus directeurs permet de représenter les systèmes qui retrouvent leur position initiale après un tour. L'angle permet de représenter des rotations de plusieurs tours.

Représentation des rotations spatiales : trois représentations des rotations sont utiles : les quaternions, les matrices de passages et la représentation vecteur plus angle.

Il existe d'autres représentations, nous ne les évoqueront pas ici car elles peuvent se ramener aux représentations présentées et posent encore plus de difficultés.

Les quaternions : les quaternions unitaires permettent de représenter les rotations dans l'espace et surtout d'effectuer simplement et efficacement la plupart des calculs.

La représentation la plus intéressante est composé d'un réel associé à la partie réelle et d'un vecteur de dimension trois associé à la partie imaginaire : $q = u + i\ w_x + j\ w_y + k\ w_z = u + w$. Les calculs sur les quaternions sont très performants sauf pour le calcul des translations induites.

Les quaternions sont abstraits, il est très difficile d'interpréter un quaternion directement. Un quaternion et son quaternion opposé représentent la même rotation, ce qui introduit une difficulté importante.

Les matrices de rotation : les colonnes de la matrice représentent les vecteurs directeurs d'un repère exprimé dans l'autre repère. Les colonnes de ces matrices sont très facile à interpréter surtout avec un peu d'habitude.

Les matrices de rotation constituent aussi la représention la plus adaptés aux calculs du déplacement des points.

Vecteur plus angle : Une rotation de l'angle autour de l'axe amène un repère de la position initiale à la position finale.

Cette représentation permet de représenter des rotations de plusieurs tours.

Une variante intéressante consiste à utiliser un vecteur dont la norme est égale à l'angle. Cette dernière représentation utilise 3 variables.

La représentation par un vecteur et un angle est très proche de la représentation par un quaternion unitaire. Le vecteur et l'angle s'obtiennent très facilement à partir du quaternion. Si $q = u + i\ w_x + j\ w_y + k\ w_z$, l'angle est défini par $a = \cos^{-1}(2 \times u)$ et l'axe par $(w_x/s\ \ w_y/s\ \ w_z/s)^T$ où $s = sin(a)$.

Interpolation des rotations

En utilisant la représentation vecteur plus angle et, à condition de choisir comme référentiel initial la position de départ, l'interpolation d'une rotation est évidente.

Soit R_1 un repère représentant l'orientation initiale et R_2 un repère représentant l'orientation finale. Soit v le vecteur et a l'angle représentant la rotation de R_1 à R_2 exprimés dans R_1. L'interpolation de la rotation est : $t \times a \times v$ ou t représente la variable d'interpolation ($0 \leqslant t \leqslant 1$).

Pour obtenir la matrice de rotation $M_{R_0R_t}$ d'un repère R_0 à un repère R_t il suffit de :

- transformer la représentation vecteur plus angle en un quaternion q_t ;
- faire le produit du quaternion q_t par le quaternion q_{01} définissant l'orientation de R_1 dans R_0 : $q_{0t} = q_{01} \times q_t$;
- calculer la matrice de rotation associée au quaternion q_{0t}.

Dans le cas de rotations d'angle inférieur à 2π, on retrouve l'interpolation SLERP (spherical linear interpolation) [Dam *et al.*, 1998, Kim *et al.*, 1995].

L'interpolation d'un mouvement de rotation autour d'un axe quelconque de l'espace est donc assez simple. Dans le paragraphe suivant, nous allons étudier les interpolations entre 3 orientations.

Interpolation entre 3 orientations

Supposons maintenant qu'après un premier mouvement de rotation de R_1 à R_2, nous souhaitions en effectuer un deuxième pour atteindre l'orientation du repère R_3.

Si nous appliquons un mouvement souple sur chacun de ces deux déplacements, le mobile s'arrête en R_2.

Nous proposons d'appliquer la même démarche que dans la cas des translations mais en utilisant la représentation des rotations par un vecteur de module égal à l'angle. Pour des rotations relativement petites ($< 1/4$ de tour) nous obtenons des résultats très satisfaisants. Comme pour les translations, l'interpolation entre deux points est très bien définie, mais il existe une infinité de solutions pour interpoler 3 points. Notre approche permet d'obtenir simplement un grand nombre de solutions passant ou non par le point intermédiaire.

1.3 Mouvements souples et retour visuel

Ce paragraphe présente essentiellement les résultats que nous avons obtenu avec Ignacio Herrera-Aguilar dans le domaine de la commande avec retour visuel. Nous nous sommes placés dans le contexte de la robotique de service et avons considéré la tâche canonique de manipulation suivante :

1. le système de vision détermine la position de l'objet et la position de l'homme par rapport au robot ;
2. le système de planification de saisie choisit la position de saisi de l'objet et planifie le chemin à suivre ;
3. un système de génération de trajectoire calcule la loi de mouvement pour réaliser la tâche ;
4. une boucle d'asservissement réalise le suivi de cette trajectoire ;
5. le système de planification détermine le chemin pour apporter l'objet à l'homme ;
6. le système de génération de mouvement calcule cette nouvelle trajectoire ;
7. le boucle d'asservissement exécute cette trajectoire et donne l'objet à l'homme.

Selon la stratégie précédente, la vision est seulement utilisée dans la première étape. Par la suite, le robot exécute des mouvements en aveugle. Plusieurs hypothèses peu réalistes sont nécessaires pour réaliser des tâches suivant ce schéma : le scène est statique ; le modèle du bras manipulateur, celui de l'objet et la calibration du système de vision sont de très bonne qualité. La présence de l'homme rend caduque toute tentative de s'approcher de ces hypothèses.

Nous avons proposé des schémas de commande capables de gérer l'information visuelle pour accomplir de telles tâches de robotique de service.

1.3.1 Description du système

Le modèle de système robotique pour réaliser cette tâche est présentée sur la figure 1.7. Ce modèle repose sur la définition de repères et des transformations qui les lient.

Définitions des repères :

$\mathcal{R}_W$: le repère du monde.

$\mathcal{R}_B$: repère lié à la base du bras manipulateur.

$\mathcal{R}_P$: repère lié au poignet du bras manipulateur.

$\mathcal{R}_C$: repère lié à la caméra.

$\mathcal{R}_{OT}$: repère lié à l'organe terminal, dans notre cas particulier il est aligné avec le repère $\mathcal{R}_P$.

$\mathcal{R}_o$: repère lié à l'origine de l'objet. Ce repère est défini par le modèle de l'objet.

$\mathcal{R}_p$: repère lié à la position de prise définie par l'algorithme de planification de saisie.

Un planificateur de mouvement produit le chemin que le robot doit réaliser pour déplacer l'organe terminal depuis sa situation courante vers la situation de prise. Le calcul du chemin est effectué par les techniques proposées par Efrain Lopez-Damian (paragraphe 2.4 page 49). Le chemin est défini par une ligne brisée. A partir de ce chemin, le générateur de mouvements souples que nous avons utilisé pour ce travail permet de calculer une trajectoire à partir de la position courante et du point suivant à atteindre. Au lieu d'arrêter le mobile en chaque point, le système commute pour viser le point suivant à partir de l'instant où il devrait entrer en phase de décélération.

Avec cette stratégie, le mobile ne suit pas le chemin planifié de manière satisfaisante. Ceci a motivé les développements du planificateur souple et son intégration dans le planificateur de chemin.

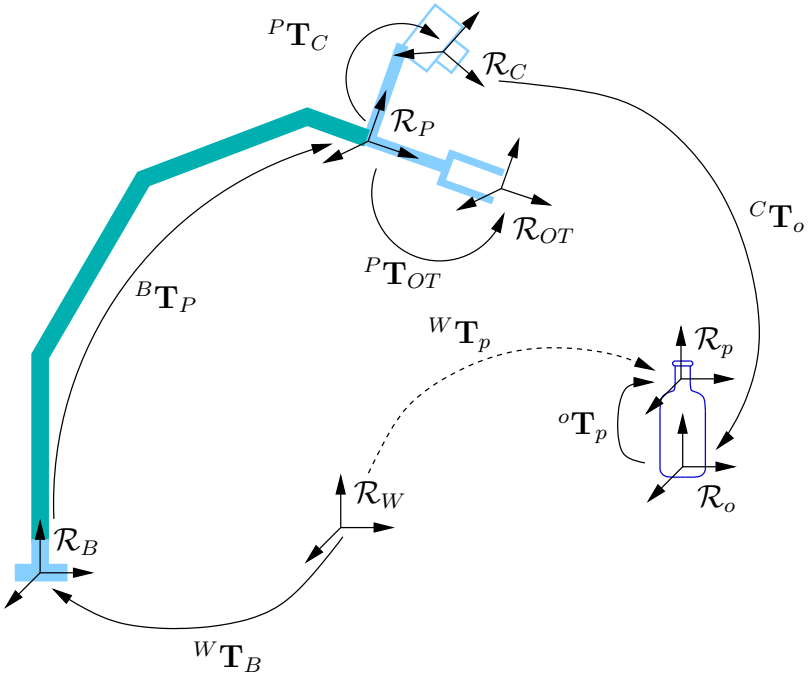


FIGURE 1.7 – Scène associée à une tâche de manipulation avec les repères utilisés

1.3.2 Asservissement Visuel 3D

L'asservissement visuel 3D requiert la reconstruction 3D de la scène. L'avantage de ce type de schémas provient de la possibilité de programmer la trajectoire directement dans l'espace cartésien de la tâche.

Ces travaux s'appuient notamment sur les travaux de Hager qui, pour résoudre le problème de commande de systèmes par vision 3D, propose la décomposition de la tâche en « capacités primitives » que le robot doit être capable d'exécuter, telles que le positionnement ou alignement [Hager, 1997]. Feddema propose de générer des trajectoires dans le plan image en utilisant une approche 2D [Feddema and Mithcell, 1989]. Mezouar intègre des contraintes mécaniques dans la génération des trajectoires à partir d'une approche 2D 1/2 [Mezouar and Chaumette, 2001].

Notre approche considère la reconstruction 3D à l'aide d'une paire stéréo montée sur l'organe terminal du bras manipulateur. Pour un objet qui se déplace, chaque fois qu'une nouvelle position de la cible est calculée, cette position est utilisée comme entrée pour le générateur de mouvements souples.

1.3.3 Schéma de commande

Le schéma de commande proposé par Ignacio Herrera-Aguilar utilise la position de la cible fournie par un système de vision 3D. Cette position sert d'entrée au planificateur de chemin et au générateur de mouvements souples. Le générateur de mouvements souples est dans la boucle de commande. La boucle de commande interne est un schéma de commande à résolution de vitesse par retour de quaternion.

Nous avons proposé deux stratégies utilisant le schéma de la figure 1.8 : le schéma avec planificateur de trajectoire et le schéma avec guidage visuel.

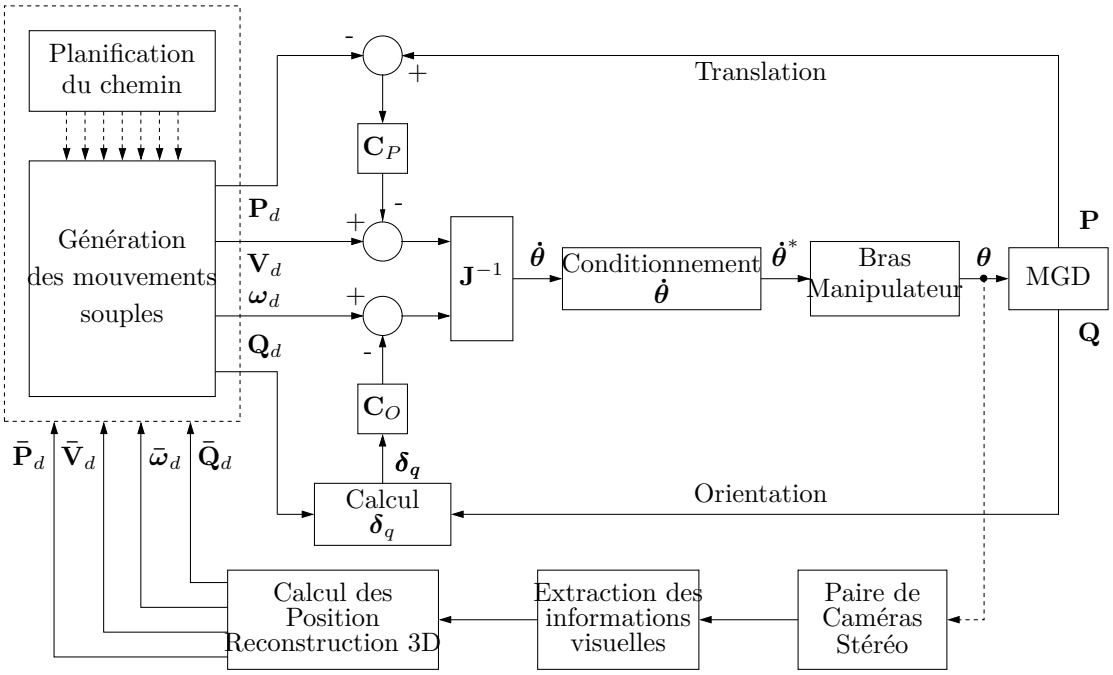


FIGURE 1.8 – Schéma de commande pour le bras manipulateur utilisant un schéma d'asservissement visuel 3D

Schéma complet avec planificateur

Cette approche s'appuie sur l'utilisation d'un planificateur pour définir le chemin que le robot doit suivre pour atteindre la situation finale. Cette stratégie est intéressante lorsque la situation courante du robot et la situation finale sont éloignées ou lorsque il y a des obstacles entre la situation courante et la situation finale.

Schéma avec guidage visuel

Cette stratégie considère que la situation suivante est déterminée par le système de vision. Nous avons fait l'hypothèse que l'espace entre la situation courante et la situation but est libre d'obstacle. Le planificateur de chemin n'est donc plus nécessaire. le générateur de mouvements souples utilise la nouvelle situation mesuré par vision comme consigne.

1.3.4 Localisation d'un objet et auto-calibration main/caméra ou « hand-eye »

Afin de limiter l'impact de la forte dépendance de ces méthodes par rapports aux modèles, nous avons proposé une méthode pour corriger les modèles qui lient le capteur au robot et les informations sur la position de la cible. Dans ce but, Ignacio Herrera-Aguilar a développé un processus de calibration main/caméra ou « Hand-eye » et un processus de localisation d'un objet.

Pour des systèmes où les paramètres intrinsèques de la caméra peuvent être connus en faisant au moins trois mouvements, la littérature montre que la calibration hand-eye est équivalente à la résolution d'une équation de la forme $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$, où $\mathbf{X}$ est la transformation inconnu qui lie la caméra à la main du robot. $\mathbf{A}$ est une matrice qui est calculée en fonction du mouvement de

la main (mouvement du robot) et **B** est une matrice qui est calculée par calibration extrinsèque de la caméra [Tsai and Lenz, 1989, Shiu and Ahmad, 1989].

Par ailleur, Westmore propose l'utilisation d'un filtre de Kalman étendu (connu par les sigles EKF en anglais) pour déterminer la position 3D d'une cible caractérisée par au moins trois points en utilisant un système de vision mono-caméra [Westmore and Wilson, 1991].

Les travaux de [Wei *et al.*, 1998] et [Andreff *et al.*, 1999] portent sur l'auto-calibration hand-eye et considèrent les effets des rotations et des translations sur les amers dans l'image. Wei propose un processus de minimisation non linéaire pendant que Andreff propose une analyse algébrique inspirée de l'équation matricielle de Sylvester.

Dans [Andreff, 1997], à l'intérieur d'une boucle d'asservissement visuel, un filtre de Kalman est utilisé pour estimer *en ligne* la calibration hand-eye.

Les solutions développées dans le domaine de la cartographie et localisation simultanée ou SLAM (de l'anglais *Simultaneous localisation and Mapping*) sont une source d'inspiration pour notre problème de commande [Durrant-White and Bailey, 2006]. Foxlin a présenté une architecture « décentralisée » pour le SLAM, elle considère aussi l'auto-calibration [Foxlin, 2002]. Solà considère l'utilisation des caméras comme des capteurs angulaires et présente une approche bi-caméra qui considère l'auto-calibration de la direction d'une caméra par rapport à l'autre [Solà *et al.*, 2007].

En utilisant les développements présentés par Solà, nous avons proposé une stratégie « simplifiée » du SLAM pour une tâche de saisie d'un objet. Notre objectif est de déterminer la localisation de la cible et les paramètres de calibration hand-eye dans un processus d'auto-calibration.

Schéma de commande

Le schéma de commande de la figure 1.9 proposé par Ignacio Herrera correspond à l'utilisation d'un système bi-caméra pour déterminer la situation suivante que l'organe terminal doit atteindre pour la saisie d'un objet.

Nous proposons une stratégie itérative définie en cinq étapes :

1. Acquisition des images.
2. Obtention des indices visuels à partir des images.
3. Application du filtre de Kalman étendu.
4. Définition de la situation suivante.
5. Déplacement vers la nouvelle situation.

La procédure reprend lorsque le mouvement est terminé. D'un point de vue applicatif, cette stratégie est peu satisfaisante, mais notre objectif était de valider l'approche. Nous espérons l'améliorer en conduisant l'ensemble de ces opération en parallèle et en temps réel.

Nous faisons les hypothèses que l'espace opérationnel entre les deux situations est libre d'obstacles et que la situation finale peut être atteinte. Nous avons utilisé une paire de caméra stéréo comme deux capteurs angulaires indépendants.

L'avantage principal de cette méthode est sa capacité à gérer l'incertitude dans la modélisation du système de vision en utilisant un filtre de Kalman étendu. Cette méthode peux facilement être étendue à une stratégie plus dynamique en améliorant les capacités de traitement des images et/ou en considérant le mouvement de la plate-forme à condition d'augmenter les états du filtre.

Pour réduire le nombre d'itérations, on peut augmenter le nombre d'amers, ce qui améliore la convergence du filtre car on dispose de plus d'information. Malheureusement, le temps de calcul augmente avec le nombre d'amers.

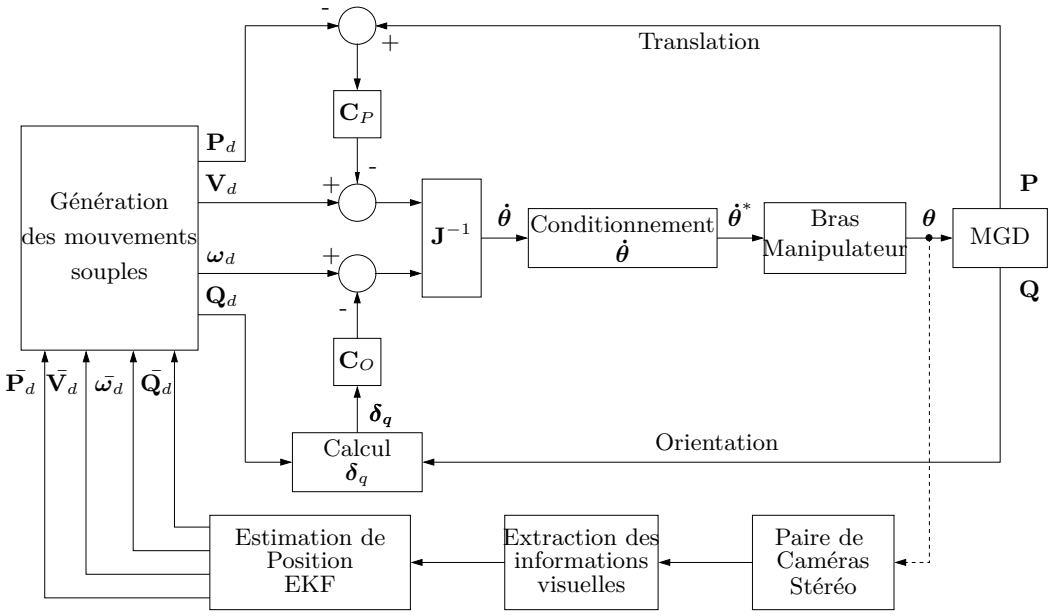


FIGURE 1.9 – Schéma de commande pour le bras manipulateur en utilisant un filtre de Kalman étendu (EKF) pour estimer la position de la cible

1.4 Commande avec retour visuel

Avec Viviane Cadenat, maître de conférence à l'université Paul Sabatier, nous travaillons sur la commande par retour visuel dans le contexte d'un système à deux bras. Plus précisément, nous souhaitons contrôler l'exécution de tâches complexes nécessitant la coordination des deux bras telles qu'une tâche consistant à refermer le capuchon d'un stylo.

Pour ce travail, et plus particulièrement au cours du stage de master de Dimitri Boissinot [Boissinot, 2008], nous nous sommes, dans un premier temps, focalisés sur le problème du déplacement d'un seul bras manipulant le capuchon (l'autre restant immobile). Nous avons ainsi étudié les problèmes de commande par retour visuel, indépendamment de la saisie des objets et du contrôle en force de la phase finale de la fermeture. L'approche que nous avons considérée, s'inspire des travaux de Viviane Cadenat qui ont montré que la réalisation d'une tâche robotique complexe ne peut être abordée globalement. Il est en effet nécessaire de la décomposer en plusieurs tâches élémentaires qu'il faut ensuite enchaîner. Dans ce but, nous avons d'abord décomposé la tâche de fermeture du stylo en quatre sous-tâches (alignement, rotation, positionnement et contournement) que nous avons modélisées par le formalisme des fonctions de tâche. Puis, nous avons exploité ces modèles pour synthétiser des correcteurs dédiés. Nous avons enfin séquencé les sous-tâches en utilisant l'approche proposée par Viviane Cadenat et Philippe Souères dans [Soueres *et al.*, 2003]. Cette approche s'appuie sur la définition d'une structure de variété différentielle et permet de séquencer les tâches en imposant, à chaque basculement, des conditions initiales conservant la continuité de la commande. Nous avons évalué l'approche développée en simulation et obtenu des résultats très encourageants. Nous souhaitons maintenant approfondir ces travaux. Pour cela, nous avons à nouveau proposé un sujet de stage de master sur ce thème ainsi qu'un sujet de thèse.

1.5 Localisation et modélisation d'objet par vision

La connaissance d'un modèle de la scène comprenant un modèle des objets et des humains et leurs positions est indispensable pour mettre en place des processus de raisonnement et de commande pour des systèmes robotiques en présence d'humain. Pour cela, les robots doivent pouvoir acquérir des données sur leur environnement et connaître les objets à manipuler. Différentes approches peuvent être utilisées pour obtenir des données suffisantes pour accomplir une tâche [Kemp *et al.*, 2007]. Nous nous plaçons dans le cadre d'environnement intérieur tel que ceux où vivent les humains : l'environnement n'est pas figé et ne peut pas être contrôlé comme un environnement industriel de production, de nouveaux objets peuvent apparaître, les mouvements sont imprévisibles pour le robot.

A partir de sa perception de la scène et de ses connaissances, le robot doit pouvoir obtenir les informations suivantes :

- la représentation géométrique et mécanique des objets de la scène ;
- la reconnaissance et la localisation des objets ;
- la position et l'attitude des humains ;
- le mouvement des éléments mobiles.

Ces connaissances dépendent des modèles et des capteurs utilisés. Nous travaillons avec Michel Devy du groupe Robotique, Action et Perception du LAAS, notamment par le co-encadrement de Nizar Khalifa Sallem pour doter nos robots de ces capacités d'acquisition de données.

1.5.1 Modélisation des objets

Pour saisir un objet inconnu, le robot doit construire un modèle géométrique de l'objet. Pour cela, le robot utilise actuellement une séquence de N images acquises par une caméra embarquée sur le bras [Sallem and Devy, 2009]. Les images sont prises à partir de positions régulièrement espacées sur une demi sphère centrée sur l'objet à modéliser. Après une segmentation destinée à isoler l'objet du support, un premier processus permet d'extraire des points d'intérêts. Les points d'intérêts que l'on retrouve dans plusieurs images permettent de calculer un nuage de points 3D. Après filtrage de ce nuage pour éliminer les points aberrants, un modèle triangulé est construit.

L'étape de reconnaissance d'un objet ne nécessite qu'une image, elle utilise les éléments appris au cours de l'étape de modélisation. Une fonction de localisation permet ensuite de calculer la position de l'objet reconnu a partir de la position de points appariés.

La reconstruction de surfaces 3D est un défi important de la vision par ordinateur depuis les années soixante-dix. Elle a bénéficié du développement de nouveaux scanners. Dans notre cas, nous travaillons à partir des points d'intérêt obtenus à partir d'une séquence d'image. Ces points sont en nombre assez faible, de l'ordre de la centaine. Des algorithmes spécifiques sont nécessaires [Trujillo and Devy, 2009, Sallem and Devy, 2009].

La mesure de la position de l'homme est encore un défi pour un robot. Les importantes installations commercialisées par des sociétés comme Vicon [5] ou MotionAnalysis [6] ne sont pas utilisables sur un robot. Nous utilisons les résultats du projet [european project Cogniron,] pour détecter la position des hommes et de leurs mains [Fontmarty *et al.*, 2007, Menezes *et al.*, 2007]. À partir de la position de l'homme et notamment de la position de ses mains, il est possible de calculer une trajectoire pour que le robot et l'humain s'échangent un objet.

5. OMG Vicon company : http ://www.omg3d.com/html/index.html
6. MotionAnalysis : http ://www.motionanalysis.com/

1.6 positionnement des caméras

Le positionnement des caméras influence grandement les résultats des commandes par retour visuel. Parmi les problèmes on peut citer la zone vue par la caméra, les problèmes d'occultation et les mouvements parasites de la caméra. Pour la manipulation, ces problèmes ne sont pas simples car l'environnement peut être contraint par des obstacles et les bras et mains du manipulateur. Afin de ne pas multiplier les caméras sur le robot, il peut être utile de réutiliser ces caméras pour la locomotion ou d'autres tâches comme l'interaction et l'inspection.

Lorsque nous avons défini le robot Jido, j'ai encadré le stage de master de Mounira Bouarroudj [Bouarroudj, 2005] sur ce thème. L'objectif était double bien positionner les caméras et choisir les caractéristiques des caméras. Nous avons utilisé le logiciel vtk [7] pour simuler le robot et valider le choix des positions des capteurs.

1.7 Commande avec retour d'effort

Notre problématique demeure la commande de robots manipulateurs en présence de l'homme dans le contexte de la robotique de service. Pour des raisons de sécurité et de confort, nous avons vu que ces robots doivent se déplacer avec des vitesses relativement faibles et des mouvements souples. Les commandes, visant à la réduction du temps de cycle de production, qui sont développées pour l'industrie manufacturière ne sont pas adapté à ce contexte.

Nous avons souligné l'intérêt des capteurs extéroceptifs qui informent le robot sur l'état du système constitué par le robot et son environnement. Les capteurs de vision et d'efforts sont les plus prometteurs.

Nous présentons d'abord des méthodes d'identification des paramètres du système en contact puis quelques résultats.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous allons présenter succinctement quelques résultats.

1.7.1 Identification de la masse manipulée et des efforts de contact

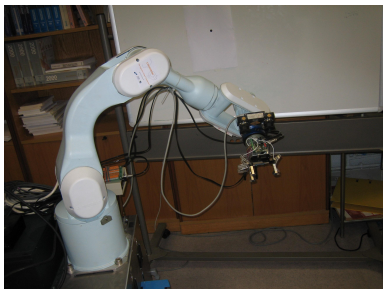


Figure 1.10 – Mesure des efforts sur Jido

Pour maîtriser les forces qu'exerce l'organe terminal du robot sur son environnement il est nécessaire de mesurer ces efforts. Or le capteur d'effort est placé entre cet organe terminal et l'extrémité du bras. Les signaux qu'il délivre correspondent à la somme des efforts engendrés par le poids et l'accélération de la masse de l'effecteur et de la masse embarquée plus les efforts de contact qu'exerce le robot sur son environnement. Il est donc indispensable d'identifier chacun de ces efforts.

7. The Visualization ToolKit (VTK) http ://www.vtk.org/

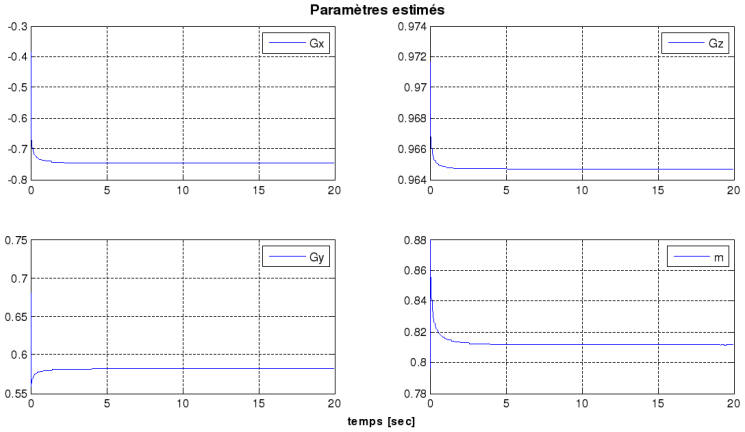


FIGURE 1.11 – Résultat d'identification de la masse (m) et de la position du centre de gravité (Gx, Gy et Gz)

Dans le contexte de l'interaction avec les humains, le robot travaille à des vitesses relativement faibles et les efforts dus aux accélérations peuvent être négligés. De même pour les paramètres inertiels, en première approximation il est possible de ne considérer que la masse et la position du centre de gravité.

La solution que nous avons proposée [Mebarki, 2006] est de reconstituer les efforts engendrés par les différentes masses, en temps réel. Dans un premier temps, nous avons proposé un modèle des éléments embarqués, puis un filtre de Kalman pour estimer les différents paramètres.

Les mesures doivent s'effectuer en fonction des différentes phases :

- Déplacement à vide. Il est possible d'identifier la position du centre de gravité et la masse des composants en aval du capteur d'effort.
- Déplacement sans contact. Il est possible d'identifier la masse et la position du centre de gravité de la charge. Pour cela, les éléments mesurés à vide sont utilisés.
- Contact avec l'environnement. À partir des éléments identifiés dans les autres phases, il est possible d'identifier les efforts extérieurs.

La figure 1.11 présente un des premiers résultat que nous avons obtenu. À partir d'une situation initiale, le filtre converge rapidement.

En simulation, nous avons développé les trois phases. Toutefois, l'hypothèse d'accélérations faibles n'est pas vérifiée en pratique. En effet de nombreux phénomènes vibratoires viennent perturber les mesures. L'utilisation d'un accéléromètre en parallèle avec le capteur d'effort devrait permettre de filtrer ces bruits comme nous l'avons expérimenté dans [Blanchard, 2005].

1.7.2 Commande avec retour d'effort

Nous présentons ici un résultat de commande avec retour de force pour le robot Jido. Jido déplace son organe terminal qui est en contact avec un carton.

Séquences de régulations (voir figure 1.12) :

1. La régulation est active, la consigne est une position $Z = 0.2m$. Cependant l'outil se situe déjà à cette position donc le bras reste immobile.
2. Début du déplacement vertical. Le bras va rejoindre la position $Z = -0.005m$. On peut observer le bruit du signal de force pendant la phase de mouvements.

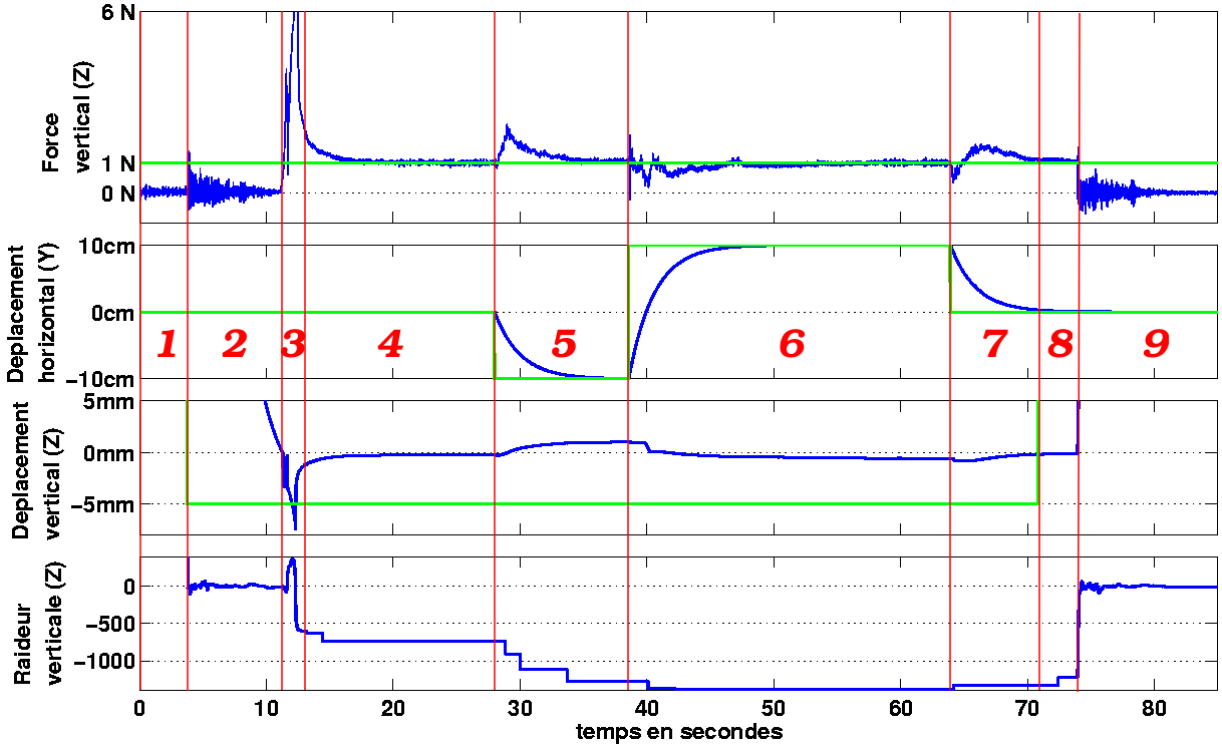


FIGURE 1.12 – Appui puis déplacement sur la surface d'un carton. Les consignes sont en vert et les mesures en bleu.

