



HAL
open science

Etude théorique et expérimentale d'une interface à retour d'effort augmenté

Anthony Chabrier

► **To cite this version:**

Anthony Chabrier. Etude théorique et expérimentale d'une interface à retour d'effort augmenté. Robotique [cs.RO]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Français. NNT : 2017PA066383 . tel-01744215

HAL Id: tel-01744215

<https://theses.hal.science/tel-01744215>

Submitted on 27 Mar 2018

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

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

UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

THÈSE DE DOCTORAT

Étude théorique et expérimentale
d'une interface à retour d'effort augmenté

Présentée par :

Anthony CHABRIER

Soutenue le 7 novembre 2017 devant le jury composé de :

M. Damien Chablat, Directeur de Recherche, École Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Said Zegloul, Professeur, Université de Poitiers	Rapporteur
Mme Véronique Perdereau, Professeur, Université Paris 6	Examinatrice
M. Claude Andriot, Expert Sénior CEA Tech, CEA-LIST Saclay	Examineur
M. Wael Bachta, Maître de Conférence, Université Paris 6	Encadrant
M. Florian Gosselin, Ingénieur de Recherche, CEA-LIST Saclay	Encadrant
M. Vincent Hayward, Professeur, Université Paris 6	Directeur de thèse

CEA-LIST – Laboratoire de Robotique Interactive

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique – Équipe Agathe



Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie

CEA-LIST – Laboratoire de Robotique Interactive
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique – Équipe Agathe

ÉTUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE D'UNE INTERFACE À RETOUR D'EFFORT AUGMENTÉ

Par Anthony Chabrier

RÉSUMÉ

Les interactions physiques avec notre environnement font intervenir des gestes variés qui nécessitent une grande dextérité. Elles mettent par ailleurs en œuvre des échanges d'informations haptiques très variées. Différentes interfaces à retour d'effort ou tactile ont été développées pour reproduire ces mouvements dextres et/ou simuler chacune de ces interactions. Cependant, aucune d'entre elles ne permet de toutes les reproduire simultanément. Il est en effet impossible, dans l'état actuel de la technique, de concevoir une interface permettant de simuler tous les types d'interactions avec un retour haptique réaliste.

Pour aller au-delà de l'état de l'art, je propose dans cette thèse d'identifier les interactions les plus importantes et les zones de la main sur lesquelles il est le plus intéressant de les simuler. Je propose ensuite d'étudier comment certains dispositifs peuvent être associés entre eux pour améliorer le ressenti global de l'utilisateur sur ces zones. En confrontant les résultats obtenus avec la littérature portant sur les interfaces haptiques, il m'a semblé intéressant de développer une interface se concentrant sur trois phénomènes : la restitution de la transition entre les mouvements de l'utilisateur en espace libre et au contact d'un objet, le retour d'effort, et enfin la simulation de la déformation locale et globale de la pulpe, et ce sur 4 zones : les phalanges distales du pouce, de l'index et de l'annulaire, et le côté extérieur de l'index. En confrontant cet objectif ambitieux avec ce qu'il est envisageable de faire dans le cadre d'une thèse, j'ai finalement décidé de me focaliser sur les deux premières modalités et sur les interactions pouce-index.

Suite à cette analyse, j'ai entrepris de développer une interface à retour d'effort à contacts intermittents sur le pouce et l'index. Afin de garantir l'évolutivité de cette interface, j'ai pris en compte les contraintes liées à l'ajout futur de robots supplémentaires pour les autres doigts et à l'intégration de systèmes permettant de déformer la pulpe des doigts. Pour cela, j'ai tout d'abord élaboré un effecteur instrumenté permettant d'acquérir, sans contact, la position de la dernière phalange d'un doigt en 6D. Puis j'ai dimensionné une interface de type 'gant' à deux doigts, capable de déplacer, en 6D, ces effecteurs dans l'ensemble de l'espace de travail des doigts et de générer un retour d'effort quand cela est nécessaire. Enfin j'ai étudié la commande de ce système lors de ses différentes phases de fonctionnement et j'ai effectué des essais pour évaluer ses performances.

PhD dissertation, Université Pierre et Marie Curie

CEA-LIST –Interactive Robotics Laboratory
Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique – Team Agathe

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF AN AUGMENTED FORCE FEEDBACK INTERFACE

By Anthony Chabrier

ABSTRACT

Physical interactions with our environment involve various and highly dexterous movements. They also induce the exchange of very diverse haptic information. Numerous force or tactile feedback interfaces were developed with the aim to reproduce these dexterous gestures and/or simulate each of these interactions. However, none of these devices allows reproducing them simultaneously. The design of an interface allowing to simulate all of these interactions with a realistic haptic feedback is indeed technically impossible to date.

To go beyond the state of the art, I propose in this dissertation to identify the most important interactions and the hand areas which are the most interesting to stimulate. Then I propose to study how different devices can be associated together to improve the global feeling of an operator over these areas. By confronting the results of this study with the existing haptic interfaces, I decided to focus on three phenomena: the simulation of the transition between user's movements in free space and in contact with an object, force feedback, and finally local and global deformation of the fingers' pulp, with an emphasis on the four following areas: distal phalanges of the thumb, index and middle finger, plus the external side of the index finger. By further confronting this ambitious target with the resources offered by a PhD, I finally decided to focus on the two first modalities and on thumb-index interactions.

In accordance with this analysis, I designed an intermittent contact force feedback interface for the thumb and index fingers. In order to allow future upgrades, I took into account during the design process the constraints associated with the integration of additional robots for the other fingers and to the incorporation of complementary devices allowing to deform the pulp of the distal phalanges. Therefore, I first developed instrumented end-effectors able to remotely measure the 6D configuration of the distal phalanx of the fingers without any contact with them. Then I dimensioned and designed a glove-type haptic interface with two fingers. This device allows controlling the position and orientation of the intermittent contact end-effectors in 6D throughout the whole fingers workspace. It is also able to generate force feedback when necessary. Finally, I studied the control laws of this interface in all its operating phases and its performances were evaluated.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration et le déroulement de ma thèse, et notamment mon directeur de thèse Vincent Hayward pour son intérêt et ses précieux conseils, et mes co-encadrants, Wael Bachta pour son avis pertinent et son aide, et particulièrement Florian Gosselin pour sa grande disponibilité, son suivi assidu et ses nombreux conseils.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien du CEA qui m'a permis de me consacrer sereinement à ma thèse grâce à une allocation de recherches et diverses aides financières. Ces travaux ont aussi été partiellement supportés par l'Agence Nationale de la Recherche (projet MANDARIN - ANR-12-CORD-0011, labellisé par le Cap Digital Paris Région, le cluster Français pour les contenus et services digitaux, et laboratoire d'excellence SMART - ANR-11-IDEX-0004-02, financé par les Investissements d'Avenir), et par la Commission Européenne (projet RoMaNS, EU.2.1.1.5. 645582 du programme H2020).

Je remercie également l'ensemble de mes collègues du Laboratoire de Robotique Interactive pour leur accueil chaleureux et leur disponibilité. J'exprime ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont consacré du temps pour me permettre d'avancer, notamment Elodie pour toutes les démarches administratives, Dominique pour ses conseils sur la CAO, Philippe pour son important travail sur les cartes électroniques, Marc, Benoit et Thomas pour leur aide minutieuse sur le montage, Pascal pour l'élaboration de la baie et surtout Djibril pour ses nombreuses heures passées sur la commande et le robot.

Au terme de ce parcours, je tiens également à dire merci à toutes celles et ceux qui sont devenus plus que des collègues, en particulier à Vaiyee, Alex, Nolwenn et Katleen qui ont partagé mon bureau mais aussi à Aymeric, Marie-Charlotte, Benoît, Susana, Djibril et tant d'autres. J'ai aussi une pensée pour mes amis normands et vendéens que j'ai quelque peu délaissés en cette fin de thèse. Je suis également redevable à mes parents, Dominique et Luc Chabrier, pour leur soutien moral et leur confiance. Enfin, je tiens à adresser un sincère remerciement à ma conjointe, Alexandra, qui m'a accompagné durant cette longue épreuve et qui m'a aidé à traverser les moments de doute.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Remerciements.....	iii
CHAPITRE 1. Introduction générale	1
CHAPITRE 2. Étude de la main et du toucher en vue de la spécification d’une interface dextre à retour d’effort augmenté.....	7
1. Introduction	7
2. Taxonomie du toucher	8
2.1. Liste des sollicitations cutanées associées au toucher	8
2.2. Simulation des différentes sollicitations cutanées.....	10
2.3. identification des modalités d’intérêt	19
3. Les interfaces dextres à retour d’effort.....	23
3.1. Introduction	23
3.2. Étude des interactions dextres.....	23
3.3. État de l’art des interfaces dextres à retour d’effort.....	32
3.4. Conclusion sur le retour d’effort	38
4. Les interfaces à contacts intermittents	39
4.1. Principe de fonctionnement	39
4.2. État de l’art des interfaces à contacts intermittents	40
4.3. Conclusion sur le contact intermittent	43
5. Retour d’effort augmenté : la déformation de la pulpe.....	43
5.1. Introduction	43
5.2. Déformations réelles de la pulpe du doigt.....	44
5.3. Utilisation d’illusions haptiques	45
5.4. Conclusion sur la déformation locale de la pulpe	46
6. Conclusion.....	47
CHAPITRE 3. Étude et conception d’un effecteur permettant le suivi d’un doigt à distance	49
1. Introduction	49
2. Problématique	49

2.1.	Rôle de la capsule	49
2.2.	Approche retenue pour la mesure de la configuration des doigts.....	50
2.3.	Architecture de l'interface	51
2.4.	Types de mouvements mesurés.....	53
3.	Solution technique retenue	54
3.1.	Un effecteur concave instrumenté.....	54
3.2.	Nombre et placement des capteurs	55
3.3.	Calcul de la configuration du doigt dans la capsule.....	56
3.4.	Dimensions des capsules	58
3.5.	Choix des proximètres	58
3.6.	Intégration sur la capsule.....	60
3.7.	Électronique de mesure.....	61
4.	Évaluation expérimentale des performances	65
4.1.	Pré-étalonnage des capteurs	65
4.2.	Performances de l'effecteur associé à l'index.....	66
4.3.	Performances de l'effecteur associé au pouce	69
5.	Optimisation du calcul de la configuration du doigt.....	71
5.1.	Problématique.....	71
5.2.	Nouvel algorithme	72
5.3.	Comparaison des résultats.....	73
6.	Conclusion.....	74
CHAPITRE 4. Développement d'une interface dextre à contacts intermittents.....		75
1.	Introduction	75
2.	Étage de positionnement des effecteurs.....	77
2.1.	Cahier des charges.....	77
2.2.	Architecture cinématique	79
2.3.	Dimensionnement géométrique	82
2.4.	Dimensionnement et choix des actionneurs.....	87
2.5.	Caractérisation des performances en raideur.....	92
2.6.	Comparaison entre le cahier des charges et le dimensionnement du robot.....	97
3.	Étage d'orientation des effecteurs.....	99
3.1.	Architecture cinématique	99
3.2.	Motorisation.....	100

4.	Base du gant.....	104
5.	Équilibreur statique.....	106
5.1.	Problématique.....	106
5.2.	Compensation du poids de l'interface.....	106
5.3.	Dimensionnement du système.....	107
5.4.	Reconstruction de la position de la main.....	109
6.	Architecture électronique.....	110
6.1.	Cahier des charges du contrôleur.....	110
6.2.	Transfert des signaux des codeurs de l'équilibreur au bus de données EtherCAT	111
6.3.	Choix du variateur	112
6.4.	Conception de capteurs de contact.....	113
6.5.	Intégration de la baie.....	114
6.6.	Temps de cycle et retard.....	115
7.	Conclusion.....	117
CHAPITRE 5. Commande et Évaluations expérimentales.....		119
1.	Introduction	119
2.	Problématique et approche proposée	119
2.1.	Commande d'une interface à contacts intermittents	119
2.2.	Spécificités de notre interface.....	120
3.	Lois de commande utilisées pendant les différentes phases de fonctionnement.....	121
3.1.	Commande bas niveau.....	121
3.2.	Phase de suivi en espace libre.....	122
3.3.	Phase de contact	123
3.4.	Phase de stabilisation	124
3.5.	Transitions entre deux phases	125
3.6.	Commande globale.....	126
4.	Évaluations expérimentales.....	128
4.1.	Cas d'usage envisagé pour les évaluations	128
4.2.	Comportement attendu.....	128
4.3.	Suivi en orientation.....	129
4.4.	Suivi en position	134
4.5.	Retour d'effort.....	136
4.6.	Proposition d'amélioration de la loi de commande : avance de l'effecteur sur le doigt.....	139

5. Conclusion.....	140
CHAPITRE 6. Conclusion générale.....	141
Perspectives à court terme	142
Perspectives à long terme	143
Bibliographie de l’auteur.....	145
1. Articles en rapport avec la thèse.....	145
2. Autres articles et brevets de l’auteur	145
Bibliographie	147

CHAPITRE 1.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les environnements de réalité virtuelle et les maquettes numériques sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Ils permettent de voir et de manipuler, à l'échelle 1 et de manière immersive, les éléments constitutifs d'un bâtiment, d'un avion, d'une voiture ou de tout autre système en cours de conception avant même qu'un prototype physique ne soit réalisé. Il est ainsi possible d'en vérifier le fonctionnement très tôt dans le cycle de conception et de corriger rapidement et facilement d'éventuelles erreurs. Les gains de productivité sont énormes.

Pour que ces systèmes soient efficaces, il faut que les utilisateurs puissent manipuler les objets virtuels de manière simple, confortable et intuitive. La meilleure solution pour cela est d'utiliser des interfaces haptiques à retour d'effort. Ces robots, souvent équipés à leur extrémité d'une poignée saisie en main par l'utilisateur, permettent de mesurer les mouvements de l'utilisateur pour commander ceux des objets virtuels mais aussi d'appliquer en retour un effort sur la main fonction des interactions des objets virtuels avec leur environnement.



Figure 1.1 : Environnement immersif permettant de tester en virtuel des tâches de montage pour l'automobile (CEA/Stroppa).

Pour une utilisation naturelle de ces systèmes, il est nécessaire qu'ils limitent le moins possible les capacités motrices et de perception de l'utilisateur. Ils ne doivent pas restreindre sa liberté de mouvement ni la qualité du toucher. Cette 'transparence' du système requiert que soient reproduites de façon réaliste toutes les composantes du toucher, qu'elles soient kinesthésiques ou tactiles. Cette condition est encore plus importante dans le cas d'interactions délicates avec des objets de petites tailles ou d'une grande fragilité. C'est par exemple le cas pour la simulation du montage et / ou du démontage d'un ordinateur ou d'un contrôleur de robot. L'utilisateur doit saisir successivement plusieurs objets virtuels avec différentes prises tout en contrôlant finement les efforts exercés.

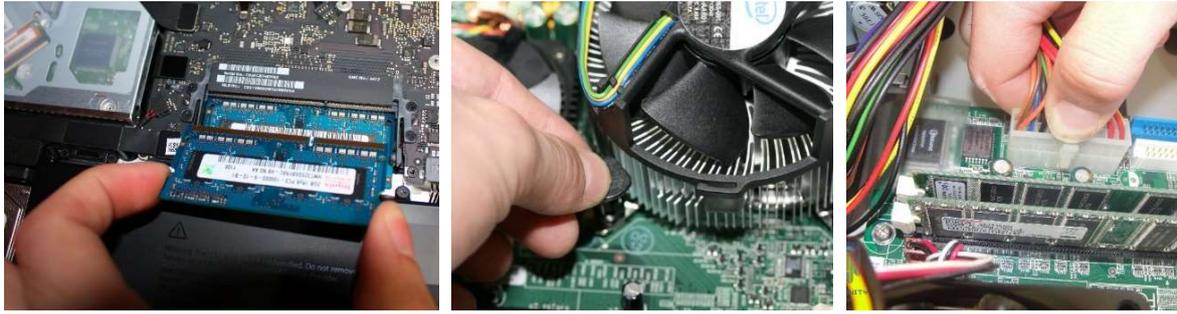


Figure 1.2 : Différentes configurations rencontrées lors du montage / démontage d'un ordinateur ou d'un contrôleur.

Il est à noter que parmi nos cinq sens, celui du toucher est l'un des plus complexes. Il ne nous sert pas uniquement à obtenir des informations sur notre environnement mais aussi à interagir avec celui-ci. Ces interactions physiques font intervenir des échanges d'informations très variées. Dans la pratique cependant, les interfaces à retour d'effort du commerce ne permettent pas de reproduire toutes ces informations. Elles sont en général en contact permanent avec la main et ne reproduisent plus ou moins correctement que les informations d'effort (ex : champs de force, efforts de contact, ...). Or les informations haptiques échangées lors d'interactions avec un objet quelconque sont beaucoup plus riches [Martinot et al. 2005] [Biet 2007] [Bresciani et al. 2008]. Ainsi, le ressenti de l'utilisateur va non seulement dépendre de ces efforts mais aussi de la surface de contact avec les objets, de leur orientation et de leur forme locale, de leur texture, de leur température, ... La restitution fidèle du passage de l'espace libre au contact est aussi importante. Ces limitations sont en général contournées en associant chaque interface à des tâches très spécifiques [Watanabe et Fukui 1995] [Hayward 2004] [Kuchenbecker et al. 2008] [Niwa et al. 2006] [Hayward et MacLean 2007] [Lévesque et al. 2007]. Certaines se concentrent par exemple sur la déformation de la pulpe du doigt en fonction des interactions avec l'environnement [Solazzi et al. 2007] [Frisoli et al. 2008], d'autres sur la modification de la surface de contact en fonction de la force d'appui [Ambrosi et al. 1999].



Figure 1.3 : Différentes interfaces se concentrant sur un type d'informations donné. Gauche : interface permettant de modifier l'orientation de la surface de contact avec le doigt [Frisoli et al. 2008]. Milieu : interface permettant de faire varier la surface de contact avec le doigt [Ambrosi et al. 1999]. Droite : interface à contact intermittent [Sato et al. 2007].

Peu d'entre elles combinent différents retours, même si plusieurs tentatives ont été menées en laboratoire pour essayer de restituer une information plus riche, en associant par exemple retour d'effort et tactile [Haptex 2005] [Yang et al. 2005] ou retour tactile et thermique [Yang et al. 2007].

Le but de notre travail est de contribuer à l'étude et à la conception d'une telle interface haptique multimodale restituant un retour haptique le plus réaliste possible. Pour cela, nous proposons d'étudier comment certains dispositifs peuvent être associés pour améliorer le ressenti global de l'utilisateur. Cette approche est illustrée par la figure 1.4.

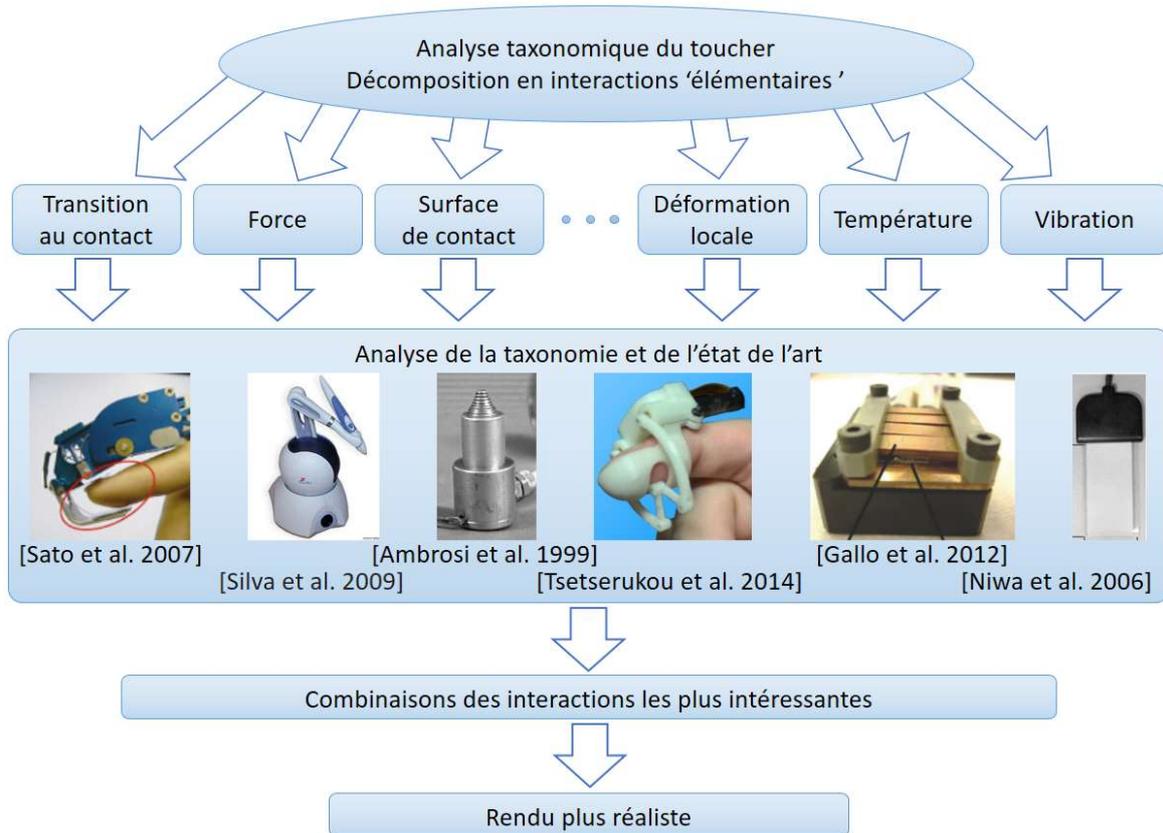


Figure 1.4 : Approche proposée pour améliorer le réalisme des interactions haptiques.

Une telle étude requiert plusieurs étapes. Nous analyserons tout d'abord le sens du toucher afin d'en déduire les modalités les plus importantes à simuler, et nous étudierons l'état de l'art pour connaître les moyens les plus efficaces de les restituer. Cette étude nous permettra de justifier le choix de développer une interface dextre à retour d'effort à contacts intermittents sur deux doigts (pouce et index) permettant un rendu réaliste de la transition entre espace libre et contact mais aussi des efforts d'interaction avec l'environnement. Nous nous intéresserons ensuite à l'étude d'effecteurs pour le pouce et l'index adaptés à ce besoin, puis à l'étude d'une interface haptique apte à déplacer ces effecteurs en fonction des mouvements de l'utilisateur, et à restituer des efforts fonction des interactions en jeu. Enfin, nous étudierons la commande à mettre en place pour gérer à la fois l'arrivée au contact d'un objet virtuel et la restitution des forces d'interaction.

Ces différentes études sont détaillées dans les quatre chapitres qui constituent ce manuscrit :

Etude de la main et du toucher en vue de la spécification d'une interface dextre à retour d'effort augmenté : nous avons tout d'abord effectué une analyse taxonomique des interactions haptiques. À travers une analyse des interactions gestuelles lors de différentes tâches, nous avons essayé de classer les différentes façons dont la peau et le derme sont sollicités. En confrontant cette analyse avec une étude des interfaces haptiques existantes, nous en avons déduit les informations les plus intéressantes à restituer pour accroître le réalisme du retour haptique et améliorer l'immersion de l'utilisateur. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux interfaces dextres, permettant une interaction avec la main et les doigts. Nous avons ainsi réalisé une étude des différentes zones de la main à solliciter, en nous basant sur leur taux de stimulation dans chacune des directions au quotidien. Cette étude, qui a été publiée dans une conférence internationale, constitue la première contribution importante de notre travail. Les modalités les plus intéressantes à simuler sur ces différentes zones étant l'arrivée au contact des objets, le retour d'effort et les déformations de la pulpe des doigts, nous avons ensuite étudié le fonctionnement et la littérature des interfaces à contacts intermittents qui permettent un retour haptique naturel, et nous nous sommes intéressés aux différentes possibilités permettant d'enrichir le retour d'effort par des informations tactiles afin d'améliorer le réalisme de la simulation. Ces études nous ont conduits à nous focaliser sur une interface à retour d'effort à contacts intermittents sur le pouce et l'index.

Etude et conception d'un effecteur permettant le suivi d'un doigt à distance : dans le second chapitre, nous nous intéressons à l'effecteur d'une telle interface à contacts intermittents. En revenant sur son rôle et en analysant les différentes possibilités de le réaliser, nous avons pu choisir son architecture et les caractéristiques visées pour sa conception. Nous avons ainsi choisi de développer un effecteur capable d'acquiescer la position d'une phalange distale en 6D utilisable par un gant haptique pour suivre un doigt à distance sans contact. Pour cela, nous avons tout d'abord choisi les capteurs utilisés et leur disposition. Nous nous sommes ensuite intéressés à la conception de l'effecteur permettant d'intégrer ces capteurs et de son électronique pour acquiescer et transmettre les données. Enfin, ces dispositifs ont été évalués sur un banc de test afin de caractériser leurs performances. Ces travaux, qui ont été présentés dans le cadre d'une conférence internationale, constituent une seconde contribution de cette thèse.

Développement d'une interface dextre à contacts intermittents : nos effecteurs doivent être montés sur un robot capable de suivre les mouvements des doigts en 6D et d'appliquer un retour d'effort quand cela est nécessaire. Ne trouvant pas de dispositif répondant à notre besoin dans la littérature, nous avons développé une interface haptique spécifique à deux doigts. Sa cinématique a d'abord été étudiée, avec comme objectif qu'elle soit compatible avec l'espace de travail du pouce et de l'index pour qu'elle ne limite pas les mouvements de l'utilisateur. Notre interface a ensuite été dimensionnée en effort et en raideur, de sorte qu'elle soit capable de restituer les forces d'interactions avec l'environnement virtuel de manière réaliste. Nous avons enfin conçu un équilibreur passif permettant de compenser son poids qui est conséquent. Ce dispositif permet aussi de mesurer à tout instant la configuration de la main dans l'espace. Ce travail constitue une troisième contribution de cette thèse qui reste à publier.

Commande et évaluations expérimentales : notre interface a pour but de permettre le suivi à distance en 6D des doigts de l'utilisateur et la restitution en 3D des forces d'interactions au contact. Après avoir analysé les diverses possibilités présentes dans la littérature pour la commande d'une interface à contacts intermittents, nous avons étudié chacune de ces phases de fonctionnement pour en déduire une loi de commande adaptée. Afin d'éviter tout problème d'instabilité, nous avons aussi analysé les transitions entre les différents modes. Certaines de ces lois de commande ont pu être implémentées et testées expérimentalement. Cependant, les premiers tests ont fait apparaître des limitations dues à une trop faible raideur mécanique et à des jeux dans les transmissions. Ces limites ne nous ont pas permis de tester complètement notre interface. Pour contourner ces difficultés, il faudrait réviser la conception de certains éléments et le montage de certaines pièces. Ce travail conséquent n'étant pas compatible avec les contraintes de temps et de moyens de ma thèse, ces évolutions n'ont pas pu être implémentées.

En conclusion, nous dresserons le bilan des travaux réalisés au cours de cette thèse et nous proposerons des perspectives pour poursuivre ces travaux sur les différents points abordés.

CHAPITRE 2.

ÉTUDE DE LA MAIN ET DU TOUCHER EN VUE DE LA SPÉCIFICATION D'UNE INTERFACE DEXTRE À RETOUR D'EFFORT AUGMENTÉ

1. INTRODUCTION

Le sens du toucher a ceci de particulier qu'il est à la fois distribué puisque l'ensemble de notre corps comporte des capteurs physiologiques haptiques, qu'ils soient tactiles au niveau de la peau et du derme ou kinesthésiques dans les muscles et les tendons, et bidirectionnel puisque sa stimulation est souvent associée à une action de la part de l'utilisateur. Il nous permet non seulement d'acquérir des informations sur notre environnement, mais aussi d'interagir avec les objets qui nous entourent.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à sa restitution en environnement virtuel, le but de ce travail étant de proposer des solutions permettant d'améliorer le ressenti global d'un utilisateur lors d'interactions haptiques quelconques en environnement virtuel. Pour identifier les solutions permettant de répondre au mieux à ce problème, nous proposons dans ce chapitre d'étudier les aspects suivants :

Dans un premier temps, nous essaierons de mettre en place une taxonomie des interactions haptiques, qui font intervenir des échanges d'informations très variées avec l'environnement (arrivée au contact, retour d'effort, retour tactile, ...). Nous la confronterons ensuite avec les solutions techniques développées pour les simuler, dans le but d'identifier les informations qu'il est le plus intéressant de restituer.

Dans un second temps, nous étudierons les techniques et les technologies qui permettent de simuler au mieux ces interactions. Compte tenu de la problématique adressée, nous nous intéresserons plus particulièrement :

- Aux interfaces haptiques dextres, c'est-à-dire permettant d'interagir avec les mains et les doigts, qui autorisent des interactions aussi génériques que possible. Leur étude nécessite une connaissance de la structure de la main et de ses différents mouvements. Nous nous intéresserons aussi à la façon dont la main est utilisée dans la vie de tous les jours pour essayer d'en déduire les zones qu'il est le plus intéressant de stimuler.
- Aux interfaces à contact intermittent qui autorisent un retour haptique très naturel. Nous en présenterons le principe de fonctionnement et nous en dresserons un panorama rapide afin de choisir les solutions les mieux adaptées dans notre cas.
- Aux techniques permettant d'avoir un retour haptique le plus riche possible. Le retour d'effort kinesthésique ne suffisant pas à restituer toutes les informations haptiques échangées avec l'environnement lors d'interactions génériques, nous étudierons comment ce retour peut être enrichi pour améliorer le réalisme de la simulation sans générer de solutions trop complexes.

Le but de ce chapitre est ainsi, à l'issue de ces travaux, de spécifier l'architecture et les différents composants d'une interface dextre à retour d'effort augmenté permettant des interactions les plus naturelles possibles avec un environnement virtuel.

Les travaux sur la façon dont la main est utilisée ont fait l'objet de la publication suivante :

A. Chabrier, F. Gonzalez, F. Gosselin, W. Bachta, 'Analysis of the Directions in which Forces are Applied on the Hand During Manual Manipulation and Exploration', Proc. IEEE Int. Conf. World Haptics, Chicago, IL, USA, 22-26 juin 2015, pp. 280-285.

2. TAXONOMIE DU TOUCHER

Le toucher, que ce soit dans un but d'exploration de l'environnement ou pour la saisie et la manipulation d'objets, fait intervenir de nombreux phénomènes de déformation de la peau et du derme qui viennent exciter nos capteurs cutanés. Ces sollicitations, ainsi que celles de capteurs kinesthésiques de nos muscles et tendons, nous renseignent sur les caractéristiques de notre environnement [Martinot et al. 2005] [Bresciani et al. 2008].

Comme nous le verrons ci-dessous, il est impossible dans l'état actuel de la technique de simuler l'ensemble de ces phénomènes. Il est donc nécessaire de se concentrer sur ceux que l'on peut juger comme les plus significatifs. Pour les identifier, nous proposons dans ce paragraphe de classer les différentes façons dont la peau est sollicitée lorsque l'on touche un objet. Cette étude doit permettre de connaître leur importance relative et de savoir celles qu'il est intéressant de reproduire pour améliorer le réalisme de la simulation des interactions haptiques.

2.1. LISTE DES SOLLICITATIONS CUTANÉES ASSOCIÉES AU TOUCHER

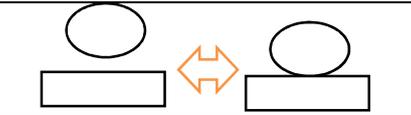
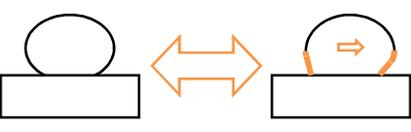
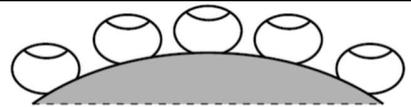
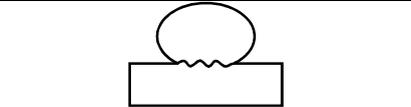
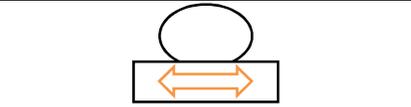
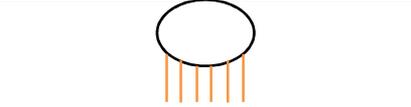
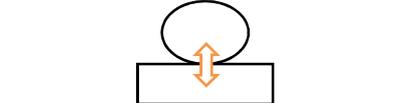
L'étude des différents types de mouvements associés au toucher et à la manipulation des objets de notre environnement permet de déterminer plusieurs types de sollicitations spécifiques de la peau et du derme associés à ces mouvements. Cette liste, illustrée par le tableau 2.1, regroupe les stimuli suivants :

- **Transition contact - non contact** : ce stimulus correspond à l'arrivée du doigt au contact des objets. Il précède l'ensemble des autres sollicitations de la peau et du derme.
- **Mouvement normal de la pulpe par rapport au doigt** : dès que l'on touche un objet, on exerce sur celui-ci une force normale (qui peut être accompagnée ou non d'une force tangentielle). On notera que la main ou le doigt peut être statique par rapport à l'objet touché, par exemple quand on porte un objet ou qu'on exerce une pression sur une surface rigide, ou mobile par rapport à ce dernier, par exemple quand on appuie sur une surface déformable pour déterminer sa dureté. Dans les deux cas, la compression de la pulpe et la surface de contact entre le doigt et l'objet augmentent avec la force appliquée.
- **Mouvement tangentiel de la pulpe par rapport au doigt** : ce phénomène apparaît quand on appuie sur l'objet touché et qu'on exerce une force tangentielle. Comme dans le cas précédent, la main ou le doigt peut être statique ou mobile par rapport à l'objet touché. Cette déformation de la peau apparaît par exemple quand on parcourt une surface avec le doigt pour identifier sa texture (on est bien sûr limité par les dimensions de l'espace de travail du système). Le mouvement

de la pulpe est d'autant plus important que la force tangentielle est grande, cette force étant elle-même proportionnelle à la force normale et au coefficient de frottement de la surface parcourue.

- **Adaptation de la pulpe à la courbure globale de l'objet** : lorsque l'on touche un objet convexe ou concave, la surface de contact avec la peau varie (zone et orientation), ce qui permet de déterminer la forme globale d'un objet. Ainsi, lorsque le rayon de courbure est très grand, la surface peut paraître plane si on ne se déplace pas. Seul le mouvement de la main permet d'en identifier la forme.
- **Adaptation de la pulpe à la forme locale** : lorsque l'on touche un objet, la peau se conforme aussi à sa géométrie locale (dans la limite de la déformabilité du derme), ce qui permet de sentir sa forme locale, et en particulier les rainures fines à sa surface ou ses coins.
- **Vibrations globales** : ce phénomène se produit par exemple quand on parcourt une surface uniformément texturée. Ce mouvement produit des vibrations de l'ensemble de la peau en contact avec l'objet touché.
- **Vibrations localisées** : lors du parcours d'une surface avec une texture fine, les vibrations des différents points de la peau ne sont pas identiques.
- **Transfert thermique** : tout contact avec un matériau entraîne un transfert thermique. Cela permet de distinguer des matériaux aux caractéristiques géométriques proches.

Tableau 2.1 : Différents types de sollicitations de la peau et du derme.

	<p>Transition contact - non contact au moment de l'arrivée au contact d'un objet (ce phénomène précède tous les autres).</p>
	<p>Mouvement normal de la pulpe par rapport au doigt lorsque l'on appuie sur une surface et/ou qu'on se déplace normalement à celle-ci.</p>
	<p>Mouvement tangentiel de la pulpe par rapport au doigt lorsqu'on applique une force tangentielle et/ou que le doigt est déplacé sur une surface.</p>
	<p>Adaptation (déformation) globale de la pulpe en fonction de la forme et de la courbure globale des objets touchés.</p>
	<p>Adaptation (déformation) locale de la pulpe qui s'adapte à la forme et à la courbure locale des objets.</p>
	<p>Vibrations globales du doigt.</p>
	<p>Vibrations localisées sur le doigt.</p>
	<p>Transfert thermique entre le doigt et l'objet manipulé.</p>

2.2. SIMULATION DES DIFFÉRENTES SOLLICITATIONS CUTANÉES

On trouve dans la littérature des interfaces haptiques capables de simuler l'ensemble des phénomènes évoqués précédemment. Comme nous allons le montrer ci-dessous, sans chercher à être exhaustifs, la plupart d'entre elles ont été développées pour reproduire une seule ou un nombre limité de types de sollicitations élémentaires.

2.2.1. Mouvement normal ou tangentiel de la pulpe par rapport au doigt

Les interfaces Sensable PHANToM Premium de la société Geomagic (www.geomagic.com) [Massie et Salisbury 1994] [Chen 1999], delta.3 et omega.3 de la société Force Dimension (www.forcedimension.com) [Grange et al. 2001], Virtuose de la société Haption (www.haption.com), dérivée des travaux du CEA [Gosselin et Riwan 2001], ou encore Freedom 6S de la société MPB Technologies (<http://mpb-technologies.ca>) [Demers et al. 1998] sont spécialisées dans le retour d'effort. Elles permettent à l'utilisateur de se déplacer librement dans l'espace (dans la limite de leur espace de travail) et sont capables d'appliquer un retour d'effort apte à produire un mouvement normal ou tangentiel de la pulpe des doigts servant à les manipuler. Le Freedom 6S, à titre d'exemple, peut générer un retour d'effort en 6D dans un espace elliptique de 22x24x22cm. Ce dispositif est composé d'une base à 3 degrés de liberté (DDLs), d'un bras équilibré à 3 DDLs pour la mise en position et d'un poignet à 3 DDLs. Il peut générer une force maximale continue de 0.6N et un couple maximal continu de 80mN.m. Il possède une résolution de 20 μ m en translation et 0.005rad en rotation, et ses frottements statiques sont très faibles (0,06N et 0,02N.m). On notera qu'il existe aussi des interfaces à retour d'effort multi-digitales et des exosquelettes à retour d'effort. Ces interfaces seront présentées plus en détails dans le paragraphe 3.



Figure 2.1 : Interfaces à retour d'effort Freedom 6S (gauche) et Pantograph (droite).

On notera que le retour d'effort permet de créer des illusions haptiques. Ainsi, le Pantograph, qui est composé d'un mécanisme à quatre barres actionné par deux moteurs et ne comportait que 2 DDLs [Hayward et al. 1994] [Ramstein et Hayward 1994], permet non seulement de générer des efforts dans les deux directions tangentielles à la pulpe du doigt, mais il peut aussi donner l'illusion à l'utilisateur que la

hauteur de la surface touchée varie. Pour cela, on modélise et on restitue sur la poignée les forces que rencontrerait le doigt s'il montait ou descendait effectivement une bosse virtuelle.

L'interface CASR, qui est constituée d'un grand nombre de cylindres de différents diamètres imbriqués les uns dans les autres et dont on peut faire varier la surface apparente à l'aide d'une alimentation pneumatique, permet en sus de simuler l'accroissement de la surface de contact avec le doigt [Ambrosi et al. 1999]. Pour que cette variation soit corrélée avec le niveau d'effort appliqué, elle a été couplée avec une interface à retour d'effort delta.3 [Scilingo et al. 2007].

Le dispositif développé par [Song et al. 2008] permet quant à lui de moduler la raideur ressentie par l'utilisateur. Il est composé d'une surface en caoutchouc fixée sur un vérin vertical dont la pression est gérée par un moteur à courant continu. En augmentant la pression à l'intérieur du dispositif la surface de contact est plus raide et vice versa. La plage de raideur possible est dépendante de l'encombrement du vérin.

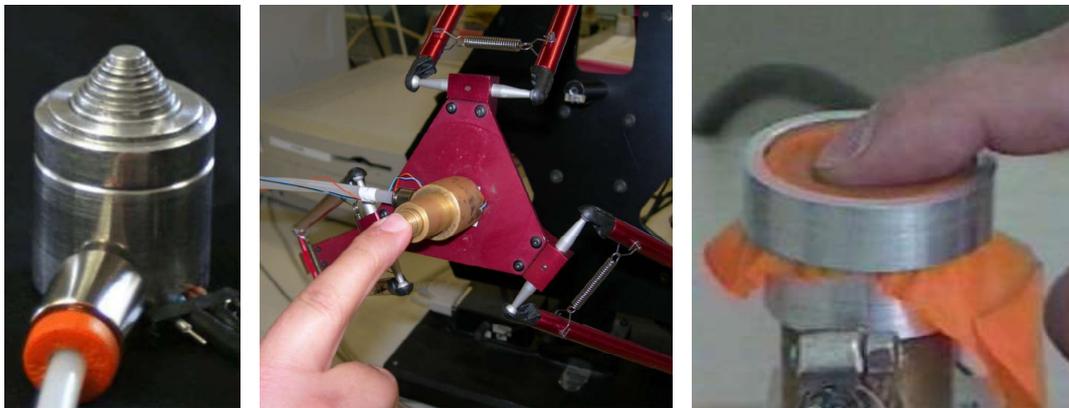


Figure 2.2 : Interface CASR seule et montée sur une interface delta.3 (gauche et milieu) et dispositif développée par [Song et al. 2008] (droite).

On notera que la plupart des interfaces précédentes sont des interfaces fixes. Il existe également des interfaces haptiques portables comme par exemple les interfaces HapTips développées par le CEA [Girard et al. 2016] [Gosselin et al. 2017]. Ces interfaces miniatures sont fixées au bout des doigts. Elles comportent un plateau mobile en translation dans un plan tangent à la pulpe du doigt. Ce mouvement permet de déplacer la pulpe tangentiellement par rapport au doigt et ainsi de simuler un retour d'effort.



Figure 2.3 : Les interfaces HapTips du CEA.

2.2.2. Transition contact-non contact

Sur les interfaces précédentes, l'utilisateur est en permanence en contact avec un organe de saisie ou de manipulation. Il ne peut donc pas ressentir de façon naturelle la transition entre espace libre et contact. Pour cela, on doit utiliser des interfaces à contacts intermittents. Les interfaces de l'Université de Tsukuba sont par exemple équipées d'effecteurs creux intégrant sur leur pourtour des capteurs optiques permettant de mesurer la position d'un doigt en 2D ou en 3D dans cet effecteur [Yoshikawa et Nagura 1997] [Yoshikawa et Nagura 1999]. On peut ainsi suivre le doigt à distance en espace libre et n'entrer à son contact que quand on veut appliquer un retour d'effort, ce qui permet de simuler la transition contact-non contact. Il en est de même sur l'interface à retour d'effort à contact intermittent du CEA [Gonzalez 2015]. Nous reviendrons plus en détail sur ces interfaces dans le paragraphe 4.

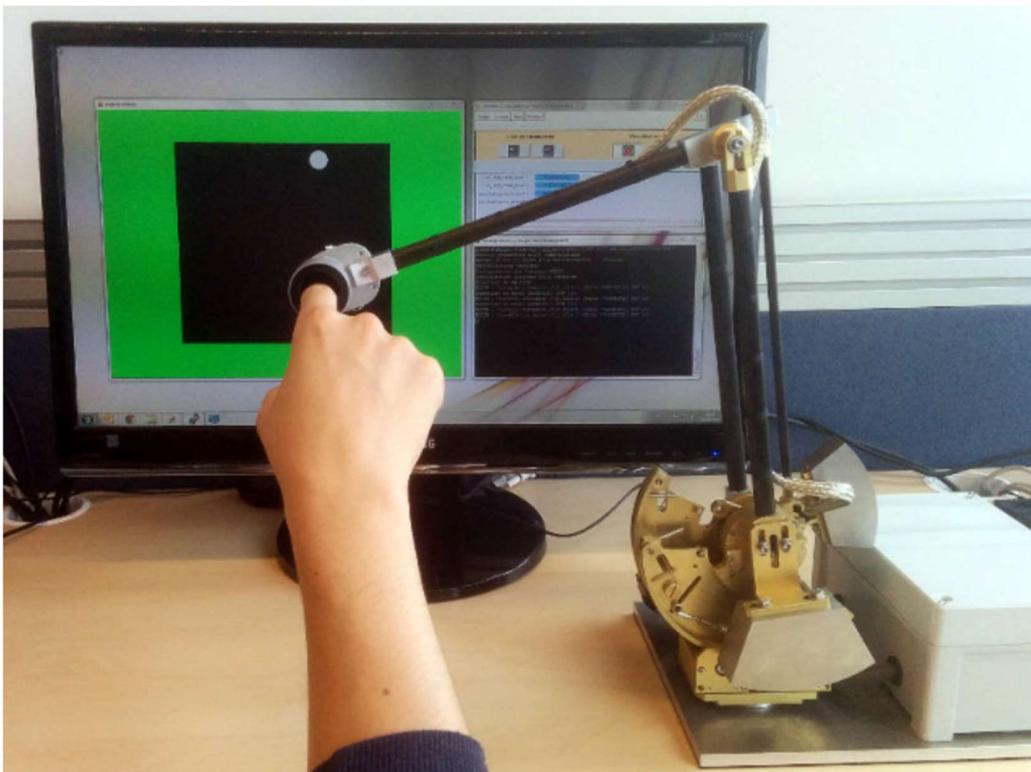


Figure 2.4 : Interface à retour d'effort à contact intermittent du CEA.