3. L'extrémité du bras percute le carton. Comme les effets dynamiques ne sont pas pris en compte, l'estimation de la raideur n'est pas bonne et des déplacements rapides apparaissent.
4. Une fois les effets dynamiques redevenus négligeables, la raideur peut à nouveau être calculée. La régulation en force peut alors imposer un déplacement vertical cohérent.
5. Déplacement du bras parallèlement au carton pour atteindre la consigne $Y = -0.1m$.
6. Déplacement du bras parallèlement au carton pour atteindre la consigne $Y = 0.1m$.
7. Retour à la position $Y = 0$.
8. Retour à la position $Z = 0$
9. Le contact avec le carton a été perdu.

Ces travaux avaient pour but d'évaluer la possibilité d'effectuer en parallèle le contrôle de la tâche et la mesure de paramètres de cette tâche, ici la raideur de la liaison entre le robot et le carton.

1.8 Conclusion

Ces quelques éléments nous permettent d'entrevoir la complexité de la commande d'un manipulateur dans le contexte de la robotique de service aux contact des hommes. Nous avons proposé quelques pistes comme l'utilisation des mouvements souples, l'identification en ligne des paramètres de la tâche ou l'utilisation de capteurs extéroceptifs.

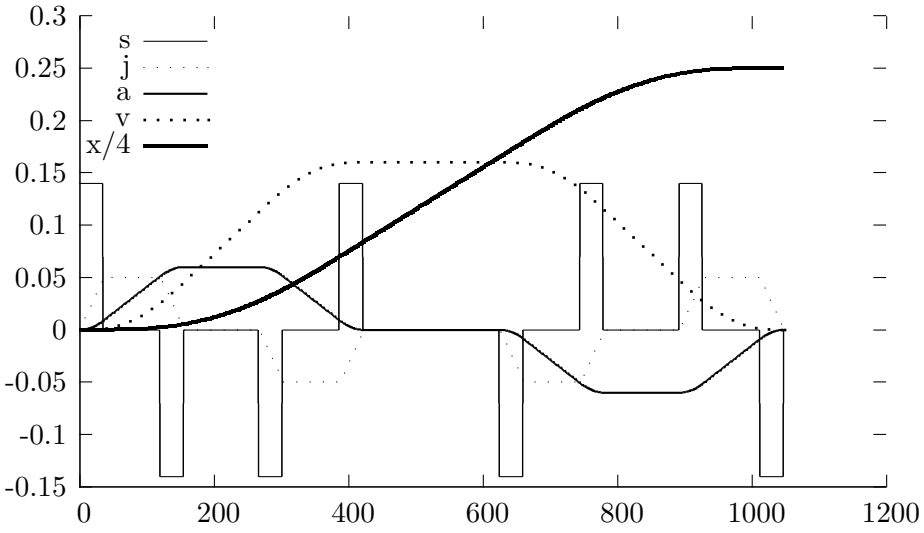


FIGURE 1.13 – Déplacement avec dérivée du jerk bornée

1.8.1 Limiter la dérivé du jerk

Rendre le jerk continu en bornant aussi sa dérivé est très attrayant. Compte tenu de la complexité des mouvements souples que nous venons de présenter, et surtout du saut de complexité entre accélération borné (3 segments de degrés 2) et jerk borné (7 segments de degrés 3), l'étude de ces séquences de fonctions dans le cas d'une dérivée du jerk bornée semble hors d'atteinte dans un temps raisonnable. L'étude rapide du mouvement conduisant d'une situation à l'arrêt à une nouvelle situation arrêtée en atteignant un pallier à vitesse maximum fait apparaître 15 segments de fonctions de degrés 4 (figure 1.13).

1.8.2 Contrôle et manipulation

Ces quelques résultats nous montre que la commande d'un robot manipulateur en milieu humain pose encore de nombreux problèmes. Tout d'abord au niveau des capteurs et du traitement des données brutes pour obtenir des informations de haut niveau (position relative d'un objet par rapport à une main, effort de contact...). Ensuite, au niveau de la commande qui doit intégrer des contrôles en position et en force qui évoluent au cours du temps. Ces évolutions, notamment pour les manipulation en interaction avec les humains, nécessite de planifier la tâche en temps réel.

1.8.3 Lien planification commande

Nous avons proposé une piste pour passer de la planification de chemin à la planification de la trajectoire, c'est à dire planifier l'évolution temporelle sur le chemin. Cette trajectoire peut constituer l'entrée d'un contrôleur, mais le contrôleur n'est pas encore défini à ce stade. Le choix des capteurs et des traitements à effectuer demeure entier, de même que le choix des correcteurs.

2

Planification de tâches de manipulation

2.1 Introduction

Le terme manipulation regroupe toutes les actions mécaniques que le robot peut effectuer sur son environnement. Compte tenu de la très grande diversité des tâches de manipulation que le robot peut effectuer, la réalisation d'un planificateur de manipulation général ne sera pas envisageable avant longtemps. Nous allons toutefois essayer de construire des planificateurs spécialisés.

Un premier domaine concerne la manipulation d'un outil, elle est assez peu étudiée en robotique mais constitue un des thèmes majeurs en fabrication mécanique. Par exemple, la maîtrise des trajectoires d'outils pour obtenir des surfaces fonctionnelles de qualité constitue un enjeu économique de premier plan [Yong and Narayanaswami, 2003].

Lorsque le robot n'utilise pas d'outil, il manipule directement les objets de son environnement. Nous pouvons distinguer plusieurs classes de problèmes de manipulations :

- Le choix de l'objet à déplacer ou la définition de l'ordre dans lequel les objets doivent être déplacés. Nous pouvons citer quelques cas particuliers qui ont donné lieux à de nombreux travaux : l'assemblage et le désassemblage de mécanismes qui constituent un enjeu industriel important, le remplissage et le vidage de containers divers qui peuvent contenir des objets en vrac ou rangés, le rangement...
- La définition de la technique de déplacement (poussage, portage etc) et des lieux de contact. La saisie d'un objet est la solution la plus commune, nous allons en présenter plusieurs aspects dans la suite. Lorsque l'objet est plus imposant, la saisie est plus difficile et pousser ou tirer l'objet peut s'avérer plus facile [Walker and Salisbury, 2008]. D'autres solutions comme le pivotement sont possibles [Yoshida *et al.*, 2008]. Dans le cas des grues, on préfère accrocher le câble à un anneau ou à une élingue pour plus de sécurité.
- Lorsque, au delà du déplacement de l'objet d'une position à une autre, la tâche nécessite de réaliser des mouvements fins, l'utilisation de mains artificielles devient indispensable [Okamura *et al.*, 2000].
- Pour manipuler des objets plus massifs ou plus encombrant, l'utilisation de plusieurs bras ou de plusieurs robots devient nécessaire. Les problèmes de coordination et de coopération arrivent alors au premier plan [Caccavale and Uchiyama, 2008, Yoshida *et al.*, 2008].
- L'actionnement d'un mécanisme par un robot est assez peu étudié car il est généralement moins coûteux de contourner la difficulté que d'utiliser des préhenseurs dextres qui

sont encore rares. Il est par exemple plus simple d'installer une porte automatique que de programmer un robot pour ouvrir une porte standard. De même il est plus simple de concevoir un outil spécifique que de manier une paire de ciseaux. Mais avec la démocratisation prochaine des *mains artificielles* la situation devrait évoluer.
– Les robots doivent interagir avec les humains. A coté des problèmes de sécurité et de confort que le partage d'un espace commun aux humains et aux robots introduit, nous pouvons citer les problèmes de communication et de réactivité. Le choix et la présentation des informations que le robot fournit conditionnent de manière très importante la cohabitation. Par exemple l'utilisation de systèmes haptiques et de visualisation 3D peuvent grandement faciliter ces interactions. Le concept d'apprentissage dont les enjeux dépassent les seuls roboticiens est à la fois prometteur et complexe. Les robots seront aussi très probablement amenés à superviser des tâches et à confier des sous tâches aux humains. Là se pose une question importante, quelles seront les limites d'acceptabilité des humains ?

Quelle que soit la tâche principale choisie, pour la réaliser le robot doit aussi effecteur des tâches secondaires : identification, localisation, modélisation, surveillance...

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à la saisie des objets, nous aborderons ensuite le problème de la planification de tâches de manipulation.

2.2 Qualité d'une prise et fermeture en force

La réussite d'une tâche de manipulation repose notamment sur la qualité de la ou des prises choisies. Les prises dépendent de facteurs difficiles à caractériser : la physique du frottement qui n'est pas encore complètement comprise et modélisée [Milan, 2008, Sidobre and Hayward, 2004], de nombreux points de contacts dont la localisation reste imprécise et d'efforts extérieurs inconnus. L'estimation de la qualité des prises n'est donc pas facile.

Une condition souvent retenue est la notion de fermeture en force Nous retenons ici la définition de Bicchi [Bicchi and Kumar, 2000]. La fermeture en force peut être définie comme la possibilité pour une prise de résister à n'importe quel effort extérieur en faisant l'hypothèse que les efforts de contact normaux peuvent être infinis.

Cette définition peut être formulée différemment. Plaçons nous dans l'ensemble des torseurs de force exprimés à l'origine d'un repère R_0 lié à l'objet et considérons une boule ouverte B_0 centrée à l'origine de cet ensemble de torseur de force. Une prise définit alors une fermeture en force si et seulement si pour tout effort F_i appartenant à B_0 il existe des efforts de contact bornés en chaque point de contact de la prise et ces efforts équilibrent l'effort F_i. Cette deuxième formulation montre mieux les propriétés de la fermeture en force.

Cette condition n'est pas nécessaire : les serveurs de bars transportent sans trop de difficultés des verres et bouteilles sur un plateau où ces objets fragiles ne sont pas soumis à une fermeture en force.

Cette condition n'est pas suffisante : il n'est pas possible, avec une seule main, de soulever un objet long en le saisissant par l'une de ses extrémités même en définissant une fermeture en force avec la main. Ceci est dû à l'hypothèse d'efforts de contact infinis, qui n'est pas vérifiée pour ce cas réel.

Cette condition est toutefois utile : c'est une condition géométrique relativement simple et jusqu'à ce que les efforts de contacts atteignent leurs limites, elle garantit que la prise peut

résister à une perturbation extérieure de direction quelconque. Elle ne fait aucune hypothèse sur la tâche à réaliser.

La définition d'une condition plus proche de la tâche à réaliser nécessite de connaître les efforts extérieurs et les caractéristiques précises du préhenseur. Une étude dynamique des manipulations à effectuer fournit alors l'évolution des efforts de contact. Ces efforts de contact et notamment leur aptitude à résister à des perturbations constituent un bon critère de choix de la prise [Okamura *et al.*, 2000, Haschke *et al.*, 2005].

Une autre notion rencontrée est la fermeture géométrique qui est définie comme l'immobilisation de la pièce sans utilisation du frottement. Cette notion est très utilisée pour le positionnement et le bridage des pièces en fabrication mécanique [Prattichizzo and Trinkle, 2008, Wang *et al.*, 2006].

La fonction d'un préhenseur est de transmettre les efforts extérieurs exercés sur la pièce par contact au bras manipulateur. Au niveaux des points de contacts, ces efforts engendrent des contraintes mécaniques pouvant occasionner des déformations permanentes. De ce point de vue, la meilleure prise est celle qui peut transmettre les efforts avec le minimum d'effort de contact.

De la même manière, la minimisation des efforts interne du préhenseur permet de limiter l'usure et de diminuer la puissance nécessaire pour les moteurs du préhenseur.

La précision de positionnement de l'objet manipulé constitue un deuxième critère de choix.

Dans les paragraphes suivant nous allons essayer de répondre à deux questions : une prise constitue-t-elle une fermeture en force ? Et considérant deux prises, laquelle est la meilleure du point de vue de la fermeture en force ? La deuxième question correspond à la définition d'un critère général ne faisant aucune hypothèse sur la tâche à effectuer pour comparer deux prises.

2.2.1 Fermeture en force

Modèles de frottement

Trois modèles de contact sont généralement retenus en manipulation [Kao *et al.*, 2008] :
- contact sans frottement ;
- frottement de Coulomb, la force de contact reste dans un cône d'angle φ ;
- contact souple, on ajoute au modèle de Coulomb un frottement de pivotement.

Nous n'utiliserons ici que le modèle de Coulomb qui s'écrit localement : $|f_t| \leqslant \mu f_n$ où $\mu = \tan\varphi$ est le coefficient de friction, $f_n \geqslant 0$ l'effort normal et f_t l'effort tangent.

Comme l'effort tangent se décompose en deux efforts f_x et f_y dans les directions x et y du plan tangent, la condition de frottement sans glissement s'écrit :

$$\sqrt{{f_x}^2 + {f_y}^2} \leqslant \mu |f_n|$$

Cette condition introduit une contrainte quadratique qui peut être linéarisée en approximant le cône par un cône polyédrique convexe défini par m vecteurs v_i tels que :

$$v_i = \begin{vmatrix} \sin\varphi \ \cos i\dfrac{2\pi}{m} \\ \sin\varphi \ \sin i\dfrac{2\pi}{m} \\ \cos\varphi \end{vmatrix} \qquad \text{avec} \quad 0 \leqslant \mathrm{i} < \mathrm{m} \tag{2.1}$$

La condition de frottement sans glissement peut alors s'écrire $f = \sum_{i=1}^{m} a_i v_i$ avec $a_i \geqslant 0$. Cette condition exprime que la force de contact f se trouve à l'intérieur du cône polyédrique convexe. Comme le modèle de frottement est connu avec peu de précision, il n'est généralement

pas utile de choisir m grand. Cette approximation présente aussi l'inconvénient de casser la symétrie circulaire.

Fermeture en force, état de l'art

La notion de fermeture en force a été introduite par Reulaux dans son étude sur la propriété des mécanismes à la fin du dix-neuvième siècle [Reuleaux, 1963]. Des études ont été effectuées pour déterminer le nombre minimal de points de contact nécessaires pour réaliser une liaison complète et proposer des algorithmes de vérification de la fermeture en force [Mishra *et al.*, 1987, Markenscoff *et al.*, 1990, Lakshminarayana, 1978, Murray *et al.*, 1994]. Salisbury et Roth [Salisbury and Roth, 1982] ont montré qu'une prise définit une fermeture en force si et seulement si les torseurs de force définis par les forces de contact de la prise génèrent entièrement l'espace des torseurs de force.

De nombreux travaux portent sur des cas particuliers comme les problèmes plans ou des problèmes avec un nombre limité de contact [Nguyen, 1988, Ferrari and Canny, 1992, Li *et al.*, 2003, Ponce and Faverjon, 1995, Sudsang and Phoka, 2005]. Les résultats de Li sont particulièrement intéressants car ils fournissent un résultat très efficace pour le cas où il y a de 3 points de contact.

Liu [Liu *et al.*, 1999, Lam and Ding, 2004] a reformulé la condition de fermeture en force en un problème de lancé de rayon ce qui permet d'utiliser un programme linéaire pour le résoudre.

La méthode que nous allons détailler dans le paragraphe suivant a été proposée par Belkacem Bounab et utilise aussi la résolution d'un programme linéaire. Elle est générale et simple à mettre en œuvre. Elle s'adapte aussi bien à la linéarisation du frottement de Coulomb pour donner un test rapide de fermeture en force qu'à la résolution du problème quadratique pour aborder les problèmes d'optimisation.

Axe central d'un torseur

Le champ de force équiprojectif défini par un torseur admet un minimum sur une droite appelée axe central du torseur. De plus, la force et le moment du torseur exprimés en un point de cet axe sont colinéaires avec cet axe.

Soit un torseur $\mathcal{T} = (f_x\ f_y\ f_z\ m_x\ m_y\ m_z)^T = \begin{pmatrix} F \\ M \end{pmatrix}$.

Son axe central Δ_g est :

$$\Delta_g = \begin{cases} \dfrac{F \wedge M}{\|F\|^2} + \lambda F & \text{avec } \lambda \in \mathbb{R} \quad \text{si } F \neq 0 \\ 0 + \lambda M & \text{avec } \lambda \in \mathbb{R} \quad \text{si } F = 0 \end{cases}$$

Axe central orienté Les efforts de contact sont orientés et la définition de l'axe central d'un torseur donnée ci-dessus est aussi orientée. Deux axes centraux ayant les forces F opposés (ou les moments M opposés si F est nul) sont différents et opposés. Nous ne considèrerons dans la suite du document que des axes centraux orientés.

Cas plan Pour un problème plan, l'espace des forces est de dimension 3 et les efforts peuvent être représentés par f_x, f_y et m_z (moment par rapport à l'origine). Une autre représentation consiste à donner l'axe central et l'intensité de l'effort. Il n'existe alors que deux types d'axes centraux : les droites du plan pour lesquelles le moment est nul et la direction perpendiculaire au plan pour laquelle la force est nulle.

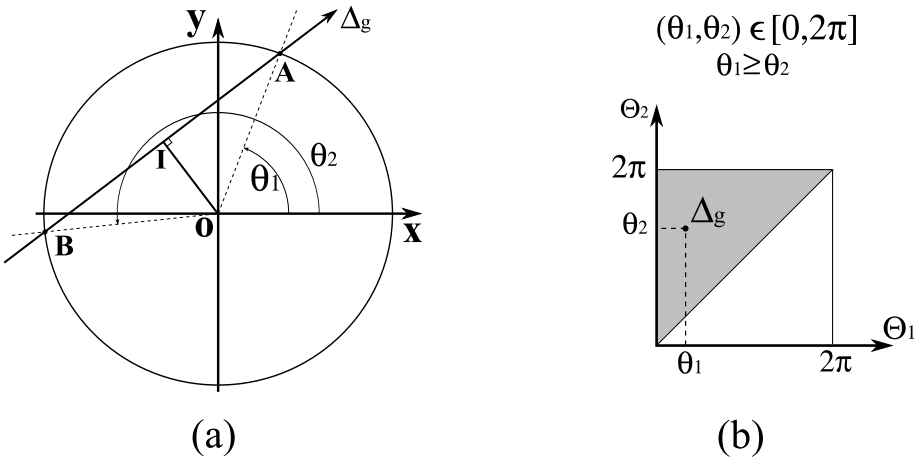


FIGURE 2.1 – (a) Paramètres θ_1 et θ_2 pour une droite Δ_g du plan. (b) Représentation des droites dans le plan θ_1, θ_2.

Axe central et fermeture en force Dans le plan, un torseur d'effort peut donc être caractérisé par son axe central et une intensité, or pour les problèmes de fermeture en force l'intensité est inutile du fait de l'hypothèse d'effort infini. À partir de cette remarque, Belkacem BOUNAB [Bounab *et al.*, 2007a, Bounab *et al.*, 2007b] a proposé le théorème suivant : une prise définit une fermeture en force si et seulement si elle est capable de générer l'ensemble des axes centraux.

Or, pour les problèmes plan, l'ensemble des axes centraux est de dimension 2 plus la direction perpendiculaire. Nous pouvons donc chercher une famille d'algorithmes plus simples qui vérifient une propriété sur les moments et une propriété dans un ensemble de dimension 2.

Cette idée peut être étendue en dimension 3 [Bounab *et al.*, 2008]. C'est toutefois un peu plus compliqué car l'ensemble des droites est de dimension 4 ce qui correspond à la perte de l'information d'intensité et du rapport entre la force et le moment sur l'axe central.

2.2.2 Fermeture en force dans le plan

À partir des remarques précédentes, nous avons établi le théorème suivant :

Théorème 1 *Une prise plane de n contacts réalise une fermeture en force si et seulement si : soit un point quelconque du plan de saisie,*

- *les n forces de contact peuvent produire en ce point des moments positifs et négatifs ;*
- *les axes centraux des torseurs de contacts qui passent par ce point génèrent positivement le plan de prise.*

À partir de ce théorème, un algorithme purement géométrique peut être construit pour le cas plan [Bounab *et al.*, 2007a]. Il est illustré sur la figure 2.2.

Les axes du plan y sont représentés par un point sur un graphe θ_1, θ_2 avec $\theta_1 < \theta_2$ (voir figure 2.1). θ_1 et θ_2 représentent la coordonnée angulaire des points d'intersection des droites avec un cercle de rayon donné. Le triangle défini par les droites $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 2\pi$ et $\theta_1 = \theta_2$ permet de représenter l'ensemble des droites du plan qui coupent le cercle.

À partir d'un tirage aléatoire de forces de contact, on calcule les axes centraux correspondants, puis on les dessine sur une figure. Lorsque la prise définit une fermeture en force, le triangle doit être entièrement noirci.

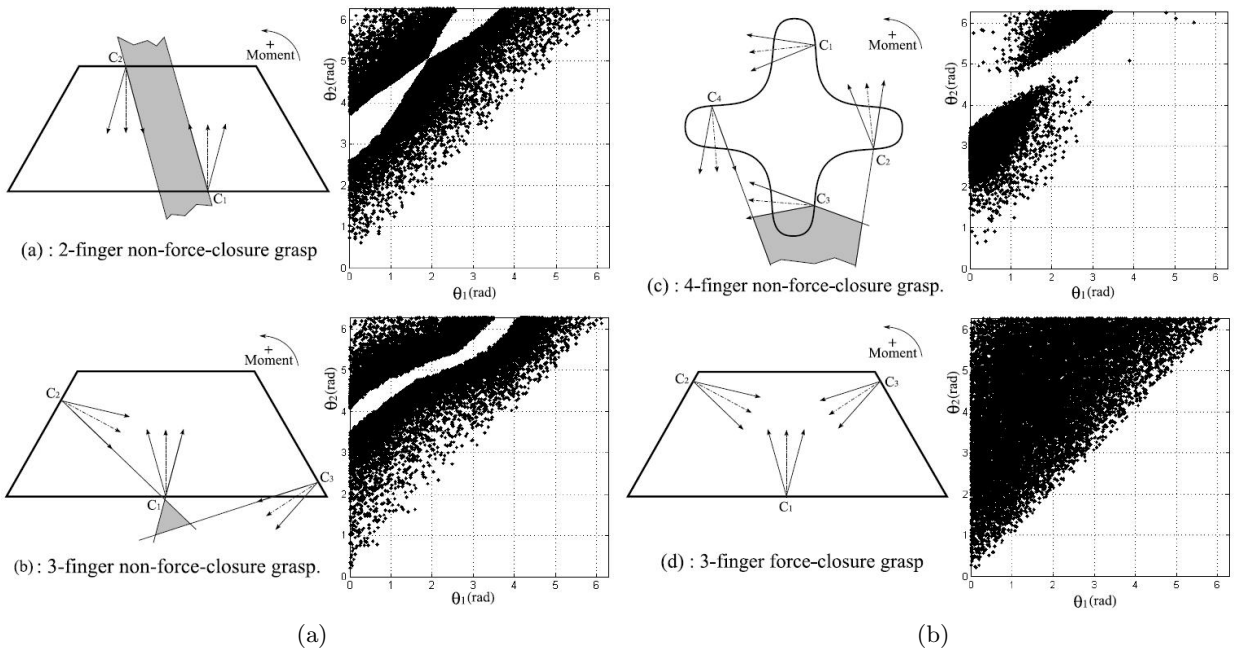


FIGURE 2.2 – Position des axes centraux dans le plan

La figure 2.2 présente des figures ainsi obtenues pour des prises qui ne définissent pas une fermeture en force (cas a, b et c) et une prise qui définit une fermeture en force (cas d).

2.2.3 Fermeture en force dans l'espace

En dimension trois, nous avons représenté le point d'intersection des axes centraux avec une sphère de rayon donné. La figure 2.3 présente deux prises qui ne définissent pas une fermeture en force (a et b) et un cas de prise définissent une fermeture en force (c).

A partir de ces considérations géométriques, nous allons maintenant voir comment construire des algorithmes pour résoudre ces problèmes de fermeture en force.

2.2.4 Équilibre et fermeture en force

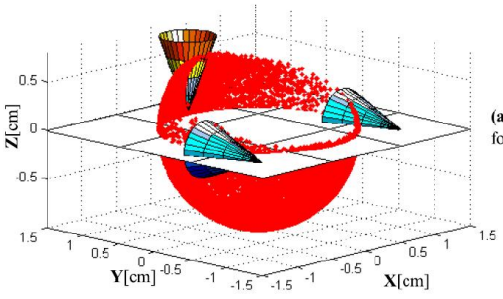
Nous devons préalablement présenter les théorèmes sur lesquels s'appuient les algorithmes que nous avons proposés.

Condition d'équilibre Pour l'étude de l'équilibre, nous ne considérons que les forces appliquées par les n doigts du préhenseur. Nous privilégions le point de contact c_i où le doigt i applique la force F_i suivant le modèle de Coulomb. Les autres $n-1$ doigts appliquent la force F_r. L'objet est donc soumis à deux torseurs de forces : $W_i = (F_i, 0)^T$ et $W_r = (F_r, T_{r/c_i})^T$ écrits au point c_i.

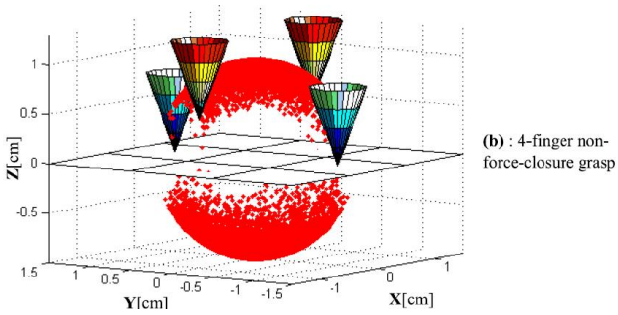
Avec $F_r = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} F_j$ et $T_{r/c_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} (c_j - c_i) \times F_j$

La condition d'équilibre peut donc s'écrire :

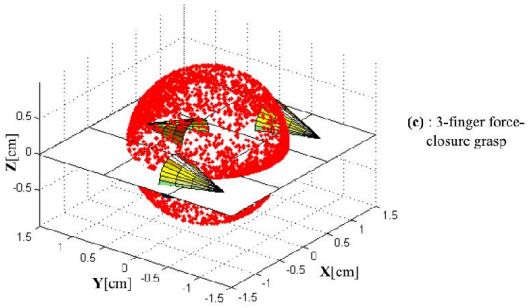
$$W_i + W_r = 0 \tag{2.2}$$



(a) 3 doigts, pas de fermeture en force



(b) 4 doigts, pas de fermeture en force



(c) 3 doigts, fermeture en force

FIGURE 2.3 – Position des axes centraux dans l'espace (les axes centraux sont représentés par leur intersection avec une sphère de rayon donné).

Ce qui peut aussi s'écrire :

$$\begin{cases} F_r = -F_i \\ T_{r/c_i} = 0 \end{cases} \tag{2.3}$$

De même, nous construisons deux classes d'axes centraux orientés : Δ_i pour les axes centraux orientés définis par les torseurs W_i et Δ_r pour les axes centraux orientés définis par les torseurs W_r. La deuxième condition ($T_{r/c_i} = 0$) dans (2.2) définit une classe particulière d'axes centraux orientés Δ_r^* passant par c_i et ayant un moment nul. Notons $\Delta_g^* = \Delta_i \cup \Delta_r^*$.

Nous pouvons en déduire le théorème [Bounab *et al.*, 2008] :

Proposition 1 *Une prise définie par n points de contact réalise un équilibre si et seulement si les axes centraux orientés de classe Δ_g^* engendrent positivement $\mathbb{R}^3$ au point c_i.*

Et son corollaire :

Lemme 1 *Les axes centraux orientés de Δ_g^* définis par une prise ayant n points de contact engendrent positivement $\mathbb{R}^3$ en c_i si et seulement si les axes centraux de Δ_r permettent de construire un axe central orienté en c_i pointant à l'intérieur du cône opposé au cône de friction du i^econtact.*

La figure 2.4 présente le cône de friction associé au contact i avec un axe central F_r situé dans le cône opposé.

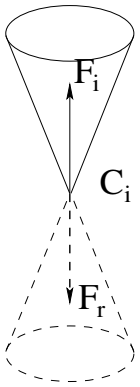


FIGURE 2.4

2.2.5 Condition de fermeture en force

A partir de la notion d'équilibre, il est possible d'introduire la notion de fermeture en force. En effet une fermeture en force définit aussi un équilibre, mais l'inverse n'est pas vrai. Une prise en fermeture en force peut résister à n'importe quel torseur d'effort extérieur. La démonstration du théorème suivant se trouve dans [Bounab *et al.*, 2009].

Théorème 2 *Une prise définie par n contacts ponctuels définit une fermeture en force si et seulement si, soit c_i l'un des points de contact,*

1. *les axes centraux de type Δ_g^* engendrent positivement l'espace $\mathbb{R}^3$ en c_i ;*
2. *les moments engendrés par les n doigts engendrent positivement $\mathbb{R}^3$ en c_i.*

2.2.6 Algorithmes de vérification de la fermeture en force

Nous allons maintenant voir comment utiliser ces propriétés pour construire des algorithmes de vérification de la fermeture en force. Considérons une prise définie par m point de contact c_i, avec $1 \leqslant i \leqslant m$.

Les moments : considérons le point de contact c_i où nous définissons les m efforts $f_{ij} = a_{ij}v_{ij}$ pour linéariser le modèle de frottement de Coulomb. Chaque effort unitaire v_{ij} crée un moment $\tau_{ij} = (c_i - c_1) \wedge v_{ij}$ au point c_1 choisi arbitrairement.

La propriété, les moments τ_{ij} engendrent positivement $\mathbb{R}^3$, peut se ramener à la vérification que le point c_1 est strictement à l'intérieur de l'enveloppe convexe $H(\tau_{ij})$ des τ_{ij} : $C_1 \in H(\tau_{ij})$. Cette condition peut être vérifiée par calcul matriciel[Murray *et al.*, 1994].

Les axes centraux : nous devons vérifier que les efforts de contacts peuvent créer un axe central en c_1 orienté vers le coté opposé du cône de friction du contact 1. Si nous orientons l'axe z_1 du repère du contact 1 sur l'axe du cône de friction, nous pouvons vérifier s'il est possible de créer l'axe central $-z_1$. En introduisant une variable strictement positive δ, ceci peut s'écrire :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} a_{ij}v_{ij} = -\delta z_1 \\ \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{m} (c_i - c_1) \wedge a_{ij}v_{ij} = 0 \\ a_{ij} \geqslant 0 \\ \delta > 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

Le système précédent peut se mettre sous la forme d'un programme linéaire :

$$\min_x f^T x \qquad \text{avec} \qquad \begin{cases} A\,x = 0 \\ l_x \leqslant x \leqslant u_x \end{cases} \tag{2.5}$$

La matrice A de dimension $(6 \times (mn+1))$ est définie par :

$$A = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1m} & v_{12} & \cdots & \cdots & v_{nm} & z_1 \\ \tau_{11} & \cdots & \tau_{1m} & \tau_{12} & \cdots & \cdots & \tau_{nm} & 0 \end{pmatrix} \tag{2.6}$$

et :

$$\begin{cases} x &= (a_{11}, a_{12}, \cdots, a_{1m}, a_{21}, \cdots, a_{2m}, \cdots, a_{nm}, \delta)^T \\ l_x &= (0, \cdots, 0, \xi)^T \quad \text{avec} \quad \xi > 0 \\ u_x &= (1, \cdots, 1)^T \\ f &= (1, \cdots, 1, -1)^T \end{cases} \tag{2.7}$$

La résolution de ce programme linéaire s'effectue en deux phases. La première phase consiste à rechercher une solution de base admissible. Seule cette première phase est utile pour déterminer si une prise définit ou non une fermeture en force : la prise définit une fermeture en force si et seulement si il existe une solution admissible.