2.2.3. Déformation globale de la pulpe

Différentes interfaces ont également été développées pour simuler la déformation globale de la pulpe quand on touche un objet convexe ou concave. L'interface Morpheotron se compose par exemple d'un plateau inclinable selon deux directions sur lequel on vient positionner son doigt, fixé sur un charriot roulant [Dostmohamed et Hayward 2005]. Cette interface permet de simuler des surfaces avec un grand rayon de courbure en déformant la pulpe du doigt. D'après les évaluations effectuées avec ce système, les utilisateurs parviennent à distinguer la courbure de sphères ayant un diamètre allant jusqu'à 0.5m. On notera que l'on a affaire ici à une illusion haptique puisque le chariot, bien qu'il ne se déplace que dans un plan, donne l'impression de parcourir la surface d'une sphère.

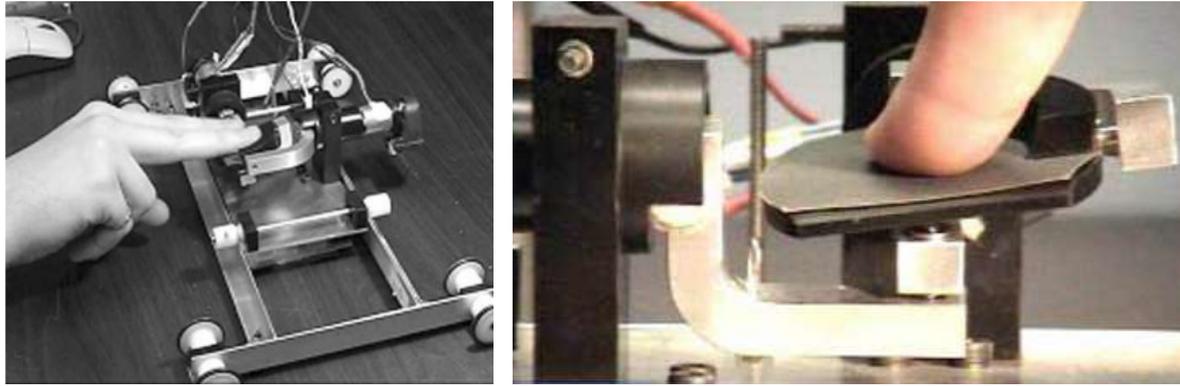


Figure 2.5 : Le Morpheotron.

Le Fingertip Haptic Display développé par l'Université de Pise comporte lui aussi un plateau orientable permettant, une fois cette interface montée sur un robot porteur, de simuler la déformation globale de la pulpe [Frisoli et al. 2008]. En outre, ce mécanisme est monté sur un étage à contacts intermittents, ce qui autorise aussi la restitution de la transition contact-non contact sur le bout du doigt, même si cette transition n'est pas totalement transparente puisqu'avec cette interface, la phalange médiane, qui sert à déplacer le robot porteur permettant d'appliquer des efforts sur le doigt, est toujours en contact avec ce robot.

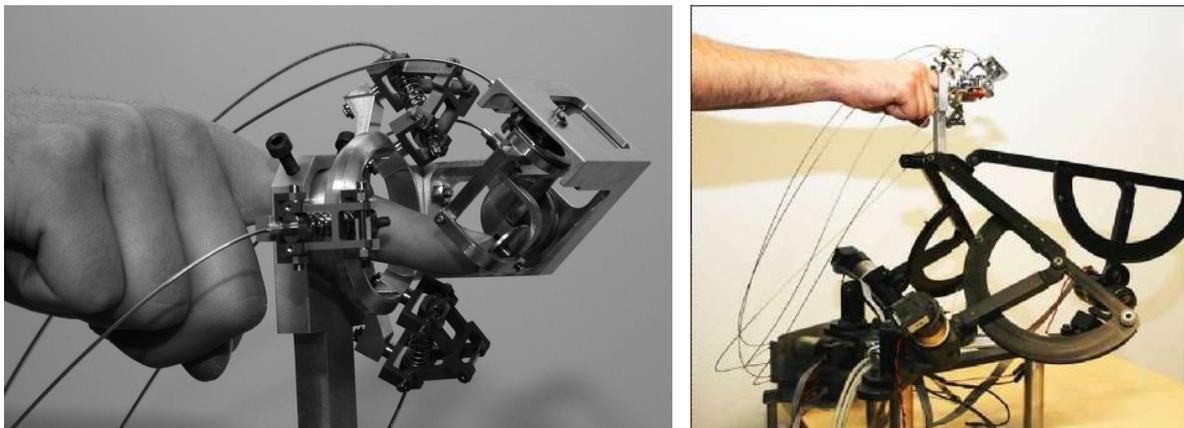


Figure 2.6 : Le Fingertip Haptic Display de l'Université de Pise.

Il existe de nombreux autres exemples d'interfaces permettant de déformer globalement la pulpe du doigt. Nous en verrons quelques-uns dans le paragraphe 5.

2.2.4. Déformation locale de la pulpe

Il existe aussi dans la littérature des interfaces destinées à reproduire les déformations locales de la pulpe du doigt. Le dispositif breveté par [Maschmeyer et Cameron 2012] prévoit par exemple l'emploi de matériaux piézo-électriques pour déformer la surface d'un écran tactile afin d'améliorer les interactions avec les appareils qui les intègrent. Ainsi l'utilisateur pourrait percevoir des déformations locales et les assimiler à divers boutons.

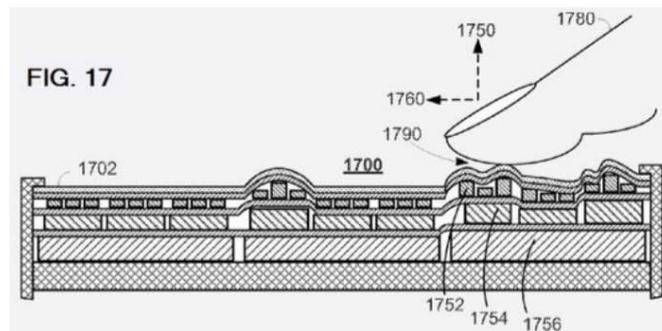


Figure 2.7 : Interface brevetée par [Maschmeyer et Cameron 2012].

On notera que l'on peut aussi donner l'illusion de déformations locales d'une surface sans déformation de la pulpe, sous réserve que le doigt se déplace par rapport à la surface touchée. [Watanabe et Fukui 1995] ont ainsi proposé une méthode permettant de modifier le coefficient de frottement d'une poutre en la faisant vibrer à haute fréquence (77 kHz) avec un déplacement maximal de 2 μm , ce qui crée un fin film d'air entre la plaque et le doigt. En activant ce mécanisme de façon coordonnée avec le mouvement du doigt, on peut donner l'impression que la surface est rainurée ou texturée.

Ces exemples ne sont bien sûr pas exhaustifs. Il existe d'autres interfaces permettant de déformer localement la pulpe du doigt. Nous en verrons quelques-exemples supplémentaires dans le paragraphe 5.

2.2.5. Vibrations globales du doigt

Plusieurs solutions techniques ont été proposées pour simuler et reproduire des vibrations globales du doigt. L'actionneur développé par [Niwa et al. 2006] se base par exemple sur l'utilisation d'un film piézoélectrique. Ce genre de dispositif est utilisé pour générer des vibrations lors d'un contact avec l'utilisateur. On notera que l'amplitude de ces vibrations diminue avec la pression exercée par le doigt, ce qui oblige les auteurs à implanter une boucle de retour afin d'asservir leur système pour garder une amplitude constante et ainsi améliorer le ressenti de l'utilisateur.

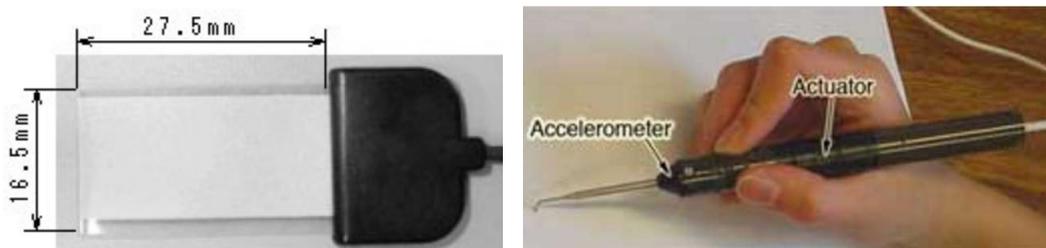


Figure 2.8 : Film piézoélectrique (gauche) et interface MicroTactus (droite).

L'interface MicroTactus développée par [Yao et al. 2005] permet quant à elle d'améliorer le ressenti d'une personne sondant une surface avec la pointe d'un outil. La pointe de l'appareil est instrumentée avec un accéléromètre qui permet d'enregistrer les vibrations perçues. Ces données sont ensuite amplifiées puis transmises à un actionneur reproduisant ces vibrations. Ainsi l'utilisateur peut aisément percevoir des imperfections de faible taille. Cette interface a pour but d'être utilisée pour de la chirurgie micro-invasive. Elle fonctionne aussi en télé opération avec un MicroTactus pour enregistrer les vibrations et un autre pour les reproduire.

2.2.6. Vibrations localisées sur le doigt

Un exemple d'interface permettant de simuler des vibrations localisées sur le doigt est le système STReSS [Pasquero et Hayward 2003]. Il a été développé pour générer de faibles déplacements tangentiels au niveau de la pulpe du doigt. Il est constitué de dix plaques piézo-électriques, elles mêmes découpées en dix lamelles, formant ainsi une matrice de 10x10 pines avec une résolution spatiale de 1mm. La fréquence de fonctionnement de cette interface est de 700Hz. Sur une seconde version de cette interface appelée STReSS 2, la surface de contact est incurvée pour mieux se conformer à celle du doigt [Wang et Hayward 2005]. Dans les deux cas l'encombrement est important à cause de l'électronique nécessaire au bon fonctionnement du dispositif.

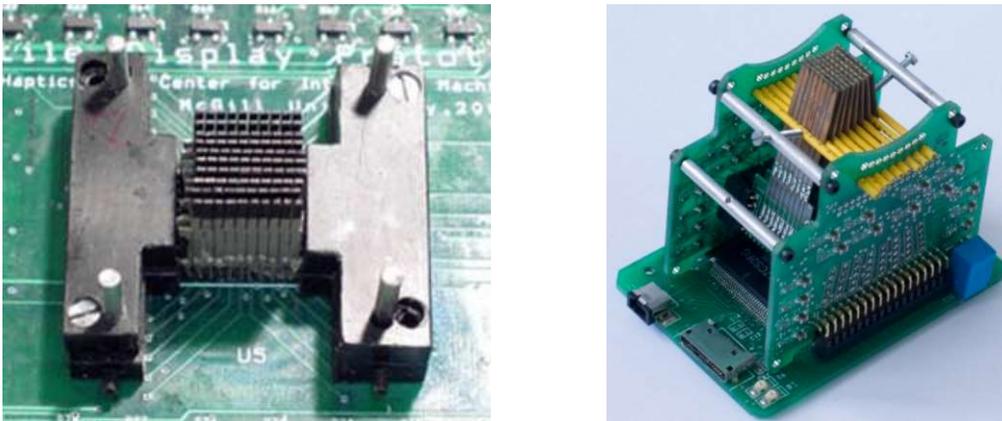


Figure 2.9 : Interfaces STReSS (gauche) et STReSS 2(droite).

Une autre solution pour donner l'illusion de vibrations localisées sur le doigt est d'utiliser des interfaces électro-tactiles comme le dispositif proposé par [Ying et al. 2012] qui est composé d'une membrane en silicone intégrant directement des électrodes pour stimuler le doigt. Ce matériau fin ($\sim 500\mu\text{m}$ d'épaisseur) et souple permet de ne pas gêner l'utilisateur. Les électrodes peuvent à la fois être utilisées comme capteur de pression, mais aussi pour simuler un contact en stimulant directement les nerfs.

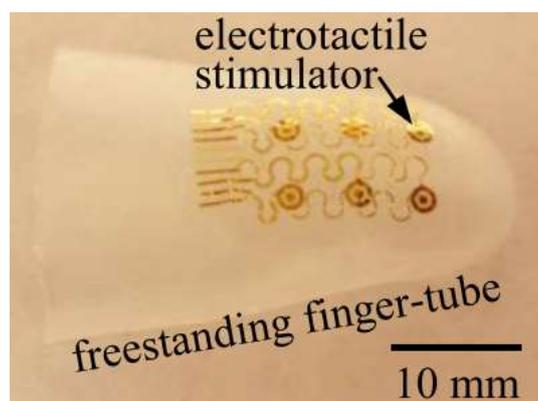


Figure 2.10 : Nano membrane en silicone [Ying et al. 2012].

2.2.7. Transfert thermique

Les dispositifs présentés précédemment ne permettent pas de distinguer deux matériaux différents ayant un même état de surface et un même coefficient de frottement. Il est nécessaire pour cela de simuler aussi les transferts thermiques entre le doigt et la surface touchée. Cette constatation a conduit au développement d'interfaces permettant de simuler ces transferts thermiques. L'interface [Gallo et al. 2012] utilise par exemple pour cela des modules Peltier permettant de générer une température allant de 10°C à 40°C. Un refroidissement à eau a été mis en place pour refroidir un des côtés des modules, l'autre étant en contact avec le doigt. La principale limite de ce type de dispositif est son temps de réponse, les vitesses de refroidissement et de chauffage étant relativement longs, respectivement 14.4°C/s et 18.7°C/s.

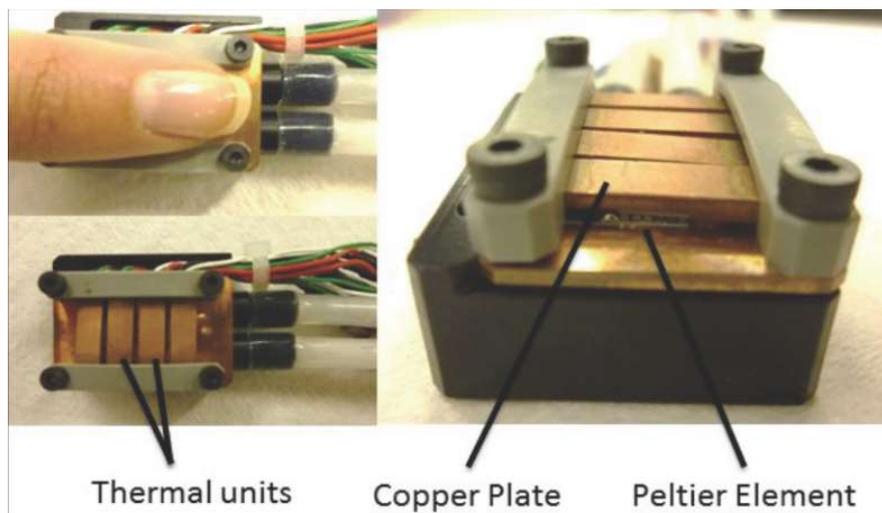


Figure 2.11: Interface développée par [Gallo et al. 2012].

2.2.8. Simulation de plusieurs types de sollicitations élémentaires

La plupart des interfaces présentées précédemment se concentrent sur la reproduction d'un seul type de sollicitation de la peau, même si les interfaces à contacts intermittents permettent de simuler à la fois les transitions contact – non contact et les déformations locales de la pulpe dues à des efforts normaux ou tangentiels.

Pour enrichir les phénomènes simulables, il est nécessaire d'associer différents types d'interfaces. Nous en avons vu ci-dessus plusieurs exemples. L'interface CASR peut ainsi être montée sur un robot delta.3 pour que la surface de la pulpe en contact avec l'interface augmente avec l'effort appliqué. Le Fingertip Haptic Display de l'Université de Pise permet quant à lui de simuler l'arrivée au contact, puis les déformations normale, tangentielle et globales de la pulpe. Ce paragraphe présente quelques autres exemples d'interfaces autorisant la reproduction de différents types d'interactions.

[Declerck et Lenay 2010] ont par exemple couplé une interface à retour d'effort (kinesthésique), le Phantom [Massie et Salisbury 1994], avec une interface à retour tactile composée d'une matrice de 4x4 pines. Ils ont ensuite évalué ce couplage pour une tâche de suivi de contour. Parmi l'ensemble des participants, 84.5% réussissent la tâche avec le couplage contre 75% et 72.5% avec respectivement le retour d'effort seul et le retour tactile seul, ce qui montre l'intérêt d'un tel couplage.

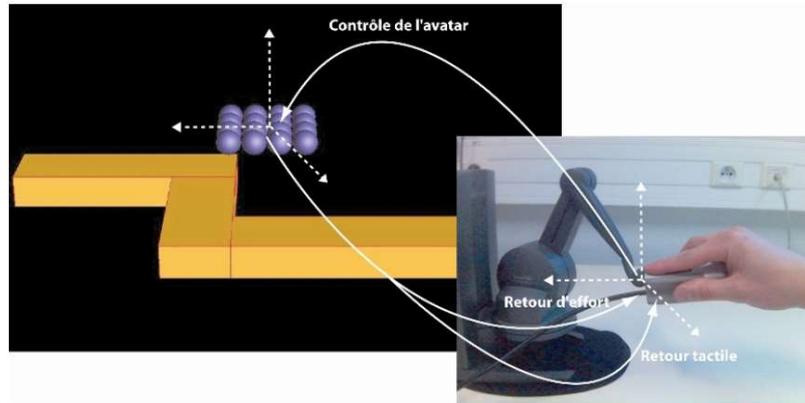


Figure 2.12 : Interface couplant retour kinesthésique et vibrations localisées [Declerck et Lenay 2010].

L'interface développée par [Konyo et al. 2008] couple quant à elle un bras à retour d'effort avec une plaque piézoélectrique. Dans un premier temps, les auteurs analysent les vibrations dues au phénomène de glissement / adhésion lors du parcours d'une surface. Puis ils mettent en place ce dispositif pour simuler le frottement du doigt sur un objet sans utiliser de forces tangentielles. Leurs premiers résultats montrent qu'un utilisateur réussit à percevoir différentes frictions ainsi que leur augmentation. Dans un second temps, ils comparent cette méthode avec l'utilisation de forces tangentielles pour restituer le frottement. Leurs seconds résultats montrent qu'un septième des utilisateurs perçoit mieux la friction générée par les forces tangentielles qu'avec les vibrations.

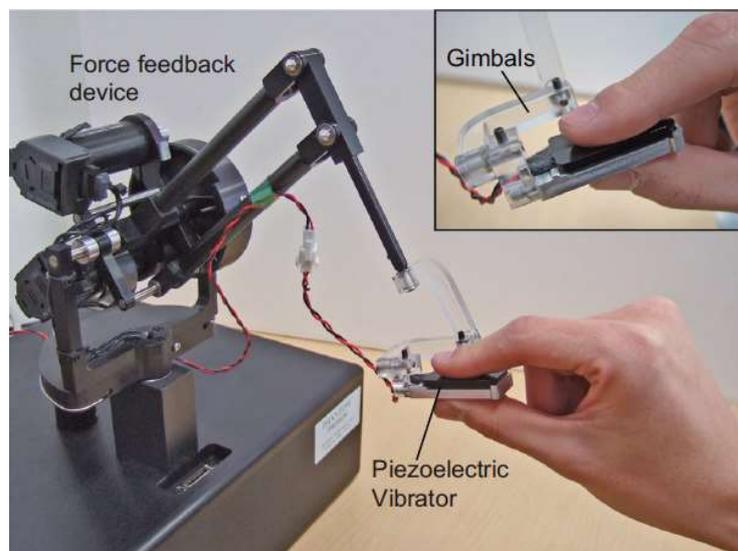
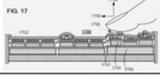


Figure 2.13 : Interface couplant retour kinesthésique et vibrations globales du doigt [Konyo et al. 2008].

2.2.9. Premier bilan

L'analyse effectuée dans le paragraphe 2.1 montre que le toucher est très riche. Il fait intervenir de nombreux types de stimulations de la peau. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.2, qui ne se veut pas exhaustif, de nombreuses interfaces ont été développées pour simuler et reproduire ces phénomènes. Le tableau 2.2 fournit une vision synthétique de leurs capacités à simuler telle ou telle stimulation.

Tableau 2.2 : Les différents phénomènes simulés par chaque interface haptique.

		Transition contact - non contact	Mouvement normal de la pulpe par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Mouvement tangentiel de la pulpe par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Modification de la surface de contact	Adaptation globale de la pulpe (associée à un mouvement de la main)	Adaptation locale de la pulpe (* taille du doigt)	Vibrations globales du doigt	Vibrations locales sur le doigt	Transfert thermique
	Sensable PHANTOM Premium									
	Force Dimension delta.3 et omega.3									
Interfaces à retour d'effort	Virtuose Haption									
	MPB Freedom 6S									
	CASR + delta,3									
	HapTips									
	Interfaces à retour d'effort à contact intermittent									
	Morpheutron Haptic Shape Display									
	Fingertip haptic display									
	Déformation d'une surface									
	Film piézoélectrique									
	Microtactus									
	STReSS / STReSS 2 Tactile Display									
	Interface électro-tactile									
	Tactile Thermal Display									
	PHANTOM et interface tactile									
	PHANTOM et film piézoélectrique									

Ce tableau, bien qu'il ne soit pas exhaustif, est représentatif des technologies actuellement disponibles. Il montre qu'aucune des interfaces existantes ne permet de simuler l'ensemble des phénomènes associés au toucher. Il est donc nécessaire, dans l'état actuel de la technique, de se focaliser sur certains seulement de ces phénomènes.

2.3. IDENTIFICATION DES MODALITÉS D'INTÉRÊT

Pour choisir les phénomènes sur lesquels nous allons nous concentrer, nous proposons de les analyser sous deux angles. Nous essaierons de déterminer ceux qui sont les plus fréquemment mis en œuvre lors d'interactions manuelles. Puis nous consoliderons cette information en étudiant la corrélation entre ces interactions et la façon dont réagissent les différents types de capteurs cutanés.

2.3.1. Etude des mouvements d'exploration et de manipulation

Dans la littérature, on distingue en général deux types de mouvements : les mouvements d'exploration qui sont effectués pour identifier les caractéristiques des objets environnants et les gestes de manipulation utilisés pour les saisir et les déplacer.

Les mouvements effectués pour explorer l'environnement sont généralement classés en 6 catégories suivant les caractéristiques que l'on cherche à identifier [Jones et Lederman 2006] :

- Parcours de la surface des objets avec le doigt pour déterminer leur texture.
- Application d'une force normale pour connaître leur dureté.
- Contact statique pour déterminer leur température.
- Soupèusement pour connaître leur poids.
- Prise en main et parcours de leur contour pour mieux appréhender leur forme et leur volume.
- Suivi du contour de l'objet pour identifier plus précisément sa forme.

Tableau 2.3 : Les stimulations cutanées associées aux différents mouvements d'exploration.

Caractéristiques du matériau que l'on cherche à identifier	Mouvement d'exploration associé [Jones et Lederman 2006]										
		Transition contact - non contact	Mouvement normal de la pulpe par rapport au doigt (déplacement)	Mouvement normal ou tangentiel par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Mouvement tangentiel de la pulpe par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Modification de la surface de contact	Adaptation globale de la pulpe (associée à un mouvement de la main)	Adaptation locale de la pulpe (< taille du doigt)	Vibrations globales du doigt	Vibrations locales sur le doigt	Transfert thermique
Texture	Parcours de la surface avec les doigts 										
Dureté / Raideur	Application d'une force normale avec un doigt 										
Température	Contact statique de la main contre l'objet 										
Poids	Soupèusement avec le creux de la paume 										
Forme globale et volume	Prise en main de l'objet et parcours de son contour 										
Forme globale et exacte	Suivi du contour avec le bout du doigt 										

Comme le montre le tableau 2.3, nous avons identifié les différentes façons dont la peau est sollicitée pour chacun de ces mouvements. Il ressort de ce tableau que les phénomènes les plus fréquemment mis en œuvre sont :

- La transition contact-non contact qui intervient dans tous les mouvements d'exploration.
- La déformation normale de la pulpe qui intervient également dans tous les cas, tandis que la déformation tangentielle n'apparaît que pour la moitié des mouvements.
- La déformation globale et locale de la pulpe du doigt qui est aussi mise en jeu dans la moitié des mouvements d'exploration.

Nous avons essayé de faire le même type d'études pour les gestes destinés à saisir et manipuler les objets environnants. Une telle étude est cependant plus difficile du fait de la diversité des manipulations mais surtout des objets manipulés. Ainsi, un même geste peut être utilisé pour manipuler différents objets qui ne seront pas utilisés de la même façon et qui ne feront pas tous intervenir les mêmes sollicitations de la peau. Ce tableau n'a donc pas pu être mis en place.

2.3.2. Stimulation des capteurs physiologiques

En complément de l'étude précédente, nous avons cherché à identifier les capteurs physiologiques associés à chacune des sollicitations élémentaires de la peau et du derme, dans le but de voir si certains phénomènes sollicitent plus ces capteurs que les autres.

On rappelle que le toucher est composé de deux modalités, le sens tactile et le sens kinesthésique. Le ressenti haptique est un couplage complexe de ces deux phénomènes dépendant de la tâche effectuée. Deux autres aspects du toucher nous apportent des informations complémentaires, la thermoception, qui nous permet de percevoir la température, et la nociception, pour ressentir la douleur.

D'un côté, la sensibilité tactile, aussi nommée sensibilité cutanée, est principalement extéroceptive. Elle nous apporte des informations sur l'environnement extérieur. Elle nous permet par exemple d'identifier un objet en ressentant sa forme, sa taille, sa texture, etc. La sensibilité tactile utilise un réseau complexe de mécanorécepteurs répartis dans la peau. D'après les nombreuses études portant sur ce domaine [Vallbo et Johansson 1984] [Johnson et Hsiao 1992] [Johansson et Vallbo 1993] [Johnson 2001], il existe quatre types de mécanorécepteurs différents : les corpuscules de Meissner, de Pacini et de Ruffini, et les disques de Merkel. Chacun d'eux possède deux caractéristiques importantes : son temps d'adaptation et sa taille. Les mécanorécepteurs ayant une adaptation rapide, nommés RA pour 'Rapidly Adapting', perçoivent mieux les vibrations alors que ceux ayant une adaptation lente, nommés SA pour 'Slowly Adapting' ressentent plus facilement les déformations de la peau. Ils possèdent aussi deux tailles différentes. Certains sont de petite taille. Ils sont alors dits de type I. D'autres sont plus étendus. Ils sont dits de type II. Chacun de ces capteurs cutanés répond mieux à un certain type de stimuli, nous apportant ainsi des informations variées sur notre environnement :

- Les disques de Merkel (SA I) nous renseignent sur les indentations normales de la peau.
- Les corpuscules de Ruffini (SA II) répondent aux étirements latéraux de la peau.
- Les corpuscules de Meissner (RA I) sont sensibles aux vibrations à basse fréquence (5-50 Hz).
- Les corpuscules de Pacini (RA II) répondent aux vibrations à haute fréquence (50-1000 Hz).

On sait également que la densité de ces mécanorécepteurs varie grandement d'une région du corps à l'autre, entraînant une grande différence de sensibilité. Ainsi le seuil de discrimination spatiale, distance

minimale entre deux points de stimulation mécanique permettant de les ressentir comme deux points distincts, est d'un millimètre sur l'extrémité de la langue et des doigts, et de 70mm sur le dos.

Ces informations nous permettent d'améliorer notre compréhension du toucher afin de définir les solutions de stimulations tactiles les plus adaptées.

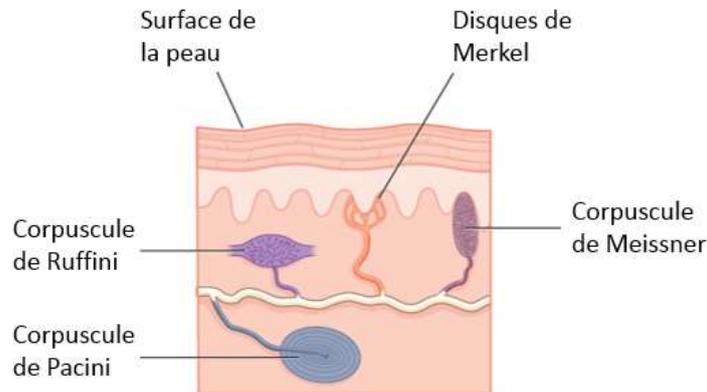


Figure 2.14 : Disposition des différents mécanorécepteurs cutanés.

D'un autre côté, la sensibilité kinesthésique (aussi nommée proprioception) est surtout proprioceptive. Elle nous renseigne sur l'état de notre propre corps. Elle est nécessaire pour percevoir la position et les mouvements de nos membres. Elle se sert pour cela de mécanorécepteurs positionnés autour des tendons, des muscles et des articulations. Chacun de ces capteurs apporte des informations variées et complémentaires sur la déformation des organes qui l'entourent. Ainsi l'état des tendons, des muscles et des articulations nous permet de reconstruire mentalement la position de chacun de nos membres. Les organes tendineux de Golgi [Jami 1992] se situent par exemple à la jonction des muscles et des tendons. Ils permettent de connaître la tension exercée sur le muscle. Au sein même des muscles, les fuseaux neuromusculaires sont des mécanorécepteurs qui fournissent des informations sur leurs variations de longueur. Ces données permettent de définir l'état physiologique des muscles. La sensibilité kinesthésique est surtout utile pour les tâches de manipulations, la position d'un objet, une fois saisi, dépendant de la position de la main qui est fournie par l'ensemble de ces mécanorécepteurs.

Le tableau ci-dessous montre que chaque type de mouvement de la peau stimule un ou plusieurs types de capteurs kinesthésiques ou tactiles. Ce résultat corrobore le fait que ces mouvements peuvent être détectés par l'utilisateur.

Ici encore, on voit que les phénomènes prépondérants sont la déformation normale ou tangentielle de la pulpe et dans une moindre mesure la transition contact-non contact et la déformation globale et locale de la pulpe du doigt.

On notera que cette étude repose sur les hypothèses usuelles de réaction des différents capteurs physiologiques (réponse statique ou dynamique, lente ou rapide, ...). Le comportement physiologique du toucher est cependant très complexe et les mécanorécepteurs interviennent de façon couplée.

Tableau 2.4 : Les stimulations cutanées détectées par les différents types de capteurs physiologiques.

Capteurs physiologiques	Rapidité de détection / type de réponse	Stimulations cutanées								
		Transition contact - non contact	Mouvement normal de la pulpe par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Mouvement tangentiel de la pulpe par rapport au doigt (déplacement normal ou tangentiel)	Modification de la surface de contact	Adaptation globale de la pulpe (associée à un mouvement de la main)	Adaptation locale de la pulpe (* taille du doigt)	Vibrations globales du doigt	Vibrations locales sur le doigt	Transfert thermique
Corpuscules de Meissner	Rapide / Dynamique									
Corpuscules de Pacini	Rapide / Dynamique									
Disques de Merkel	Lente / Statique									
Corpuscules de Ruffini	Lente / Statique									
Thermorécepteurs	Rapide / Dynamique									
Mécanorécepteurs articulaires	Rapide / Dynamique - Statique									
Mécanorécepteurs tendineux	Rapide / Dynamique									
Mécanorécepteurs musculaires	Rapide / Statique									

2.3.3. Choix des phénomènes à simuler

L'étude précédente montre que les sollicitations de la peau et du derme les plus fréquemment mise en jeu lors d'interactions avec notre environnement sont les suivantes : la transition entre les mouvements de l'utilisateur en espace libre et ceux au contact d'un objet, les mouvements normaux et latéraux de la pulpe liés à un déplacement ou à l'application d'un effort sur cet objet, et enfin la déformation globale et locale de la pulpe. Ce sont également ces phénomènes qui sollicitent le plus nos capteurs physiologiques. Ce sont donc ceux que nous considérerons comme les plus importants et que nous chercherons à simuler.

Nous concentrerons donc nos études sur :

- Les interfaces à retour d'effort aptes à reproduire les déformations normales et tangentielles de la pulpe des doigts. On notera que pour permettre à l'utilisateur d'interagir naturellement avec l'environnement, il est nécessaire d'utiliser des interfaces dextres multi-digitales permettant de toucher librement l'environnement pour explorer une surface et de saisir et manipuler les objets alentour.
- Les interfaces à contacts intermittents qui permettent de simuler la transition contact-non contact : parmi les interactions élémentaires mises en avant par l'étude précédente, le contact intermittent semble le plus complexe à mettre en œuvre. Il ne peut pas être simplement ajouté à

une interface existante. Il demande une conception spécifique dirigée vers cet objectif. C'est donc un point important à prendre en compte dès le début de l'étude.

- Les interfaces permettant d'enrichir le retour haptique en autorisant la déformation globale et/ou locale de la pulpe du doigt pour améliorer le ressenti de l'utilisateur. Un système déformant la pulpe des doigts peut par exemple permettre à l'utilisateur de distinguer des arêtes, des coins ou autres variations de formes de l'objet. Il est alors plus aisé de reconnaître l'objet que l'on saisit ou la surface sur laquelle on se déplace.

3. LES INTERFACES DEXTRES À RETOUR D'EFFORT

3.1. INTRODUCTION

La main est un organe incroyablement complexe autorisant des gestes très variés. Elle est utilisée à la fois pour explorer l'environnement et pour saisir et manipuler des objets, ce qui dans les deux cas peut nécessiter des gestes très précis et un contrôle très fin des efforts appliqués.

Dans ce paragraphe, nous proposons d'étudier la façon dont elle est utilisée dans la vie de tous les jours afin d'identifier les zones les plus sollicitées sur lesquelles nous devrions nous concentrer lors de la conception d'une interface dextre destinée à simuler ces interactions. Les résultats obtenus seront ensuite confrontés à un état de l'art des interfaces dextres à retour d'effort existantes, ce qui nous permettra de mieux appréhender ce qu'il est envisageable de réaliser dans le cadre de cette thèse.

3.2. ÉTUDE DES INTERACTIONS DEXTRES

3.2.1. Géométrie et cinématique de la main et des doigts

Une interface haptique dextre doit être adaptée à la géométrie, aux mouvements et aux efforts de la main pour permettre à l'utilisateur d'interagir de manière naturelle avec un environnement virtuel. Pour son dimensionnement et sa conception, il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de la main. De nombreuses études ont été faites en ce sens, que ce soit en robotique ou dans le domaine de la psychologie [Brooks 1990] [Jones 1997] [Jones et Lederman 2006] [Gosselin 2000, 2012] [Samur 2012].

Chacun des doigts possède 4 degrés de liberté (DDLs) : un mouvement d'abduction/adduction à la liaison entre la paume et la phalange proximale et trois mouvements de flexion/extension à la jonction entre deux phalanges adjacentes. Le pouce possède un DDL couplé supplémentaire pour permettre un mouvement de mise en opposition par rapport aux autres doigts. Ces mouvements sont relativement complexes, les articulations physiologiques de la main étant comme les autres articulations du corps humain basées sur des surfaces qui roulent et/ou glissent les unes sur les autres, avec des axes variables en fonction de la configuration des articulations [Greibenstein et al. 2012] [Cai et al. 2010]. Dans la pratique cependant, elles sont souvent assimilées par souci de simplification à des liaisons pivot à axe fixe comme le montre la figure 2.15.

Les dimensions de la paume et des phalanges peuvent être obtenues à partir de données disponibles dans la littérature. Celles correspondant à un homme adulte de taille moyenne sont illustrées sur la figure 2.15 [Gosselin 2004].

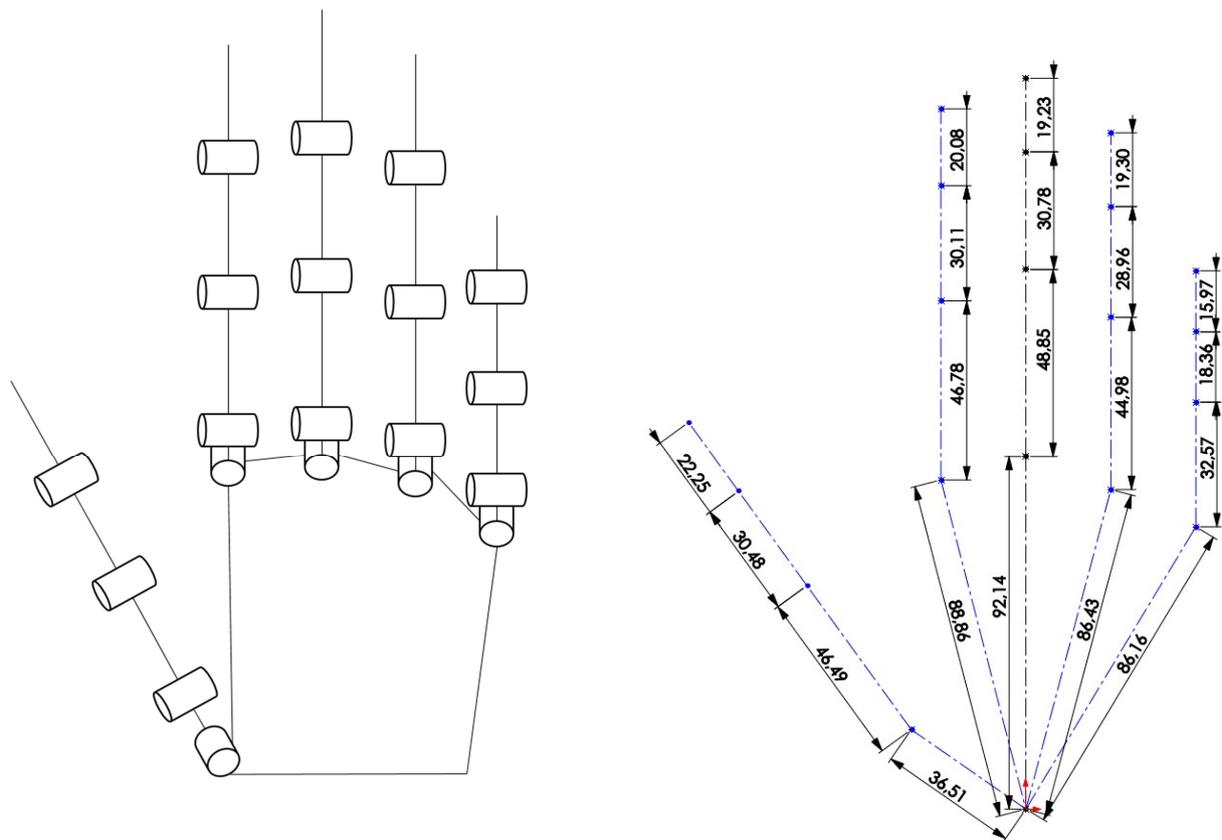


Figure 2.15 : Schéma cinématique simplifié de la main (gauche) et dimensions de la paume et des phalanges (droite).

3.2.2. Dynamique des mouvements de la main et des doigts

La littérature portant sur la dynamique des mouvements humains est moins importante que celle qui s'intéresse à la cinématique et à la taille de la main. Il est donc nécessaire pour la caractériser de rassembler et recouper des informations de domaines divers comme le sport (base-ball, Kung Fu, ...) [Dun et al. 2007] [Hirashima et al. 2008] [Elgendi et al. 2012] [Zaremski et Krabak 2012] ou les arts (piano). Les auteurs de [Gonzalez et al. 2014] ont regroupé un nombre important d'articles sur ce sujet et en ont déduit les valeurs de vitesse et d'accélération de la phalange distale du pouce et des autres doigts lors de mouvements rapides :

- Flexion/extension du pouce : 0,14 à 0,21 m/s (6,75 m/s²)
- Abduction/adduction du pouce : 0,62 m/s (n/a)
- Flexion/extension d'un autre doigt : 1,01 à 1,26 m/s (24,5 m/s²)
- Abduction/adduction d'un autre doigt : 0,26 m/s (4 m/s²)

Il est bon de noter que la plupart de ces articles porte sur les vitesses et accélérations liées à des mouvements rapides et dont les valeurs sont nettement plus élevées que celles qui sont atteintes lors de mouvements de manipulation de précision par exemple.

3.2.3. Zones de la main utilisées lors des interactions dextres manuelles

Les interactions dextres ont pour objectif soit d'explorer l'environnement pour mieux connaître ses caractéristiques, soit de manipuler des éléments de cet environnement. Ces mouvements peuvent, dans certains cas, faire intervenir l'intégralité de la surface de la main. Il est cependant impossible, dans l'état actuel de la technique, de faire un retour haptique réaliste sur toute la surface de la main. Nous proposons donc d'étudier les zones de la main qui sont les plus sollicitées lors des différentes interactions du quotidien pour en déduire les parties où il serait le plus intéressant de stimuler la main.

Pour cette étude, nous reprendrons les résultats obtenus précédemment par le CEA LIST et l'ISIR [Gonzalez et al. 2013] [Gonzalez et al. 2014]. Les auteurs utilisent les taxonomies usuellement utilisées pour classifier les différents gestes de manipulation [Cutkosky 1989] [Feix et al. 2009] et d'exploration [Jones et Lederman 2006] pour déterminer un panel de 40 mouvements types liés aux interactions dextres, 34 pour la manipulation (en distinguant prises de précision et prises de puissance) et 6 pour l'exploration. Ils identifient ensuite pour chacune de ces prises la zone de la main utilisée, et y associent des fréquences d'utilisation issues d'une publication récente qui présente une procédure expérimentale qui a permis d'enregistrer et d'analyser les activités d'un individu dans son environnement de travail habituel pendant une durée relativement importante [Zheng et al. 2011]. Des personnes effectuant des tâches ménagères et des travaux d'atelier ont été enregistrées et les manipulations correspondantes ont été classées en utilisant les taxonomies de Cutkosky et de Feix et al., ce qui a permis de déterminer les fréquences d'utilisation des différentes prises. En mettant en corrélation les zones associées à chaque type d'interaction dextre et la fréquence d'utilisation du geste associé, les auteurs en déduisent la fréquence d'utilisation, exprimée en pourcents, de chaque zone de la main pour trois types de comportements différents :

- Lors de tâches ménagères, on réalise principalement des tâches de manipulation grossières impliquant des prises de puissance.
- Lors de travaux d'atelier, on réalise des activités techniques plus délicates avec à la fois des prises de puissance et de précision.
- Enfin, lors des gestes d'exploration on cherche à apprendre des informations sur notre environnement.

Les gestes du quotidien étant une combinaison de ces différents comportements, les auteurs combinent l'ensemble de ces données (avec un ratio variant de 25% à 50%) pour avoir un graphe représentant de façon synthétique la façon dont la main est utilisée dans la vie de tous les jours. Sur ce graphe, la fréquence d'utilisation de chaque zone de la main est représentée à la fois par une valeur chiffrée et par un niveau de gris associé.