La deuxième phase permet de trouver la valeur optimale pour le vecteur x. Cette valeur correspond aux efforts minimum pour obtenir l'effort δ maximum. Cette valeur optimale permet de comparer les prises. Il faut toutefois noter que l'optimum obtenu dépend du choix effectué pour le point c_1. Il serait bien sûr possible de faire la moyenne des valeurs obtenu pour chacun des c_i, mais au détriment du temps de calcul.

Temps de calcul

Nous avons utilisé un ordinateur portable équipé d'un processeur Pentium-M à 1.7 GHz sous Windows pour effectuer nos tests. Nous avons utilisé Matlab et les méthodes du simplexe et du point intérieur pour résoudre les problèmes linéaires. De nombreux tests on été effectués sur des problèmes 2D et 3D, ils confirment l'efficacité de ces méthodes pour le calcul des prises en fermetures en force.

Nous avons comparé notre méthode pour les tests qualitatifs avec la meilleure méthode connue [Liu, 1999]. Cette méthode utilise une approximation des cônes de friction par des cônes convexes polyédriques à m cotés. Après le calcul d'un point intérieur à l'enveloppe convexe, la méthode conduit à la résolution d'un problème de programmation linéaire. Le problème obtenu comporte 6 variables et nm inéquations, alors que notre approche conduit à un problème à nm variables et 6 équations.

Exemple

Nous avons repris un exemple de [Liu, 1999] défini par :

$$c_1 = [2,0,0]^T; c_2 = [0,1.5,0]^T; c_3 = [0,0,2]^T; c_4 = [1.2,-2,0]^T$$
$$z_1 = [-1,0,0]^T; z_2 = [0,-1,0]^T; z_3 = [0,0,-1]^T; z_4 = [0,1,0]^T$$

Dans un premier exemple, figure 2.5, le coefficient de frottement est $\mu = 0.5$ et la prise définit une fermeture en force. La courbe représente le temps de calcul en fonction du nombre de facettes m. Pour le deuxième exemple, figure 2.6, le coefficient n'est plus que $\mu = 0.3$ et la

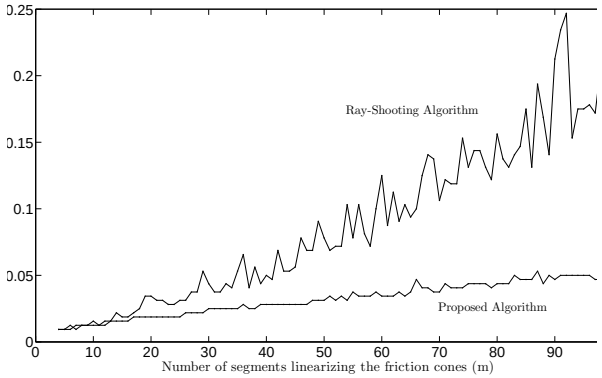


FIGURE 2.5 – Temps de calcul pour une prise à quatre doigts définissant une fermeture en force

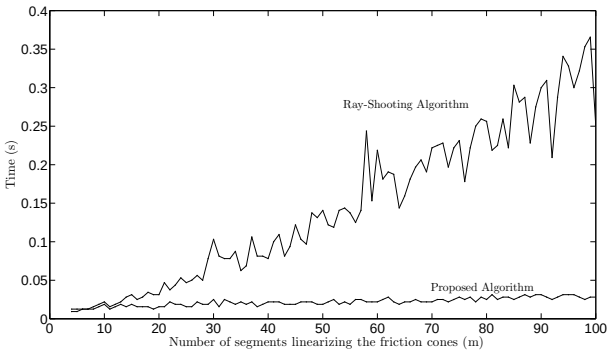


FIGURE 2.6 – Temps de calcul pour une prise à quatre doigts ne définissant pas une fermeture en force

prise ne définit plus une fermeture en force. Dans ce deuxième cas, la différence est beaucoup plus nette car notre algorithme décide dès qu'il n'a pas trouvé de solution admissible pour le problème.

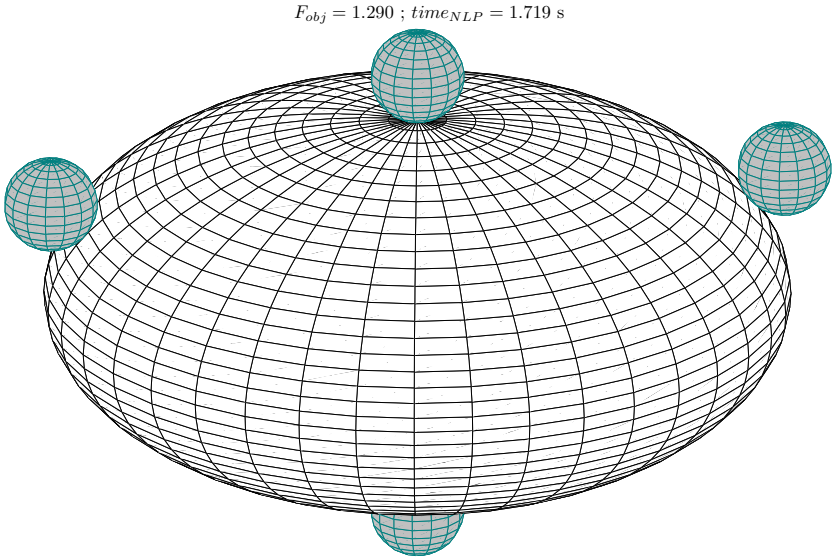
Du point de vue temps de calcul et complexité, notre méthode se comporte nettement mieux que la méthode de [Liu, 1999] qui était la meilleure méthode connue. Le temps de calcul dépend, tout d'abord, du nombre de points de contact qui n'est généralement pas très grand. Il dépend aussi du nombre m de vecteurs de discrétisation des cônes de friction. Les courbes 2.5 et 2.6 montrent l'évolution du temps de calcul en fonction du nombre m de facette de discrétisation pour une prise à quatre doigts.

Exemple 2

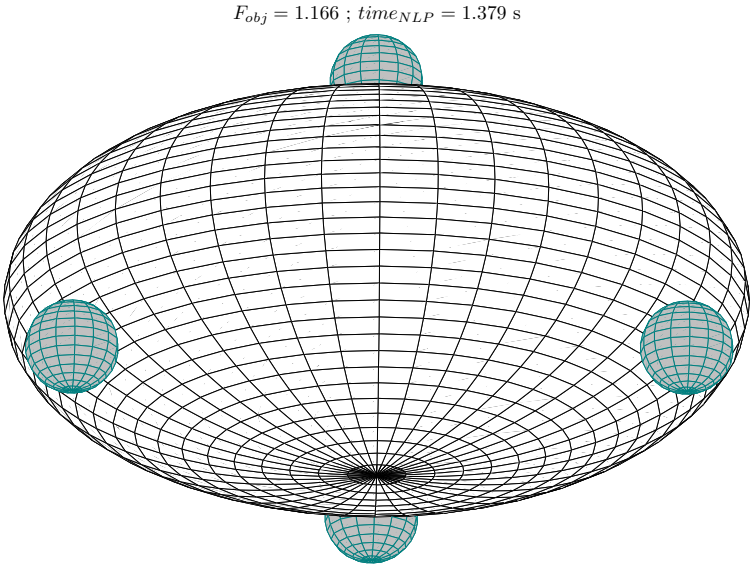
Nous considérons ici la prise quasi optimale sur un ellipsoïde de révolution de la figure 2.7 avec un coefficient de frottement $\mu = 0.5$. La position des quatre doigts et des normales associées sont définies par P^* en dessous de la figure 2.7. Pour $m = 100$, nous avons obtenu un temps CPU de 43.7 ms alors qu'avec l'algorithme de lancé de rayon nous obtenons 184.4 ms.

2.2.7 Calcul d'une prise optimum

Nous avons vu que le choix d'une prise ne nécessite pas l'obtention de la meilleure prise. Toutefois, pour une main animant un objet qu'elle tient, le calcul des prises permettant le mouvement



(a)



(b)

FIGURE 2.7 – Prises optimum sur des ellipsoïdes.

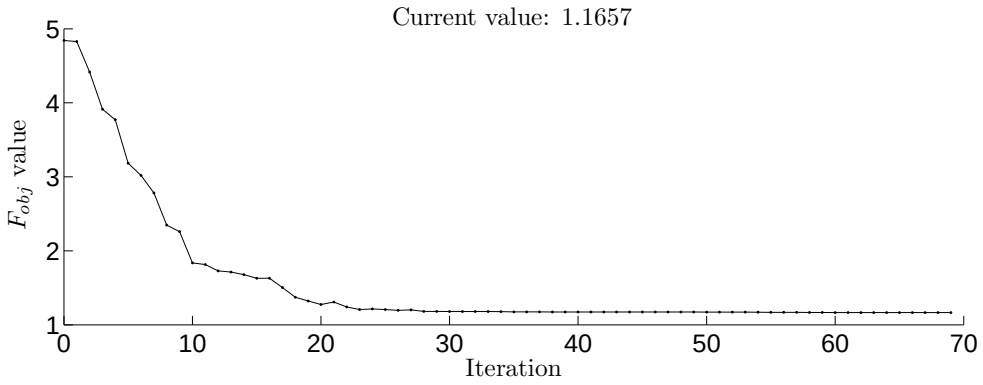


FIGURE 2.8 – Critère d'optimisation F_{obj} en fonction du nombre d'itération pour la prise de la figure 2.7b

peut être avantageusement calculé par des techniques d'optimisation. Dans [Bounab *et al.*, 2009], nous présentons quelques résultats intéressants pour le calcul de prise optimale.

Contraintes du problème d'optimisation

La première condition du théorème 2 consiste à vérifier que tous les axes centraux de type Δ_g^* génèrent positivement l'espace $\mathbb{R}^3$. Cette condition fournit les contraintes suivantes :

– trois équations pour les forces :

$$\sum_{i=1}^{n}(f_{xi}\, x_i + f_{yi}\, y_i + f_{zi}\, z_i) = -\delta z_i \tag{2.8}$$

– et trois pour les moments :

$$\sum_{i=2}^{n} d_i \wedge (f_{xi}\, x_i + f_{yi}\, y_i + f_{zi}\, z_i) = 0. \tag{2.9}$$

– Les contraintes quadratiques liées à la friction :

$$f_{ix}^2 + f_{iy}^2 - \mu^2 f_{iz}^2 \leqslant 0\ ,\ i = 1, \ldots, n. \tag{2.10}$$

– Les limites physiques sur les forces des doigts :

$$f_{ix}^2 + f_{iy}^2 + f_{iz}^2 \leqslant ||f_i^{\max}||^2\ \ ,\ i = 1, \ldots, n. \tag{2.11}$$

La seconde condition du théorème 2 conduit à vérifier que tous les moments engendrés au point c_i par les n cônes de friction génèrent positivement l'espace $\mathbb{R}^3$:

– Nous obtenons trois inéquations pour les moments :

$$\begin{cases} -\sum_{i=2}^{n} |t_{i/c_1}.x| \leqslant -\varepsilon \\ -\sum_{i=2}^{n} |t_{i/c_1}.y| \leqslant -\varepsilon \quad \text{avec } \varepsilon > 0 \\ -\sum_{i=2}^{n} |t_{i/c_1}.z| \leqslant -\varepsilon \end{cases} \tag{2.12}$$

Les moments t_{i/c_i} sont exprimés par rapport au point c_1 dans un repère local de l'objet. Le repère lié au doigt i est défini par (x_i, y_i, z_i) dans le repère de l'objet. Les moments t_{i/c_i} sont donnés par : $t_{i/c_i} = d_i \wedge (f_{xi}\, x_i + f_{yi}\, y_i + f_{zi}\, z_i)$

Le problème d'optimisation peut se mettre sous la forme :

$$\min_x F_{obj} \ : \ \begin{cases} C(x) \leqslant 0 \\ Ceq(x) = 0 \\ l_x \leqslant x \leqslant u_x \end{cases} \tag{2.13}$$

avec :

$$x = (f_{x1}, f_{y1}, f_{z1}, \ \dots \ , f_{xn}, f_{yn}, f_{zn}, P, \delta)^T$$
$$l_x = (f_1^{\min}, f_1^{\min}, 0, \ \dots \ , f_n^{\min}, f_n^{\min}, 0, P_{\min}, \varepsilon)^T$$
$$u_x = (f_1^{\max}, f_1^{\max}, f_1^{\max}, \ \dots \ , f_n^{\max}, f_n^{\max}, f_n^{\max}, P_{\max}, \delta^{\max})^T$$

F_{obj} correspond au critère de qualité de la prise. Les équations non-linéaires $Ceq(x)$ et les inéquations non-linéaires $C(x)$ sont définies à partir des relations (2.8) et (2.12). Le vecteur P définit les paramètres géométriques de l'objet à saisir. $\delta^{\max}$ est définie par $\delta^{\max} = \sum_{i=1}^{n} f_i^{\max}$.

2.2.8 Choix du critère d'optimisation

De nombreux critères d'optimisation sont possibles pour le problème que nous venons de présenter. La fonction objectif F_{obj} peut être associée à différents paramètres de prise comme la position des points de contact, la configuration de la main ou la force exercés par les doigts. Un critère plus général peut être construit en combinant plusieurs de ces paramètres. Dans [Bounab *et al.*, 2009], nous avons retenu

$$F_{obj} = \frac{F + E}{\delta} + g_c \tag{2.14}$$

où $F = \sum_{i=1}^{n} ||f_i||$ définit la force appliquée que l'on souhaite minimiser. La quantité $E = \sum_{i=1}^{n} | \, ||f_i|| - \frac{F}{n}|$ est minimisée pour favoriser la participation de tous les doigt à la prise. Le paramètre δ est maximisé pour garantir la fermeture en force. Le second terme $g_c = \frac{1}{n} || \sum_{i=1}^{n} c_i ||$ correspond à la distance entre le centre des points de contacts et le centre de masse qui est ici choisi comme origine du repère de l'objet. Le rapprochement de ces deux points permet de diminuer l'impact des forces gravitationnelles et inertielles.

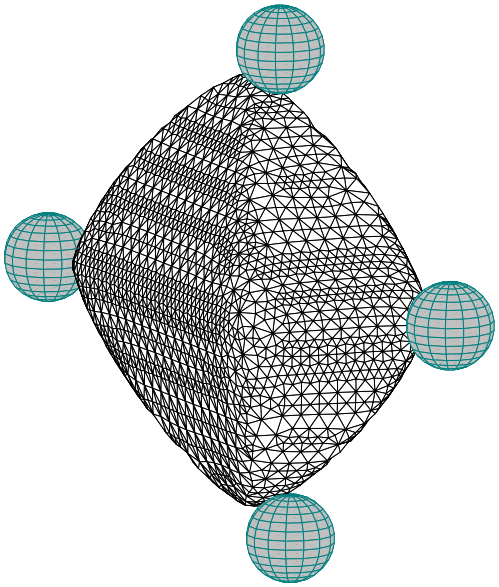
Ce problème d'optimisation est un problème d'optimisation non linéaire pour lequel de nombreuses méthodes de résolution peuvent être utilisées. Nous avons retenu une méthode de programmation quadratique séquentielle. Elle utilise une approximation quadratique du lagrangien pour construire un sous-problème de programmation quadratique.

2.2.9 Exemple

Nous présentons d'abord quelques résultats de calcul de prise pour un ellipsoïde de révolution de rayon $R = 2$ et $r = 1$ (figure 2.7), et ensuite pour un objet défini par une super quadrique (figure 2.9). Nous choisissons $||f_i^{\max}|| = 1$N. A partir d'une première prise admissible généré aléatoirement. L'admissibilité de la prise est vérifiée à l'aide de la formulation linéaire. Nous avons choisi un coefficient de friction $\mu = 0.4$. Le problème consiste à trouver la position optimale des quatre contacts c_1, c_2, c_3, c_4 sur l'ellipsoïde. La position du point de contact est déterminée par les paramètres ϕ_i et ψ_i tel que $c_i(\phi_i, \psi_i) = (R\cos\phi_i \cos\psi_i, R\cos\phi_i \sin\psi_i, r\sin\phi_i)^T$.

Une prise quasi-optimale est obtenue en moins de 50 itérations (voir figure 2.8). Pour la première prise, les doigts sont positionnés dans un même plan. Dans le deuxième cas, les doigts sont positionnés symétriquement autour de l'ellipsoïde. Ces prises apparaissent cohérentes avec notre expérience humaine.

$F_{obj} = 1.307$; $time_{NLP} = 2.328$ s

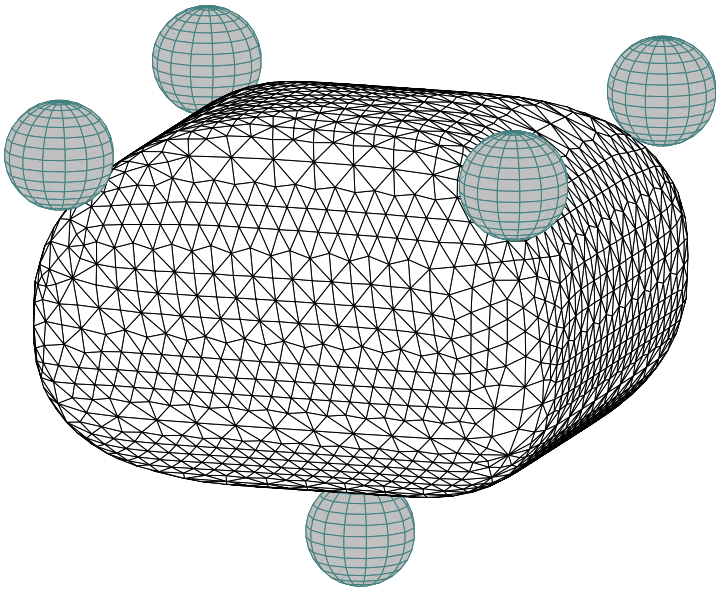


$\mathbf{P}^* = \{[0.000,\ 5.088]^T; [-1.247,\ 1.739]^T; [1.322,\ 1.748]^T; [-0.001,\ 1.909]^T\}$ rad

$r_x = 0.5,\ r_y = 1,\ r_z = 1,\ \eta = 0.2,\ \varepsilon = 1.5$

(a)

$F_{obj} = 1.277$; $time_{NLP} = 3.172$ s



$\mathbf{P}^* = \{[-1.571,\ 3.539]^T; [0.634,\ 0.783]^T; [0.635,\ 5.494]^T; [0.634,\ 2.361]^T; [0.635,\ 3.926]^T\}$ rad

$r_x = 1,\ r_y = 1,\ r_z = 0.7,\ \eta = 0.2,\ \varepsilon = 0.8$

(b)

FIGURE 2.9 – Prises optimum sur des super-quadriques.

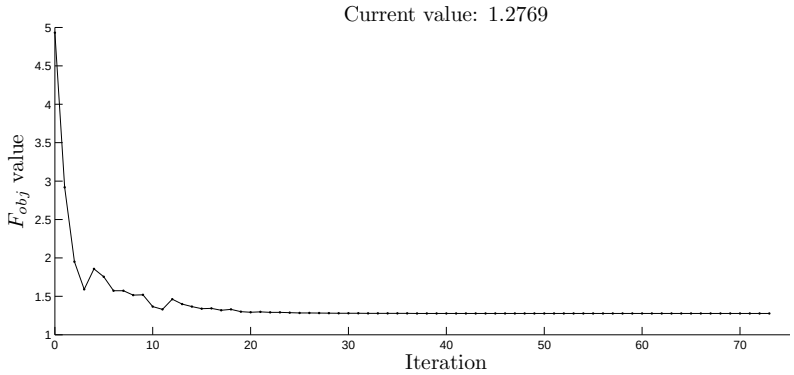


FIGURE 2.10 – Critère d'optimisation F_{obj} en fonction du nombre d'itération pour la prise de la figure 2.9b

Pour l'exemple de la figure 2.9, la surface est définie par la fonction implicite : $H(x,y,z) = [\left(\frac{x}{r_x}\right)^{\frac{2}{\eta}} + \left(\frac{y}{r_y}\right)^{\frac{2}{\eta}}]^{\frac{\eta}{\varepsilon}} + \left(\frac{z}{r_z}\right)^{\frac{2}{\varepsilon}} - 1$. r_x, r_y et r_z définissent les facteurs d'échelle associés à la taille de la super-quadrique dans les directions x, y et z. η et ε sont des paramètres qui définissent la forme de la super-quadrique. La position d'un point c_i peut être définie par deux paramètres β_i et λ_i : $c_i(\beta_i, \lambda_i) = (r_x c_{\beta_i}^{\eta} c_{\lambda_i}^{\eta}, r_y c_{\beta_i}^{\eta} s_{\lambda_i}^{\eta}, r_z s_{\beta_i}^{\eta})^T$ avec $c_a^b = signe(\cos a)|\cos a|^b$ et $s_a^b = signe(\sin a)|\sin a|^b$. Nous avons choisi un coefficient de friction $\mu = 0.4$.

Nous avons testé l'algorithme avec différentes valeurs des paramètres de la super-quadrique et en utilisant plusieurs nombres de points de contact. La figure 2.9 présente quelques résultats obtenus par notre méthode. Les paramètres des super-quadriques et la solution obtenue sont présenté en dessous de la figure, le temps de calcul est indiqué au dessus. La figure 2.10 présente l'évolution du critère d'optimisation en fonction de l'itération pour la prise de la figure 2.9b. Nous observons que l'algorithme converge en quelques itérations. La méthode d'optimisation que nous avons retenue est locale, elle ne fournit qu'un optimum local qui dépend de la position initiale choisie pour les doigts.

2.3 Planification des prises

Il existe une grande variété de prises possibles pour une main que l'on peut classer à partir de la position relative des doigts et de l'objet [Cutkosky and Howe, 1990]. Il n'existe pas de classification comparable pour les prises à deux mains, dans le cadre du projet européen DEXMART [8] une telle classification est en cours d'élaboration.

Les deux grandes familles de prises sont les prises enveloppantes et les prises par pincement. En anglais, pour désigner les prises enveloppantes on emploie le terme force (*power*) qui fait référence au fait que ces prises peuvent transmettre des efforts importants. De même on emploie le terme *précision* pour désigner les prises par pincement utilisant le bout des doigts pour permettre la manipulation fine des objets.

Le choix d'une prise pourrait être simple car il existe généralement un grand nombre de solutions. Mais cette diversité cache des contraintes importantes liées à l'utilisation de l'adhérence et à la nécessité de tenir l'objet pendant toute le durée de la tâche. La tâche introduit des contraintes d'accessibilités directement et au travers des obstacles.

8. European FP7 project DEXMART, http://www.dexmart.eu/, DEXterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation with sMART sensory-motor skills: A bridge from natural to artificial cognition

Nous pouvons distinguer deux grands types d'approche du problème de planification de tâche de manipulation suivant que l'on utilise ou non l'apprentissage.

Les approches par apprentissage [Zollner *et al.*,] visent à reproduire les tâches effectués par les humains. Comme la planification d'une tâche de manipulation est très complexes, ces approches essaient de supprimer ou au moins de simplifier la planification. Dans un premier temps, de nombreux capteurs tels que caméras, capteur de force, gants de données, télémètres lasers, mesurent les mouvements de l'homme. Après filtrage, analyse et décomposition en mouvements élémentaires, le système essaie de reproduire ces mouvements pour refaire la tâche ou pour effectuer une nouvelle tâche semblable. Cette approche est très prometteuse dans des contextes où les tâches varient peu. Pour la saisie elle nécessite d'avoir appris à saisir l'objet ou un objet semblable.

Une idée importante a été proposée par [Borst *et al.*, 2003] : il existe un grand nombre de solutions parmi lesquelles plusieurs sont bonnes. Il est donc inutile de chercher la solution optimum. Cette remarque conduit à privilégier notamment des méthodes aléatoires guidées par des heuristiques.

De nombreuses solutions pour la planification de prises ont été proposées notamment dans le cas des prises enveloppantes. Citons par exemple l'approximation de l'objet par des cylindres à base elliptiques [Bard *et al.*, 1995]. L'axe naturel de prise [Michel *et al.*, 2006] est construit à partir des facettes parallèles et opposées de l'objet pour capter la direction de saisie. L'utilisation de primitives de base comme des boites, des cylindres ou des cônes pour approximer l'objet et simplifier la recherche peut aussi donner de bons résultats [Miller *et al.*, 2003].

Nous allons détailler quelques aspects de la planification des prises sur lesquels nous avons travaillé comme l'heuristique inertielle et la décomposition des objets complexes. Nous présenterons ensuite quelques pistes pour prendre en compte d'autres contraintes liées à la tâche.

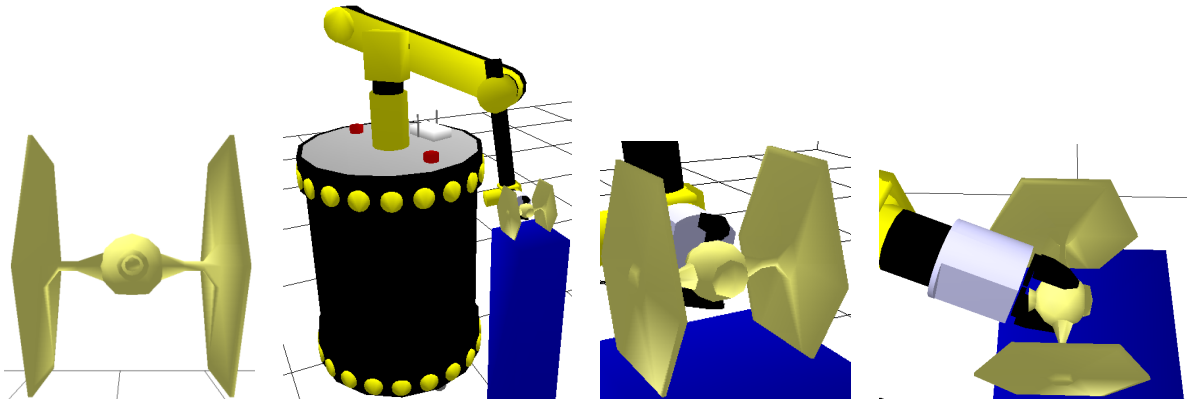
2.3.1 Inertie ou guider la recherche des prises

Très souvent, les efforts extérieurs se réduisent à la gravité et aux efforts de contact, il est alors souhaitable de saisir l'objet au niveau de son centre d'inertie afin de minimiser les efforts de saisie. De même pour des objets simples (cylindres, boites...), les directions dans lesquelles on peut placer le préhenseur correspondent aux directions principales d'inertie.

Comme le calcul du centre d'inertie et des directions principales d'inertie est de complexité linéaire avec le nombre de facettes [Mirtich, 2005], le calcul de ces positions de base est très intéressant. A ce stade, on obtient 24 positions de saisie : 4 pour chaque direction x^+, x^-, y^+, y^-, z^+ et z^-. L'introduction de positions aléatoires autour de ces positions de base permet d'augmenter le nombre de prises candidates comme nous allons le voir.

A partir de ces considérations, nous avons proposé une stratégie pour la recherche de prises [Lopez-Damian *et al.*, 2005a] :

- calcul du centre d'inertie et des directions principales d'inertie ;
- calcul de positions de saisie aléatoires autour de l'objet, mais guidée afin de privilégier la position du centre d'inertie et les orientations suivant les directions principales d'inertie ;
- élimination des prises qui ne constituent pas une fermeture en force ;
- élimination des prises en collision ;
- Sélection des meilleures prises.



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 2.11 – In a) Scaled spaceship model, b) Grasp found for the planner c) Grasp zoom and d) Grasp zoom seen from above. The grasp is found near the mass center as it is the most logical point to see how forces act on the object

Calcul de la position de saisie

A partir d'une position initiale obtenue, par exemple par tirage aléatoire guidé par les paramètres d'inertie de l'objet, nous calculons une position recalée et les points de contact pour la pince choisie. Une prise est donc caractérisée par la position relative de la pince par rapport à l'objet et la position des points de contact.

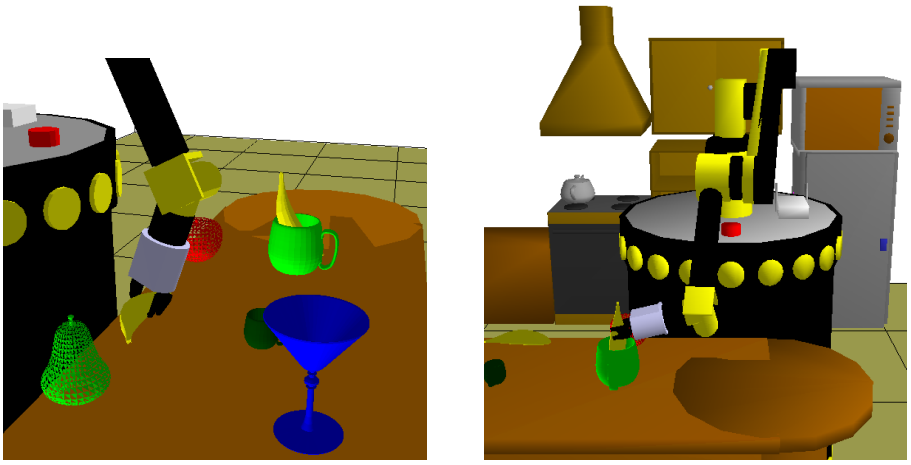
Le calcul des points de contact dépend de la pince et doit être redéfini pour chaque nouvelle pince. Dans le cas d'une pince à mors parallèle ou d'une prise enveloppante, il est nécessaire d'ajuster la position de la pince pour assurer plusieurs points de contact [Lopez-Damian, 2006].

Pour les pinces multi-doigts, une solution simple consiste à positionner la pince ouverte à la position choisie. Puis à simuler la fermeture des doigts suivant une trajectoire jusqu'à ce que chaque doigts entre en contact avec l'objet. Cette méthode simple est coûteuse en temps de calcul et ne permet pas de trouver certaines prises à l'intérieur d'une concavité. Il est plus intéressant de calculer l'intersection de la trajectoire d'un point du doigt avec l'objet, puis d'ajuster la positions de contact. Cet ajustement est plus simple si les doigts ont une surface simple telle qu'une surface sphérique.

Parmi l'infinité de trajectoires permettant de fermer une main équipée de doigt à plusieurs degrés de liberté, il est possible de choisir des trajectoires simples (droites, cercles). Le problème se pose avec plus d'intensité pour les pinces sous-actionnées qui produisent des trajectoires plus complexes. Nous avons proposé une solution dans le cas de la pince Barrett [Lopez-Damian *et al.*, 2006].

Quelques résultats issus du travail d'Efrain Lopez-Damian

Le premier exemple figure 2.11 présente la meilleure prise trouvé pour un modèle réduit de vaisseau spatial issue d'un film de science fiction. La position du robot est donnée comme condition initiale et la prise obtenue est sans collision.



(a) Banana alone (b) Banana inside mug

FIGURE 2.12 – The figure shows a service robot in a kitchen and how the grasp planner can find a solution for an object in different situations, for example a banana on the table surrounded by obstacles and a banana inside a mug

Le deuxième exemple (figure 2.12) montre deux exemples de saisie de banane. Dans le premier cas, la banane est posée sur la table et le robot l'attrape vers son milieu. Dans le deuxième cas, la banane est à l'intérieur d'une grande tasse. Le robot l'attrape par la partie accessible.

2.3.2 Décomposition des objets complexes

Lorsque l'objet est complexe, les paramètres inertiels n'ont pas de lien direct avec les propriétés locales des zones de l'objet où une saisie peut être effectuée. L'heuristique basée sur les propriétés inertielles échoue.

En présence de tels objets complexes, il est très intuitif pour nous de choisir l'anse, la poignée, le bouton, le manche ou une forme en faisant office pour saisir facilement l'objet. Pour ces objets complexes, nous devons définir des algorithmes permettant d'isoler des éléments permettant la saisie de ces objets.

Parmi les techniques proposées, nous pouvons citer la décomposition en primitives géométriques (boites, cylindres, sphères...) [Miller *et al.*, 2003]. Des prises possibles sont associées à chaque primitives. Pour choisir une prise, le système évalue chacune des prises possibles et choisit la meilleure. La décomposition n'est pas unique et reste manuelle dans ce cas.

[Goldfeder *et al.*, 2007] propose une décomposition sous forme d'un arbre de super quadriques. Outre la relative complexité des calculs, la méthode semble sensible aux bruits des données réelles.

[Huebner *et al.*, 2008] propose une décomposition hiérarchique en boites englobantes à partir du nuage de points enveloppe. Pour une orientation donnée, les calculs sont rapides, mais les boites peuvent être assez éloignées des formes réelles.