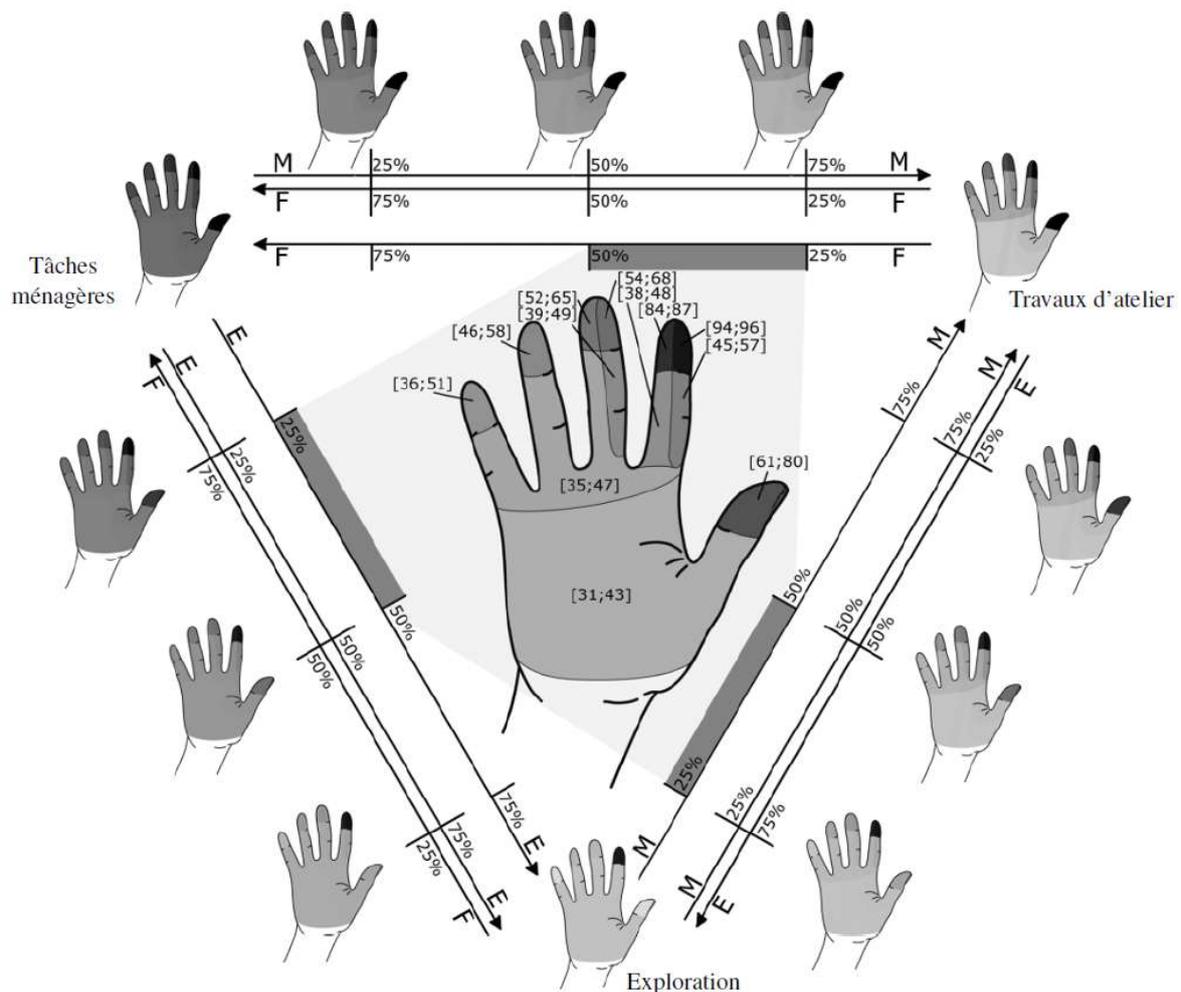


Figure 2.16 : Cartes d'interaction représentant la fréquence d'utilisation de chaque zone de la main pour différents types d'activité combinant tâches de puissance, de précision et d'exploration [Gonzalez et al. 2014].

Les cartes d'interaction ainsi obtenues offrent un aperçu de la manière dont la main est habituellement sollicitée, mais pas des activités qui peuvent être effectuées en fonction des zones de contact mises en jeu. Pour cela, les auteurs mettent en place un autre outil se présentant sous la forme d'un arbre d'interaction qui indique le pourcentage (c'est-à-dire la fréquence d'utilisation) des interactions manuelles réalisables en fonction des zones de la main sollicitées. Cet arbre, dont un extrait est visible sur la figure 2.17, illustre de manière synthétique l'efficacité des diverses zones de contact de la main, c'est-à-dire la capacité qu'elles offrent à interagir de façon naturelle avec notre environnement, en fonction de la complexité de la surface manuelle mise en jeu, évaluée à l'aide du nombre de zones élémentaires dont elle est constituée. Cet arbre constitue ainsi un outil graphique très intéressant pour le choix des zones d'interactions à considérer dans la conception d'une interface haptique dextre. Dans la pratique, les auteurs conseillent de choisir une surface permettant d'obtenir un pourcentage d'interactions élevé pour un faible nombre de zones élémentaires.

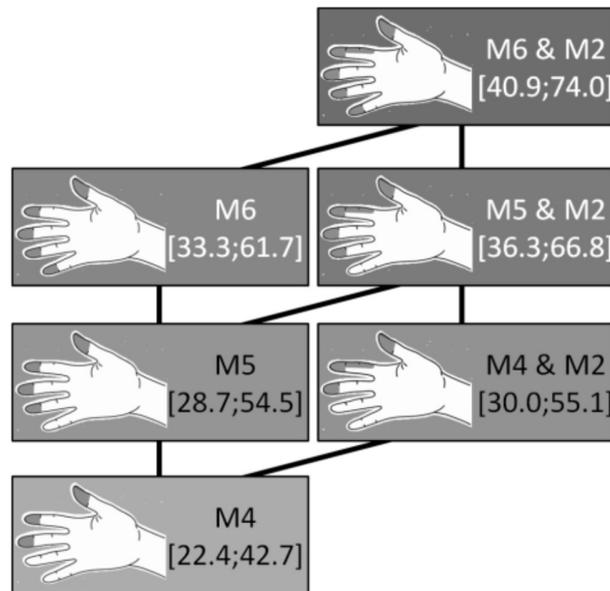


Figure 2.17 : Extrait de l'arbre d'interaction mis en place dans [Gonzalez et al. 2014].

3.2.4. Directions des stimulations

L'étude précédente permet de diminuer le nombre de zones de la main à stimuler en choisissant celles qui permettent d'interagir le plus efficacement en environnement virtuel. Elle suppose cependant un retour d'effort 3D sur chaque zone choisie, ce qui reste complexe à réaliser dans la pratique pour un grand nombre de zones.

Pour résoudre ce problème, une étape supplémentaire dans cette étude des interactions dextres consiste à prendre en compte la direction des sollicitations de la main. Les principales étapes de cette étude sont présentées ci-dessous.

On se base sur le même panel de mouvements de manipulation et d'exploration que l'étude précédente, en reprenant les zones de la main identifiées pour chacun de ces gestes. De la même façon, nous séparons exploration, manipulation fine et manipulation grossière et nous prenons en compte les mouvements de la main, l'utilisation d'outils et leurs interactions possibles avec l'environnement pour en déduire les directions des forces appliquées. Cette analyse a été effectuée à 3 personnes. Nous nous sommes réunis pour étudier de la façon la plus objective possible les actions possibles avec chaque type de prise en considérant le panel le plus large possible d'activités associées. Dans le tableau ci-dessous, nous regroupons l'ensemble des interactions n'ayant pas un taux d'utilisation nulle, ainsi que leur fréquence d'utilisation et les directions des forces sur chacune des zones de la main (dans la 1ère colonne, on retrouve le nom et un schéma de la prise, dans la 2ème les fréquences d'utilisation des gestes associés, en bleu pour l'agent d'entretien et en rouge pour le technicien, dans la 3ème un schéma de la zone de la main utilisée et dans les colonnes suivantes, on identifie la présence d'une force sur une zone donnée dans une direction donnée).

Tableau 2.5 : Directions des forces associées aux différents gestes de manipulation (partie 1).

Grasp types	Freq. H/M	Contact area	Elementary Directional Areas																					
			Thumb			Index			Major			Ring			Little			Palm						
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z				
C1	2.8																							
	1.6																							
C2	0.5																							
	1.2																							
C3	26.1																							
	10.5																							
C4	1.2																							
	1.2																							
F18	13																							
	4.2																							
C10	0.1																							
	0.1																							
C11	12.9																							
	3.1																							
C15	0.6																							
	0.2																							
F31	0.3																							
	0																							
F27	0																							
	0.1																							
F29	1.3																							

Tableau 2.5 : Directions des forces associées aux différents gestes de manipulation (partie 2).

Grasp types	Freq. H/M	Contact area	Elementary Directional Areas																	
			Thumb			Index			Major			Ring			Little			Palm		
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
F32 	0.1																			
	1.8																			
F30 	0.2																			
	1.3																			
F33 	0.1																			
	0.7																			
F21 	1.7																			
	2.6																			
F26 	0.9																			
	1.8																			
C6 	3.1																			
	6																			
C12 	6.7																			
	1.5																			
C13 	0.4																			
	0.8																			
C7																				

Un tableau similaire a été dressé pour les mouvements d'exploration. Il est présenté ci-dessous (comme précédemment, on retrouve dans la 1^{ère} colonne le nom et un schéma du geste effectué, dans la 2^{ème} la fréquence d'utilisation du geste associé, dans la 3^{ème} une représentation de la zone de la main associée, et dans les colonnes suivantes on identifie la présence d'une force sur une zone donnée dans une direction donnée).

Tableau 2.6 : Directions des forces associées aux différents mouvements d'exploration.

Exploratory patterns	Freq.	Contact area	Elementary Directional Areas																		
			Thumb			Index			Major			Ring			Little			Palm			
			X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
	4.8																				
	9.5																				
	9.5																				
	14.3																				
	9.5																				
	52.4																				

De façon similaire à l'étude précédente, nous pouvons concaténer l'ensemble de ces données pour obtenir des cartes de la main indiquant le taux d'utilisation de chaque zone suivant le type de gestes et la direction des forces. Les gestes du quotidien étant une combinaison des prises de précision, de puissance (en force) et des mouvements de manipulation, on peut obtenir une carte synthétique représentative des activités du quotidien en rassemblant les informations obtenues en pondérant chacun de ces comportements avec un poids allant de 25 à 50%. Comme le montre la figure 2.18, on obtient alors des cartes permettant de connaître le taux de stimulation d'une zone dans une direction donnée. Il est ainsi possible de voir l'importance d'un retour d'effort dans une direction donnée sur une zone spécifique.

On voit que les bouts des doigts sont les zones les plus sollicitées de la main, ces zones étant plus souvent sollicitées perpendiculairement à la peau que tangentiellement à celle-ci. Les doigts les plus sollicités sont l'index et le pouce, puis dans l'ordre le majeur, l'annulaire et l'auriculaire. La face extérieure de l'index est également souvent sollicitée.

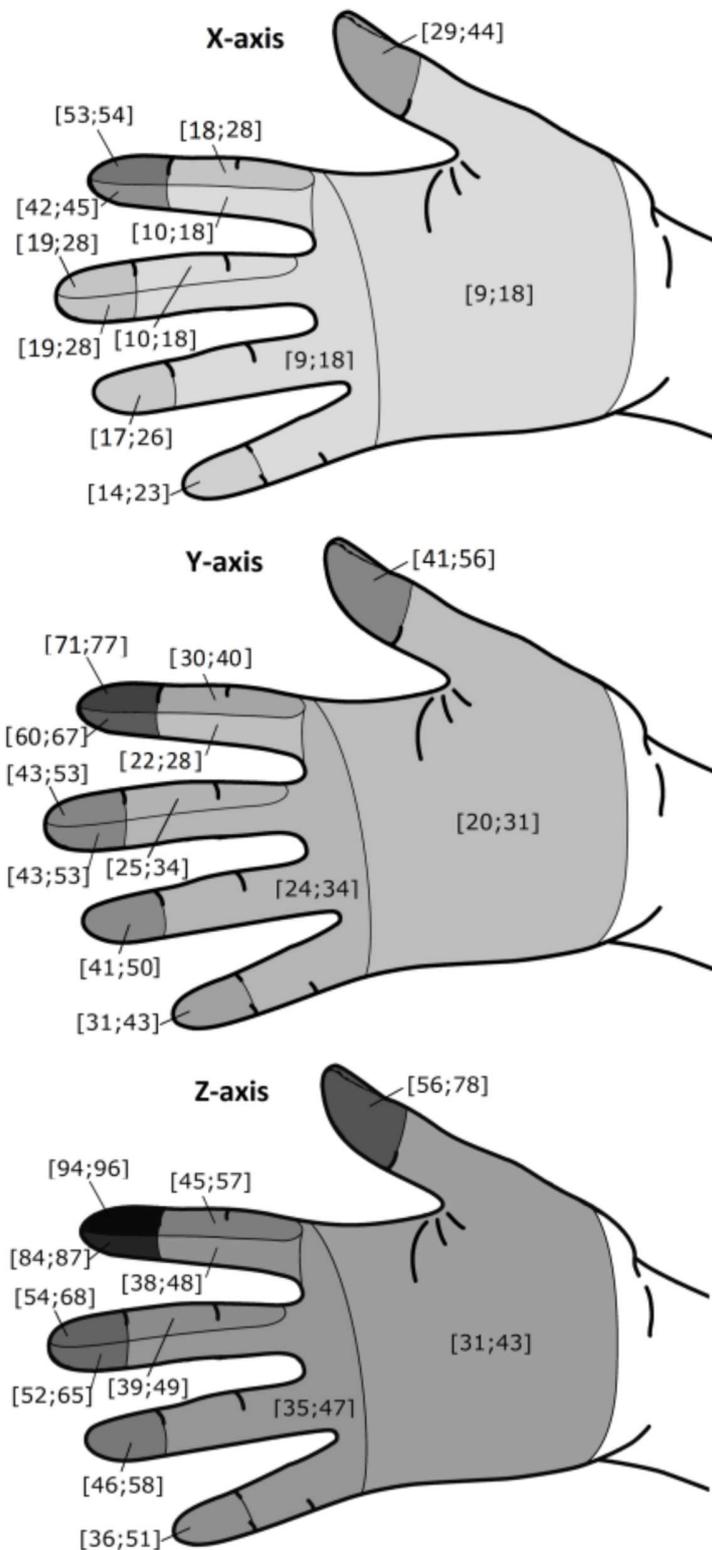


Figure 2.18 : Cartes représentant le taux de stimulation des différentes zones de la main en fonction de la direction du stimulus pour un usage quotidien.

Dans une logique de conception d'une interface haptique, il serait intéressant de connaître le pourcentage de gestes simulables en fonction des zones sollicitées et des directions suivant lesquelles elles peuvent être stimulées. Pour obtenir un tel résultat, on étudie actuellement la faisabilité d'arbres d'interaction fonction de ces directions. On pourrait en déduire le nombre de DDLs nécessaires pour la conception d'une interface haptique. Ce travail n'a cependant pas été mené à terme faute de temps. Il constitue une perspective intéressante pour la poursuite de ces travaux. Il serait également intéressant de tenir compte de l'amplitude des efforts qui doivent être appliqués sur chaque zone et dans chaque direction, afin de spécifier totalement le retour d'effort sur la main. Une partie de ces amplitudes est disponible dans la littérature. L'article [Jansen et al. 2013] analyse par exemple la vitesse moyenne et la force appliquée lors des mouvements d'exploration. Les données manquantes pourraient être obtenues en utilisant un gant mesurant les efforts lors des différents gestes d'exploration ou de manipulation.

On notera que les travaux présentés dans les paragraphes précédents décrivent une méthode qui peut être utilisée pour la conception d'interfaces servant à retranscrire un ensemble de manipulations différentes mais aussi pour le design de périphériques dédiés à une tâche spécifique. Il suffit pour cela de ne considérer que les patterns d'interaction associés à cette tâche et d'ajuster les pourcentages associés. Dans tous les cas, il est ainsi possible de justifier la sélection d'un nombre limité de zones à stimuler et de directions suivant lesquelles on doit appliquer un retour d'effort sur ces zones. De cette façon, on peut construire un cahier des charges pour la création d'une interface haptique en fonction des besoins des utilisateurs.

3.3. ÉTAT DE L'ART DES INTERFACES DEXTRES À RETOUR D'EFFORT

3.3.1. Introduction

Nous allons maintenant essayer de confronter le besoin exprimé précédemment à l'état de l'art des interfaces dextres à retour d'effort.

Comme précisé précédemment, on se place dans le contexte général des interactions dextres, c'est-à-dire que nous supposons que les interactions peuvent avoir lieu pour différentes configurations de la main. Il est donc important que l'interface s'adapte au mouvement des doigts de l'utilisateur. Nous ne parlerons donc pas ici des interfaces équipées d'organes de préhension de type 'poignée' qui, bien qu'elles soient les plus courantes, contraignent la configuration de la main lors des interactions. Nous nous concentrerons au contraire sur les interfaces de type 'gant' qui sont les plus adaptées pour ce genre de gestes puisqu'elles permettent une interaction naturelle avec la main et les doigts.

Nous ne présenterons par ailleurs dans ce paragraphe que des interfaces à retour d'effort. Il existe également des interfaces portables miniatures destinées à être fixées sur le bout des doigts pour déformer la pulpe en fonction des interactions avec l'environnement pour donner l'illusion d'un retour d'effort ou pour restituer des informations complémentaires sur les objets environnants. Certaines de ces interfaces seront présentées dans le paragraphe 5. On pourra également se reporter à [Girard et al. 2016]. Cependant, ces interfaces nécessitent des métaphores d'interaction et ne permettent pas un vrai retour d'effort. Elles ne seront pas décrites ici.

Dans la pratique, on distingue deux types de 'gants' à retour d'effort :

- Les exosquelettes haptiques qui sont attachés aux différentes phalanges des doigts. Ils permettent de mesurer la configuration complète de la main et d'appliquer un retour d'effort sur l'ensemble du doigt, au prix d'une grande complexité mécanique et d'une adaptation nécessaire à la taille de la main de chaque utilisateur.
- Les interfaces dextres à retour d'effort au bout des doigts. Ces dispositifs se concentrent sur la mesure de la configuration et le retour d'effort sur les phalanges distales uniquement, ce qui permet de simplifier leur conception et de les rendre plus universels. En contrepartie, ils ne permettent pas de bloquer directement les phalanges proximales et intermédiaires et ne sont pas adaptées à la simulation des prises de puissance.

Il existe de nombreuses interfaces de ces deux types. Nous n'en présenterons que quelques-unes. Pour un état de l'art plus complet, on pourra se reporter à [Foumashi et al. 2011] ou [Heo et al. 2012].

3.3.2. Les exosquelettes haptiques

Ces exosquelettes permettent un retour d'effort sur chacune des phalanges de l'utilisateur, sur un ou plusieurs doigts, ce qui autorise la simulation d'une multitude d'actions différentes. Ces interfaces peuvent ainsi simuler à la fois des manipulations fines et en force. Ces capacités sont toutefois obtenues au prix d'une grande complexité mécanique qui peut conduire à un poids et un encombrement importants qui nuisent alors à l'expérience ressentie par l'utilisateur. Cette complexité peut également nuire à la transparence de ces interfaces, ce qui est critique dans le cadre de manipulations fines. En effet, pour un fonctionnement optimal, l'utilisateur doit pouvoir faire abstraction de l'interface et se concentrer sur la tâche à réaliser.

Les premiers exosquelettes haptiques ont été développés pour permettre de commander des mains robotiques de façon plus naturelle et plus facile qu'avec des interfaces de télé-opération 'à poignée'. Les exosquelettes LRP Dextrous Hand Master [Turki et Coiffet 1995] et Sensor Glove 2.1 [Nishino et al. 1997] sont parmi les premiers gants à 5 doigts. Le premier possède quatorze degrés de liberté (trois pour chaque doigt et deux pour le pouce). Des mécanismes parallèles relient les phalanges entre elles. Les segments sont actionnés par un ensemble de câbles afin de déporter les moteurs à distance. Le second comporte vingt-et-un degrés de liberté et utilise des jauges de contraintes pour mesurer l'effort produit par l'utilisateur. Il peut appliquer un effort maximal de 1.5N suivant la normale au doigt. Les moteurs sont par contre fixés sur la paume, ce qui le rend lourd et encombrant. Les deux possèdent un espace de travail proche de celui de la main.

Plus récents, les exosquelettes à cinq doigts développés par l'université de Delft se basent sur un robot avec trois modules fixés séparément sur chaque phalange et glissant les uns par rapport aux autres [Lelieveld et al. 2006]. L'étude A utilise un retour d'effort couplé sur les phalanges d'un même doigt alors que l'étude B peut appliquer une force de 2N sur chacune des parties du doigt indépendamment. Afin d'alléger le système, les moteurs sont déportés sur chacune des interfaces. La cinématique couplée de l'étude A la rend sensible aux frottements, la force de friction allant jusqu'à 3.87N. Ces systèmes possèdent une résolution articulaire de 0.02° et 0.12° respectivement.

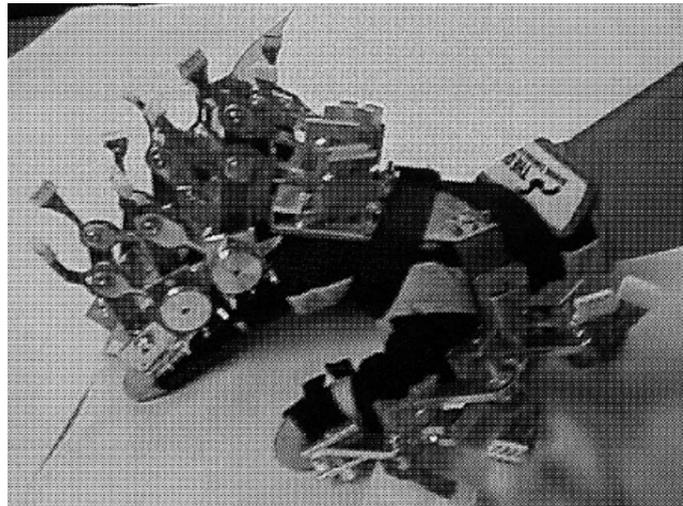
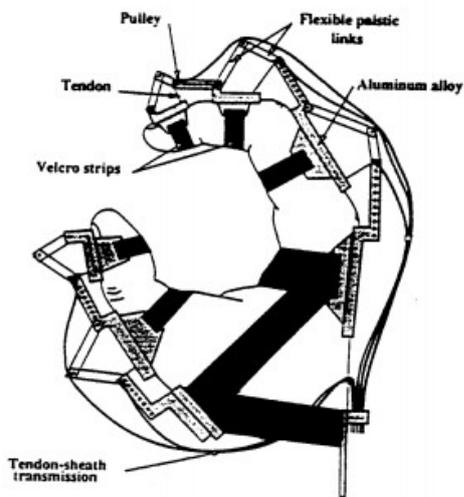


Figure 2.19 : Exosquelettes LRP Dextrous Hand Master (gauche, schéma de principe) et Sensor Glove 2.1 (droite).