Avec Efrain Lopez Damian [Lopez-Damian *et al.*, 2005b], nous avons utilisé avec succès une méthode de décomposition de l'objet en éléments convexes approchés [Lien and Amato, 2003, Lien and Amato, 2007]. Sur chaque élément d'une décomposition de l'objet en éléments convexes approchés, nous appliquons l'algorithme de base.

Plus récemment, dans le cadre du projet DEXMART et en collaboration avec Jean-Philippe

Saut, nous avons repris cette technique de décomposition approchée en s'inspirant notamment des travaux de [Kraevoy *et al.*, 2007].

Décomposition en éléments convexes

La décomposition d'un objet en éléments convexes [Bajaj and Dey, 1984, Chazelle, 1984] est assez intuitive pour constituer une représentation liée à la topologie de l'objet. Malheureusement elle se heurte à plusieurs problèmes :

- elle n'est pas unique, le choix de la concavité que l'on va traiter en premier influe sur le résultat ;
- le choix de la surface de découpage modifie le résultat ;
- elle est sensible à tous les détails formant des concavités ;
- la décomposition en un nombre minimum de partie convexe est un problème NP-complet.

Nous avons utilisé une méthode de décomposition convexe approchée [Lien and Amato, 2003, Lien and Amato, 2007]. Cette méthode permet de contrôler le niveau de détail de la décomposition. La méthode consiste à choisir l'arête « la plus concave » au sens d'une distance entre une arête et l'enveloppe convexe et à couper l'objet en deux à partir de cette arête. On répète cette décomposition élémentaire tant que la concavité est plus grande qu'un seuil fixé.

Décomposition en éléments convexes approchés

Pour un objet polyédrique triangulé quelconque, nous pouvons calculer son enveloppe convexe. Nous appellerons concavité tout volume connexe maximum qui appartient au volume limité par l'enveloppe convexe sans appartenir à l'objet. Pour chaque concavité, nous caractérisons sa concavité par la concavité de l'arête la plus concave de la concavité.

Nous définissons la concavité d'une arête par la longueur minimale d'un chemin. Ce chemin appartient à l'intérieur de la concavité et relie le milieu de l'arête à l'enveloppe convexe.

Cette définition pose un problème dans le cas d'objet mince où des arêtes relient deux faces peu éloignées. Dans ce cas, il est possible d'exclure du calcul les faces adjacentes à l'arête.

Pour simplifier le calcul de la concavité des arêtes, nous avons retenu la longueur du segment qui joint le milieu de l'arête à l'enveloppe convexe. Le lecteur pourra trouver plus de détails sur ces questions dans [Lien and Amato, 2007] et [Lopez-Damian, 2006].

Découpage en deux de l'objet Une fois l'arête sélectionnée, le choix de la surface pour découper l'objet est complexe. Lien et Amato proposent de choisir une chaîne constituée d'arêtes pour effectuer la découpe. Cette solution évite de découper des facettes, mais le choix de la chaîne est complexe. Nous avons choisi la solution plus simple consistant à couper l'objet par un plan passant par l'arête sélectionnée.

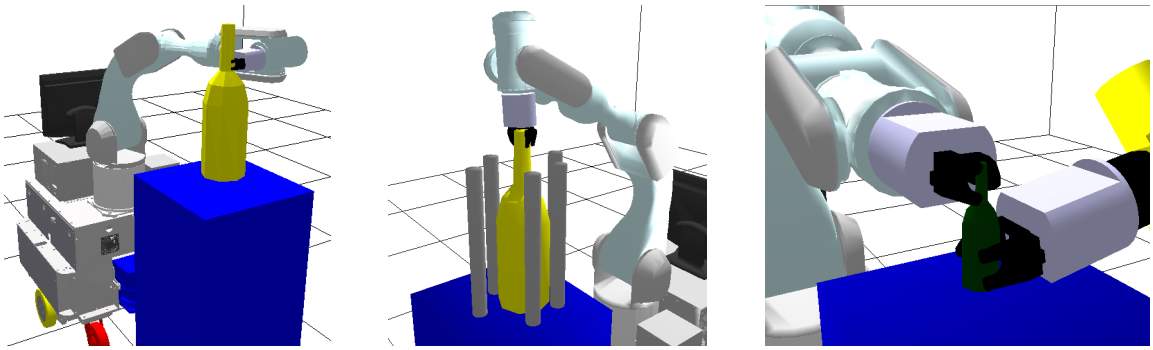
Parmi l'infinité de plan passant par l'arête, nous avons choisi celui qui donne la surface de coupe la plus petite.

Le plan choisi découpe l'objet en N parties pour lesquelles l'appartenance à l'un où l'autre des deux objets fils doit être déterminée par continuité. L'objet est alors coupé en deux par un plan contenant l'arête la plus concave.

Résultats Cette approche nous a permis de découper des objets de manière satisfaisante et d'obtenir des position de saisie pour des objets complexes.

(a) Bouteille (b) Enveloppe convexe (c) plan de coupe (d) Décomposition

FIGURE 2.13 – Découpe d'une bouteille en deux éléments



(a) (b) (c)

FIGURE 2.14 – a) Prise calculée pour une bouteille, le choix de la prise sur le bas du goulot est dû au critère de choix d'une prise qui favorise les prises proches du centre de gravité. b) Prise en présence d'obstacles. c) Deux prises sur une même bouteille

2.3.3 Développements plus récents

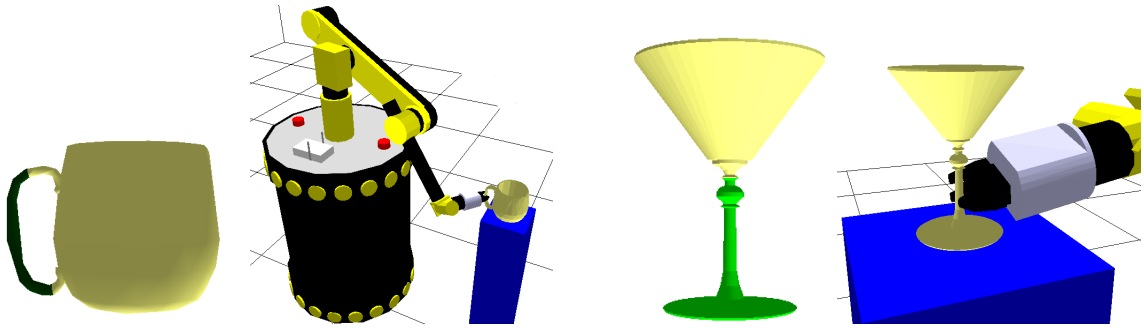
Nous avons récemment repris ces travaux avec Jean-Philippe Saut dans le cadre du projet DEXMART. Le découpage par un plan nécessite de travailler sur les triangles et engendre des calculs assez compliqués. D'autre part la notion d'arête la plus concave n'est pas toujours pertinente par rapport à la découpe. Jean-Philippe Saut a repris l'approche présentée dans [Lien and Amato, 2007] dans une version simplifiée pour extraire des zones approximativement convexes. Un résultat est présenté sur la figure 2.16.

2.3.4 Choix de la prise pour effectuer une tâche de manipulation

Considérons une tâche canonique de prise et dépose d'un objet. Jusqu'ici, nous n'avons pris en compte que le couple préhenseur et objet pour vérifier qu'il n'y avait pas de collision. Des collisions peuvent aussi survenir entre le robot et l'environnement ou entre l'objet transporté et l'environnement. De même des problèmes d'accessibilité liés aux butés du bras peuvent survenir.

Pour effectuer la tâche avec une seule prise, la prise doit être compatible avec la saisie et la dépose. Très souvent il n'y a pas de prise compatible, il faut alors déposer l'objet pour le ressaisir dans une nouvelle position. Avec des systèmes à deux bras, il est aussi possible de changer l'objet de main.

Avec Efrain Lopez Damian, nous avons proposé de planifier une prise compatible avec l'action de donner l'objet à un homme en choisissant une prise permettant une deuxième saisie sur l'objet. L'utilisation d'un modèle de main se rapprochant plus de la main humaine permet d'affiner ces



(a) (b) (c) (d)

FIGURE 2.15 – a) Décomposition d'une tasse b) Saisie de la tasse par sa anse c) Décomposition d'un verre d) Saisie du verre par son pied

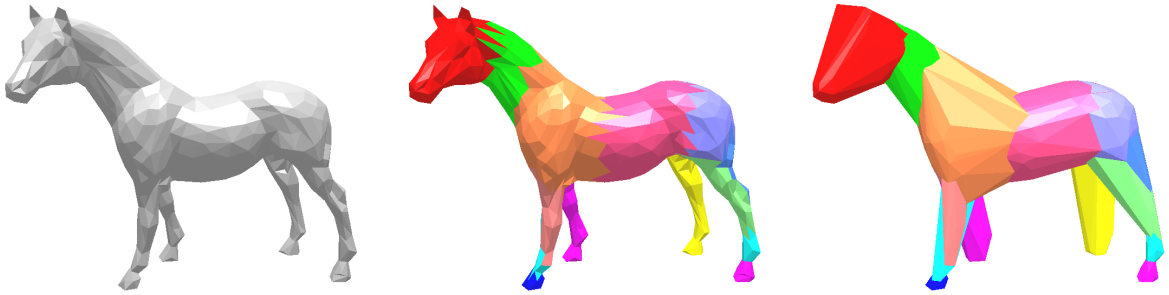


FIGURE 2.16 – Le modèle original est à gauche, la décomposition convexe approchée du maillage est au centre et les enveloppes convexes des parties convexes à droite.

tests.

Nous voyons apparaître une interdépendance entre la planification de la prise et la planification de la tâche. Nous allons voir comment planifier de telles tâches dans les paragraphes suivants.

2.4 Le planificateur de tâche de manipulation

Efrain Lopez-Damian, dans son travail de thèse, a proposé un planificateur de tâches de déplacement d'un objet. L'objet est saisie puis déposé ailleurs ou donné à un humain.

Du point de vue géométrie, la planification du déplacement d'objets peut être vue comme un problème de planification de mouvements particuliers où le robot se déplace seul (mouvement de transit) ou en transportant un objet (mouvement de transfert). La solution est une suite de mouvement de transit et de transfert reliés par des états appartenant aux deux ensembles et correspondant aux saisies ou déposes d'un objet [Alami *et al.*, 1989].

2.4.1 Planification de mouvements

La planification pour la manipulation et la saisie d'objets constitue un sous-problème du problème général de la planification de mouvements. Dans les années quatre-vingt, la notion d'espace des configurations a été introduite par Lozano-perez [Lozano-Perez, 1983] dans la communauté des roboticiens. La recherche d'un trajet sans collision pour un robot se déplaçant

parmi des obstacles est transformé en une recherche d'un chemin pour un point se déplaçant dans l'espace des configurations CS_{free}.

L'étude des méthodes de recherches de trajectoires basées sur ces concept n'a pas débouché sur des méthodes pratiques mais à montré la complexité du problème [Reif, 1979, Kavraki and LaValle, 2008].

A coté de ces développements théoriques, des méthodes locales sont proposées. Elles permettent d'obtenir des résultats pratiques pour des problèmes simples et localisés. Les méthodes basées sur des champs de potentiel artificiel ont donné lieu à de nombreux développements [Khatib, 1986].

Au milieu des années quatre-vingt-dix, une nouvelle approche est proposée. Au lieu de représenter explicitement les obstacles dans l'espace des configurations, de nouveaux algorithmes capturent la connectivité de l'espace libre CS_{free} par échantillonnage. Un graphe dont les nœuds représentent des configurations sans collision du robot et les arêtes les déplacements entre ces nœuds est alors construit en appliquant une méthode locale. Cette dernière dépend de la structure cinématique du robot et des contraintes du mouvement. Ces algorithmes de planification de mouvements par échantillonnage peuvent être divisés en deux grandes classes : les méthodes probabilistes aléatoires et les algorithmes d'accroissement.

Les premières se décomposent en trois phases, la phase d'apprentissage ou échantillonnage qui construit la carte des chemins ou roadmap, la phase de recherche d'un chemin sur ce graphe et la phase de lissage. La phase de lissage essaye de simplifier le chemin pour que le robot effectue un mouvement plus direct vers le but. Il est évident que ce type d'algorithme a besoin d'un détecteur de collision très performant.

Les algorithmes d'accroissement reposent sur l'idée de créer une carte de chemin sous la forme d'un arbre en capturant la connectivité de l'espace libre CS_{free}. La racine de cet arbre correspond à la configuration initiale, l'algorithme échantillonne l'espace pour trouver de nouvelles configurations correspondant à de nouveaux nœuds de l'arbre, puis de nouveaux arcs reliant ces nœuds. Après un certain temps, l'algorithme vérifie si la configuration finale peut être atteinte à partir d'un nœud. Une variante intéressante consiste à construire deux arbres en même temps en partant simultanément des configurations initiale et finale. L'algorithme s'arrête lorsque les deux configurations sont reliées ou qu'un nombre d'essais maximum a été atteint. Des techniques pour explorer plus rapidement ces arbres on été développées. Elles sont connus sous l'acronyme RRT pour *Rapidly exploring random tree* [LaValle and Ku, 2001].

A ce stade, nous disposons de deux briques, le planificateur de prise et le planificateur de mouvement. Nous allons maintenant voir comment, à partir de ces briques, il est possible de construire un planificateur de tâche.

2.4.2 Planificateur pour des tâches de manipulation interactive

Le planificateur proposé par Efrain Lopez-Damian a été conçu pour résoudre des problèmes d'échange d'objets avec un humain. Il a été développé comme un module du logiciel Move3D [Siméon *et al.*, 2001].

Pour cela, nous avons proposé une architecture composée de modules qui interagissent avec un contrôleur, voir Fig. 2.17.

Ce planificateur de tâches de manipulation est constitué de plusieurs modules de planification basés sur des algorithmes d'échantillonnage probabilistes. L'architecture est composée des modules suivants :

Contrôleur de tâches : c'est la partie qui régule tout le fonctionnement, le contrôleur peut être vu comme un ensemble de machines à états où un automate gère chaque tâche de

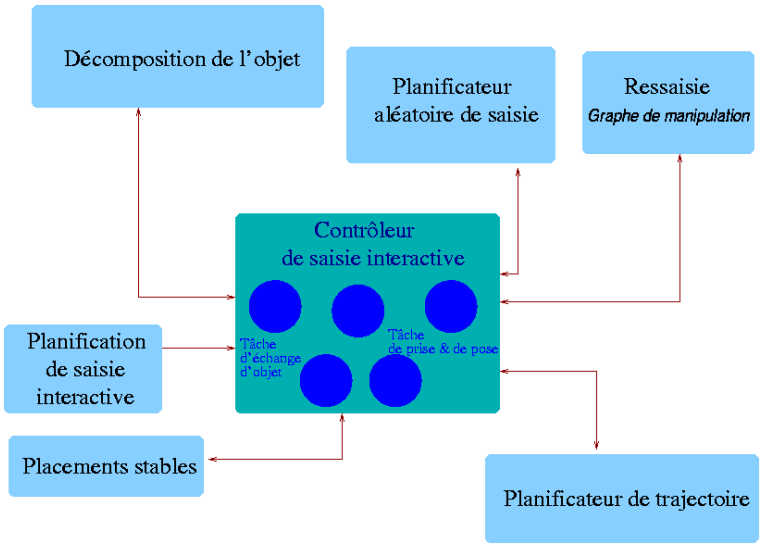


FIGURE 2.17 – Architecture modulaire pour un planificateur de manipulation interactif

planification. Les transitions entre états dépendent de drapeaux qui indiquent si une opération a réussi à fournir une solution. Chaque état de la machine correspond à une action effectuée par des opérateurs. Les actions sont réalisées par les modules. Les données de sortie de chaque module dépendent de l'opération effectuée. Les modules échangent les données dont ils ont besoin au moyen d'opérateurs.

Opérateurs et drapeaux : pour effectuer une action, le contrôleur utilise les opérateurs. Ceux-ci prennent en entrée le type d'action à effectuer et les données nécessaires pour la réaliser. A la sortie les opérateurs délivrent un drapeau indiquant si l'action a ou non réussi et, selon le cas, les données correspondantes.

Planification de saisie aléatoire : ce module fournit en sortie à la fois la prise ou un ensemble de prises, la configuration de prise pour le robot et le chemin pour aller prendre l'objet.

Génération de deux prises : pour les tâches de manipulation interactives, il est nécessaire que deux robots saisissent simultanément le même objet. Ce module génère ces deux prises et les deux saisies correspondantes. Une partition de l'objet peut être demandé par ce module.

Poses stables : les poses stables sont calculées en considérant l'enveloppe convexe des sommets en contact avec le plan support et en vérifiant que la projection du centre de gravité se trouve à l'intérieur de ce polygone aussi appelé polygone de sustentation.

Planification de mouvements : les mouvements de transit et de transfert du robot avec l'objet sont planifiés en utilisant les techniques de cartes de chemins aléatoires probabilistes par échantillonnage ou par arbres d'exploration rapides.

Test de compatibilité : ce module vérifie qu'une même prise peut être utilisée par le planificateur pour saisir l'objet dans sa configuration initiale et finale.

Planification de ressaisie : si le système ne trouve pas de prise compatible pour les configurations initiale et finale, l'objet peut être reconfiguré un certain nombre de fois pour trouver une série de prises compatibles. Ce module utilise les données du module de poses stables.

Décomposition d'objets : ce module calcule une partition en éléments volumiques de l'objet. Ces éléments sont utilisés comme entrées pour le planificateur de saisie.

2.4.3 Tâche de prise et dépose d'objets

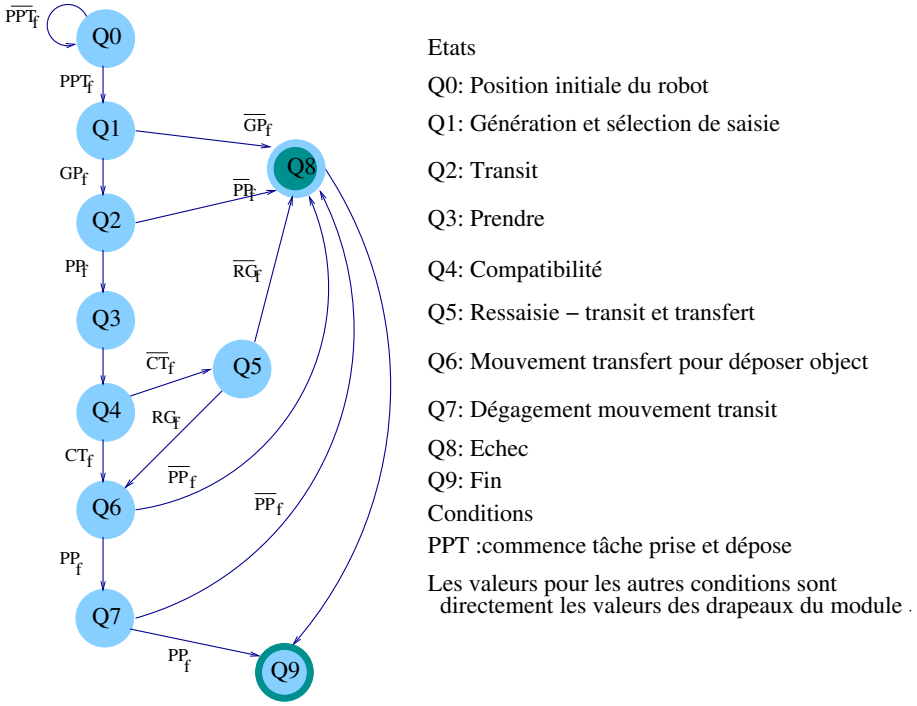
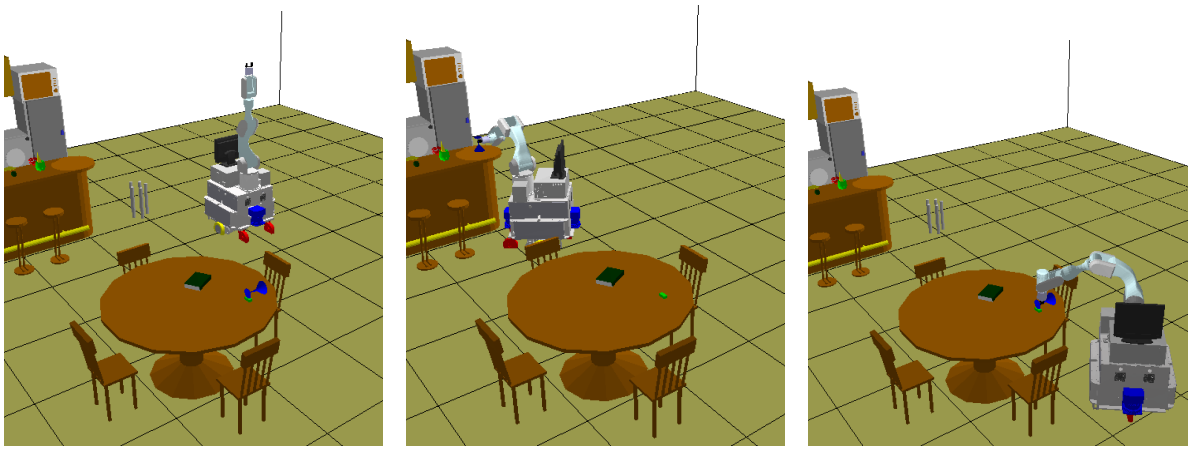


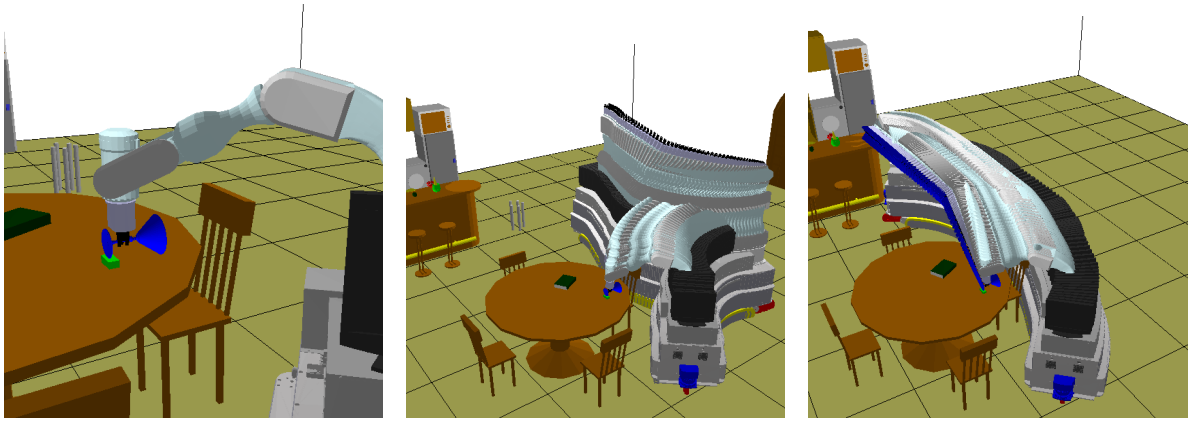
FIGURE 2.18 – Machine à état pour une tâche de prise et dépose d'un objet

Pour la tâche de manipulation consistant à prendre l'objet puis à le déposer ailleurs (figure 2.19), au départ, la machine à états est dans l'état initial qui correspond à la configuration initiale du robot et de l'objet (figure 2.18). L'état suivant qui représente le début du calcul correspond à la génération de la saisie. Si une prise et la configuration du robot associée sont trouvées, le système passe dans l'état de transit et demande la planification d'un chemin pour amener le préhenseur de l'état initial à la configuration de prise. En cas d'échec, c'est à dire si le planificateur n'a pas trouvé de configuration de prise, la machine passe dans l'état échec et arrête le processus.

Une fois que le robot s'est déplacé et a saisi l'objet, le système est dans l'état saisie et teste la compatibilité de la prise. Si elle est compatible, cela signifie que le planificateur a trouvé une configuration de dépose de l'objet pour cette prise et le planificateur peut évoluer vers l'état de compatibilité. Si le test échoue, l'état de ressaisie est activé. Il donnera en sortie une configuration de prise supplémentaire et la configuration de pose compatible ou se placera en échec. Une demande de planification du mouvement de transfert pour amener l'objet de sa position de saisie à la position de dépose est effectuée. Si un chemin est trouvé, la machine passe dans l'état d'objet posé. L'avant dernier état est alors atteint et correspond au mouvement de transit pour amener le robot dans sa configuration finale permettant d'atteindre le dernier état de fin de tâche. Dans le cas où les réponses sont négatives la machine évolue vers l'état d'échec.



(a) Configuration initiale (b) Configuration finale (c) Configuration de saisie



(d) Configuration de saisie agrandie (e) Chemin du mouvement de prise (f) Chemin vers la position finale

FIGURE 2.19 – Actions pour une tâche de prise et dépose d'un objet.

2.4.4 Chaînes cinématiques fermées

Pour déplacer un objet suivant une trajectoire prédéfinie définie par rapport à une repère fixe, l'objet est assimilé à un robot virtuel qui évolue sur cette trajectoire. Le robot manipulateur vient fermer une boucle cinématique pour effectuer le transport de l'objet.

Le système global définit un robot comme une chaîne cinématique qui peut être décomposé en chaînes actives et passives (figure 2.20). Une chaîne active fait évoluer le système, une chaîne passive utilise son modèle géométrique inverse pour rejoindre la chaîne active. Cette stratégie est utilisée pour résoudre les problèmes de planification pour les mécanismes qui forment une chaîne cinématique fermée [Lavalle *et al.*, 1999, Han and Amato, 2000].

Dans notre cas, lorsque le robot saisit l'objet posé, il forme une première chaîne fermée. À l'instant où l'objet est soulevé, cette chaîne est rompue. Nous pouvons alors utiliser ce type d'algorithme en déclarant l'objet comme partie active et le manipulateur comme chaîne passive pour calculer les configurations du robot entier par une technique aléatoire. Seule la trajectoire des chaînes actives est échantillonnée lors de la recherche d'un chemin. Nous avons utilisé l'algorithme de génération aléatoire pour chaînes fermées développé dans [Cortés *et al.*, 2002, Cortés, 2003] pour le module de planification des mouvements de transfert.

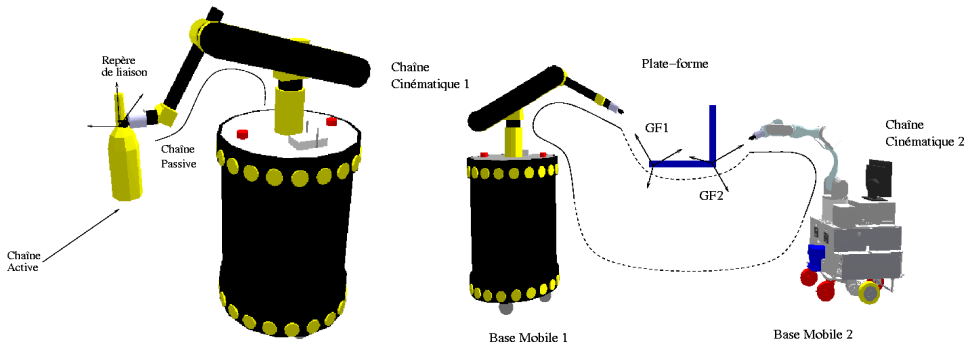


FIGURE 2.20 – Division des systèmes en chaînes actives et passives pour les tâches de manipulation

2.4.5 Tâche d'échange d'objets

Pour le travail d'Efrain Lopez-Damian, nous avons défini une tâche d'échange d'un objet entre un robot donneur et un robot receveur par : le robot donneur saisie un objet sur une table, le tend à un robot receveur qui le prend puis le dépose sur une deuxième table.

Lorsque les deux robots tiennent tous les deux l'objet, un mécanisme parallèle est formé. La chaîne cinématique fermée est constituée de l'objet, des deux préhenseurs, de la base mobile de chacun des robots et de leur bras. Comme les bases mobiles sont en contact avec le sol, le système parallèle constitue une chaîne cinématique fermée. Nous pouvons donc diviser le robot en chaînes actives et passives. Nous avons considéré que l'objet constitue la chaîne active et que les robots définissent les chaînes passives (figure 2.20).

Les configurations du robot parallèle sont basées sur la méthode précédente. Dans ce cas, l'espace de travail est calculé à partir de chaque espace de travail des chaînes cinématiques et de la position et de l'orientation de l'objet. Ce type d'approche a été utilisé pour la planification de mouvements de coopération entre mannequins virtuels [Esteves *et al.*, 2006]. Dans la phase d'apprentissage du planificateur, chaque nœud représente une configuration du robot parallèle sans collision. Ces configurations sont prises comme lieux d'échange. Les actions à réaliser pour ce type de tâche de manipulation interactive sont similaires à celles des tâches de prise et dépose. La machine à états est similaire.

La phase de génération de la double saisie demande deux opérations : la génération d'un ensemble de prises sur l'objet et la génération de la prise et de la configuration de saisie pour le robot donneur. Deux états supplémentaires sont introduits, l'un pour la génération des configurations d'échange et l'autre pour la phase de transit du robot récepteur afin qu'il rejoigne la configuration d'échange à partir de sa configuration initiale.

La figure 2.21 montre le résultats du calcul d'une double saisie pour effectuer l'échange d'un verre. La solution retenue ne semble pas très satisfaisante car un doigt est à l'intérieur du verre. Nous allons voir comment prendre en compte ce type de contrainte dans le paragraphe suivant.

2.4.6 Prises contraintes par la tâche

Le modèle géométrique des objets que nous avons retenu ne permet pas d'aller au delà de saisir un objet simple. Par exemple, pour saisir un récipient il faut éviter de tremper les doigts dans le liquide, pour saisir un objet tranchant il faut éviter les arêtes tranchantes, pour saisir des lunettes on évitera les verres pour ne pas les souiller... Une première voie d'amélioration

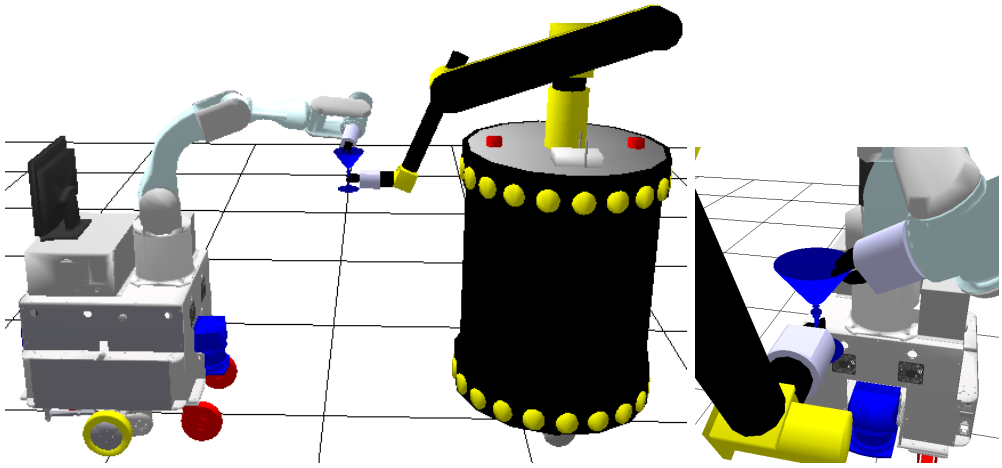


FIGURE 2.21 – Echange d'un verre

du planificateur de prise consiste à étendre les modèles physiques des objets pour prendre en compte ces contraintes. Par exemple le calcul des pressions de contact permettrait d'éviter la saisie sur une arrête tranchante.

Une autre approche possible consiste à s'inspirer des méthodes de planification de trajectoire de robot en présence d'humain [Sisbot *et al.*, 2008] pour compléter notre planificateur. Il est alors possible de privilégier certaines surfaces.

Ensuite, il sera aussi possible d'envisager d'utiliser des techniques d'apprentissage pour guider le choix vers de meilleures solutions.

2.4.7 Conclusion

Ces quelques résultats sur la planification de tâches de manipulation sont très encourageants. Ils montrent qu'il est possible de construire un robot manipulateur autonome. Toutefois, les exemples traités sont très simples. De nombreux travaux sont encore nécessaires pour résoudre efficacement des tâches industrielles simples ou de la vie courante.

Nous pouvons citer deux difficultés. La première est liée à la taille de l'espace de recherche, par exemple, le nombre de solutions possibles pour déplacer un objet est très grand du fait du grand nombre de possibilités pour chacune des étapes : choix de la position de prise, choix du chemin, choix de la dynamique, choix du contrôleur, choix de la position de dépose... Chacun de ces choix a une influence sur les autres choix et sur la réalisation globale de la tâche.

La deuxième difficultés est liée au développement de chacun des éléments. Par exemple pour la saisie, il faut améliorer les préhenseurs, leur contrôle et les techniques de planification de prise. Attraper une chaise posée sur le sol, la retourner et la poser horizontalement sur la table de manière autonome est encore hors de porté pour nos robots. Cette tâche est un simple déplacement d'objet, il n'y a pas d'action particulière sur l'objet comme ouvrir, couper, assembler ou déformer.

3

Dynamique - frottements

Après un doctorat essentiellement consacré à la planification de mouvement au contact puis une année de travail chez Aérospatiale qui est devenue Airbus depuis, j'ai travaillé avec Alain Giraud qui avait encadré mon doctorat sur un contrat de recherche avec la société Storage Tek [Castel *et al.*, 1995, Giraud and Sidobre, 1995]. Ce travail s'est arrêté en 1999 pour ce qui me concerne, Alain Giraud a ensuite effectué quelques développements notamment dans le cadre du développement du robot Endoxirob [Giraud *et al.*, 2004]. La société Storage Tek commercialisait de grandes unités de stockage de données équipées de robots pour assurer le transfert de cassettes entre des lecteurs enregistreurs et des emplacements de stockage.

L'objectif de Storage Tek était de diminuer le temps de cycle pour un changement de cassette. Storage Tek disposait de deux types de préhenseur, l'un rigide et relativement simple qui permettait des temps de cycle de saisie de l'ordre de 0.8 seconde. L'autre, souple et plus complexe, était associé à un boitier de guidage, il permettait des temps de cycle de saisie de l'ordre de 0.6 secondes. Durant les premiers mois du contrat nous avons étudié ces systèmes et proposé quelques améliorations mineures. Nous avons ensuite convenu, d'une part, d'étudier plus finement la phase de saisie de la cassette et, d'autre part, de proposer des solutions pour développer de nouveaux préhenseurs.

Pour résumer, nous pouvons dire que la diminution du temps de cycle se traduit par des micro rebonds et des phénomènes oscillatoires au niveau des points de contacts. L'étude de ces phénomènes nous a conduit à développer un simulateur dynamique planaire que nous avons livré à la société Storage Tek. Un jeune ingénieur, Laurent Petrelli, a effectué son stage de fin d'étude avec nous au LAAS, puis est allé chez Storage Tek aux États Unis d'Amérique pour assurer le transfert industriel du logiciel. Nous avons aussi proposé des modèles de préhenseurs utilisant mieux les masses et surtout les efforts inertiels créés par les accélérations et décélérations.

Dans la première partie du chapitre, nous présentons quelques éléments du simulateur dynamique plan que nous avons construit. La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude des frottements et notamment à la présentation d'un scanner de force de friction. Ces travaux ont été effectués durant l'année scolaire 2000-2001 au Centre for Intelligent Machines de l'université McGill de Montréal au Canada dans le cadre d'un congés pour recherches ou conversions thématiques.

3.1 Le simulateur dynamique

Un simulateur dynamique est un système complexe qui comprend des outils de modélisation des objets, des outils de visualisation, un moteur de simulations dynamiques et des outils

d'analyse des résultats. Nous avons assez naturellement développé ce simulateur à l'aide de l'environnement EPIFER : Environnement de Programmation pour l'intégration de Fonctions Evolutives à un Robot.

Écrit dans une première version en fortran à la fin des années 1970, EPIFER a été réécrit en C++ à la fin des années 1980. Bâti autour d'un interprète de commande émulant une partie du langage C++, EPIFER dispose de modules d'interaction avec un robot, d'un modeleur volumique, d'une interface graphique et de bibliothèques de calcul.

3.1.1 Géométrie et cinématique

Le simulateur est basé sur l'étude des boucles mécaniques qui a été développée pour la génération de trajectoires de robots manipulateurs [Piccin, 1995, Piccin and Giraud, 1995]. L'élément de base est le demi-conctact associé à un élément géométrique d'un objet. Deux demi-contacts permettent de définir une articulation entre deux corps. D'un point de vue pratique un demi-contact correspond à un processus de création d'un repère de contact, une articulation ou un contact entre deux solides est défini à l'aide d'une relation entre deux demi-contacts.

Un problème est constitué de corps reliés entre eux par des liaisons articulaires ou de contact. Ces liaisons sont définies entre des demi-contacts. Le simulateur construit un graphe des repères de contact dont l'étude des cycles permet d'extraire automatiquement les boucles mécaniques.

Chaque coordonnées des articulations de contact est spécifiée pour préciser sa nature : contrainte de contact, direction libre, associée à un axe commandé... Le mécanisme est défini localement par ces spécifications. Une approche similaire de la spécification des liaisons mécaniques est présentée dans [Herman Bruyninckx, 1996].

Le système mécanique ainsi défini est résolu numériquement par la méthode de Newton-Raphson pour calculer la position initiale puis l'évolution du système. Le système linéaire est construit à partir de ce modèle spécifié. Le moteur de résolution choisit automatiquement le mode de résolution des différentes variables. La résolution peut être exacte si le nombre de relations de contraintes est égal au nombre d'inconnu, au minimum de norme s'il y a plus d'inconnus ou au moindres carrés si il y a plus de contraintes que d'inconnus. Le mécanisme étant défini localement, rien ne garantit ses propriétés globale aussi EPIFER propose des outils d'analyse du mécanisme pour aider l'utilisateur.

Ce moteur de résolution de problèmes cinématiques dans l'espace a été étendu pour la résolution de problèmes dynamiques plan.

3.1.2 Dynamique d'un système mécanique

Pour compléter cette présentation succincte, le lecteur trouvera une présentation du problème du calcul des efforts de contact dans les mécanismes dans [Baraff, 1993, Baraff, 1994]. [Jong-Shi Pang, 1996] traite le calcul des efforts de contact avec frottements de Coulomb et [Pierre E. Dupont, 1997] étudie la stabilité des contacts entre solides avec friction à partir de modèles élastiques.

Dans sa thèse, [Mirtich, 1996] propose de traiter toute la simulation par des micro-percussions. Les problèmes liés à l'intégration des accélérations ainsi qu'à l'utilisation des multiplieurs de Lagrange sont présenté dans [Baraff, 1996, A. Rosen, 1997]. L'utilisation d'un simulateur dynamique pour la commande de robots est présentée dans [Khatib, 1995].

3.1.3 Evolution d'un système mécanique

L'évolution d'un système mécanique est associé à des ruptures de modèle du mécanisme. Par exemple lorsque un objet entre en contact avec un autre objet, il y a d'abord un phénomène de percussion après lequel le contact est maintenu ou non. De même le modèle de frottement de Coulomb peut être associé à plusieurs modèles ou spécifications du contact. Ce modèle change notamment lorsque la vitesse de glissement passe par zéro.

Ces systèmes peuvent dans certain cas être modélisés par un problème linéaire complémentaire connu sous le sigle LCP pour *Linear Complementarity Problem*. La bibliographie sur ces problèmes est très importante [Richard W. Cottle, 1992]. Toutefois, dans le cas de la simulation dynamique de mécanismes, ce n'est pas un type particulier de problème qui doit être résolu, mais de nombreux cas très différents. La friction introduit notamment une grande diversité de cas. Les méthodes spécifiques qui fonctionnent éventuellement bien dans un cas particulier n'apportent rien et même sont nuisibles pour la résolution des autres cas. Nous avons été amené à résoudre la combinatoire des problèmes possibles et à choisir le modèle qui admet une solution.

Pour cela, nous avons développé une méthode d'énumération dirigé qui consiste à énumérer les différents cas possibles à l'aide d'une heuristique. Cette heuristique consiste à considérer que les cas les plus probables sont ceux que l'on a déjà rencontré. Dans certain cas, l'évolution du mécanisme est prévisible, par exemple lors de la perte d'un contact ou de l'arrêt d'un glissement. Le nombre de variables complémentaires croit assez vite, la pince Storage Tek en nécessite une trentaine en 2D.

La friction de Coulomb introduit une autre difficulté dans la modélisation. Dans certaines situations, le mouvement n'est pas possible en présence de friction. Le problème du calcul des efforts n'admet pas de solution si la vitesse est différente de zéro. L'exemple du skieur dévalent une pente peu enneigé et chutant en abordant une plaque d'herbe en constitue un excellent exemple. Le skieur situé sur de l'herbe ne glisse pas. Lorsqu'il aborde la plaque d'herbe avec une vitesse, il se produit une *percussion* de friction. Au cours de cette percussion, l'énergie cinétique du skieur est partiellement transformée en énergie de rotation vers l'avant et le skieur chute. Ces percussions de friction peuvent être simulées de manière similaire aux percussions de contact.

La friction, qui est un phénomène non linéaire, peut entraîner le coincement du mécanisme en interdisant la relaxation complète des efforts internes apparus lors d'une mise en charge ou lors d'une percussion.

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter quelques aspects originaux sur lesquels nous avons plus particulièrement travaillé.

3.1.4 Les percussions

La percussion entre solides mets en jeu des phénomènes physiques très complexes qui nécessiteraient des temps de calcul irréalistes et la connaissance d'un grand nombre de paramètres physiques pour obtenir une simulation précise. D'autre part ces phénomènes sont extrêmement rapides et seuls leurs effets cinématiques sont pertinent pour la simulation dynamique.

Le modèle de Newton de la percussion sans frottements de deux corps fournit les vitesses après le choc à partir des vitesses initiales en considérant que la vitesse après le choc est une fraction α de la vitesse avant le choc et qu'il y a conservation de la quantité de mouvement. Ce modèle illustre bien le modèle de la percussion que nous recherchons car il fait abstraction des phénomènes physiques tout en respectant les principes fondamentaux pour fournir une approximation du résultat.

Malheureusement ce modèle est trop grossier et ne permet pas de prendre en compte les

frottements et les percussions simultanées entre plusieurs corps.

Une présentation assez complète du calcul des percussions, avec des exemples se trouve dans [F. Pfeiffer, 1996]. Mirtich propose une approche de la simulation dynamique faisant une part plus importante aux percussion entre deux solides [Briam Mirtich, 1995a, Briam Mirtich, 1995b, Mirtich, 1996]. La percussion simultanée entre plusieurs solides est abordée dans plusieurs travaux [Yildirim Hurmuzlu, 1994, Dan B. Marghitu, 1995]. La simulation des percussions multiples d'un objet tombant sur le sol, abordé dans [S.Goyal, 1998a] et [S.Goyal, 1998b], illustre bien l'importance de la simulation dynamique des percussions.

L'approche que nous avons proposée consiste à considérer que les efforts *statique* de la simulation normale sont négligeable devant les efforts de percussion et que les solides ne se déplacent pas. Ceci permet le calcul de la variation de vitesse par intégration numérique dans une base de temps beaucoup plus petite avec des calculs limités et donc dans un temps compatible avec la simulation.

L'utilisation d'un modèle élastique où la force est fonction du déplacement entraîne une mauvaise convergence de l'intégration. Nous avons proposé un modèle d'effort simplifié où l'effort est une fonction de l'énergie accumulée au niveau du contact.

D'autre part il ne faut pas négliger le fait que l'hypothèse selon laquelle *les corps se comportent comme des solides lors de la percussion* n'est pas valide en général. Même lorsque l'on peut négliger les déformations au niveau du point d'impact, les vibrations du solide peuvent aussi avoir des influences importantes comme le montre [D. Stoianovici, 1996] pour le choc d'une tige sur un plan.

3.1.5 Percussion frontale entre deux billes

Ce problème bien connu est défini par les masses m_A et m_B, les vitesses initiales v_{A0} et v_{B0} et un coefficient α de restitution de l'énergie. Si la percussion entre les deux billes est suffisamment brève pour pouvoir négliger sa durée, les seules inconnues du problèmes sont les vitesses v_{Af} et v_{Bf} des deux billes après le choc.

Le choc est constitué de deux phases : la première correspond à la transformation de l'énergie cinétique et la seconde à la restitution d'une partie de l'énergie cinétique transformée dans la première phase.

Le modèle classique considère que seulement une fraction $\alpha \times E$ $(0 \leq \alpha \leq 1)$ de l'énergie E accumulée pendant la première phase est restituée aux billes sous forme d'énergie cinétique. L'autre fraction $(1 - \alpha) \times E$ est transformée sous diverses formes : chaleur, ondes sonores, contraintes internes... La valeur particulière $\alpha = 0$ du coefficient de restitution d'énergie correspond à un choc mou où toute l'énergie est dissipée. De même, la valeur $\alpha = 1$ correspond à un choc parfaitement élastique.

Dans le cas de la percussion entre deux billes, quel que soit le modèle d'effort choisi l'énergie transformée dans la première phase du choc est $E = 0.5 \times (m_A {v_{A0}}^2 + m_B {v_{B0}}^2)$ et l'énergie restituée aux billes pendant la deuxième phase est $\alpha \times E$. Malheureusement cette propriété est limitée à la percussion frontale entre deux corps. En faisant une hypothèse sur la direction des trajectoires après le choc il est possible de traiter certaines percussions non frontales entres deux corps sans utiliser un modèle d'effort. Cette dernière propriété est très utilisée pour traiter les chocs entre billes ou particules où la direction après le choc est déterminée géométriquement.

3.1.6 Percussion entre plusieurs corps avec frottement

Une approche couramment utilisée consiste à définir un modèle élastique virtuel dissipatif de très grande raideur. Ce modèle engendre des efforts de contact très grand par rapport aux autres efforts. La simulation de la percussion est alors celle d'un système dynamique réduit similaire du système représentant le mécanisme réel. Cette simulation est effectuée durant la période de temps similaire où les deux solides sont en contact pour évaluer la discontinuité des vitesses. La friction peut aisément être introduite, en adoptant un coefficient de friction spécifique. La validité de la simulation est essentiellement dépendante du choix du coefficient de restitution de l'énergie de l'impact et du choix de la valeur du coefficient de friction.

Certains auteurs comme [Keller, 1986] et [Mirtich, 1996] proposent de simplifier les calculs en choisissant comme variable d'intégration l'impulsion ($\int_0^T f(t)dt$) plutôt que le temps. Ce choix ne peut être étendu au cas de la percussion simultanée entre plusieurs corps car l'impulsion n'évolue pas de la même manière en chaque point d'impact.

Dans le cas de la percussion simultanée de plusieurs solides libres constituants un système isolé, la simulation à l'aide de structures élastiques dissipatives conduit à un état après impact respectant la loi de conservation des quantités de mouvement. Par contre, pour des conditions initiales de vitesses identiques, les vitesses des solides après impact sont dépendantes du modèle de déformation des structures élastiques utilisées. La simulation de ce type de percussion ne permet pas de représenter précisément une percussion à impacts simultanés (par exemple la collision entre plusieurs sphères d'acier).

Nous avons proposé un modèle de percussion force-énergie liant la force de contact à l'énergie mise en jeu durant l'impact. Ce modèle de contact est plus favorable à la modélisation de la percussion que le modèle élastique force-déplacement où la force est dépendante de la profondeur de pénétration des solides au cours de l'impact. En effet ce modèle permet de bien gérer l'énergie restituée aux points d'impact. Il contribue à propager plus rapidement dans le mécanisme les impulsions de percussion que ne le fait le modèle force-déplacement. Les temps de calculs sont nettement améliorés.

3.1.7 Percussion dans un mécanisme

La simulation de la percussion de contact de deux surfaces appartenant à deux mécanismes articulés est effectuée à la manière de la percussion de deux solides. La force de contact (incluant éventuellement la force de friction) est calculée suivant le modèle force-énergie et entraine le changement de mouvement des deux mécanismes articulés. Les efforts induits dans chaque articulation (de grande amplitude lors de la percussion) sont évalués et permettent de simuler un effort de friction de Coulomb. Dans des conditions de configuration et de friction favorables au coincement la simulation permet de calculer un état du mécanisme coincé. La validité de la simulation réalisée ne peut être que qualitative. Elle présente certainement un très grand intérêt pour le praticien. Lors de la percussion, la simulation est incapable de prendre en compte les dissipations d'énergie dans les articulations autres que de friction.

Enfin la simulation de la percussion avec impacts multiples simultanés entre deux solides est aussi effectuée avec le modèle force-énergie. Pour illustrer la nécessité d'une telle simulation considérons la chute d'un parallélépipède sur une surface plane. La position finale du parallélépipède correspond à un contact plan sur plan, donc à un contact en plusieurs points. Le processus de percussion débute par une suite de percussion à impact unique d'amplitude décroissante (du fait des dissipations d'énergie). Après un certain nombre de rebonds l'hypothèse de l'impact unique doit être abandonnée et la percussion avec impacts multiples simultanés doit être si-

mulée jusqu'à l'obtention de rebonds d'amplitude négligeable. A ce stade de la simulation, le contact plan sur plan peut être parfaitement obtenu par application de procédures géométrique et cinématique de recalage des positions et des vitesses.

Ici encore les résultats qualitatifs de la simulation (état d'équilibre après percussion, existence de rebonds, coincement du mécanisme, mise en vibration du mécanisme, etc...) ont une forte probabilité de reproduire le comportement réel du mécanisme. Les résultats quantitatifs (tels le nombre de rebonds et leur amplitude) fournis par la simulation de la percussion ne peuvent prétendre reproduire la réalité avec une grande précision.

La simulation des phénomènes dynamiques rapides intervient pour évaluer "raisonnablement" les discontinuités de vitesses et de forces intervenant aux changements de spécification du mécanisme introduits pour modéliser à l'échelle temporelle réelle les contacts unilatéraux et les contacts de friction. Il est possible de proposer à l'utilisateur des procédures d'initialisation de ces discontinuités pour conduire une étude spécifique de sensibilité du mécanisme.

3.1.8 Liaisons avec friction

La modélisation numérique dynamique 2D en présence de friction d'un préhenseur a exigé le développement d'une méthode de résolution robuste des efforts de friction.

Nous avons déjà évoqué la modélisation de la friction par un problème linéaire complémentaire que nous avons proposé de résoudre par une méthode d'énumération dirigée.

Dans un mécanisme, au niveau d'une liaison unilatérale avec friction, les forces tangentielle F_t et normale F_n sont liées par une relation non linéaire : $f(F_n, F_t) = 0$. Cette relation dépend de la structure du mécanisme.

Les processus de calcul des efforts de friction statique et dynamique sont différents et nécessitent deux boucles itératives imbriquées. Le calcul des forces de friction dynamique ne peut pas s'effectuer directement par une méthode itérative classique comme la méthode de Newton-Raphson car il faut surveiller l'apparition d'instabilité comme les percussions de friction. Une percussion de friction se traduit par la divergence des efforts au niveau de la liaison. En présence d'une percussion de friction nous résolvons en premier la percussion puis réinitialisons le problème avec les valeurs de sortie du calcul de percussion.

Une autre difficulté de la simulation de mécanismes constitués de solides avec friction est lié à l'hyperstatisme. L'hyperstatisme correspond à l'existence, dans le mécanisme, d'efforts internes qui n'affectent pas le mouvement des corps. Considérons, par exemple, une table à trois pieds posé sur le sol. Il existe probablement des efforts de friction tangentiel au niveau des contacts des pieds sur le sol, mais ils sont inobservables et n'ont pas d'effet sur les mouvements de la table. Pour les calculer, il faudrait modéliser la déformabilité des solides du mécanisme et connaître l'histoire du chargement de la table. Ce qui changerait complètement la nature de la simulation proposée.

L'hyperstatisme est lié aux problèmes de dépendances linéaires entre les lignes des matrices du modèle dynamique. L'hyperstatisme permet d'expliquer les phénomènes de coincement ou d'arc-boutement : les efforts internes dans le mécanisme sont provoqués par des charges élevées appliquées au mécanisme. Lors des phases de percussion, l'énergie cinétique peut être transformée et redistribuée sous forme d'effort interne. La rémanence des efforts de friction est provoquée par l'hystérésis introduite par la friction.

La simulation que nous avons proposée ne permet pas d'évaluer les efforts internes du mécanisme, mais elle permet de les gérer. L'utilisateur de la simulation peut ainsi être alerté sur la présence dans le mécanisme de situations probablement indésirables de coincement ou de percussion de friction.

La gestion de ces efforts internes implique la résolution de système d'équations linéaires par des méthodes plus complexes que celle de l'inversion de matrice carrée. Nous avons notamment introduit des méthodes d'inversion au minimum de norme, des méthodes d'inversion au minimum de norme de la variation, des méthodes de résolution de problème par la programmation quadratique.

3.2 Frottements

Les frottements jouent un rôle très important en mécanique et en robotique. La plupart des manipulations effectuées par les robots utilisent des liaisons de contact avec frottements. De même le déplacement des robots mobiles est tributaire des frottements des liaisons avec le sol. La friction joue aussi un rôle très important dans l'amortissement des boucles de commande des axes des robots. La compréhension de la friction demeure un enjeu important pour améliorer les retours haptiques notamment pour restituer la texture des surfaces.

Les mécanismes qui sont à la base de la friction demeurent largement inexpliqués. Plusieurs modèles ont été proposés avant ou pendant nos travaux, ils s'appuient notamment sur des phénomènes impliquant des phonoms [Sokoloff *et al.*, 1993], "troisième corps" [He *et al.*, 1999], et plus récemment la création de fissures et de cicatrisations [Gerde and Marder, 2001].

C'est assez naturellement, qu'arrivant au Centre for Intelligent Machines de l'université McGill de Montréal au Canada, pour travailler avec Vincent Hayward sur le retour haptique nous avons décidé de nous intéresser au frottements. Nous avons rapidement décidé de développer un instrument capable de mesurer précisément le comportement de liaisons mécaniques : le scanner de force de friction. De tels instruments sont aussi utilisés pour des applications en tribologie et dans d'autres domaines [Bhushan and Dandavate, 2000, Caroli and Nozières, 1998, Hoelscher *et al.*, 1996].

Les conceptions habituelles font appel aux microscopes à force atomique [Mate *et al.*, 1987, Israelachvili *et al.*, 1990], dans lesquels le comportement des liaisons est observé au travers de la mesure de la déformation d'une poutre flexible en porte à faux interagissant avec un échantillon. Un appareil venait d'être proposé pour étudier le comportement de liaisons entre un échantillon et une sonde où ces deux éléments étaient positionnés par des lames de ressort disposées orthogonalement [Hendriks and Vellinga, 2000]. Un autre instrument correspond au microscope à force interfaciale qui utilise un contrôle électrostatique pour créer un déplacement rigide [Joyce and Houston, 1991]. Des conceptions basées sur une sonde activée magnétiquement qui permettent d'augmenter la sensibilité et le découplage des mesures normales et tangentes ont aussi été décrites [Jarvis *et al.*, 1999]. La plupart des instruments équilibrent la force totale exercée au niveau de la liaison par un effort élastique résultant d'une déformation en flexion. La mesure du déplacement [Feige and Balk, 2003], associée avec l'étalonnage de la réponse en flexion, permet alors d'évaluer la force totale au niveau de la liaison.

3.2.1 Le scanner de force de friction

Nous avons conçu et réalisé un instrument appelé scanner de force de friction (FFS) qui utilise l'énergie électrostatique à la place de l'énergie de déformation [Sidobre and Hayward, 2004]. Il est constitué d'un seul étage et permet une gamme de mesure très large. La sonde qui interagit avec l'échantillon est montée sur un chariot supporté par des fibres. La suspension fournit un guidage géométrique quasi parfait et réduit la mobilité à exactement deux degrés de liberté, simplifiant la modélisation et l'étalonnage. Le guidage précis permet de détecter les mouvements du chariot par interférométrie. L'amplitude du déplacement est suffisante pour permettre au même étage

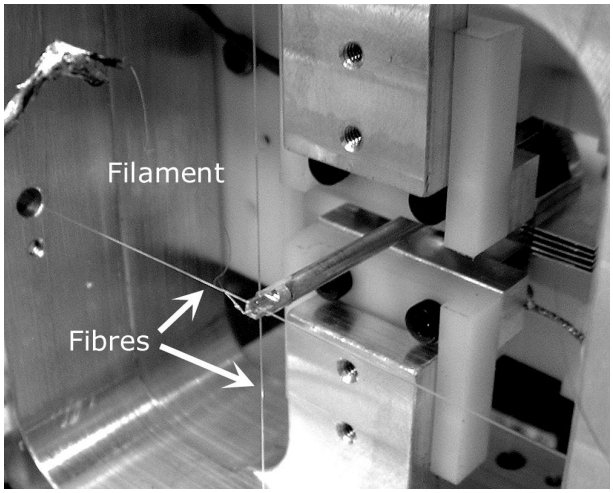


FIGURE 3.1 – Le cadre vu de derrière avec les deux fibres croisées contraignant à la tige arrière du chariot. Le filament assurant la mise à la masse du chariot est visible.

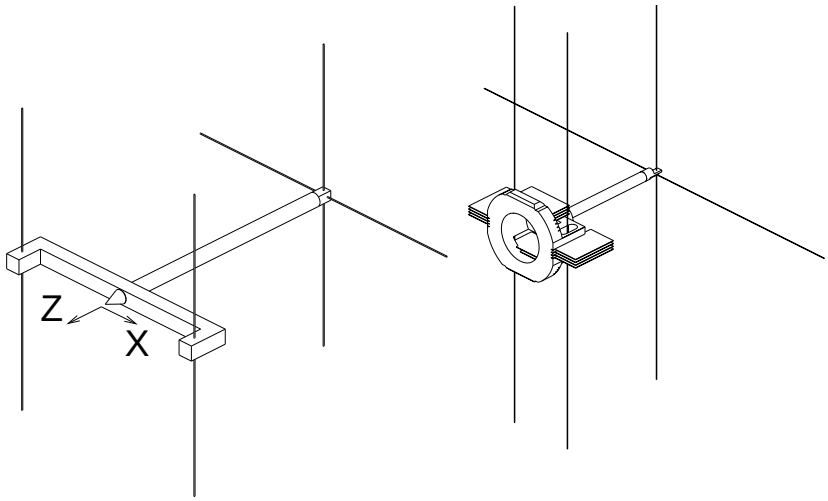
de mesurer la force d'interaction et de scanner sur plusieurs échelles, tirant ainsi avantage de la plage de mesure de l'interféromètre. Par conception, la raideur réglable de la suspension est linéaire sur toute la plage de mesure et les termes parasites dus aux hystérésis mécaniques et à la gravité sont éliminés. Le chariot suspendu de la sonde a deux actionneurs électrostatiques à peigne agissant dans les directions normale et tangentielle. Un nouveau type d'actionneur électrostatique différentiel et linéaire fourni une force calibrée sur toute la plage de mesure.

L'instrument a été utilisé de manière quasi statique. Sans contrôler les facteurs environnementaux autrement que par des précautions élémentaires, il atteint une résolution de 2×10^{-7} N pour la force sur une plage de $\pm 2 \times 10^{-4}$ N. La position a été mesuré par un interféromètre de type *precision optical displacement sensor PODS* commercialisé par MPB Technologies Inc. Montréal. Sa résolution est de l'ordre de 0.1 nm pour le déplacement tangentiel [Charette *et al.*, 1992]. La plage de déplacement est supérieure à 1 μm, ce qui permet d'étudier le comportement des liaisons mécaniques sur plus de quatre ordre de grandeur simultanément pour la force et le déplacement.

Conception de l'instrument

Les liaisons à déformation de la suspension peuvent être réalisées au moyen de fibres ou de lames. Les lames sont souvent utilisées par paire pour créer une approximation de translation. Toutefois, la raideur d'une suspension réalisée avec des lames dépend de la raideur dans les autres directions, ce qui nécessite des compromis au moment de la conception. De plus, la raideur varie avec le déformation en flexion des lames, ce qui complique l'étalonnage.

La suspension doit définir deux directions de translation orthogonales. Elle doit donc contraindre les quatre autres degrés de liberté, un en translation et trois en rotation. À première vue, des fils de suspension ne peuvent pas définir ces contraintes simultanément. Il est facile de voir cela car une fibre définie une contrainte de translation en un point. Plusieurs fibres de même direction créent aussi une contrainte en translation ainsi que deux contraintes en rotation. Deux directions de fibres différentes sont donc nécessaires pour contraindre les trois rotations : par conséquent le problème n'a pas de solution. Il est néanmoins possible de réaliser une approximation aussi précise que nécessaire. La solution présentée sur la figure 3.2a utilise quatre fibres. Les trois premières sont parallèles et définissent un mouvement plan sur plan, la quatrième qui



(a) (b)

FIGURE 3.2 – Shéma de la suspension avec trois fibre parallèles et une orthogonale pour contraindre le chariot à un mouvement à deux degrés de liberté : la pointe de la sonde peut se déplacer dans le plan défini par les trois points d'attachement. (b) Vue du chariot avec les armatures des condensateurs. Pour donner une idée de l'échelle, la distance entre la pointe et le centre de rotation est de 30 mm et la longueur des fibres est 80 mm.

est orthogonale aux trois premières, définit un centre de rotation. Au niveau de la pointe, ces contraintes définissent deux translations. La raideur du système est déterminée par la tension des fibres. La géométrie du chariot est présentée sur la figure 3.2b.

Le guidage précis assuré par cette suspension nous permet d'utiliser directement un interféromètre qui mesure le déplacement d'un miroir fixé au chariot. Avec une distance de 30 mm entre les fibres entourant la sonde et les deux fibres qui définissent le centre de rotation, l'erreur du déplacement en translation dans la direction normale est de l'ordre de 0.0167 nm pour un mouvement tangentiel de 1 μm. Pour une raideur de 20 $N\,m^{-1}$, l'erreur est de $0.33 \times 10^{-9} N$ pour la force normale.

La figure 3.3 montre l'ensemble de l'appareil vu de dos. Dans la direction normale z, un actionneur unipolaire est séparé en deux parties symétriques pour assurer une force normale au niveau de la pointe. Pour simplifier la figure 3.3, ils sont représentés de part et d'autre de la pointe, mais ces deux parties sont positionnées au dessous et au dessus dans l'instrument réalisé. La force tangentielle dans la direction x est fournie par un actionneur bipolaire différentiel. La tension dans les deux fibre avant est égalisée par un balancier pour éliminer les couples parasites.

La géométrie du chariot (figure 3.2b) et des condensateurs est conçue pour que le centre de masse, le point d'action des forces électrostatiques et le point d'action des forces élastiques, coïncident tous avec la position de la liaison à tester. Ceci élimine tous les couplages statiques et dynamiques. Ainsi, en notant x la direction tangente et z la direction normale, la dynamique du système est décrite par les deux équations du second ordre indépendantes associant les forces agissant au niveau de la liaison :

$$F_t = m\,\ddot{x} - a_t - k_t\,x - b_t\dot{x} \tag{3.1}$$

$$F_n = m\,\ddot{z} - a_n - k_n\,z - b_n\dot{z} \tag{3.2}$$

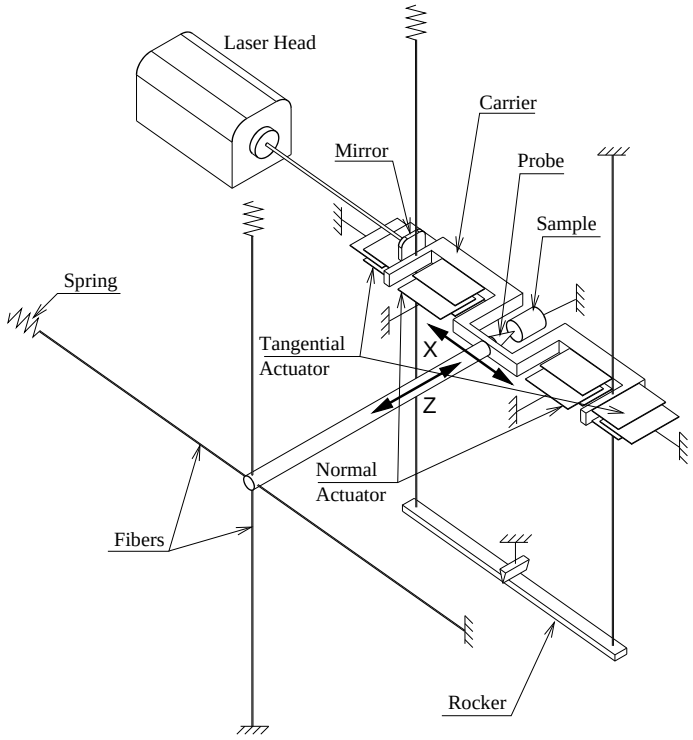


FIGURE 3.3 – Schéma de l'appareil vue de dos. On voit l'actionneur unipolaire de la direction normale et l'actionneur bipolaire différentiel de la direction tangente. Le guidage précis du chariot permet d'utiliser un interféromètre pour mesurer les déplacements latéraux.

F_t et F_n sont les composantes normale et tangentielle mesurées de l'effort exercé par la liaison, $m_t\ddot{x}$ et $m_n\ddot{z}$ sont les termes d'inertie, a_t et a_n sont indépendamment définis par les actionneurs, $k_t x$ and $k_n z$ sont les forces dues à l'élasticité de la suspension, et $b_t\dot{x}$ et $b_n\dot{z}$ sont les termes d'amortissement visqueux.