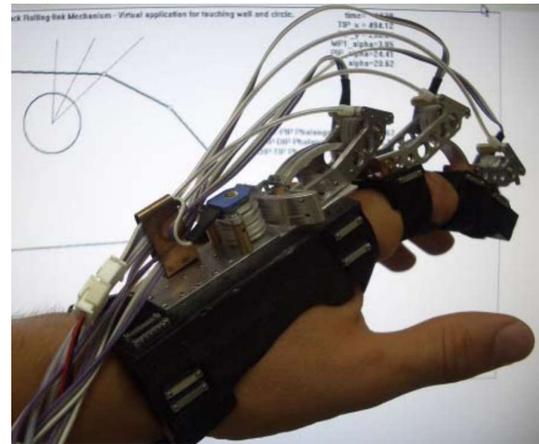
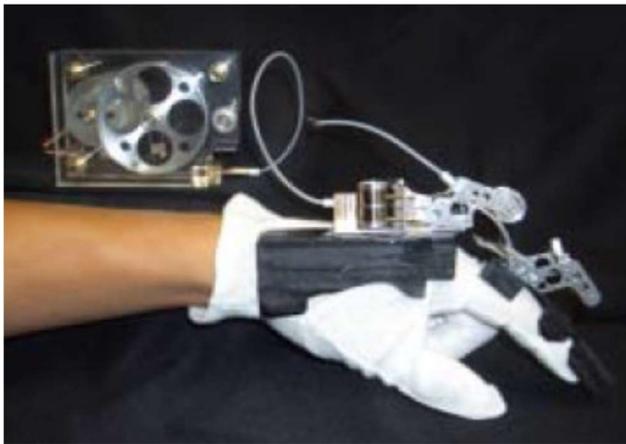


Figure 2.20 : Exosquelettes de l'université de Delft. Etude A (gauche) et Etude B (droite) [Lelieveld et al. 2006].

On notera que la plupart de ces gants restent des prototypes de laboratoire. Le seul système commercialisé est le gant Cybergrasp [Aiple et Schiele 2013]. Cette interface propose un retour d'effort couplé sur les deux dernières phalanges des cinq doigts. Il est couplé à un gant de données équipé de jauges de contrainte pour acquérir la position des doigts. Son espace de travail est quasiment égal à celui des doigts. Ce système peut appliquer une force allant jusqu'à 12N et sa raideur peut atteindre 50N/mm selon la configuration. Pour que le gant reste léger, l'actionnement est déporté dans un bloc moteur relié au gant par des câbles passant dans des gaines, ce qui introduit des frottements importants. Par ailleurs ce dispositif ne permet qu'un retour d'effort normal au doigt.

Se basant sur un actionnement à partir de vérins pneumatiques, l'exosquelette ExoHand de FESTO [FESTO 2014] possède également un retour d'effort couplé sur l'ensemble des phalanges des doigts.



Figure 2.21 : Gants Cybergrasp (gauche) et FESTO ExoHand (droite).

L'ensemble de ces exosquelettes comporte une structure complexe pour générer un retour d'effort, soit indépendant soit couplé, sur l'ensemble des phalanges des doigts. Ce principe a l'avantage de permettre la simulation de prises de force et de précision, mais cela implique une structure complexe avec de nombreuses pièces mécaniques. Ils possèdent pour la plupart une transparence faible à cause des nombreux frottements de leur cinématique. Le retour d'effort est donc complet mais peu réaliste.

3.3.3. Les interfaces dextres à retour d'effort au bout des doigts

L'étude des interactions dextres nous a permis de conclure que les zones de la main où il est le plus intéressant de faire un retour haptique sont les phalanges distales et le côté extérieur de l'index. On ne s'étonnera donc pas qu'il existe aussi dans la littérature de nombreuses interfaces dextres autorisant un retour d'effort seulement sur le bout des doigts. En comparaison des gants exosquelettes qui sont plus complexes pour un gain de ressenti mineur, ces interfaces ont l'intérêt d'avoir une structure mécanique plus simple, ce qui permet d'en diminuer les frottements.

Parmi les premières interfaces de ce type, on trouve l'interface Rutgers Master II qui permet un retour d'effort sur les phalanges distales de quatre doigts [Bouzit et al. 2002]. L'actionnement se base sur des vérins pneumatiques placés au creux de la main, ce qui permet une cinématique et un montage simples, mais a l'inconvénient de réduire grandement l'espace de travail des doigts (la fermeture de la main est limitée à 55%). Cette interface peut générer une force allant jusqu'à 16N avec une raideur de 8N/mm. Sa cinématique simple et le faible nombre de pièces mécaniques permettent d'avoir un faible poids de 80 g, actionneurs inclus mais sans tenir compte des compresseurs qui sont déportés.

Une autre interface à retour d'effort au bout des doigts est le gant WHIPFI [Gosselin et al. 2005]. C'est une interface à deux doigts (pouce – index) conçue pour des manipulations fines. Il est composé de deux robots indépendants à six degrés de liberté dont trois motorisés. Chacun de ces robots est fixé à la phalange distale d'un doigt. Il permet un retour d'effort de 0.8N en continu et 4.7N en crête dans toutes les directions. Seuls les systèmes d'attache limitent l'espace de travail des doigts. Sa raideur apparente est de 0.9N/mm et sa masse est d'environ 1kg.

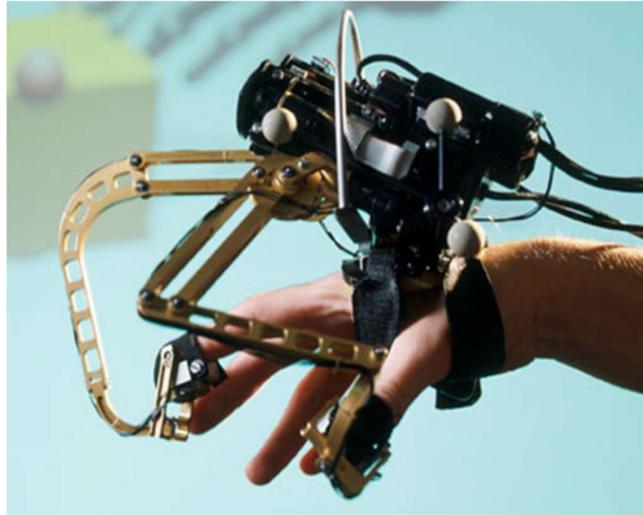


Figure 2.22 : Interfaces à quatre doigts Rutgers Master II (gauche) et à deux doigts WHIPFI (droite).

L'interface PERCRO Pure Form [Frisoli et al. 2007] est également un système permettant un retour d'effort sur le pouce et l'index. Sa cinématique est proche de celle du WHIPFI hormis le fait que les robots ne sont pas fixés sur la paume de la main mais sur l'avant-bras. Sa capacité en effort est de 4N en continu et de 25N en crête dans toutes les directions, et sa raideur apparente est d'environ 5.9N/mm.

Le gant à deux doigts PERCRO HAPTEX [Fontana et al. 2009] se base sur une cinématique différente des interfaces précédentes. Il possède trois degrés de liberté indépendants, tous motorisés, suivant le mouvement des phalanges. Il peut générer des forces allant jusqu'à 5N et sa raideur apparente est de 1N/mm. Sa cinématique complexe le rend encombrant et son poids est de 1.1kg.

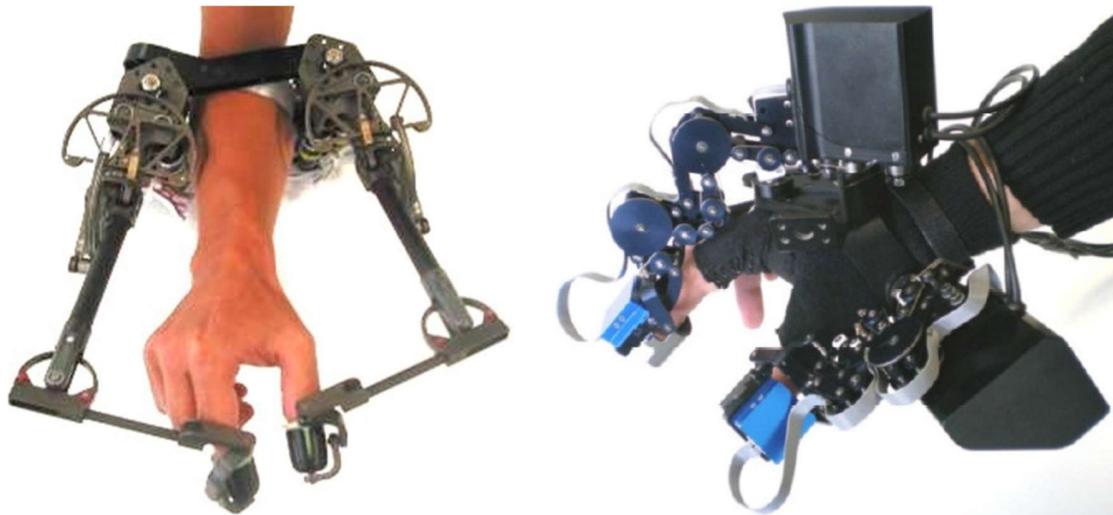


Figure 2.23 : Interfaces à deux doigts PERCRO Pure Form (gauche) et PERCRO HAPTEX (droite).

Le gant IHS10 [Gosselin 2012] propose quant à lui un retour d'effort sur trois doigts. Les phalanges distales du pouce, de l'index et du majeur sont reliées à des robots ayant cinq degrés de liberté, dont trois actionnés. Comme sur la plupart des interfaces citées précédemment, l'espace de travail n'est limité que

par les systèmes d'attache. Les moteurs sont déportés pour limiter le poids porté sur la main (il est d'environ 500g). Le retour d'effort atteint 10N en crête et sa raideur est de 5N/mm.

Le gant MANDARIN va plus loin en autorisant un retour haptique sur 4 doigts [Happich 2016]. Il utilise une structure cinématique redondante couplée pour permettre de bouger librement les doigts tout en minimisant son encombrement. Pour avoir un retour d'effort de qualité, les moteurs sont embarqués sur le robot. Pour limiter le poids (environ 500g) et l'encombrement du gant, le retour d'effort n'est appliqué que sur le mouvement de fermeture de la main (il atteint 4N en continu et 12N en crête), des dispositifs haptiques miniatures venant déformer la pulpe des doigts pour donner l'illusion d'un retour d'effort dans les autres directions.

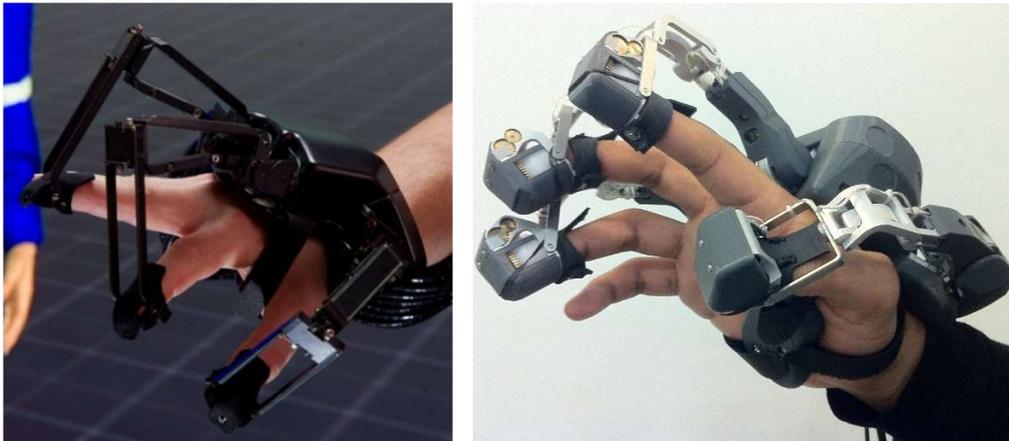


Figure 2.24 : Interfaces à trois doigts IHS10 (gauche) et à quatre doigts MANDARIN (droite).

L'interface Dexmo [Dexta Robotics 2016] [Gu et al. 2016] propose quant à elle un retour d'effort sur l'ensemble des phalanges distales. Cependant, pour limiter le poids et l'encombrement, ces efforts ne sont appliqués que sur le mouvement de fermeture de la main. Ainsi, ce gant ne peut pas repousser les doigts mais simplement les arrêter, les actionneurs venant bloquer mécaniquement les corps adjacents pour verrouiller les mouvements du robot (chaque module peut générer un couple de 0.3N.m). L'objectif est d'avoir une mécanique simple et peu chère pouvant être commercialisée dans le domaine grand public.

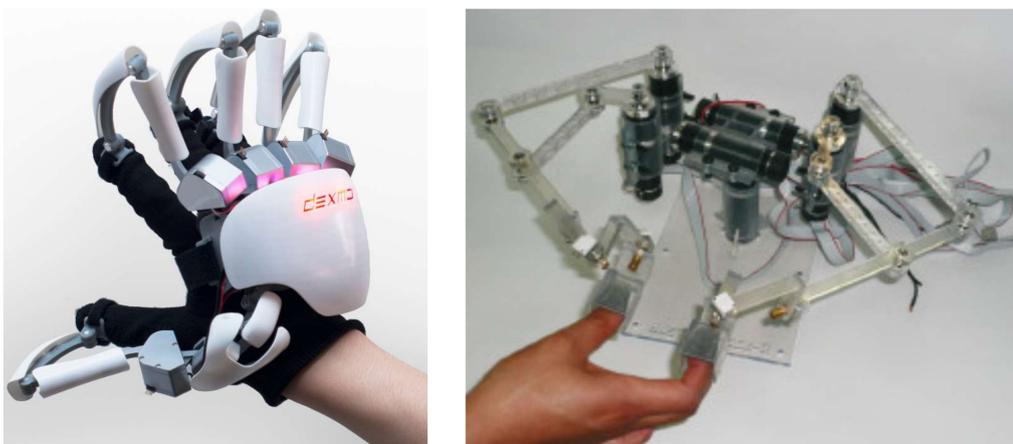


Figure 2.25 : Interface portable à cinq doigts Dexmo (gauche) et interface fixe à deux doigts Master Finger II (droite).

On voit sur ces exemples que la structure de ces interfaces, bien que plus simple que celle des exosquelettes haptiques, reste souvent lourde et encombrante, sauf à limiter le nombre de degrés de liberté motorisés comme sur le Rutgers Master II ou l'interface Dexmo ou à combiner retour d'effort et retour haptique comme sur le gant MANDARIN. Cela a conduit d'autres auteurs à proposer des solutions où l'utilisateur n'a pas à porter l'interface.

L'interface Master Finger II [Monroy et al. 2008] est par exemple constituée de deux modules (un par doigt) qui ne sont pas fixés sur l'utilisateur mais sur un plan de travail. Ainsi, l'utilisateur n'a pas à en supporter le poids mais le mouvement des mains est limité. Chaque module a six degrés de liberté dont trois motorisés, ce qui permet un retour d'effort dans toutes les directions sur deux doigts dans sa version la plus simple, sachant que sa conception modulaire permet également de concevoir une interface à trois ou quatre doigts voire deux mains [Giachristis et al. 2009].

Le bras HIRO III [Endo et al. 2011] est une autre interface de ce type. Elle ressemble à une main robotique placée en opposition de la main de l'utilisateur et connectée à ses phalanges distales. Elle n'est pas portée par l'utilisateur mais par un bras robotique, ce qui permet d'avoir un espace de travail conséquent sans avoir de charge sur la main. Les efforts fournis par l'interface sont de 3.6N et sa raideur maximale est de 5N/mm.

Les interfaces haptiques SPIDAR [Sato 2002] [Walairacht et al. 2002] [Liu et al. 2014] sont une autre solution permettant de simuler une manipulation à deux mains et quatre ou cinq doigts par main. Son fonctionnement est basé sur une cage supportant des moteurs tirant sur des câbles attachés aux capsules fixées au bout des doigts. On peut générer un retour d'effort indépendant sur chaque doigt en pilotant la tension des câbles. L'espace de travail est limité par la taille de la cage.

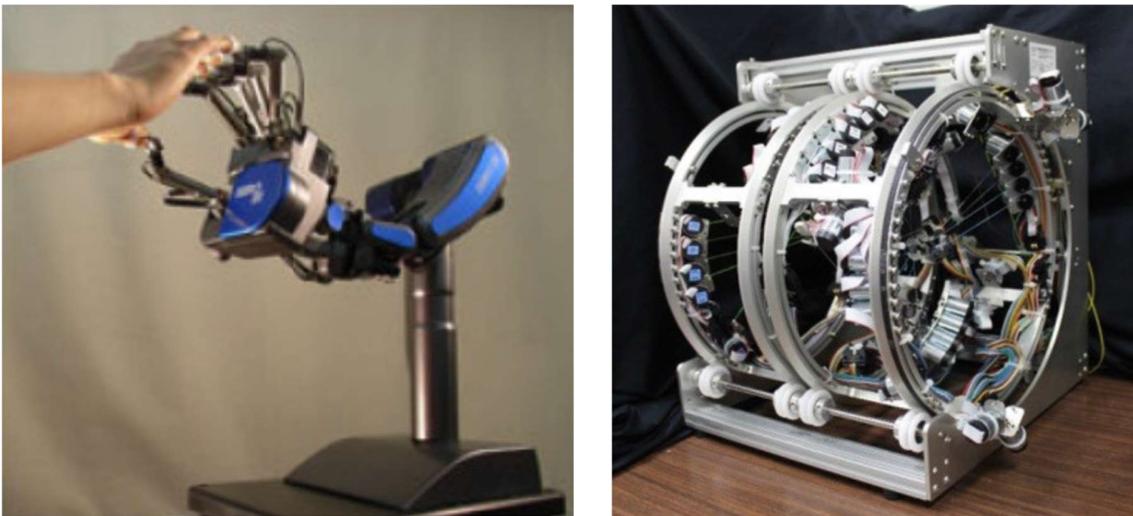


Figure 2.26 : Interfaces à cinq doigts HIRO III (gauche) et SPIDAR-10 (interface bi manuelle, droite).

3.4. CONCLUSION SUR LE RETOUR D'EFFORT

Les exosquelettes haptiques proposent un retour d'effort sur plusieurs phalanges des doigts, afin de pouvoir simuler à la fois des prises de précision et en force. Ils possèdent un grand nombre de pièces, ce qui engendre une mécanique complexe, des frottements élevés et un encombrement important. Dans le

cadre de manipulations fines, il est possible d'avoir une simulation réaliste avec des interfaces ayant un retour d'effort uniquement sur les phalanges distales. Cela permet de diminuer la complexité du système. Nous favoriserons donc l'emploi de ce type d'interface. Parmi les dispositifs haptiques existants, beaucoup sont équipés de bras robotiques indépendants pour chaque doigt, ayant pour la plupart six degrés de liberté dont trois motorisés. Pour des raisons de simplicité, beaucoup se limitent à une interface à deux doigts. Nous dirigerons notre étude vers ce genre de solution.

4. LES INTERFACES À CONTACTS INTERMITTENTS

4.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La plupart des interfaces haptiques existantes viennent se fixer sur le bras, la main ou les doigts de l'utilisateur qui ressent donc un contact résiduel même si aucun objet virtuel n'est en contact avec son avatar. Ce contact peut altérer les sensations de l'utilisateur et diminuer sa sensibilité. Il sera moins à même de distinguer s'il a touché un élément de l'environnement virtuel ou non puisqu'il touche en permanence un élément réel. Par ailleurs, si l'interface est attachée en permanence à l'utilisateur, il faut qu'elle soit très transparente, ce qui impose des contraintes de conception supplémentaires.

C'est pour contourner ces contraintes que les interfaces à contacts intermittents ont été développées. Le principe de base est de déconnecter l'utilisateur de l'interface quand son avatar se trouve en espace libre dans l'environnement virtuel, et de ne venir à son contact que quand ce dernier touche un objet virtuel. Ainsi, on peut appliquer un retour d'effort au contact de l'environnement tout en garantissant l'absence totale de contrainte extérieure (c'est-à-dire une transparence parfaite) s'il n'y a aucun contact avec les objets de l'environnement virtuel.

Comme l'illustre la figure suivante, il existe deux types de dispositifs à contacts intermittents :

- Les interfaces 'encountered-type', comme par exemple celle proposée par [Tachi et al. 1994], restent en permanence sur une surface représentative de celle de l'environnement virtuel (a). Elles se déplacent sur cette surface pour rester en son point le plus proche de l'utilisateur, en particulier lorsque le doigt s'en approche (b). Ainsi, lorsque son avatar atteint la surface virtuelle, l'utilisateur entre en contact avec le robot (c). On notera que pour que le contact soit réaliste, il faut que l'effecteur du robot ait une forme qui ressemble à celle des objets de l'environnement virtuel. Pour permettre différents types d'interactions, l'effecteur proposé par [Tachi et al. 1994] comporte différentes formes élémentaires comme des arrêtes ou des coins. [Hirota et Hirose 1995] ou [Bordegoni et al. 2010] vont plus loin en proposant une surface reconfigurable en fonction de la forme des objets virtuels. La variabilité des objets simulables est cependant limitée et on ne peut pas envisager des interactions génériques. Par ailleurs lorsque l'on simule des objets concaves, par exemple pour des tâches de type 'peg-in-hole', le robot peut être amené à faire de grands mouvements si l'utilisateur passe d'un côté à l'autre du trou, ce qui peut poser des problèmes de sécurité. Enfin si l'on a une interaction à plusieurs doigts, les différents robots peuvent entrer en collision entre eux. Dans ces conditions, ce genre de systèmes paraît difficilement adaptable à une interface dextre et ne peut pas être intégré à un gant à retour d'effort.

- Les interfaces 'encounter-type', introduites par [Yoshikawa et Nagura 1997] et [Yoshikawa et Nagura 1999], suivent au contraire en permanence le doigt de l'utilisateur sans rester sur la surface de l'objet virtuel (d). Ce suivi est effectué à distance. Pour cela, on utilise en général un effecteur creux muni de capteurs permettant de mesurer la position du doigt par rapport à celui-ci. Lorsque son avatar s'approche de l'environnement virtuel, l'effecteur s'arrête à sa surface (e). Si l'utilisateur continue à s'en approcher, il finit par entrer en contact avec le robot (f). Avec ce principe, la dynamique du robot est limitée à celle des doigts, qui se déplacent à vitesse relativement faible dans la plupart des tâches simulées en environnement virtuel. Par ailleurs, pour une interface multi digitale, les différents robots, tout comme les doigts, restent proches les uns des autres sans risque de collision (sauf si les doigts se croisent). Cette solution paraît donc plus adaptée et sera favorisée ici.

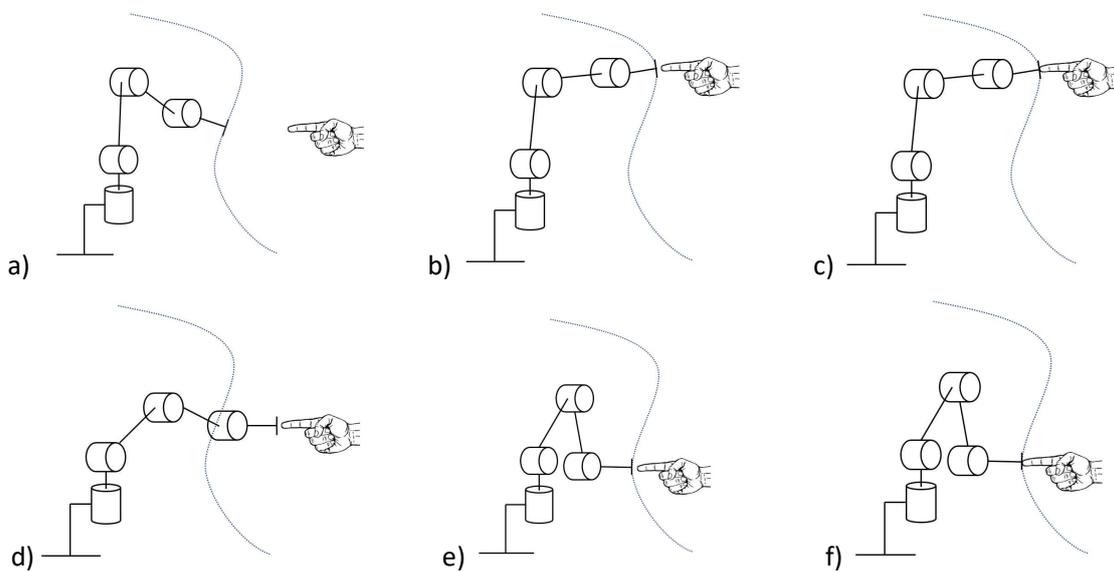


Figure 2.27 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement des interfaces 'encountered-type' (a, b, c) et 'encounter-type' (d, e, f).

4.2. ÉTAT DE L'ART DES INTERFACES À CONTACTS INTERMITTENTS

Au vu de l'analyse précédente, nous ne parlerons ici que des interfaces à contacts intermittents de type 'encounter-type'. Ces interfaces possèdent des avantages triviaux par rapport aux interfaces haptiques classiques. Le toucher est plus naturel puisqu'il sollicite les capteurs tactiles de la même manière que lors d'une interaction réelle. Il n'est donc pas étonnant de trouver de nombreux dispositifs utilisant ce principe.

Un premier exemple d'interface à contacts intermittents est le Touch Thimble [Kuchenbecker et al. 2008]. Cette interface fixe ne permet un retour d'effort que sur un seul doigt, ce qui limite son utilisation à des tâches d'exploration et exclut les tâches de manipulation. Elle relie un bras PHANTOM [Massie et Salisbury 1994] au doigt à l'aide d'une capsule composée d'un anneau fixé sur le doigt et de ressorts. La raideur de ces derniers suffit pour que le doigt entraîne le dispositif, mais elle reste faible par rapport à la raideur de l'environnement simulé. Lors d'un contact, l'utilisateur vient les déformer pour toucher le reste de la capsule. Si le rendu est amélioré par rapport à un bras PHANTOM classique, l'utilisation d'un anneau intermédiaire ne permet pas une transparence totale en espace libre.

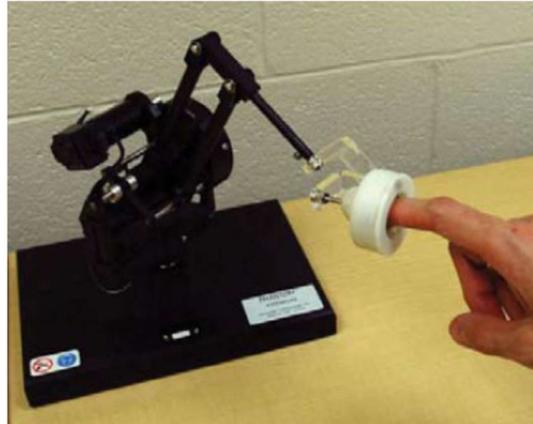


Figure 2.28 : Interface Touch Thimble.

L'université de Pise a conçu plusieurs prototypes utilisant des solutions similaires, comme par exemple l'interface PERCRO PRESENCIA [Solazzi et al. 2007] qui est composée d'un bras parallèle à trois degrés de liberté, relié à la phalange médiane, et d'un dispositif permettant de déplacer et d'orienter une plaque en face de la phalange distale pour simuler la présence d'un objet virtuel. Il est ainsi possible de simuler des surfaces ayant un grand rayon de courbure. Les auteurs ont amélioré ce principe en proposant une interface à deux doigts, toujours à base fixe, PERCRO PRESENCIA 2 [Solazzi et al. 2010]. Le principe reste le même. Les bras robotiques sont fixés sur les phalanges médianes et un dispositif vient stimuler les phalanges distales. Elle peut restituer un effort de 1.97N en continu et 6.7N en crête. Si ces interfaces permettent un retour d'effort à contacts intermittents sur le bout du ou des doigts, elles souffrent du même défaut que le Touch Thimble, à savoir qu'elles utilisent un anneau fixé sur une autre partie du doigt pour assurer le suivi des mouvements de la main. Dans ces conditions leur transparence est limitée en espace libre.

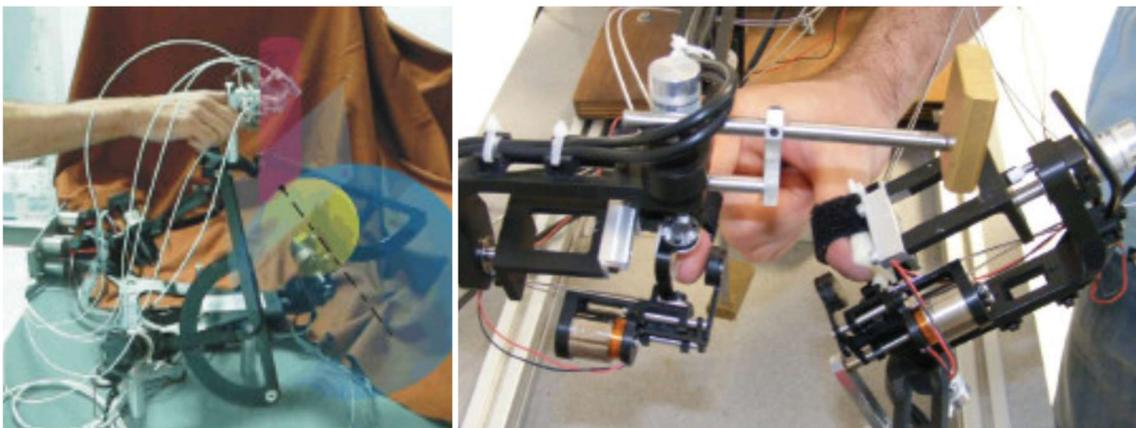


Figure 2.29 : Interfaces PERCRO PRESENCIA (gauche) et PERCRO PRESENCIA 2 (droite).

D'autres interfaces haptiques de ce type ont été développées sous la forme de gant à retour d'effort à contacts intermittents comme l'interface de l'Université de Tokyo [Nakagawara et al. 2005] [Sato et al. 2007] et l'interface du DLR/HIT [Fang et al. 2009]. Ces dispositifs plus complexes se basent sur les flexions couplées des doigts pour diminuer le nombre de moteurs nécessaires au retour d'effort. L'interface de l'Université de Tokyo est une interface portée sur le dos de la main, à cinq doigts. Chaque système pour un doigt est constitué de trois modules déplacés les uns par rapport aux autres au moyen de crémaillères.

Un seul degré de liberté par doigt est actionné. Chaque système suit à distance les mouvements du doigt auquel il est associé, en captant les déplacements relatifs du robot par rapport au doigt à l'aide d'une plaque réfléchissante plaquée sur l'ongle au moyen d'un ressort de faible raideur. L'interface du DLR/HIT fonctionne sur un principe similaire. Elle est constituée de trois modules liés les uns aux autres par un mécanisme parallèle. Un seul moteur permet de gérer le déplacement du système pour chaque doigt et de restituer un effort à l'utilisateur. Les mouvements des phalanges distales sont déduits des déplacements d'une plaque métallique reposant sur l'ongle. Il est capable de restituer un effort allant jusqu'à 8N. Dans les deux cas, la présence d'un contact résiduel avec l'ongle pour mesurer la position du doigt par rapport au robot ne permet pas une transparence parfaite.

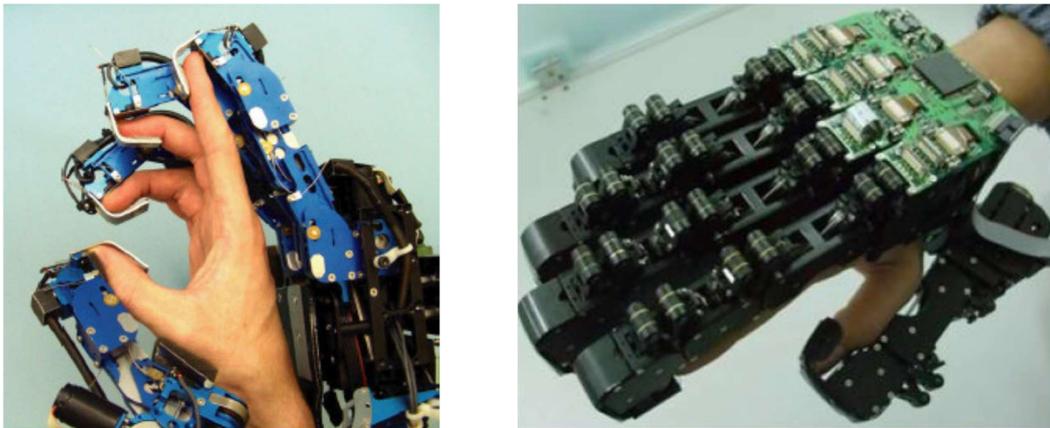


Figure 2.30 : Interfaces dextres de l'Université de Tokyo (gauche) et du DLR/HIT (droite).

Au contraire, l'interface du CEA et de l'ISIR [Gonzalez et al. 2015] reprend les principes proposés par [Yoshikawa et Nagura 1997] tout en améliorant la précision des mesures et la fréquence d'acquisition. Elle utilise un effecteur creux équipé de capteurs de distance infrarouges pour traquer l'extrémité d'un doigt dans un plan sans aucun contact avec ce dernier en espace libre. Elle permet aussi d'appliquer un retour d'effort, mais seulement quand cela est nécessaire. Son principal avantage par rapport aux autres interfaces présentées dans ce paragraphe est qu'il n'y a aucun contact, même résiduel, entre l'interface et l'utilisateur en espace libre. Sa principale limitation provient du fait qu'elle ne permet de traquer qu'un doigt, ce qui limite comme pour le Touch Thimble son utilisation à des tâches d'exploration et exclut les tâches de manipulation. Par ailleurs ce robot ne peut se déplacer que dans un plan.



Figure 2.31 : Interface à contacts intermittents du CEA et de l'ISIR (gauche). Zoom sur l'effecteur (droite)

4.3. CONCLUSION SUR LE CONTACT INTERMITTENT

Les interfaces à contacts intermittents proposent de déconnecter l'utilisateur de l'interface quand son avatar se trouve en espace libre dans l'environnement virtuel, et de ne venir à son contact que quand ce dernier touche un objet virtuel. Elles présentent en théorie l'avantage de permettre une transparence parfaite en espace libre.

Beaucoup d'interfaces développées pour répondre à ce principe gardent cependant un contact résiduel plus ou moins important avec le doigt pendant les phases de déplacement en espace libre [Nakagawara et al. 2005] [Sato et al. 2007] [Solazzi et al. 2007] [Kuchenbecker et al. 2008] [Fang et al. 2009] [Solazzi et al. 2010]. Sur certaines, le doigt est rattaché à l'interface via sa phalange médiane. Sur d'autres, une pièce mécanique venant appuyer sur l'ongle est nécessaire pour mesurer les mouvements des doigts. Dans les deux cas l'utilisateur ressent la présence de l'interface fixée à son doigt ou à proximité, ce qui n'est pas naturel, même si ces interfaces conservent l'avantage de libérer les capteurs tactiles de la phalange distale des stimuli parasites.

Les prototypes n'ayant aucun contact résiduel avec l'utilisateur, bien que théoriquement meilleurs, sont quant à eux limités à un doigt [Yoshikawa et Nagura 1997] [Yoshikawa et Nagura 1999] [Gonzalez et al. 2015].

Nous décidons de reprendre ce principe et de l'étendre à un dispositif intégrable à un gant à retour d'effort. On remarquera que les interfaces à contacts intermittents de type gant n'utilisent qu'un seul moteur par doigt, ce qui signifie qu'elles peuvent suivre le doigt seulement lors de la flexion simultanée de l'ensemble des articulations. Il n'est donc pas possible à l'utilisateur de fléchir seulement la première phalange ou d'écartier les doigts (mouvement d'abduction). Elles contraignent ainsi la liberté de mouvements de l'utilisateur, ne le laissant pas reproduire des gestes naturels. Pour éviter ces limitations, nous nous intéresserons à un robot permettant de suivre les doigts dans tous leurs mouvements. Compte tenu de la complexité de cette tâche, nous nous limiterons à deux doigts.

5. RETOUR D'EFFORT AUGMENTÉ : LA DÉFORMATION DE LA PULPE

5.1. INTRODUCTION

Nous avons vu précédemment qu'il est intéressant, en plus du retour d'effort qui permet de stimuler notre sens kinesthésique, de simuler les déformations locales de la pulpe des doigts pour transmettre d'autres informations à l'utilisateur. Dans le monde réel, ce phénomène, qui stimule nos capteurs tactiles, correspond à l'adaptation de la peau à la forme locale des objets. Il existe différentes méthodes pour le simuler. On peut les classer en deux catégories :

- On peut soit déformer physiquement la peau dans les mêmes proportions que lors de contacts avec des objets réels. On notera que ces déformations peuvent être globales, localisées ou encore réparties sur la pulpe du doigt.
- On peut également jouer sur des illusions haptiques pour donner l'impression à l'utilisateur qu'on déforme la pulpe du doigt sans le faire réellement.

Nous allons présenter ci-dessous quelques exemples d'interfaces appartenant à chacune de ces catégories, sans chercher toutefois à être exhaustifs.

5.2. DÉFORMATIONS RÉELLES DE LA PULPE DU DOIGT

5.2.1. Déformation globale de la pulpe du doigt

Plusieurs interfaces comme le dispositif de l'université de Pise [Solazzi et al. 2007] que nous avons vu précédemment, l'interface de [Chinello et al. 2015] ou encore [Prattichizzo et al. 2013], proposent de déformer globalement la pulpe à l'aide d'un plan inclinable. Ces dispositifs permettent de simuler toutes les orientations possibles d'une surface virtuelle en contrôlant les deux angles d'inclinaison d'une pièce mobile plane. En outre, ils permettent aussi de contrôler la pression de cette pièce contre le doigt. Pour cela ils sont actionnés par trois moteurs.

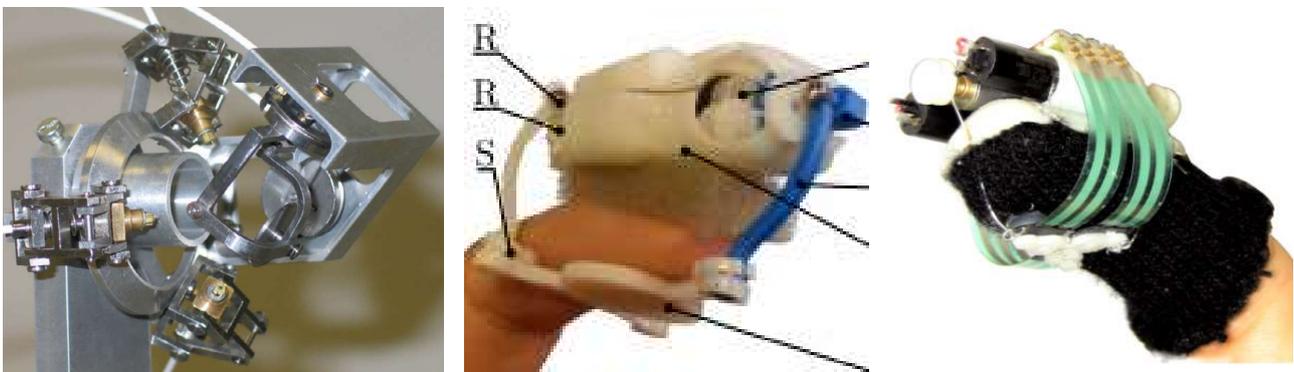


Figure 2.32 : Interfaces à plan inclinable : à gauche [Solazzi et al. 2007], au centre [Chinello et al. 2015] et à droite [Prattichizzo et al. 2013].

Ces dispositifs permettent de simuler la forme globale d'un objet, mais pas sa forme locale. Par ailleurs on ne peut simuler que des surfaces ayant un grand rayon de courbure, et cela au prix d'une grande complexité et d'un encombrement relativement important par rapport aux doigts qui permettraient difficilement d'implémenter une telle solution sur plusieurs doigts pour autoriser la manipulation dextre des objets virtuels.

5.2.2. Déformation locale de la pulpe du doigt

Il existe également des systèmes portables qui viennent déformer localement la pulpe du doigt pour simuler une arête, comme par exemple le dispositif de l'Université de Stanford [Provancher et al. 2005] ou le LinkTouch de l'Université de Technologie de Toyohashi [Tsetserukou et al. 2014]. Pour limiter la complexité de ces interfaces, l'arête simulée ne peut se déplacer que suivant un seul axe. Cela évite l'intégration d'un étage d'actionnement supplémentaire servant à orienter le mécanisme. Même ainsi, ces systèmes sont souvent encombrants et nécessitent l'implantation de 2 à 3 DDLs motorisés supplémentaires par doigt. Comme précédemment, il paraît difficile de les intégrer sur un gant à retour d'effort.



Figure 2.33 : Interface de l'université de Stanford (gauche) et LinkTouch (droite).

5.2.3. Déformations réparties de la pulpe du doigt

D'autres interfaces se basent sur une matrice tactile comme la souris augmentée Mouse KAT [Kyung et al. 2006], le dispositif VITAL [Benali-Khoudja et al. 2007] ou le module tactile de l'IIT [Sarakoglou et al. 2012]. Ces dispositifs utilisent tous une matrice de taxels (ou pixels tactiles) ayant un mouvement vertical permettant de produire différents motifs sur le doigt. Pour la conception de ce type d'interfaces, il est important de connaître la sensibilité du doigt humain afin d'en déduire la densité nécessaire d'actionneurs. L'étude [Garcia-Hernandez et al. 2011] permet de guider la création d'un dispositif se basant sur ce principe.

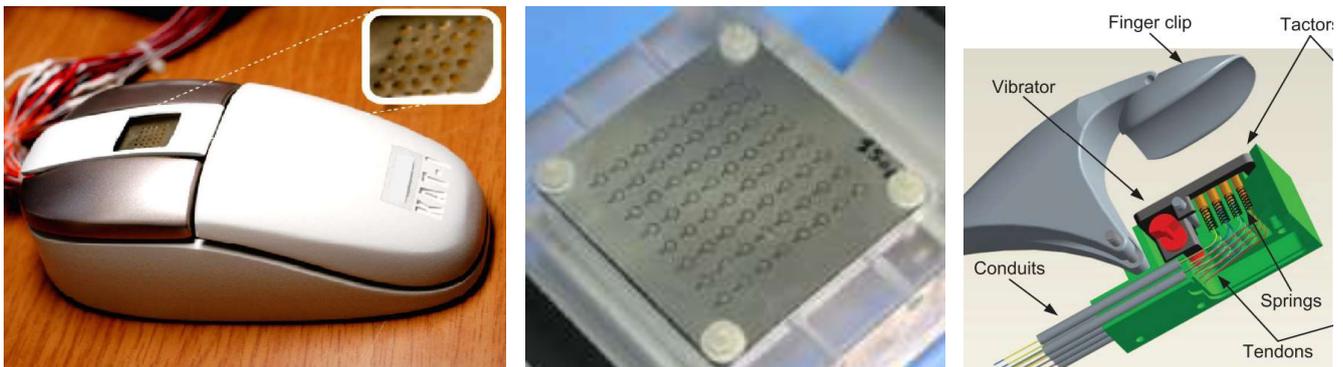


Figure 2.34 : Interfaces à matrice tactile Mouse KAT (gauche), VITAL (centre) et proposée par l'IIT (droite).

Du fait qu'il soit nécessaire d'avoir un actionneur par taxel, l'encombrement des interfaces proposant une matrice de déformation de la pulpe est conséquent. De ce fait, il est difficile d'intégrer ce genre de technologie à un gant à retour d'effort. De plus même si les utilisateurs sont capables de distinguer et d'interpréter les informations transmises par ces interfaces, les stimuli ne sont pas naturels.

5.3. UTILISATION D'ILLUSIONS HAPTQUES

Une autre solution pour donner l'impression à l'utilisateur qu'on vient déformer la pulpe du doigt est d'utiliser une illusion haptique. L'une des illusions les plus connues est celle du Fishbone [Nakatani et al. 2006]. Elle utilise une pièce en plastique ayant la forme d'une arête de poisson. En suivant avec l'extrémité du doigt l'arête principale, on a l'impression que celle-ci est plus basse que les arêtes latérales alors qu'elles sont toutes à la même hauteur. L'illusion peut aussi être obtenue avec plusieurs surfaces vibrantes

[Nakatani et al. 2008]. En stimulant les côtés du doigt, on perçoit une arête creuse, alors qu'en stimulant le centre, on a l'illusion de parcourir une arête saillante. Dans tous les cas Le but est d'utiliser des stimuli différents, souvent plus simples, mais qui sont interprétés comme les arêtes d'un objet par le cerveau.