Actionneurs électrostatiques à peigne

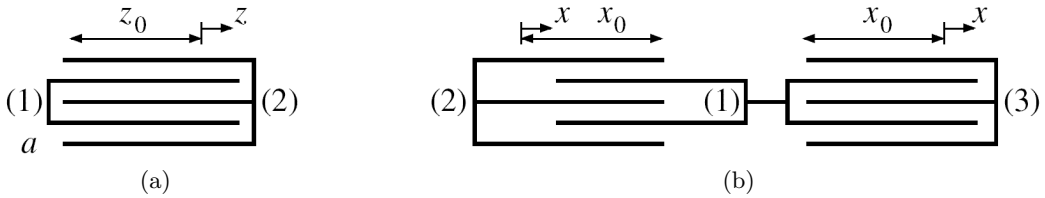


FIGURE 3.4 – (a) Actionneur à peigne unipolaire. (b) Actionneur à bipolaire différentiel.

Généralement les actionneurs en peigne produisent des efforts quadratique par rapport à la tension d'alimentation. Ce qui complique l'étalonnage des appareils car la variation de force dépend du point de fonctionnement.

Considérons un actionneur unipolaire (figure 3.4a) dont l'armature mobile (1) interagit avec l'armature fixe (2). Pour des potentiels v_1 et v_2 délivrés aux armatures, l'énergie électrostatique

est :

$$E = \frac{1}{2}(c_{11}\, v_1^2 + c_{22}\, v_2^2 + 2c_{12}\, v_1 v_2) \tag{3.3}$$

où les c_{ij} représentent les capacités. En ignorant les effets de bord, la capacité d'une paire d'armatures est $\varepsilon_0\, \varepsilon_r\, l_n\, z_0/a$, où ε_0 est la permittivité du vide et ε_r la permittivité relative de l'air, l_n et z_0 représentent respectivement la longueur et la largeur de la surface des armatures en opposition, et a désigne l'écartement entre les armatures. Soit z le déplacement de l'armature mobile, Nn le nombre d'intervalle et en posant $c_n = (N_n \varepsilon_0 \varepsilon_r l_n)/a$ on obtient :

$$c_{11} = c_{12} = c_{22} = c_n\,(z_0 + z). \tag{3.4}$$

La force produite par l'actionneur est $\partial E/\partial z = c_n(v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2)$. Nous attribuons un potentiel constant à v_1, et un potentiel de commande v_n à l'entrée v_2, la force normale produite par l'actionneur devient

$$a_n = c_n(\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{1}{2}v_n^2 + v_1 v_n). \tag{3.5}$$

Dans la direction tangente, un nouveau actionneur électrostatique bipolaire et différentiel est utilisé pour linéariser la réponse et simplifier l'étalonnage (voir figure 3.4b). L'armature mobile (1) est guidée entre les armatures fixes (2) et (3). Étant donné les trois tensions v_1, v_2 et v_3, l'énergie électrostatique est

$$E = \frac{1}{2}(c_{11}\, v_1^2 + c_{22}\, v_2^2 + c_{33}\, v_3^2 + 2c_{12}\, v_1 v_2 + 2c_{13}\, v_1 v_3 + 2c_{23}\, v_2 v_3), \tag{3.6}$$

où $c_t = (N_t\, \varepsilon_0\, \varepsilon_r\, l_t)/a$ en tenant compte de la géométrie de l'actionneur. Pour un déplacement x :

$$c_{11} = 2c_t\, x_0, \quad c_{22} = c_{12} = c_t\,(x_0 - x), \quad c_{33} = c_{13} = c_t\,(x_0 + x), \quad c_{23} \approx 0. \tag{3.7}$$

La force délivrée par l'actionneur est $\partial E/\partial x = \frac{1}{2}c_t(-v_2^2 + v_3^2 - 2v_1 v_2 + 2v_1 v_3)$.

En contrôlant les tensions de façon à ce que v_2 et v_3 soient opposés, en les associant à une tension de commande $v_t = v_3 = -v_2$ et en fixant le tension v_1, la force produite par l'actionneur est égale à :

$$a_t = 2c_t\, v_1\, v_t. \tag{3.8}$$

En conséquence, la force a_t délivrée par l'actionneur est proportionnelle à la tension de commande v_t.

Les forces élastiques

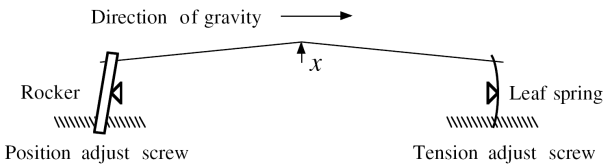


FIGURE 3.5 – Déformation et chargement d'une fibre de suspension.

Le principe du positionnement et du réglage de la tension des fibres est présenté sur la figure 3.5. Les fibres sont attachées à l'une de leur extrémité sur un mécanisme de réglage de la position et à l'autre extrémité sur un ressort à lame qui permet de régler la tension de manière

indépendante. La force élastique exercée sur le chariot dépend de la déformation des lames de ressort, de la déformation des fibres et du poids de la masse suspendue. Il est facile de montrer que la force due à la déformation des fibres est négligeable devant celle des autres termes, et peut donc être négligée. Les tensions dans les deux fibres de devant sont égales car elles sont sur le même chemin de chargement du balancier symétrique (figure 3.3).

Pour de petits angles, la raideur de la suspension dans la direction tangente est $k_t = (4T_t - mg)/l_0$, où T_t représente la tension des fibres, mg le poids du chariot, et l_0 la demi longueur des fibres. Dans la direction normale, la raideur des fibres croisées de l'arrière sont tendues par la force T_n qui s'ajoute à celle des fibres avant, la masse arrière est négligeable, et la force totale est $k_n = k_t + 4T_n/l_0$. Dans la plage de d'utilisation, la suspension assure un rapport d'au moins 1000 entre les directions contraintes et les directions libres.

La raideur des ressorts à lame dépend de leur déformation. La solution retenue permet de découpler la raideur des lames du déplacement du chariot. Notons d la flèche nécessaire pour créer la tension T, et Δd l'incrément de flèche due au déplacement du chariot : $T = k_{lame}(d+\Delta d)$. Δd est du même ordre de grandeur que les déplacements x ou z. Si le ressort est choisi de telle manière que $\Delta d \ll d$ alors T ne varie presque pas et la raideur de la suspension est quasi constante.

Étalonnage

Connaissant la masse de la partie mobile, en mesurant le déplacement nous avons déterminé la raideur à partir de la fréquence propre dans les directions normale et tangente. Pour le réglage particulier utilisé dans la suite les mesures de fréquence propre ont donné 7.008 et 11.05 Hz correspondant à 3.5 et 8.7 Nm^{-1} respectivement dans les directions normale et tangente. L'étalonnage des actionneurs peut ensuite être effectué. Le résultat de l'étalonnage pour l'actionneur tangentiel bipolaire est $a_t = 1.30 \times 10^{-6} v_t$. Le coefficient de l'actionneur unipolaire de la direction normale ne peut être déterminé que de manière approximative. La force tangente maximum est d'environs ± 0.2 mN. Les forces peuvent être modulées aussi finement que le permet le contrôle de la tension de commande. Dans notre cas nous étions limité par la résolution de 16 bits des convertisseurs numérique/analogique que nous utilisions avec ce prototype.

Construction

L'appareil est composé d'un cadre en aluminium supportant les mécanismes de tension des fibres et les armatures fixes des actionneurs (figure 3.1). De nombreuses précautions ont été prises pour minimiser l'hystérésis en prenant, notamment, de nombreuses précautions dans la conception de l'attachement des fibres et le choix de longues fibres de verre de 0.13 mm de diamètre pour limiter les déformations. L'échantillon est positionné par des platines micrométriques en translation et en rotation. La connexion électrique du chariot mobile est constituée d'un filament de tungstène de lampe à incandescence fixé au niveau du centre de rotation pour minimiser son déplacement et donc les perturbations qu'il pourrait introduire (figure 3.6).

Les tensions d'alimentation v_n, v_t et $-v_t$ étaient amplifiées par trois amplificateurs opérationnels haute tension qui alimentaient les actionneurs au travers de filtre passe bas (± 200 V, coupure à 1 kHz). Ces amplificateurs étaient pilotés par des convertisseurs numérique/analogique de 16 bits de résolution. Les tensions des armatures étaient aussi mesurés par des convertisseurs 16 bits au travers de pont de résistance de précision. Les forces délivrées par les actionneurs étaient déterminées à partir de ces tensions après qu'ils aient été étalonnés.

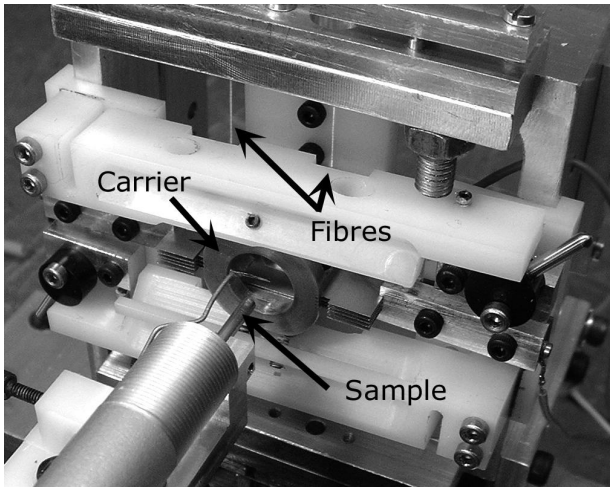


FIGURE 3.6 – Vue de l'instrument avec le microscope au premier plan et son miroir de renvoi ainsi que l'échantillon. La pointe de la sonde à l'intérieur de la cavité du chariot peut être observée avec le microscope pour contrôler le contact entre l'échantillon et la sonde. Les deux fibres de verre de l'avant sont visibles mais partiellement cachées par le dispositif de blocage du chariot utilisé pour le montage de la sonde et le transport.

3.2.2 Exemples de mesures avec le scanner de force de friction

Pour effectuer les mesures, nous avons placé l'appareil sur une table optique de deux tonnes, isolée pneumatiquement du sol et fermée par un lourd couvercle isolant pour limiter les vibrations acoustiques. Afin de diminuer encore le niveau de bruit, nous avons suspendu le plateau de montage par l'intermédiaire de six tubes en latex. Cette suspension additionnelle avait une fréquence de résonance de 2 Hz et des mouvements amortis en 2 s.

Après une période de stabilisation, Nous avons effectué des mesures avec le chariot libre de mouvement. Nous avons identifié au moins trois sources de bruit : vibrations mécaniques et sonores, le bruit intrinsèque de l'interféromètre et des dérives thermiques. Un très faible coefficient d'amortissement de 0.05 N s $m^{-}1$ a pu être estimé. Nous avons évalué le bruit de fond en effectuant des enregistrements après avoir bloqué le chariot (figure 3.7). Le bruit de l'interféromètre était de l'ordre de 0.1-0.2 nm avec une dérive probablement due à une dérive thermique, en effet on peut estimer la dilatation thermique du système de l'ordre de 1.6 nm/millième de degré. Ces mesures préliminaires indiquent que des détails plus petits que le nanomètre peuvent être mesurés.

Dans les mesures suivantes, les signaux de force et de déplacement sont limités en fréquence par une transformation dans le domaine de Fourier, puis une transformation inverse après que le spectre ait été tronqué en dessus d'une fréquence F_c (ces opérations préservent la phase des signaux). La fréquence de coupure est indiquée dans la légende des figures expérimentales.

Les mesures ont été effectuées avec deux cylindres de mica en contact dans des directions orthogonales et pour une pointe d'acier frottant sur une surface d'acier plane. Des forces de friction ont été mesurées pour des déplacements de 0.1 à 10 000 nm et pour différents types de trajectoires.

L'appareil peut être exploité dans trois modes. Le mode I est le mode quasi statique situé en dessous de la fréquence propre $f_0 = 1/2\pi\sqrt{k/m}$, le terme élastique y domine dans l'équation Eq. 3.1. Le maximum de sensibilité est atteint pour le mode II ou mode résonant à la fréquence

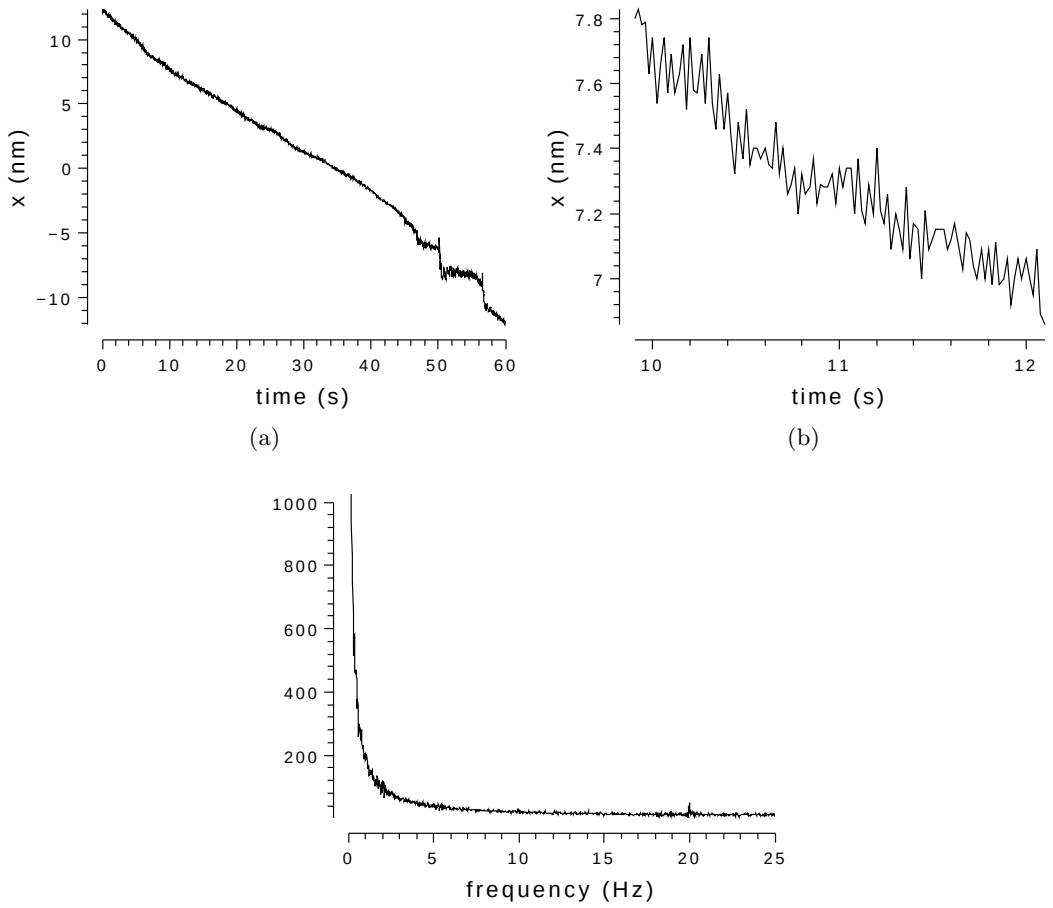


FIGURE 3.7 – (a) Mesures effectuées avec la liaison immobile. (b) Vue agrandie entre les instants 10 et 12 s. (d) Spectre de puissance jusqu'à 25 Hz

f_0 où les termes élastique et inertiel s'annulent mutuellement. La sensibilité y est fonction de l'amortissement. Dans le troisième mode, au dessus de f_0, le terme inertiel domine et croit quadratiquement avec la fréquence d'entrée.

Les mesures ont toutes été effectuées dans le mode I. Pour chaque exemple, le tableau 3.1 regroupe l'importance relative des termes statiques et dynamiques. Dans la plupart des cas, les vitesses et accélérations étaient suffisamment faibles pour identifier la force de l'actionneur avec celle exercée sur la liaison. Une sélection de résultats brièvement commentés montre la diversités des effets et phénomènes.

Frottement mica sur mica avec collage et glissement

Les échantillons étaient constitués d'une feuille de mica collée sur deux demi cylindres d'acier de 1.0 mm de rayon. Les demi cylindres étaient disposés orthogonalement. Un signal sinusoïdal de période 2.5 s était appliqués tangentiellement. Le déplacement résultant est présenté sur la figure 3.8a mesuré à une fréquence de 35 000 échantillons à la seconde. Après une période temporaire initiale de glissement jusqu'au temps 1 s, le contact devient à l'arrêt avec une oscillation de

Fig.	$\max a_t$ (N)	$\max[k\,x]$ (N)	$\max[b\,\dot{x}]$ (N)	$\max[m\,\ddot{x}]$ (N)
8(b)	1.3×10^{-4}	3.3×10^{-7}	1.2×10^{-7}	7.5×10^{-8}
9(b)	2.8×10^{-5}	1.7×10^{-8}	7.0×10^{-10}	1.0×10^{-9}
9(c)	6.0×10^{-6}	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-10}	1.0×10^{-9}
9(d)	3.4×10^{-6}	7.3×10^{-9}	3.5×10^{-10}	1.0×10^{-9}
9(d)[a]	0.7×10^{-6}	1.0×10^{-9}	8.0×10^{-10}	1.0×10^{-9}
10(a) and 10(b)[b]	1.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}	0.8×10^{-5}	1.4×10^{-5}
10(c) and 10(d)[c]	2.2×10^{-6}	2.1×10^{-6}	0.5×10^{-6}	0.1×10^{-6}
11(a)	4.5×10^{-5}	2.9×10^{-6}	0.7×10^{-6}	3.7×10^{-8}
11(b) and 11(d)	4.5×10^{-5}	0.5×10^{-6}	4.0×10^{-8}	2.5×10^{-9}
12(a)	2.2×10^{-5}	7.1×10^{-7}	1.8×10^{-7}	9.5×10^{-6}
12(b)[d]	2.0×10^{-6}	2.5×10^{-7}	0.7×10^{-7}	2.0×10^{-6}

[a]Indicates difference between maximum and minimum values in the minor loop.
[b]At large displacement, almost all the actuator force is used to balance the elastic term.
[c]Figure compensated for the elastic term.
[d]Rough estimate of the actuator force.

TABLE 3.1 – Valeurs maximum des termes statiques et dynamiques de l'équation 3.1pour chaque expérimentation.

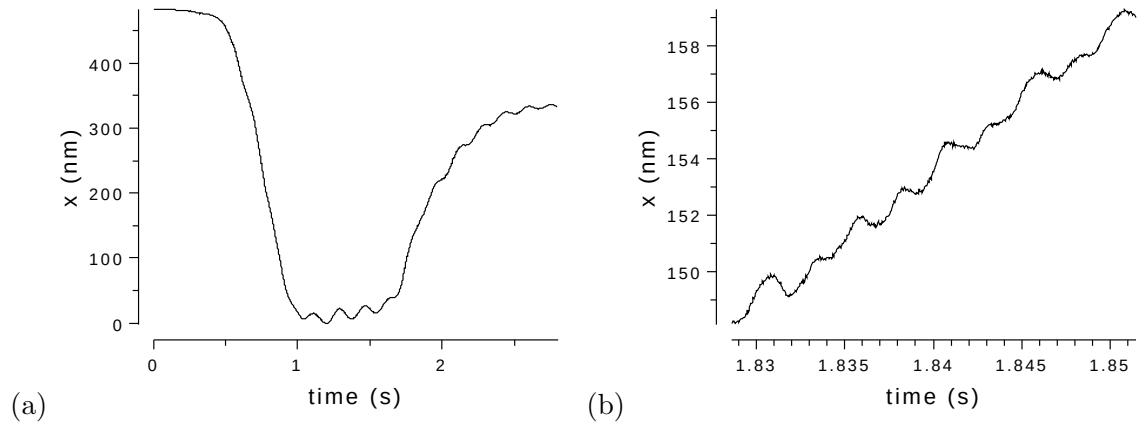
période 0.2 s jusqu'au temps 1.75 s, probablement à cause d'élasticité au niveau du contact. Ensuite, le contact se remet en mouvement jusqu'à s'arrêter à nouveau avec un comportement oscillatoire analogue. Un agrandissement d'une portion de courbe correspondant au glissement fait apparaître de faibles oscillations ayant une amplitude d'environ 1 nm (figure 3.8b).

Hystérésis à large échelle en fonction de la force normale

La figure 3.9 montre quatre boucles d'hystérésis force-déplacement obtenues avec la même force tangente périodique appliquée sur une liaison mica-mica, mais pour quatre forces normales différentes. La figure 3.9a montre une de ces mesures dans le domaine temporel. La figure 3.9b montre les quatre diagrammes de phase de la force de friction en fonction du déplacement. Comme l'actionneur normal n'était pas calibrée lors des mesures, nous ne pouvons préciser la valeur de la composante normale de la force.

Hystérésis à différentes échelles

La figure 3.10a montre la forme de la force tangentielle composée de trois arcs de sinusoïde d'amplitude décroissante, chacun d'amplitude égale au dixième de celle de la précédente. Nous avons utilisé cette fonction pour étudier le comportement de l'hystérésis d'une même jonction à trois échelles différentes, ce qui crée trois boucles de taille chaque fois égale au dixième de la précédente. Les mêmes données sont présentées sur les figures 3.10b-3.10d sous forme de diagramme de phase à différentes échelles. Un accroissement net de la raideur de la liaison peut être observé typiquement à l'échelle subnanométrique, la plus petite boucle de la figure 3.10d en donne une illustration.



(a) (b)

FIGURE 3.8 – Liaison mica/mica. (a) Réponse à une force tangentielle périodique d'une période de plus de deux secondes. (b) Un détail de la même courbe grossi environs cent fois entre les instants 1.83 et 1.85 s (mesures brutes).

Influence de la force normale

L'influence de la force normale sur le comportement d'une liaison est présentée sur les figures 3.11a et 3.11b pour des déplacements à deux échelles différentes. Une liaison constituée d'une pointe en acier interagissant avec une surface plane en acier poli est soumise à une force tangente sinusoïdale. La courbe en trait tireté représente la tension appliquée sur l'actionneur normal. Comme l'actionneur normal n'a pas été étalonné pour cette expérience, nous ne connaissons pas la valeur de l'effort normal.

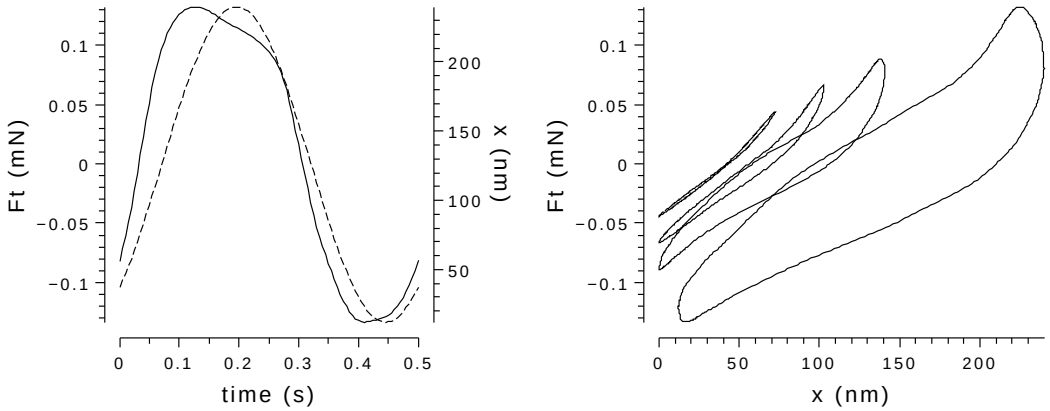
Nous pouvons observer une relation inverse entre la force normale et le déplacement tangentiel. La figure 3.11a contient de nombreux détails avec des déplacements importants de l'ordre de ± 4 μm. Sur la figure 3.11c un de ces détail est présenté où le déplacement tangentiel devient très petit. La figure 3.11b montre une expérience similaire, mais pour une échelle de déplacement plus petite d'environs ± 0.5 μm. La figure 3.11d montre comment la force tangentielle diminue quand le contact disparaît. pour le calcul de la force tangentielle, comme le déplacement est important le terme élastique de la force n'est pas négligeable (voir tableau 3.1).

Transition vers le glissement

La figure 3.12a montre la même liaison soumise à une force tangentielle sinusoïdale de période 10 s. L'adhésion cède progressivement avant la transition de l'adhésion vers le glissement. Des signes de faiblesse gagnent lentement en amplitude au cours des cycles jusqu'à la transition vers le glissement à l'instant 48 s, comme on peut l'observer sur les figures 3.12b et 3.12c pour les temps 27-30 et 37-40 s respectivement. Après la transition de l'instant 48 s, la liaison glisse sur 600 nm et ensuite revient adhérer exactement à la position de la transition. Le déplacement tangentiel à une amplitude variable alors même que la force exercée par la liaison est périodique.

3.2.3 Conclusion

Le scanner de force de friction a une conception originale sur plusieurs point. La force électrostatique est utilisée à la place de la force de flexion pour mesurer la force au niveau d'une liaison. La sonde est monté sur un chariot suspendu par des fibres disposées de telle manière à



(a) (b)

FIGURE 3.9 – (a) Enregistrement dans le domaine temporel d'un hystérésis à large échelle pour un même effort normal (la force tangentielle est en trait tireté, le déplacement tangentiel en trait plein). (b) Quatre boucles dans le plan déplacement-force obtenues avec la même force tangentielle, mais des efforts normaux différents. $Fc = 50$ Hz.

contraindre le mouvement à deux degrés de liberté en translation avec un fort découplage et une grande linéarité du comportement élastique. Un guidage géométrique quasi idéal, un nouveau actionneur électrostatique avec réponse linéaire, et l'utilisation de l'interférométrie conduisent à une large gamme de mesures tant pour la force que pour le déplacement et ceci avec une conception en un seul étage.

Nous avons comparé les performances de notre appareil avec celles des réalisation publiés au moment de ces travaux.

À partir des articles [Carpick and Salmeron, 1997] et [Hendriks and Vellinga, 2000], nous avons proposé la figure 3.13 où le domaine de fonctionnement en terme de force et de dépalcement est présenté pour le *lateral force apparatus* LFA [Hendriks and Vellinga, 2000], le *surface force apparatus* SFA [Israelachvili *et al.*, 1990], et le *friction force microscope* FFM [Mate *et al.*, 1987]. Il faut remarquer que notre réalisation était limité dans le bas par la résolution des convertisseurs 16 bits. Un ou deux ordres de grandeurs pourraient être ainsi gagnés par un meilleur contrôle des tensions appliquées.

A mon retour à Toulouse, nous avons envisagé de construire un deuxième prototype pour remédier à certaines limitations. Par exemple, nous avons envisagé d'utiliser aussi un actionneur différentiel dans la direction normale couplé avec un deuxième interféromètre PODS pour améliorer l'étalonnage de la force normale. Une deuxième direction de nos réflexion a concerné la réduction de la masse et de la taille du chariot. Le chariot était en magnésium avec des pales de condensateur en aluminium, une fabrication monobloc permettrait de gagner un ordre de grandeur sur la masse tout en réduisant la distance entre les pales des condensateurs et donc en augmentant leurs performances. Le choix des matériaux notamment pour le cadre, l'asservissement de la tension des actionneurs pour contrôler le déplacement, une meilleure conception des périphériques (support de l'échantillon, microscope pour la mise en place des échantillons, dispositif d'immobilisation du chariot...) laissaient entrevoir de nombreuses possibilités. Une autre possibilité que nous avons envisagé consistait à transposer notre appareil dans le domaine des micromachines ou MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) pour bénéficier de nombreux facteurs d'échelle. Mais, Vincent Hayward s'est ensuite prioritairement intéressé au retour haptique

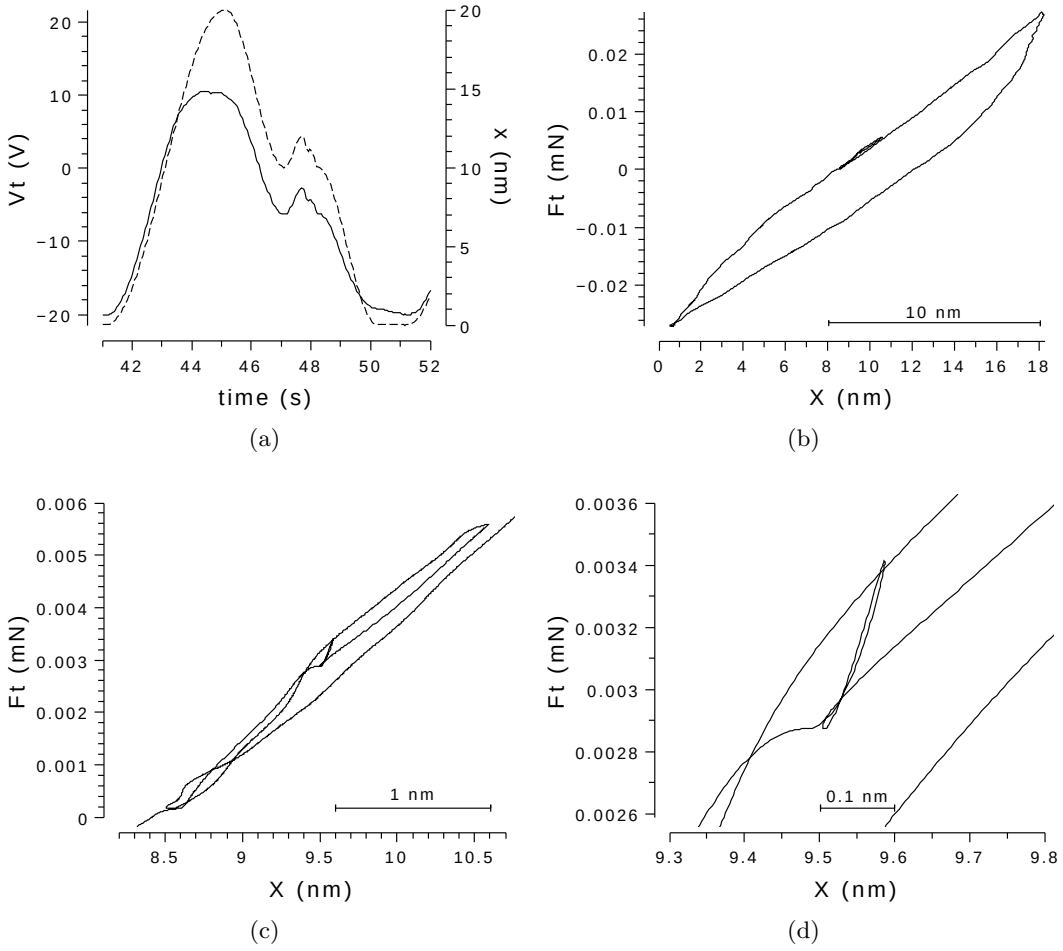


FIGURE 3.10 – Le comportement de la liaison laisse apparaître un Hystérésis à plusieurs échelles. (a) la tension tangentielle (trait tireté) et le déplacement correspondant (trait plein). (b) Boucle d'hystérésis principale (18 nm), (c) boucle secondaire (2 nm), (d) deuxième niveau de boucle secondaire (70 pm), $F_c = 8.3$ Hz.

et moi à la manipulation, abandonnant tous les deux ce projet.

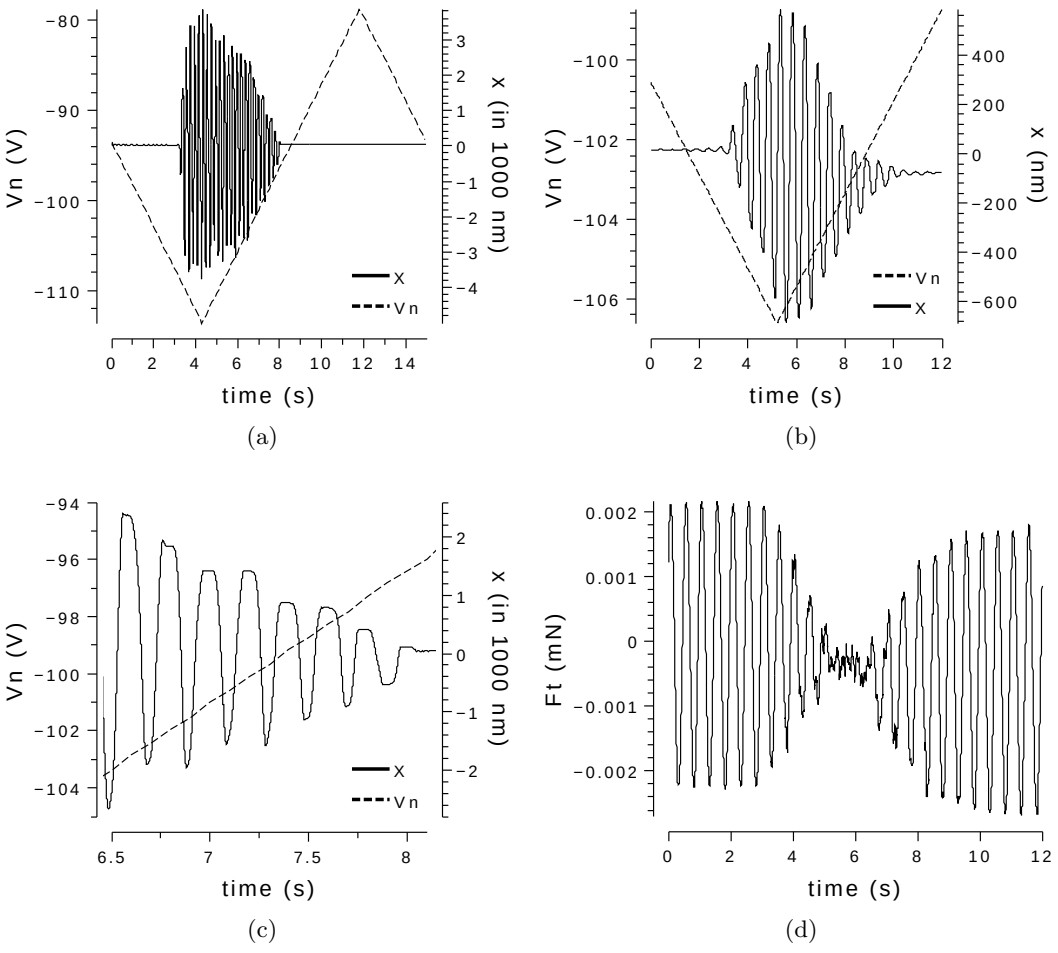


FIGURE 3.11 – (a) et (b) Effet de la force normale sur le déplacement à deux échelles différentes. (c) Agrandissement de (a) quand la force normale devient grande. (d) La force de friction tangentielle devient petite quand le déplacement tangent est maximum en (b). $Fc = 8.3$ Hz.

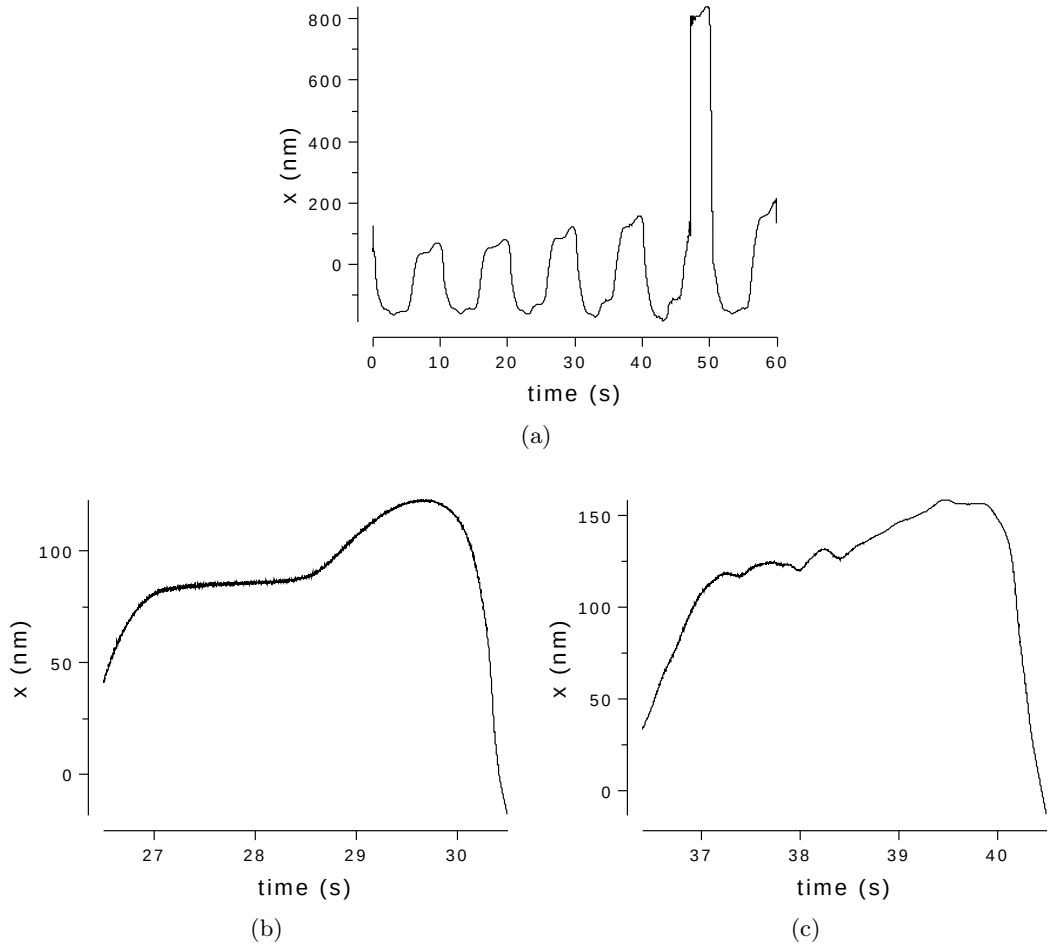


FIGURE 3.12 – (a) Une force tangentielle périodique est appliquée sur une liaison en acier. Au début le déplacement maximum est lisse, par exemple (b) entre les instants 27 et 30 s, le dernier maximum (c) juste avant que la liaison glisse est très actif entre les instants 37 et 40 s (mesures brutes).

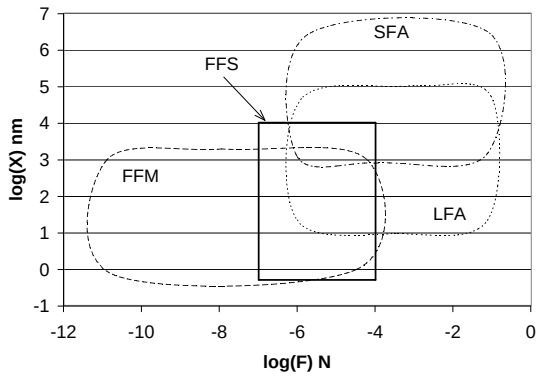


FIGURE 3.13 – Comparaison des domaines de travail pour les FFM, LFA, SFA et la présente réalisation du FFS

4

Interaction

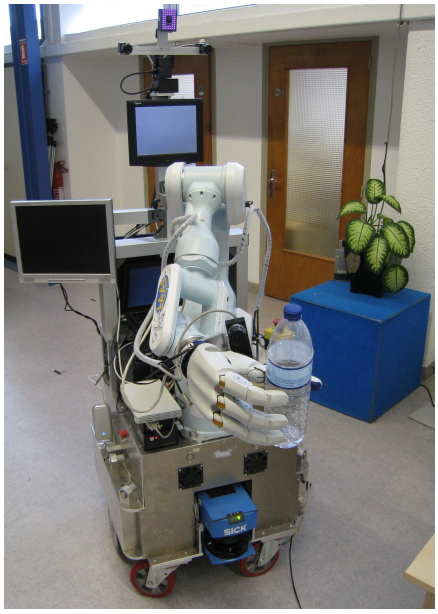


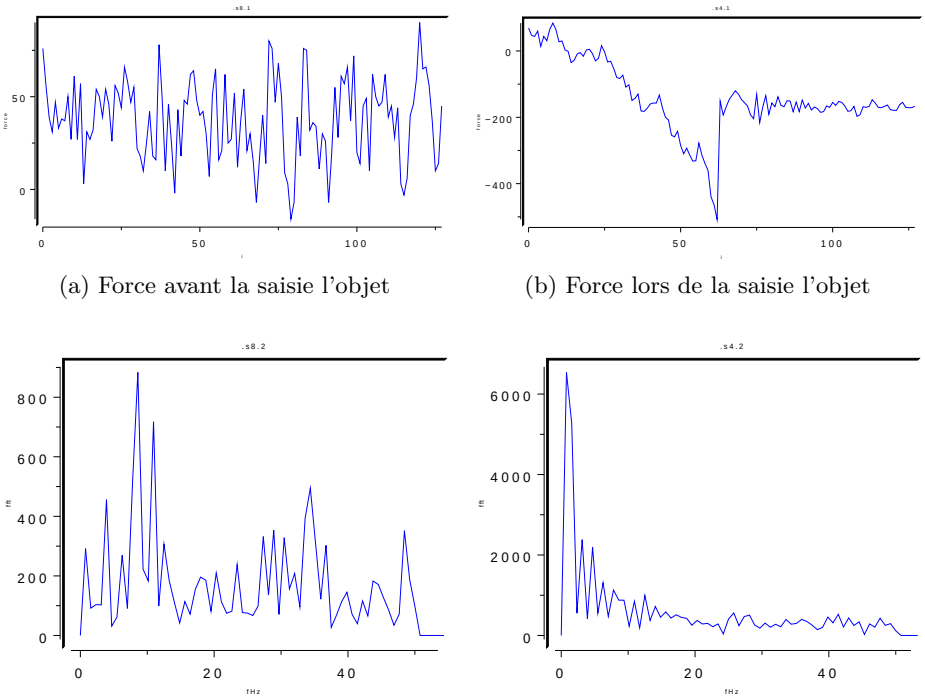
FIGURE 4.1 – Jido apporte une bouteille

Le partage de notre espace avec des machines et plus encore avec des robots soulève de nombreuses questions tant du point de vue de la sécurité que de la place que nous souhaitons leur accorder.

Nous avons, dans les paragraphes précédents, abordés les thèmes de la sécurité et du confort qui conditionnent le partage de l'espace entre les hommes et les robots. Nous souhaitons ici aller au delà et nous intéresser au dialogue homme-robot. Ce dialogue doit permettre au robot de comprendre les désirs des humains et, si possible, les réaliser.

Le domaine de l'interaction est très vaste, nous nous limiterons ici aux interactions liées aux tâches de manipulation. Le dialogue peut avoir lieu de plusieurs manières et à plusieurs niveaux : échange verbal et échange de regards, interaction au travers d'outils informatiques (clavier, écran, souris, boite à boutons), ou plus intuitivement par le toucher...

Nous pouvons considérer que ces dialogues se déroulent en trois phases. La première phase correspond à la préparation de l'action : « Fais moi passer cet objet ». La deuxième concerne les échanges au cours de la réalisation de la tâche, ils visent par exemple à coordonner les actions.



(a) Force avant la saisie l'objet

(b) Force lors de la saisie l'objet

(c) FFT de la force avant la saisie de l'objet

(d) FFT de la force lors de la saisie de l'objet

FIGURE 4.2 – Graphiques illustrant les changements dans la force lorsque l'homme saisit l'objet que le robot lui tend. Les enregistrements correspondent à 1.28 s. La transformé de Fourier fait apparaître une nette variation des faibles fréquences (inférieures à 15 Hz).

La troisième est relative à l'évaluation de la tâche qui vient d'être réalisée, cette dernière phase est directement reliée avec les capacités d'apprentissage du robot.

Même pour une tâche élémentaire comme l'échange d'un objet entre deux humains, les informations échangées par les deux humains sont très peu connues. Si l'on désire échanger de manière fiable et naturelle des objets avec des robots, nous devons mieux connaître ces informations échangées. C'est pourquoi, dans le cadre du projet européen DEXMART [9] nous avons proposé d'étudier ces interactions afin de pouvoir les reproduire. Pour cela, nous avons proposé de construire un objet-capteur qui permet de mesurer les forces d'interaction. En utilisant conjointement le système de capture de mouvement humain Motion Analysis dont nous disposons, nous pourrons disposer des informations nécessaires à la compréhension de ces échanges.

4.1 Jido sait donner un objet

A l'heure actuelle, dans le cadre des démonstrations pour le projet COGNIRON, Jido détermine la position de l'homme, planifie un chemin pour donner l'objet à l'homme, planifie un mouvement sur ce chemin et effectue ce mouvement jusqu'à ce qu'il détecte que l'homme à saisie l'objet et qu'il peut lâcher. Il arrête alors le mouvement, ouvre la pince et effectue un mouvement de replie.

9. European FP7 project DEXMART, http://www.dexmart.eu/, DEXterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation with sMART sensory-motor skills: A bridge from natural to artificial cognition

FIGURE 4.3 – Echange de Bidule

Des variations autour de ce scénario sont prises en compte par le planificateur de haut niveau SHARY [Clodic *et al.*, 2008]. Par exemple :

- si l'opérateur détourne son regard ou change d'attitude, le robot arrête de tendre l'objet. Suivant l'évolution, le mouvement pourra être poursuivi ou abandonné.
- si l'opérateur n'attrape pas l'objet, le robot attend quelques instants en fin de mouvements.

Notre contribution dans ce scénario se situe essentiellement au niveau de la planification du mouvement et de la détection de la saisie.

La détection de la saisie repose sur la détection de l'augmentation du signal de force dans le domaine des basses fréquences que nous obtenons par transformé de Fourier rapide du signal (Voir figure 4.2). En effet lorsque l'homme saisit l'objet, il transmet au robot des efforts.

4.1.1 Filtrage de l'information de saisie

La figure 4.2 montre clairement une différence au niveau des fréquences enregistrées par le capteur d'effort. Toutefois, la transformé de Fourier présentée sur la figure 4.2d représente tout l'échange qui dure un peu plus d'une demi seconde. Le déclenchement de l'ouverture de la pince doit correspondre à l'instant où l'humain tient l'objet, la variation est alors nettement moins importante.

A partir de ces constatations, nous avons défini un seuil sur les basses fréquences pour déterminer l'instant où le robot doit lâcher.

Dans le cadre des démonstrations pour le projet Cogniron et pour des visiteurs divers, nous avons proposé à des opérateurs non préparé de saisir l'objet tendu par le robot. Nous avons constaté que dans un nombre non négligeable de cas, peut être 20 %, l'échange échoue. L'échec peut être de différent type, mais il est généralement associé à une mauvaise interprétation du contact par le robot au moment de l'échange. Nous en avons conclu que le système de détection que nous avons construit est insuffisant.

4.1.2 Étude des informations échangées

Il y a peu d'étude sur les informations que nous échangeons lorsque une personne donne un objet à une autre. L'échange ne se fait pas de la même manière lorsque il s'agit d'un objet banal ou d'un objet dangereux, fragile ou de grande valeur. Il apparaît donc nécessaire de comprendre ces mécanismes afin que le robot puisse les reproduire.

À partir de ces simples constatations, il apparaît que la détection d'un seuil de force n'est pas suffisante pour savoir si l'homme à attrapé l'objet. La question est de savoir quels sont les

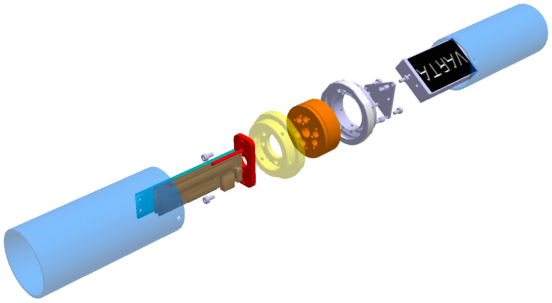


FIGURE 4.4 – Vue éclatée de Bidule : en orange le capteur de force 6D, les poignées bleus sont fixée au moyens de bagues visées sur le capteur de force, le calculateur Gumstick et la carte d'acquisition sont à gauche et la batterie à droite.

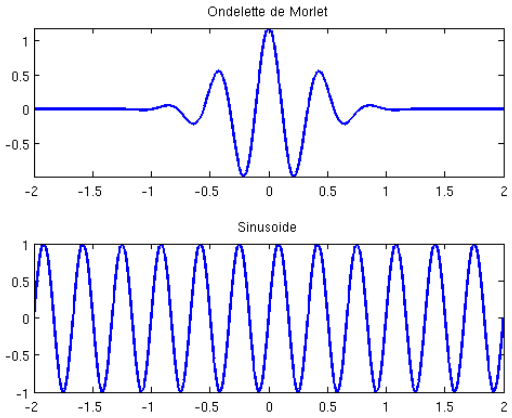


FIGURE 4.5 – En haut : exemple d'ondelette de Morlet, en bas : sinusoïde

indices qui permettraient au robot de s'assurer que l'homme à effectivement saisie l'objet et est en mesure d'assurer la suite de son transport.

La saisi de l'objet tendu par l'homme nécessite en plus du suivi des mouvements de l'homme, la mesure précise de la position relative de l'objet et la planification en temps réel du mouvement, puis le contrôle des efforts de la pince sur l'objet. Cette action est donc plus compliquée et nécessite encore des développements pour pouvoir être réalisée couramment.

4.1.3 Interaction et contact

La réalisation de ces tâche d'échange d'objet fait apparaître un manque de naturel. Probablement que les informations échangées au cours de ces échanges ne sont pas identiques à celles échangées par deux humains échangeant un objet. Ceci nous incite à mieux connaître ces interactions. Pour cela nous avons réalisé un objet équipé de capteurs pour mesurer les efforts d'interaction pendant l'échange. Cette étude a été effectuée dans le cadre du projet européen DEXMART [Sidobre *et al.*, 2009] .

Nous avons construit l'objet Bidule (voir figure 4.3). Bidule est un objet cylindrique constitué de deux poignés assemblées sur un capteur de force 6D. Ce capteur de force est associé à un accéléromètre 3 axes (Voir figure 4.4). Toute l'informatique de mesure est embarquée.

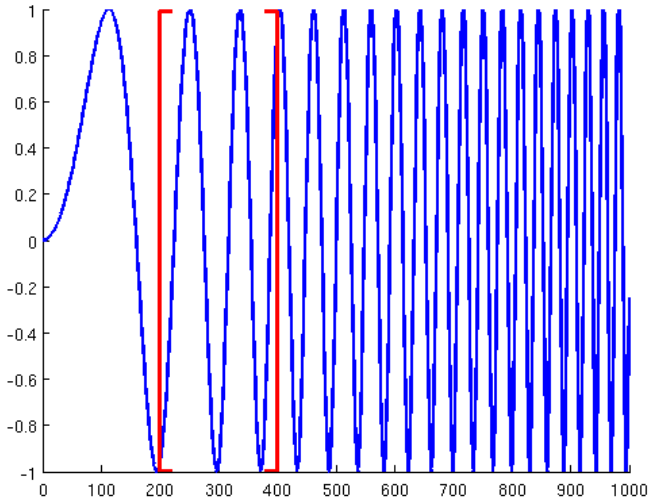


FIGURE 4.6 – Fonction sinus de fréquence variable j'usqu'à 500 et constante ensuite. Une fenêtre d'analyse est tracée en rouge entre les instants 200 et 400.

Bidule est construit autour d'une mini carte mère gumstix [10] sur laquelle nous avons installé un module GENOM [11]. Bidule est donc vu comme un robot dans notre environnement. Il peut échanger des données par liaison wifi, est doté d'une batterie lui assurant plusieurs heures d'autonomie et dispose d'une carte mémoire microSD de plusieurs giga-octets pour stocker des données. Une carte interface développée par le service informatique et instrumentation du LAAS assure l'interface entre la carte Gumstix et les capteurs.

Nous avons aussi mis en place une chaine d'acquisition et de traitement des mesures partiellement embarquée sur l'objet Bidule. Une première étape consiste à calculer les efforts extérieurs exercés sur chaque poignée à partir des mesures de force et d'accélération. Nous traitons ensuite les données par des transformés en ondelettes pour détecter notamment les différentes phases des échanges.

La transformé en ondelettes

La transformé de Fourier considère des signaux périodiques et utilise des signaux sinusoïdaux comme signaux d'analyse. La transformé en ondelettes utilise des ondelettes qui peuvent être de différents types. Nous utilisons les ondelettes de Morlet4.5.

Considérons un signal de fréquence variable (voir figure 4.6) auquel nous appliquons la transformé en ondelettes (voir figure 4.7). Nous présentons aussi le résultat d'une transformé de Fourier fenêtré pour laquelle à chaque instant la transformé de Fourier est appliquée à une fenêtre de signal de largeur fixe. Les coefficients les plus faibles sont coloré en bleu et les coefficients les plus élevé en rouge.

Nous voyons clairement que pour une fréquence fixe, partie droite des courbes, la transformé de Fourier donne une valeur beaucoup plus précise de la fréquence. Par contre il faut attendre l'instant 1.2 pour obtenir cette fréquence. La transformé en ondelette est moins précise en

10. Gumstix Inc., http ://www.gumstix.net
11. Genom : outil pour l'intégration de modules fonctionnels pour les systèmes embarqués (https ://softs.laas.fr/openrobots/wiki/genom).

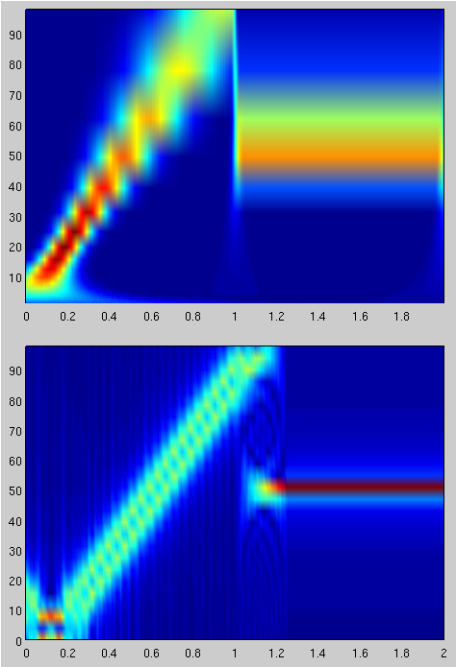


FIGURE 4.7 – Comparaison entre une transformé de Fourier fenêtrée rapide et une transformé en ondelette. Le temps est représenté horizontalement en seconde et les fréquences sont représentée verticalement en hertz. En haut, la transformé en ondelettes. En bas, le transformée de Fourier fenêtrée.

fréquence, mais beaucoup plus précise dans le domaine temporel. La transformé en ondelette assure un meilleur compromis entre temps et fréquences.

Résultats obtenus

L'analyse par transformé en ondelettes est très bien adapté aux signaux de force que nous mesurons. En effet, ces signaux sont constitué d'une composante non périodique et de composantes périodiques. Les courbes obtenues pour différentes fréquences ou à des instants différents permettent d'analyser finement les forces et d'illustrer différents phénomènes. La figure 4.9 montre un exemple de résultats obtenus.

Nous avons notamment observé que la signature de la saisie varie avec la vitesse de l'échange. Pour des vitesses faibles il est possible d'observer un pic de force dans une plage de fréquence. Pour des vitesses plus élevées, on observe deux pics consécutifs. Pour des vitesses très faibles, Bidule n'est pas suffisamment sensible pour détecter la faible force de contact. Un détecteur de saisie général nécessite donc deux types de capteur, un capteur de vitesse pour déterminer la vitesse d'approche de la main et un capteur de force pour mesurer la force de contact. Le capteur de vitesse d'approche peut être un système de capture de mouvement en laboratoire ou une caméra sur le robot.

Les mesures réalisées avec Bidule et d'autres moyens comme la capture de mouvement montrent clairement qu'il est possible de détecter la saisie de l'objet par le receveur pour une large gamme de situations. En utilisant un système de mesure de la vitesse d'approche de la main du receveur, il est possible d'augmenter la plage de détection. La nouvelle fonction de détection installée sur le robot Jido donne de meilleurs résultats.

FIGURE 4.8 – Deux personnes s'échangent Bidule, ici Bidule et les deux personnes sont équipées de marqueurs pour la capture de mouvement.

Nous travaillons maintenant à valider ces concepts pour les échanges où le robot donne l'objet à l'homme. Pour cela nous allons utiliser le planificateur Move3D pour calculer en temps réel la trajectoire de saisi à partir de la position mesurée de l'objet. La position de l'objet est obtenue à partie d'une paire de caméra stéréoscopique qui mesure la position d'étiquettes collées sur l'objet. L'approche finale de l'objet sera effectuée par asservissement visuel. Nous devrions bientôt réaliser ces expérimentations.

4.2 conclusion

Les travaux sur l'échange d'un objet présenté ici peuvent paraître limités car ils ne portent que sur quelques aspects liés à l'échange physique d'un objet. Toutefois l'interaction homme-robot constituant un des principaux thèmes de recherche des groupes robotiques du LAAS, ils font partie d'un ensemble de travaux beaucoup plus vaste qui vise à construire des robots capable d'interagir avec les humains. L'échange naturel et fiable d'un objet est l'un des éléments nécessaire pour construire des robots utiles et performants tout en assurant la sécurité et le confort des utilisateurs.

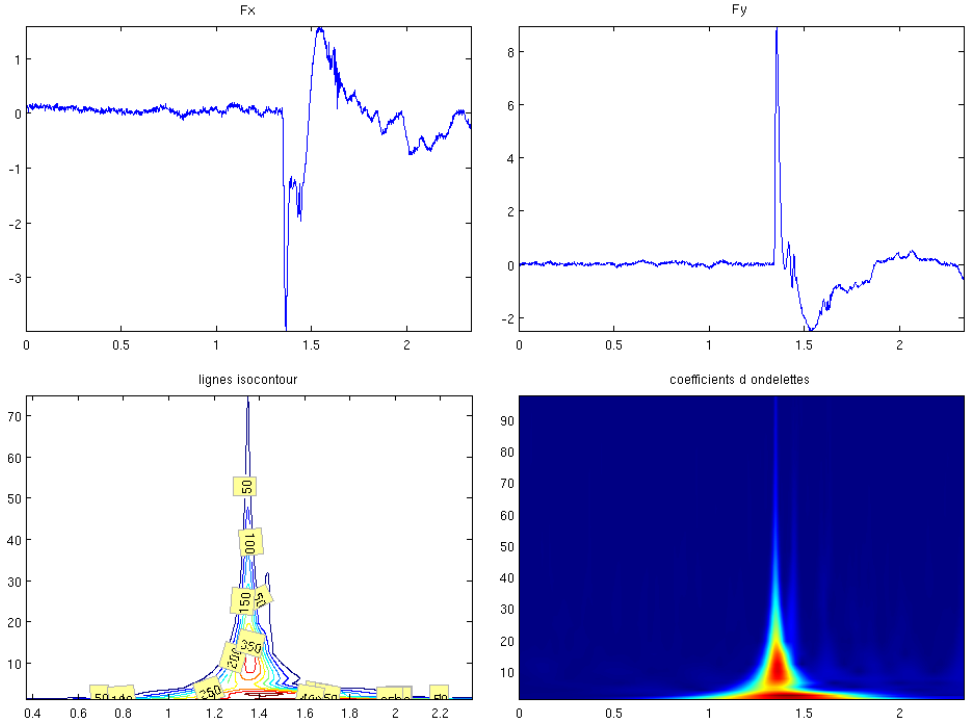


FIGURE 4.9 – Forces mesurées avec Bidule lors d'un échange. En haut, forces dans les directions X et Y. En bas transformée en ondelettes (horizontalement le temps en s et verticalement les fréquences en Hz) : à gauche lignes correspondant à des valeurs de coefficients et à droite représentation colorées des coefficients.

5

Conclusion

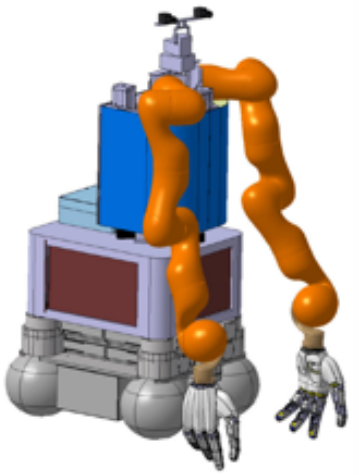


FIGURE 5.1 – Projet de robot manipulateur mobile à deux bras

Au début de ce mémoire, nous avons proposé de construire des machines capable de choisir la tâche à accomplir, puis de définir la manière de réaliser cette tâche et enfin de réaliser cette tâche. Si nous considérons une tâche de manipulation simple comme prendre un objet sur une table et le donner à un humain, nous pouvons dire que nous y sommes parvenu à la condition d'accepter que l'objet appartienne à une famille très réduite, que la table se trouve dans un environnement connu et peu contraint, que l'homme soit coopératif et prudent, que les conditions d'éclairage soient compatibles avec les caméras utilisées, que l'on accepte d'acheter un robot pour plusieurs dizaines de milliers d'euros... Au vue de ces conditions, nos résultats sont très limités.

D'un autre point de vue, nous avons été capable de construire un des premiers robots manipulateurs mobiles autonomes capable de manipuler et d'interagir avec les humains. Ceci n'aurait pas été possible sans une équipe pluridisciplinaire et les services supports du laboratoire. Et l'aventure n'est pas terminée, nous sommes en train de construire un nouveau manipulateur mobile qui aura deux bras et deux mains multi-doigts (voir figure 5.1). Même si la manipulation est au cœur de ce système, il n'est pas possible de le considérer uniquement comme un manipulateur. Les aspects navigation, interaction, perception et autonomie sont au moins aussi importants.

Le déploiement de robots industriels et domestique continue, mais la fonction manipulation est cantonnée à des tâches très répétitives. Deux axes de développement sont envisageables, le

FIGURE 5.2 – Projet de robot manipulateur mobile à deux bras du projet ASSIST

premier tire profit de l'expérience industrielle en manipulation et vise à réaliser des tâches moins répétitives. L'idée est de tirer profit de la possibilité de faire cohabiter homme et machine, c'est à dire supprimer les cages où sont actuellement enfermés les bras manipulateurs, pour réaliser des séries plus petites ou avec une plus grande variabilité en tirant profit de la présence de l'homme pour faciliter la programmation. Nous sommes en contact avec des entreprises comme EADS et Peugeot SA pour aborder ces problèmes. Le deuxième axe de développement concerne des applications nouvelles comme celle du projet ASSIST où le robot aide une personne dans des tâches quotidiennes. Dans le cas du projet ASSIST, il s'agit de personnes handicapées, mais beaucoup d'autres domaines applicatifs sont envisageables.

5.1 Prospective

A l'issue de ces travaux et de ceux de la communauté robotique mondiale, nous pouvons donc considérer que le concept de robot mobile manipulateur autonome et interactif est validé. Comme souvent en sciences ou en technologie, la connaissance d'un élément permet surtout d'entrevoir ce que l'on ne connaît pas. Sans être exhaustif, nous pouvons entrevoir des développements importants dans le domaine de la manipulation à deux bras, des mains, de la perception, de la commande et de l'interaction avec les utilisateurs.

5.1.1 Manipulation à deux bras

Comme nous l'avons vu, hors des contextes industriels particuliers où les tâches de manipulation peuvent être adaptées pour être réalisées par un seul bras, la réalisation d'une tâche de manipulation nécessite généralement deux bras et deux mains. Ces systèmes à deux membres ne peuvent pas être étudiés comme la juxtaposition de deux bras car ils exhibent des problèmes nouveaux liés à la coordination pour réaliser la tâche, éviter les collisions et prendre en compte l'environnement. De même, les possibilités pour saisir et manipuler un objet à deux mains sont beaucoup plus riches et diverses. La manipulation fine, limitée à des objets petits dans le cas d'une main, trouve ici toute sa dimension et nécessite de traiter les problèmes de roulement, de glissement, de chaînes cinématiques fermées, de dynamique, de discontinuités liées au déplacement des doigts, de commande... L'utilisation d'un outil simple comme un balai ou une pelle demande encore des développements notamment pour planifier non seulement le chemin mais aussi la dynamique du mouvement et son contrôle.

L'utilisation dissymétrique des deux bras permet de saisir un objet d'une main et un outil de l'autre ou de saisir deux objets à assembler. Bien sûr, nous avons tous déjà vu de telles coopérations, mais l'enjeu est de les réaliser de manière autonome. Les deux bras ouvrent aussi

la possibilité de manipuler des mécanismes plus complexes.

5.1.2 Les mains artificielles

Les mains actuelles ne sont pas satisfaisantes pour plusieurs raisons. Tout d'abord elles sont trop grosses, trop lourdes et elles manquent de puissance. Ensuite elles sont sensibles à l'environnement : eau, poussières... Enfin elles ne disposent pas de commande et de capteurs satisfaisants.

Dans ce domaine, la technologie évolue rapidement. Le projet DEXMART qui n'est pas le seul projet dans ce domaine a proposé plusieurs direction de recherche : la motorisation, les capteurs, la commande et l'architecture mécanique. Il existe plusieurs objectifs en fonction du contexte. A une extrémité l'on trouve la prothèse de main qui a des contraintes d'imitation et d'esthétiques très importante. Une autre direction de recherche très active est la réalisation de mains sous-actionnées pour réduire les coûts et augmenter la fiabilité.

Il est très difficile de prédire à quoi ressemblerons les préhenseurs de demain et surtout quelles seront les techniques utilisées pour réaliser les capteurs et les actionneurs.

5.1.3 Perception

La manipulation nécessite trois fonctions de perception : la première est liée à la modélisation de l'environnement du robot et la deuxième au suivi du mouvement relatif des éléments mobiles de l'environnement par rapport au robot pour le contrôle des mouvements du robot. La troisième est liée à l'identification des objets.

En observant quelques instants une scène, nous, les humains, sommes capable de choisir notre chemin dans un univers 3D complexes. Le calcul du modèle 3D de l'environnement dans un temps raisonnable n'est pas possible pour un robot actuellement. L'utilisation d'un télémètre laser comme le LIDAR de Velodyne (http ://www.velodyne.com/lidar/) donne un nuage de points à une cadence élevée, des caméras couplées à des algorithmes de stéréovision donne aussi des nuages de points 3D. Nous entrevoyons ici la possibilité de disposer de données brutes, mais certainement encore pour quelques temps à des prix très élevés. Les algorithmes de calcul des volumes de l'espace et surtout ceux destinés à extraire la sémantique d'une scène ne sont pas encore à notre disposition.

La notion d'apprentissage permettra d'éviter de recalculer des modèles déjà rencontré en liaison avec l'identification des objets.

5.1.4 La commande des machines au contact de l'homme

Nous avons abordé les problèmes de sécurité et de confort de manière élémentaire, nous avons besoin d'outils plus performants.

Au contact de l'homme, la planification de la trajectoire et son contrôle sont indissociables, en effet la sécurité de l'homme dépend de ces deux niveaux. Dans ce contexte, la synthèse automatique de contrôleur en force et vision constitue un enjeu important.

Un autre aspect à ne pas négliger est la dynamique, un mouvement est définie par sa trajectoire, son profil de vitesse et d'accélération et les efforts exercés. La réalisation d'un geste est encore hors de notre porté, par exemple nous ne savons pas reproduire les gestes d'un technicien manipulant une meule, d'un agriculteur maniant une faux ou d'un cuisinier faisant sauter une crêpe. Il faut bien voir que l'enjeu n'est pas de réaliser l'une de ces tâches dans un contexte particulier, mais de construire les modèles de ces tâches afin que le robot construise un plan

puis le réalise. Une variante consiste à les réaliser par apprentissage, à partir de l'observation de démonstrations effectuées par des humains.

5.1.5 L'interaction

Nous nous plaçons résolument dans la perspective de robot évoluant parmi les humains. Nos travaux nous ont permis d'aborder les problèmes de sécurité, de confort et de collaboration. Les deux premiers aspects sont présents à tous les niveaux du robot depuis les composants élémentaires jusqu'à la supervision du robot. La collaboration se situe plutôt au niveau de la commande, de la planification et de la supervision.

De nombreux travaux ont été menés sur l'interaction entre une machine et les humains. Toutes ces machines ont une fonction clairement définie : un avion vole pour assurer le transport de marchandise ou de personnes, une centrale nucléaire produit de l'électricité, un lave-linge lave du linge. Par définition, un robot est susceptible d'effectuer une tâche quelconque. La problématique est donc fortement différente et beaucoup plus riche.

D'un point de vue pratique, les techniques robotiques n'ont été utilisés que pour construire des machines spécialisées : machines de nettoyage, manipulateurs, robots de soudage... Les vrais problèmes d'interaction avec une machine autonome n'ont pas été abordé.

Jusqu'au jour où nous avons été en capacité d'échanger un objet avec le robot, nous n'avions pas imaginé le problème de l'échange. Nous nous le représentions sous la forme de tendre l'objet puis « appuyer sur un bouton ». De plus il semble que ce problème ait été très peu étudié chez l'homme.

Nous sommes donc au tout début de l'étude de ces problèmes d'interaction.

5.2 Conclusion

Nous devrions aussi répondre à la question initiale sur la capacité des robots à nous aider à vivre mieux. La réponse affirmative d'évidence n'est pas forcément exacte même si elle a été et demeure notre objectif. L'actualité récente nous à, par exemple, montré l'utilisation de telles machines par les militaires. Ceci ne constitue pas forcément une mauvaise chose, mais nous permet d'entrevoir des risques. Ces risques ont déjà été illustrés par des romans et des films qui mettent en scène des robots. Sur le plan économique, il n'y a pas si longtemps, les bras manipulateurs étaient accusés de conduire des travailleurs au chômage. La seule conclusion possible est que la technique n'est pas suffisante en soi, elle doit être accompagnée d'une réflexion philosophique sur ses applications pour permettre le progrès social de l'humanité.

Bibliographie

[A. Rosen, 1997] E. Edelstein A. Rosen. Fast and accurate computation of polyhedral mass properties. *Transaction of the ASME*, 64, march 1997.

[Alami *et al.*, 1989] R. Alami, T. Siméon, and J.P. Laumond. A geometrical approach to planning manipulation tasks. the case of discrete placements and grasps. In *5th International Symposium on Robotics Research*, Tokyo, Japan, 1989.

[Andreff *et al.*, 1999] N. Andreff, R. Horaud, and B. Espiau. On-line hand-eye calibration. In *Second Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, Ottawa, Canada, October 1999.

[Andreff, 1997] Nicolas Andreff. Towards the embedding of on-line hand-eye calibration into visual servoing. In *IEEE/RSJ/INRIA Workshop On New Trends in Image based Robot Servoing*, September 1997.

[Bajaj and Dey, 1984] C.L. Bajaj and T.K. Dey. Convex decomposition of polyhedra and robustness. *SIAM Journal of Computing*, 13(3) :488–507, 1984.

[Baraff, 1993] David Baraff. Issues in computing contact forces for non-penetrating rigid bodies. *Algorithmica*, 10 :292–352, 1993.

[Baraff, 1994] David Baraff. Fast contact force computation for non penetrating rigid bodies. *Computer graphics (Proc. SIGRAPH)*, pages 23–34, july 1994.

[Baraff, 1996] David Baraff. Linear-time dynamics using lagrange multipliers. *Computer graphics (Proc. SIGRAPH)*, 4(9) :137–146, august 1996.

[Bard *et al.*, 1995] C. Bard, C. Laugier, C. Milési-Bellier, J. Trocazz, B. Triggs, and G. Vercelli. Achieving dextrous grasping by integrating planning and vision-based sensing. *International Journal of Robotics Research*, 14(5) :445–464, 1995.

[Bhushan and Dandavate, 2000] Bharat Bhushan and Chetan Dandavate. Thin-film friction and adhesion studies using atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 87(3) :1201–1210, 2000.

[Bicchi and Kumar, 2000] A. Bicchi and V. Kumar. Robotic grasping and contact : a review. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, 1, 2000.

[Blanchard, 2005] Jonathan Blanchard, août 2005. Master recherche Systèmes Automatiques Informatiques et Décisionnels.

[Boissinot, 2008] Dimitri Boissinot. Asservissement visuel coordonné pour un manipulateur mobile à deux bras, 2008. Master recherche de l'Université Louis Pasteur de Starsbourg.

[Borst *et al.*, 2003] C. Borst, M. Fischer, and G. Hirzinger. Grasping the dice by dicing the grasp. In *Proc. IEEE/RSJ IROS*, volume 2003, pages 3692–3697. Citeseer, 2003.

[Bouarroudj, 2005] Mounira Bouarroudj. Optimisation du placement des came'ras pour la manipulation mobile, Juin 2005. Master recherche Systèmes Automatiques Informatiques et Décisionnels.

[Bounab *et al.*, 2007a] Belkacem Bounab, Daniel Sidobre, and Abdelouhab Zaatri. An efficient algorithm for computing n-finger force-closure grasps for planar objects. *International Review of Mechanical Engineering*, July 2007.

[Bounab *et al.*, 2007b] Belkacem Bounab, Daniel Sidobre, and Abdelouhab Zaatri. On computing multi-finger force-closure grasps of 2d objects. In *ICINCO-RA (1)*, pages 253–258, 2007.

[Bounab *et al.*, 2008] B. Bounab, D. Sidobre, and A. Zaatri. Central axis approach for computing n-finger force-closure grasps. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1169–1174, 2008.

[Bounab *et al.*, 2009] Belkacem Bounab, Abdenour Labed, and Daniel Sidobre. Stochastic optimization based approach for multifingered grasps synthesis. *Robotica*, accepted, 2009.

[Briam Mirtich, 1995a] John Canny Briam Mirtich. Impulse-based dynamic simulation. In K. Goldberg, D. Halperin, J.C. Latombe, R. Wilson, editor, *The algorithmic foundations of robotics*. A. K. Peters, Boston, MA, 1995. Proceedings from the workshop held in february, 1994.

[Briam Mirtich, 1995b] John Canny Briam Mirtich. Impulse based simulation of rigid bodies. In *Symposium on interactive 3D graphics*, New York, 1995. ACM Press.

[Broquere *et al.*, 2008] Xavier Broquere, Daniel Sidobre, and Ignacio Herrera-Aguilar. Soft motion trajectory planner for service manipulator robot. *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2808–2813, Sept. 2008.

[Broquère, 2007] Xavier Broquère. Commande d'un bras manipulateur, planification de mouvements souples, 2007. Master thesis SUPMECA Toulon.

[Broquère, 2008] Xavier Broquère. A mono-dimensionnal soft motion planner saturating jerk, acceleration and velocity. Technical report, LAAS - CNRS, 7, Avenue du Colonel Roche, Toulouse, FRANCE, 2008.

[Caccavale and Uchiyama, 2008] Fabrizio Caccavale and Masaru Uchiyama. Cooperative manipulators, 2008.

[Caroli and Nozières, 1998] C. Caroli and P. Nozières. Hysteresis and elastic interactions of microasperities in dry friction. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 4(2) :233–246, 1998.

[Carpick and Salmeron, 1997] R.W. Carpick and M. Salmeron. Scratching the Surface : Fundamental Investigations of Tribology with Atomic Force Microscopy. *CHEMICAL REVIEWS*, 97 :1163–1194, 1997.

[Castain and Paul, 1984] R. H. Castain and R. P. Paul. An on-line dynamic trajectory generator. *The International Journal of Robotics Research*, 3 :68–72, 1984.

[Castel *et al.*, 1995] J.M. Castel, A. Giraud, and D. Sidobre. Projet de préhenseur tactile. Technical Report 95104, LAAS - CNRS, 7, Avenue du Colonel Roche, Toulouse, FRANCE, mars 1995.

[Charette *et al.*, 1992] P.G. Charette, I.W. Hunter, and C.J.H. Brenan. A complete high performance heterodyne interferometer displacement transducer for microactuator control. *Review of Scientific Instruments*, 63 :241, 1992.

[Chazelle, 1984] B. Chazelle. Convex partitions of polyhedra : A lower bound and worst-case optimal algorithm. *SIAM Journal of Computing*, 13(3) :488–507, 1984.

[Clodic *et al.*, 2008] Aurélie Clodic, Hung Cao, Samir Alili, Vincent Montreuil, Rachid Alami, and Raja Chatila. Shary : a supervision system adapted to human-robot interaction. In *11th International Symposium on Experimental Robotics (ISER 08)*, Athens (Greece), July 2008.

[Cortés *et al.*, 2002] J. Cortés, T. Siméon, and J.P. Laumond. A random loop generator for planning the motions of closed kinematic chains using prm methods. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002.

[Cortés, 2003] J. Cortés. *Motion Planning Algorithms for General Closed-Chain Mechanism*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, December 2003.

[Cutkosky and Howe, 1990] M.R. Cutkosky and R.D. Howe. Human grasp choice and robotic grasp analysis. 1990.

[D. Stoianovici, 1996] Y. Hurmuzlu D. Stoianovici. A critical study of the applicability of rigid-body collision theory. *ASME Journal of applied mechanics*, 63 :307–316, june 1996.

[Dam *et al.*, 1998] E.B. Dam, M. Koch, and M. Lillholm. Quaternions, interpolation and animation. 1998.

[Dan B. Marghitu, 1995] Yildirim Hurmuzlu Dan B. Marghitu. Three-dimensional rigid-body collisions with multiple contacts points. *ASME journal of applied mechanics*, 62 :725–732, september 1995.

[Durrant-White and Bailey, 2006] H. Durrant-White and T. Bailey. Tutorial : Simultaneous localization and mapping : Part i. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pages 99–108, June 2006.

[Engelbrecht, 2001] S.E. Engelbrecht. Minimum Principles in Motor Control. *Journal of Mathematical Psychology*, 45(3) :497–542, 2001.

[Esteves *et al.*, 2006] C. Esteves, G. Arechavaleta, J. Pettre, and J.P. Laumond. Animation planning for virtual mannequins cooperation. *ACM Transactions on Graphics*, 2006.

[european project Cogniron,] In european project Cogniron. http ://www.cogniron.eu/.

[F. Pfeiffer, 1996] C. Glocker F. Pfeiffer. *Multibody dynamics with unilateral contacts*. Wiley series in nonlinear science. John Wiley & sons, 1996.

[Feddema and Mithcell, 1989] J. T. Feddema and O. R. Mithcell. Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5 :691–700, October 1989.

[Feige and Balk, 2003] V.K.S. Feige and L.J. Balk. Calibration of a scanning probe microscope by the use of an interference-holographic position measurement system. *Measurement Science and Technology*, 14(7) :1032–1039, 2003.

[Ferrari and Canny, 1992] C. Ferrari and J. Canny. Planning optimal grasps. *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, pages 2290–2295, 1992.

[Flash and Hogan, 1985] Tamar Flash and Neville Hogan. The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5 :1688–1703, July 1985.

[Fontmarty *et al.*, 2007] M. Fontmarty, F. Lerasle, and P. Danes. Data fusion within a modified annealed particle filter dedicated to human motion capture. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3391–3396, 2007.

[Foxlin, 2002] E. M. Foxlin. Generalized architecture for simultaneous localization, auto-calibration and map-building. In *IEEE Proc. Int. Conf. on Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, October 2002.

[Gerde and Marder, 2001] E. Gerde and M. Marder. Friction and fracture. *Nature*, 413(6853) :285–288, 2001.

[Giraud and Sidobre, 1995] A. Giraud and D. Sidobre. Projet de préhenseur tactile. Technical Report 95332, LAAS - CNRS, 7, Avenue du Colonel Roche, Toulouse, FRANCE, juillet 1995.

[Giraud *et al.*, 2004] A. Giraud, D. Esteve, F. Van Meer, and P. Caron. Robot chirurgical d'orientation et de positionnement d'un instrument chirurgical porteur d'un outil terminal chirurgical, juillet 2004. Brevet CNRS FR2845889.

[Goldfeder *et al.*, 2007] C. Goldfeder, P.K. Allen, C. Lackner, and R. Pelossof. Grasp planning via decomposition trees. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 4679–4684, 2007.

[Hager, 1997] Gregory D. Hager. A modular system for robust positioning using feedback from stereo vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13 :582–595, August 1997.

[Han and Amato, 2000] L. Han and N. Amato. A kinematics-based probabilistic roadmap method for closed chain systems. In *Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2000.

[Haschke *et al.*, 2005] R. Haschke, JJ Steil, I. Steuwer, and H. Ritter. Task-oriented quality measures for dextrous grasping. *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on*, pages 689–694, 2005.

[Haschke *et al.*, 2008] R. Haschke, E. Weitnauer, and H. Ritter. On-Line Planning of Time-Optimal, Jerk-Limited Trajectories. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008*, pages 3248–3253, 2008.

[He *et al.*, 1999] G. He, M.H. Müser, and M.O. Robbins. Adsorbed Layers and the Origin of Static Friction. *Science*, 284(5420) :1650, 1999.

[Hendriks and Vellinga, 2000] CP Hendriks and WP Vellinga. Quantitative measurement of sliding friction dynamics at mesoscopic scales : The lateral force apparatus. *Review of Scientific Instruments*, 71 :2391, 2000.

[Herman Bruyninckx, 1996] Joris De Schutter Herman Bruyninckx. Specification of force-controlled actions in the "task frame formalism" –a synthesis. *IEEE transactions on robotics and automation*, 12(4) :581–589, august 1996.

[Herrera-Aguilar, 2007] Ignacio Herrera-Aguilar. *Commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service*. PhD thesis, PhD Thesis, 2007.

[Hoelscher *et al.*, 1996] H. Hoelscher, UD Schwarz, and R. Wiesendanger. Simulation of a scanned tip on a NaF (001) surface in friction force microscopy. *Europhysics Letters*, 36(1) :19–24, 1996.

[Huebner *et al.*, 2008] K. Huebner, S. Ruthotto, and D. Kragic. Minimum volume bounding box decomposition for shape approximation in robot grasping. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 1628–1633, 2008.

[Israelachvili *et al.*, 1990] J. Israelachvili, P. McGuiggan, M. Gee, A. Homola, M. Robbins, and P. Thompson. Liquid dynamics in molecularly thin films. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 2, 1990.

[Jarvis *et al.*, 1999] SP Jarvis, H. Tokumoto, H. Yamada, K. Kobayashi, and A. Toda. Alternative method for the activation and measurement of lateral forces using magnetically controlled atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*, 75 :3883, 1999.

[Jong-Shi Pang, 1996] Jeffrey C. Trinkle Jong-Shi Pang. Complementarity formulations and existence of solutions of dynamic multi-rigid-body contact problems with coulomb friction. *Mathematical programming*, 73 :199–226, 1996.

[Joyce and Houston, 1991] S.A. Joyce and JE Houston. A new force sensor incorporating force-feedback control for interfacial force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 62 :710, 1991.

[Kao *et al.*, 2008] Imin Kao, Kevin Lynch, and Joel W. Burdick. Contact modeling and manipulation, 2008.

[Kavraki and LaValle, 2008] Lydia E. Kavraki and Steven M. LaValle. Motion planning, 2008.

[Keller, 1986] J. B. Keller. Impact with friction. *ASME Journal of applied mechanics*, 53 :1–4, march 1986.

[Kemp *et al.*, 2007] Charles C. Kemp, Aaron Edsinger, and Eduardo Torres-Jara. Developing robots that perform useful work in everyday settings. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, (1070-9932/07) :20–29, Mar. 2007.

[Khalil, 2002] W. Khalil. *Commande des robots manipulateurs.* Hermes Science - Lavoisier, 2002.

[Khatib, 1986] O. Khatib. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1) :90, 1986.

[Khatib, 1995] Oussama Khatib. Inertial properties in robotic manipulation : an object-level framework. *International journal of robotics research*, 14(1) :19–36, february 1995.

[Kim *et al.*, 1995] M.J. Kim, M.S. Kim, and S.Y. Shin. A general construction scheme for unit quaternion curves with simple high order derivatives. In *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 369–376. ACM New York, NY, USA, 1995.

[Kraevoy *et al.*, 2007] V. Kraevoy, D. Julius, and A. Sheffer. Shuffler : Modeling with Interchangeable Parts. *The Visual Computer*, 2007.

[Lakshminarayana, 1978] K. Lakshminarayana. Mechanics of form closure. *ASME Paper*, page 32, 1978.

[Lam and Ding, 2004] Y.H.L.M.L. Lam and D. Ding. A complete and efficient algorithm for searching 3-D form-closure grasps in the discrete domain. *Robotics, IEEE Transactions on [see also Robotics and Automation, IEEE Transactions on]*, 20(5) :805–816, 2004.

[LaValle and Ku, 2001] S. LaValle and J. Ku. Rapidly-exploring random trees : Progress and prospects. In *Algorithmic and Computational Robotics : New Directions : the Fourth Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics.* AK Peters, Ltd., 2001.

[Lavalle *et al.*, 1999] S. Lavalle, J.H. Yakey, and L. Kavraki. A probabilistic roadmap approach for systems with closed kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999.

[Li *et al.*, 2003] J.W. Li, H. Liu, and H.G. Cai. On computing three-finger force-closure grasps of 2-D and 3-D objects. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 19(1) :155–161, 2003.

[Lien and Amato, 2003] JM. Lien and N. Amato. Approximate convex decomposition. Technical Report TR03-001, PARASOL LAB, Texas A&M University, January 2003.

[Lien and Amato, 2007] J.M. Lien and N.M. Amato. Approximate convex decomposition of polyhedra. In *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Solid and physical modeling*, pages 121–131. ACM Press New York, NY, USA, 2007.

[Liu *et al.*, 1999] Y.H. Liu, D. Ding, and S. Wang. Constructing 3D frictional form-closure grasps of polyhedralobjects. *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, 3, 1999.

[Liu, 1999] Y.H. Liu. Qualitative test and force optimization of 3-D frictionalform-closure grasps using linear programming. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 15(1) :163–173, 1999.

[Liu, 2002] Steven Liu. An on-line reference-trajectory generator for smooth motion of impulse-controlled industrial manipulators. In *7th International Workshop on Advanced Motion Control*, pages 365–370, 2002.

[Lopez-Damian *et al.*, 2005a] E. Lopez-Damian, D. Sidobre, and R. Alami. A grasp planner based on inertial properties. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 766–771, Barcelona, Spain, April 2005.

[Lopez-Damian *et al.*, 2005b] E. Lopez-Damian, D. Sidobre, and R. Alami. Grasp planning for non-convex objects. In *International Symposium on Robotics*, volume 36, page 167, Tokyo, Japan, 2005. Citeseer.

[Lopez-Damian *et al.*, 2006] Efrain Lopez-Damian, Daniel Sidobre, Stephane de la Tour, and Rachid Alami. Grasp Planning for Interactive Object Manipulation. In *International Symposium on Robotics and Automation*, Mexico, Mexique, August 2006. Citeseer.

[Lopez-Damian, 2006] Efrain Lopez-Damian. *Grasp planning for object manipulation by an autonomous robot.* PhD thesis, PhD Thesis, july 2006.

[Lotti *et al.*, 2005] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri. Development of UB Hand 3 : Early Results. In *Robotics and Automation, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 4488–4493, 2005.

[Lozano-Perez, 1983] T. Lozano-Perez. Spatial planning : A configuration space approach. *IEEE Transactions on Computers*, 32(2) :108–120, 1983.

[Markenscoff *et al.*, 1990] X. Markenscoff, L. Ni, and C.H. Papadimitriou. The Geometry of Grasping. *The International Journal of Robotics Research*, 9(1) :61, 1990.

[Mate *et al.*, 1987] C. Mathew Mate, Gary M. McClelland, Ragnar Erlandsson, and Shirley Chiang. Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface. *Phys. Rev. Lett.*, 59(17) :1942–1945, Oct 1987.

[Mebarki, 2006] Rafik Mebarki. Maîtrise des efforts en manipulation, juin 2006. Master recherche Systèmes Automatiques Informatiques et Décisionnels.

[Menezes *et al.*, 2007] P. Menezes, F. Lerasle, J. Dias, and T. Germa. Towards an Interactive Humanoid Companion with Visual Tracking Modalities. 2007.

[Mezouar and Chaumette, 2001] Y. Mezouar and F. Chaumette. Design and tracking of desirable trajectories in the image space by integrating mechanical and visibility constraints. In *IEEE Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 731–736, Seoul, Korea, May 2001.

[Michel *et al.*, 2006] C. Michel, V. Perdereau, and M. Drouin. An approach to extract Natural Grasping Axes with a real 3D vision system. *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*, 4, 2006.

[Milan, 2008] Jean-Jacques Milan. *Tribologie*. 2008.

[Miller *et al.*, 2003] AT Miller, S. Knoop, HI Christensen, and PK Allen. Automatic grasp planning using shape primitives. *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*, 2, 2003.

[Mirtich, 1996] Brian V. Mirtich. *Impulse-based dynamic simulation of rigid body systems*. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1996.

[Mirtich, 2005] B. Mirtich. Fast and accurate computation of polyhedral mass properties. *Graphics Tools : The Jgt Editors' Choice*, 2005.

[Mishra *et al.*, 1987] B. Mishra, JT Schwartz, and M. Sharir. On the existence and synthesis of multifinger positive grips. *Algorithmica*, 2(1) :541–558, 1987.

[Mohan *et al.*, 2008] S. Mohan, S.H. Kweon, D.M. Lee, and S.H. Yang. Parametric NURBS Curve Interpolators : A Review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING*, 9(2) :84–92, 2008.

[Mori, 1970] M. Mori. The Uncanny Valley. *Energy*, 7(4) :33–35, 1970.

[Murray *et al.*, 1994] R.M. Murray, Z. Li, and S.S. Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.

[Nguyen, 1988] V.D. Nguyen. Constructing Force-Closure Grasps. *The International Journal of Robotics Research*, 7(3) :3, 1988.

[Okamura *et al.*, 2000] AM Okamura, N. Smaby, and MR Cutkosky. An overview of dexterous manipulation. *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, 1, 2000.

[Piccin and Giraud, 1995] O. Piccin and A. Giraud. Specification and method for solving complex motion and calibration tasks. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, volume 2, 1995.

[Piccin, 1995] Olivier Piccin. *Spécification et résolution de tâches de manipulation complexes. Application à la téléprogrammation de robots distants*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, 7, Avenue du Colonel Roche, Toulouse, FRANCE, november 1995.

[Pierre E. Dupont, 1997] Serge P. Yamajako Pierre E. Dupont. Stability of frictional contact in constrained rigid-body dynamics. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 13(2) :230–236, april 1997.

[Ponce and Faverjon, 1995] J. Ponce and B. Faverjon. On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 11(6) :868–881, 1995.

[Prattichizzo and Trinkle, 2008] Domenico Prattichizzo and Jeffrey C. Trinkle. Grasping, 2008.

[Reif, 1979] J.H. Reif. Complexity of the Mover's Problem and Generalizations Extended Abstract. In *Proceedings of the 20th Annual IEEE Conference on Foundations of Computer Science*, pages 421–427, 1979.

[Reuleaux, 1963] F. Reuleaux. The Kinematics of Machinery : Outline of a Theory of Machines, 1876, 1963.

[Richard W. Cottle, 1992] Richard E. Stone Richard W. Cottle, Jong-Shi Pang. *The linear complementarity problem*. Computer science and scientific computing. Academic Press Inc., 1992.

[Salisbury and Roth, 1982] J.K. Salisbury and B. Roth. Kinematic and force analysis of articulated hands. *International Journal of Mechanisms, Transmissions, and automation in design*, 105 :33–41, 1982.

[Sallem and Devy, 2009] Nizar Sallem and Michel Devy. Modélisation d'Objets 3D en vue de leur reconnaissance et leur manipulation par un robot personnel. In *ORASIS'09 - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Trégastel, France, 2009.

[S.Goyal, 1998a] P. A. Sullivan S.Goyal, J. M.Papadopoulos. The dynamics of clattering 1 : equation of motion and examples. *ASME journal of dynamic systems, measurement, and control*, 120 :83–93, march 1998.

[S.Goyal, 1998b] P. A. Sullivan S.Goyal, J. M.Papadopoulos. The dynamics of clattering 2 : equation of motion and examples. *ASME journal of dynamic systems, measurement, and control*, 120 :94–102, march 1998.

[Shiu and Ahmad, 1989] Y. C. Shiu and S. Ahmad. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form ax=xb. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5 :16–29, February 1989.

[Sidobre and Hayward, 2004] Daniel Sidobre and Vincent Hayward. Calibrated measurement of the behaviour of mechanical junctions from micrometre to subnanometre scale : the friction force scanner. *Measurement Science and Technology*, 15(2) :451–459, 2004.

[Sidobre *et al.*, 2009] Daniel Sidobre, jérôme Manhes, Matthieu Herbb, Xavier Broquère, and Jean-Philippe SAUT. Models of information exchanged by two humans exchanging an object for several strategies of handling. Deliverable D1.2 of the European Project DEXMART (FP7/2007-2013 no. 216239). 2009.

[Siméon *et al.*, 2001] T. Siméon, J-P. Laumond, and F. Lamiraux. Move3d : a generic platform for motion planning. In *4th International Symposium on Assembly and Task Planning*, Japan, 2001.

[Sisbot *et al.*, 2008] E.A. Sisbot, A. Clodic, R. Alami, and M. Ransan. Supervision and motion planning for a mobile manipulator interacting with humans. *Proceedings of the 3rd international conference on Human robot interaction*, pages 327–334, 2008.

[Sokoloff *et al.*, 1993] JB Sokoloff, J. Krim, and A. Widom. Determination of an atomic-scale frictional force law through quartz-crystal microbalance measurements. *Physical Review B*, 48(12) :9134–9137, 1993.

[Solà *et al.*, 2007] J. Solà, A. Monin, and M. Devy. Bicamslam : Two times mono is more than stereo. In *IEEE Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, Rome, Italy, April 2007.

[Soueres *et al.*, 2003] P. Soueres, V. Cadenat, and M. Djeddou. Dynamical sequence of multi-sensor based tasks for mobile robots navigation. In *7th Symp. on Robot Control (SYROCO 03)*, volume 2, pages 423–428, 2003.

[Sudsang and Phoka, 2005] A. Sudsang and T. Phoka. Geometric Reformulation of 3-Fingered Force-Closure Condition. *Robotics and Automation, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 2338–2343, 2005.

[Trujillo and Devy, 2009] F. Trujillo and M. Devy. Appearance-based and active 3d object recognition using vision. In *International Conference on Vision Applications (VISAPP 2009), Lisbon (Portugal)*, February 2009.

[Tsai and Lenz, 1989] R. Y. Tsai and R. K. Lenz. A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 5 :345–358, June 1989.

[Walker and Salisbury, 2008] S. Walker and J.K. Salisbury. Pushing using learned manipulation maps. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 3808–3813, 2008.

[Wang *et al.*, 2006] Y. Wang, X. Chen, Q. Liu, and N. Gindy. Optimisation of machining fixture layout under multi-constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13) :1291–1300, 2006.

[Wankyun Chung and Hsu, 2008] Li-Chen Fu Wankyun Chung and Su-Hau Hsu. Motion control, 2008.

[Wei *et al.*, 1998] G. Q. Wei, K. Arbter, and G. Hirzinger. Active self-calibration of robotic eyes and hand-eye relationships with model identification. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 14 :158–166, February 1998.

[Westmore and Wilson, 1991] D. B. Westmore and W. J. Wilson. Direct dynamic control of a robot using an end-point mounted camera and kalman filter position estimation. In *IEEE Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 2376–2384, Sacramento, USA, April 1991.

[Yildirim Hurmuzlu, 1994] Dan B. Marghitu Yildirim Hurmuzlu. Rigid body collisions of planar kinematic chains with multiple contact points. *The international journal of robotics research*, 13(1) :82–92, february 1994.

[Yong and Narayanaswami, 2003] Tsehaw Yong and Ranga Narayanaswami. A parametric interpolator with confined chord errors, acceleration and deceleration for nc machining. *Computer-Aided Design*, 35(13) :1249–1259, 2003.

[Yoshida *et al.*, 2008] E. Yoshida, M. Poirier, J.P. Laumond, O. Kanoun, F. Lamiraux, R. Alami, and K. Yokoi. Whole-body motion planning for pivoting based manipulation by humanoids. *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 3181–3186, 2008.

[Zollner *et al.*,] R. Zollner, T. Asfour, and R. Dillmann. Programming by demonstration : dual-arm manipulation tasks for humanoid robots. *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on.*

Résumé

Les humains construisent des machines de plus en plus évolués pour se faciliter la vie. La prochaine étape de cette évolution sera la construction de robots capables de choisir, définir et enfin accomplir une tâche de manière autonome au milieu des humains. Pour atteindre ce but, des outils de planification et de contrôle pour des tâches de manipulation sont présentés. La notion de mouvements souples constitués de suites de fonctions cubiques permet, d'une part, de planifier des trajectoires en prenant en compte le temps et les contraintes de confort et de sécurité des utilisateurs, et d'autre part, de faire le lien entre planification et commande. La planification de prises et l'étude de leurs stabilités constitue un élément clé de la planification de tâches de manipulation. L'étude de la dynamique et des frottements sont indispensables à la compréhension de la manipulation. L'interaction entre humains et robots est abordée à partir de l'étude de l'échange d'un objet équipé de capteurs pour mesurer les forces d'interaction.

Mots-clés: Robotique, manipulation, planification, commande, saisie, interaction, frottements, dynamique.

Abstract

Humans build more and more evolved machines to facilitate their life. The next stage of this evolution will be the construction of robots capable of choosing, defining and finally achieving a task autonomously in the middle of humans. To accomplish this objective, planning and control tools for manipulation tasks are presented. The concept of soft motions that are constituted by cubic functions enables, on the one hand, to plan trajectories that take into account time, and security and comfort constraints for users, and on the other hand, to do a link between planning and control. The grasp planning and the study of the stability of grasps constitute a key element of the manipulation planning. The study of dynamic and friction are indispensable to the understanding of manipulation. Interaction between humans and robots is tackled from the study of the hand over of an object that is equipped with sensors to measure interaction forces.

Keywords: Robotics, manipulation, planning, control, grasping, interaction, friction, dynamic.