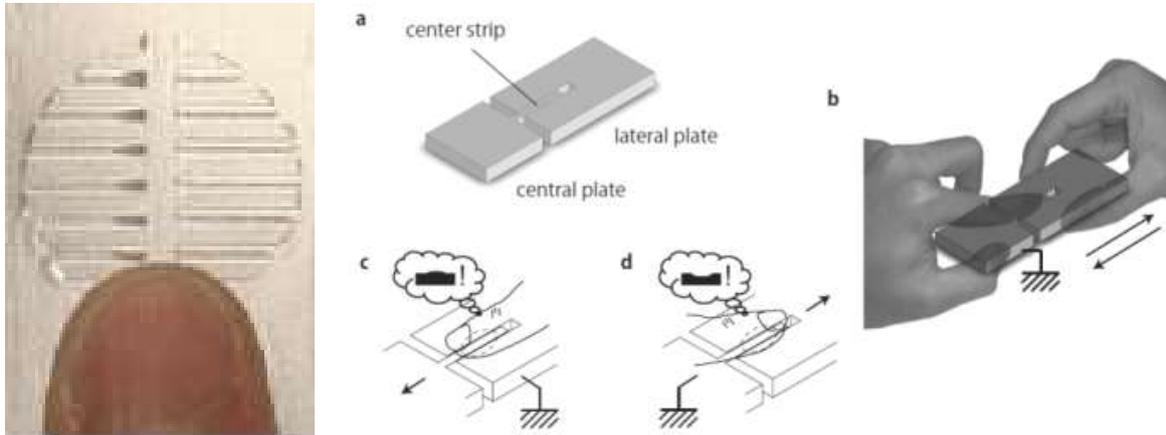


Figure 2.35 : Exemples d'illusions haptiques de type Fishbone.

Un récapitulatif des différentes illusions haptiques est fait par [Hayward 2008]. Cette approche a l'avantage d'être plus simple à réaliser techniquement que si l'on devait déformer réellement la pulpe du doigt. Elle nécessite cependant de trouver des illusions adaptées à chacun des phénomènes que l'on souhaite simuler. Il conviendrait par ailleurs de vérifier que ces illusions, souvent testées en laboratoire lors de tâches dédiées relativement simples, marchent toujours quand on réalise des tâches réelles plus complexes pendant lesquelles on ne se concentre pas spécialement sur ces illusions.

5.4. CONCLUSION SUR LA DÉFORMATION LOCALE DE LA PULPE

Nous avons pu voir dans un premier temps que l'on peut réellement déformer la pulpe des doigts. Cela requiert cependant l'ajout de nombreux degrés de liberté à notre système pour simuler par exemple de façon réaliste une surface ou une arête virtuelle. Cela aurait pour inconvénient d'augmenter grandement la complexité, l'encombrement et le poids de notre interface.

Dans un second temps, nous avons abordé les illusions haptiques qui permettent par exemple de simuler une arête dont l'orientation est fixe avec un seul degré de liberté supplémentaire. Par conséquent leur utilisation impacterait moins les critères cités précédemment. Cependant, ces illusions sont uniquement possibles lors de l'exploration d'un objet virtuel. En effet si le doigt est immobile sur l'arête, l'utilisateur trouvera étrange le fait que cette dernière vibre.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en place une taxonomie du toucher qui est un phénomène complexe faisant intervenir différents types de sollicitations de la peau et du derme. Nous avons ensuite vu que s'il existe des interfaces permettant de simuler chacune de ces sollicitations, aucune ne permet, dans l'état actuel de la technique, de toutes les simuler en même temps. Il est donc nécessaire de nous concentrer sur celles qui sont les plus fréquemment mises en jeu lors d'interactions avec notre environnement, à savoir la transition entre les mouvements de l'utilisateur en espace libre et ceux au contact d'un objet, les mouvements normaux et latéraux de la pulpe liés à un déplacement ou à l'application d'un effort sur cet objet, et enfin la déformation globale et locale de la pulpe.

Pour répondre à cette problématique, nous avons étudié successivement :

- Les interfaces dextres multi-digitales à retour d'effort qui permettent de bouger librement les mains et les doigts pour explorer l'environnement ou saisir et manipuler les objets alentour, le retour d'effort permettant de reproduire les déformations normales et tangentielles de la pulpe des doigts lors de ces interactions. Une analyse de l'état de l'art de ces interfaces au regard des zones de la main les plus souvent sollicitées dans ce contexte nous a permis de nous focaliser sur les interfaces à retour d'effort en bout de doigts. Au vu des cartes représentant les taux de stimulation au cours du temps des diverses zones de la main dans les différentes directions que nous avons mises en place, les zones les plus intéressantes à stimuler sont plus particulièrement les phalanges distales du pouce, de l'index, du majeur et de l'annulaire, ainsi que le côté extérieur de l'index.
- Les interfaces à contact intermittent qui permettent de simuler la transition contact-non contact. Parmi ces interfaces, nous avons vu que la technologie la plus adaptée à la conception d'interfaces dextres est celle utilisée sur les dispositifs de type 'encounter-type'. Pour permettre des interactions génériques à contact intermittent, chaque robot associé à un doigt doit avoir 6 DDLs. Dans ces conditions, cette interface ne pourra raisonnablement avoir que 2 doigts (pouce et index). Tous ses DDLs seront par contre motorisés, avec un effecteur intégrant des proximètres afin de suivre correctement les phalanges distales des doigts à distance et sans aucun contact en espace libre.
- Les interfaces permettant d'enrichir le retour haptique en autorisant la déformation globale et/ou locale de la pulpe du doigt pour améliorer le ressenti de l'utilisateur. Nous avons vu que pour cela, il est préférable, si possible, d'utiliser des illusions haptiques pour limiter la complexité de l'interface.

Une interface combinant ces trois modalités pourrait simuler de manière réaliste le toucher lors d'interactions avec un environnement virtuel. Il est cependant difficile d'aborder l'ensemble de ces problématiques dans le cadre d'une thèse. Nous avons donc décidé de nous concentrer, dans un premier temps, sur le retour d'effort et la transition entre les mouvements de l'utilisateur en espace libre et ceux au contact d'un objet, laissant l'intégration des systèmes simulant une déformation de la pulpe pour une étape future. Tout comme les autres interfaces à 6D par doigt, on se limitera à un retour d'effort sur l'index et le pouce, afin de limiter la complexité de notre système.

CHAPITRE 3.

ÉTUDE ET CONCEPTION D'UN EFFECTEUR PERMETTANT LE SUIVI D'UN DOIGT À DISTANCE

1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons étudié d'une part les zones de la main utilisées lors d'interaction dextres avec notre environnement et d'autre part les différents stimuli qu'il serait intéressant de restituer sur ces zones. Nous avons ensuite confronté ce besoin à l'état de l'art des interfaces haptiques. Nous en avons déduit qu'il serait intéressant de nous focaliser sur une interface dextre à contacts intermittents de type 'Encounter Type' à deux doigts autorisant un suivi et un retour haptique sur les phalanges distales du pouce et de l'index. Une telle interface nécessite des effecteurs adaptés. Ce chapitre est dédié à la présentation de leur étude, de leur conception, de leur prototypage et de la caractérisation de leurs performances. Une partie de ces travaux a fait l'objet de la publication suivante :

A. Chabrier, F. Gosselin, F. Gonzalez, W. Bachta, 'Design and experimental evaluation of an infrared instrumentation for haptic interfaces', Proc. IEEE Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf., Turin, Italie, 22-25 mai 2017, pp. 727-729.

2. PROBLÉMATIQUE

2.1. RÔLE DE LA CAPSULE

Nous pouvons distinguer trois phases différentes pendant l'utilisation d'une interface à retour d'effort à contacts intermittents de type 'Encounter Type' :

- Une phase de tracking, active quand l'avatar de l'utilisateur est loin de l'environnement virtuel, pendant laquelle l'effecteur doit suivre la phalange distale à distance sans la toucher.
- Une phase d'approche, déclenchée quand l'avatar de l'utilisateur s'approche suffisamment des objets alentours, pendant laquelle l'effecteur s'arrête sur la surface virtuelle en regard du doigt.
- Et enfin une phase au contact où l'utilisateur vient toucher l'effecteur qui permet d'appliquer un retour d'effort quand il appuie sur l'interface pour ressentir l'environnement virtuel.

L'effecteur a donc deux objectifs majeurs :

- Il doit permettre de suivre le doigt à distance pendant les phases de tracking. Il est important que le suivi soit fait sans aucun marqueur ou contact sur les doigts de l'utilisateur, afin que les capteurs sensoriels du derme ne soient pas sollicités tant que l'on est en espace libre. Ce n'est pas le cas sur les interfaces de [Nakagawara et al. 2005] et [Fang et al. 2009] qui utilisent des plaques

réfléchissantes en appui sur les ongles et des photo-réflecteurs pour connaître la position des doigts par rapport aux effecteurs. Avec un tel système, il y a un contact résiduel entre la phalange et l'interface, ce qui réduit les avantages du principe du contact intermittent. Au contraire, les effecteurs proposés par [Yoshikawa et Nagura 1997] et [Yoshikawa et Nagura 1999], composés de matrices de capteurs optiques tout-ou-rien permettant de détecter la présence du doigt à leur regard, autorisent un suivi sans aucun contact, même si la technologie proposée est relativement peu précise. Nous nous inspirerons de cette solution, en cherchant des capteurs plus précis et plus rapides.

- Il doit servir de surface de contact entre le robot et l'utilisateur. Il doit donc être assez solide pour autoriser un retour d'effort, dans les limites des capacités de l'interface. Il doit aussi assurer la protection des capteurs pendant les phases au contact.

D'une manière générale, le suivi du doigt à distance nécessite plusieurs composants technologiques :

- Des capteurs permettant de mesurer la configuration relative de la main et des doigts par rapport au robot, de façon suffisamment précise, rapide, et non bruitée. Ce chapitre se concentre sur la présentation du choix de ces capteurs, de la conception des capsules qui les intègrent, de leur réalisation et de la caractérisation de leurs performances.
- Un robot permettant de déplacer ces effecteurs avec une dynamique suffisante. Ce robot sera présenté dans le chapitre 4.
- Des algorithmes de commande garantissant que le robot suive la position et l'orientation du doigt. Ces algorithmes, ainsi que la caractérisation des performances de l'ensemble, seront présentés dans le chapitre 5.

2.2. APPROCHE RETENUE POUR LA MESURE DE LA CONFIGURATION DES DOIGTS

Comme le montre la figure 3.1, il existe plusieurs approches pour mesurer la configuration relative de l'utilisateur (ici de la phalange distale du pouce ou de l'index) par rapport au robot :

- On peut tout d'abord utiliser un système externe de capture de mouvement pour mesurer la configuration de la main de l'utilisateur, la position du robot étant quant à elle obtenue en utilisant les données des capteurs moteurs ou articulaires et les modèles du robot. Cette solution a l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre puisqu'elle ne nécessite pas de modifier le robot. Elle présente toutefois l'inconvénient majeur que la variable d'intérêt, à savoir la configuration relative de l'utilisateur par rapport au robot, doit être calculée en faisant la différence de ces deux informations. Dans ces conditions, les imprécisions des deux systèmes se cumulent, imprécisions qui peuvent être relativement importantes. En effet, les doigts peuvent être occultés quand ils sont à proximité du robot tandis que pour avoir une estimation précise de la configuration de l'effecteur du robot, il est nécessaire d'utiliser un modèle dynamique flexible de ce dernier [Jubien 2014], ce qui est complexe et nécessite un calculateur performant pour avoir une information à la milliseconde. En général, on fait l'hypothèse que l'on travaille à faible vitesse, et on utilise simplement les données capteurs et le Modèle Géométrique Direct, mais dans ce cas la configuration obtenue n'est pas très précise. Par ailleurs les systèmes de capture de mouvement usuels tournent à une fréquence plus faible que le contrôleur des robots, ce qui nécessite l'usage de filtres d'interpolation et/ou prédictifs pour que les deux systèmes fonctionnent correctement ensemble.

- En alternative, on peut aussi utiliser le système de tracking pour mesurer à tout instant à la fois la configuration du robot et celles des phalanges d'intérêt dans l'espace. Dans ce cas on aura en général intérêt à équiper les capsules avec des cibles permettant un meilleur suivi des effecteurs. Cette solution a l'avantage de permettre des mesures synchronisées de toutes les données. Elle présente par contre les mêmes défauts que la précédente, à savoir une précision et une fréquence de mesure limitées, sauf à utiliser des solutions haut de gamme très coûteuses, et la nécessité de calculer la variable d'intérêt à partir de deux mesures.
- On peut enfin mesurer directement la configuration relative du doigt par rapport à l'effecteur à l'aide de capteurs intégrés à ce dernier. Cette solution a l'avantage d'être potentiellement plus rapide et plus précise puisque l'on mesure directement la variable d'intérêt, avec une précision et une fréquence que l'on peut ajuster en faisant une conception dédiée. Elle présente par contre l'inconvénient de nécessiter le développement d'un système de mesure spécifique (on notera que dans ce cas, la configuration du robot est obtenue grâce à ses capteurs comme pour la première solution).

Compte tenu des avantages et inconvénients énumérés ci-dessus, nous avons choisi ici de développer une solution de mesure dédiée intégrée à la capsule.

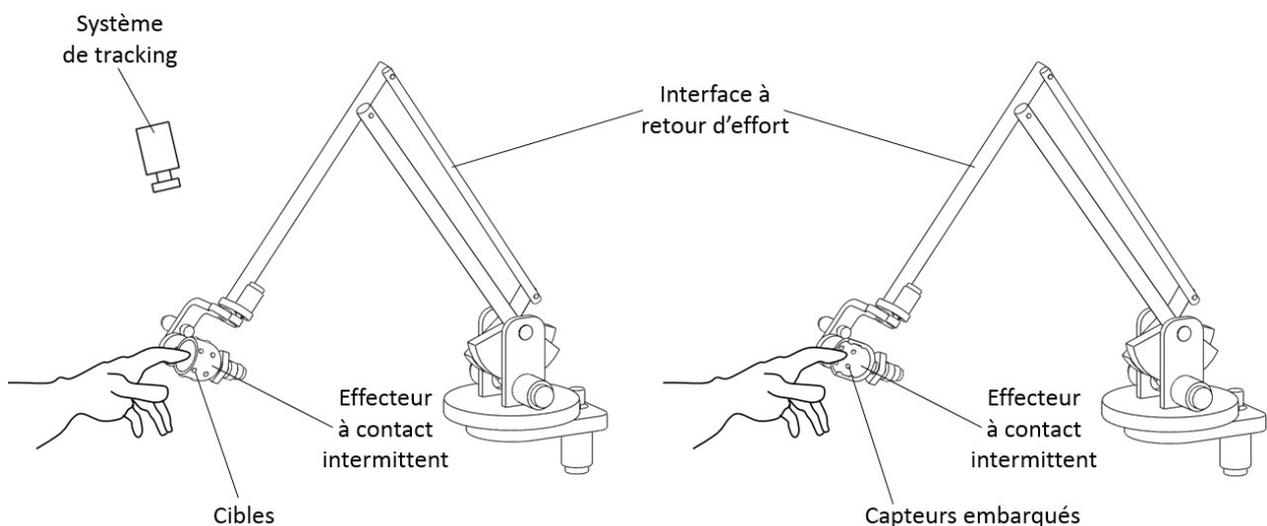


Figure 3.1 : Différentes solutions de tracking de la main de l'utilisateur.

Gauche : tracking externe absolu de la configuration du robot et de la main.

Droite : Tracking interne à la capsule de la configuration relative de la main par rapport au robot.

2.3. ARCHITECTURE DE L'INTERFACE

Une interface à contacts intermittents doit pouvoir suivre à distance tous les mouvements de l'utilisateur, et plus particulièrement les mouvements des zones du corps susceptibles d'entrer en contact avec elle lors des phases au contact. Ici, on s'intéresse plus particulièrement aux interactions manuelles faisant intervenir le pouce et l'index et les zones d'intérêt associées sont les phalanges distales de ces deux doigts. Le système de mesure doit donc être capable d'acquérir la position et l'orientation de ces zones quels que soient leurs mouvements.

Comme le montre la figure 3.2, on distingue globalement deux approches pour réaliser un tel système :

- On peut soit utiliser une structure 'externe' venant suivre directement les mouvements des extrémités des doigts dans l'espace. On utilisera par exemple deux robots indépendants intégrant chacun une capsule destinée à mesurer les mouvements de l'extrémité d'un doigt.
- On peut aussi utiliser une structure arborescente anthropomorphe comprenant un étage venant suivre les mouvements de la paume et deux dispositifs locaux venant suivre chacun les mouvements d'un doigt par rapport à la paume.

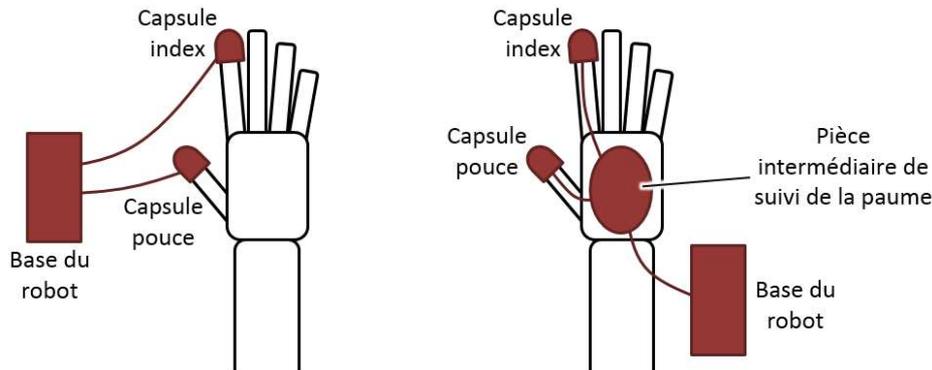


Figure 3.2 : Différentes architectures d'interfaces à contacts intermittents sur le pouce et l'index.
Gauche : structure externe. Droite : structure anthropomorphe.

La première solution est plus simple mécaniquement puisque chaque robot n'a à prendre en compte qu'un effecteur. Elle nécessite par contre le suivi de mouvements plus dynamiques que la seconde. Dans le premier cas en effet, le système de tracking et de suivi des doigts devra pouvoir suivre la dynamique des doigts lors de mouvements absolus dans l'espace, ce qui met en jeu des vitesses pouvant atteindre 1.86m/s (en excluant les gestes sportifs et en se limitant à des mouvements à vitesse réduite tels que ceux effectués dans des environnements de réalité virtuelle). Dans le second cas, il suffira que chaque dispositif local puisse suivre la dynamique des doigts par rapport à la paume. Les vitesses maximales sont alors limitées à environ 0.21m/s en flexion et 0.62m/s en abduction/adduction pour le pouce et 0.26m/s en abduction/adduction et 1.26m/s en flexion/extension pour l'index [Gonzalez 2015]. On rappelle ici que les dimensions des capsules sont directement liées à la dynamique des zones suivies pour qu'on n'ait jamais de collisions en espace libre. Dans ces conditions, la deuxième solution semble plus favorable et nous choisirons une structure anthropomorphe.

On notera qu'en théorie, avec une telle structure, il faudrait aussi développer un porteur traquant la paume à distance pour que la main de l'utilisateur soit totalement déconnectée de l'interface en espace libre. Comme le montre les figures 3.2 et 3.3, on aurait ainsi une structure arborescente avec une succession de bras chacun adapté à la cinématique de la partie du corps suivie.

Cependant, dans un premier temps et par souci de simplification, nous n'étudierons pas dans ce manuscrit le dispositif de tracking de la paume. L'interface sera fixée à la paume et les robots exerceront un retour d'effort sur l'extrémité du pouce et de l'index. Pour que ce prototype puisse évoluer ultérieurement, on prendra tout de même en considération lors de sa conception les contraintes liées au suivi de la paume.

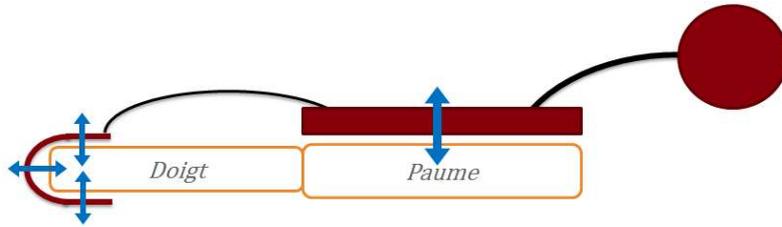


Figure 3.3 : Schéma d'une interface à contact intermittent traquant la paume et l'extrémité des doigts.

2.4. TYPES DE MOUVEMENTS MESURÉS

Pour éviter toute collision involontaire entre l'interface et les doigts en espace libre, il faut que l'axe de l'effecteur de chaque robot reste colinéaire avec celui de la phalange distale associée. Il est par ailleurs nécessaire que la même partie de l'effecteur reste toujours sous la pulpe du doigt si l'on veut, à terme, pouvoir y intégrer un dispositif annexe permettant par exemple de simuler la présence d'arrêtes sur les objets touchés. Il faut donc que chaque effecteur suive tous les mouvements de la phalange distale associée.

Compte tenu de l'architecture retenue pour notre interface haptique, nous nous intéressons ici aux mouvements des doigts par rapport à la paume. L'index a 4 degrés de liberté (DDLs) articulaires par rapport à la paume : abduction-adduction et flexion-extension des trois phalanges (on notera que si les mouvements de flexion-extension sont couplés lors d'un mouvement de saisie donné, ce couplage n'est pas le même pour toutes les prises et il est nécessaire d'avoir 4DDLs pour pouvoir toutes les effectuer). On pourrait en déduire qu'il suffit d'avoir 4 DDLs sur le robot de l'index. Cela supposerait cependant que les mobilités des doigts et des robots soient les mêmes, et donc que toutes les articulations des doigts et des robots soient alignées. Il faudrait pour cela utiliser une structure de type exosquelette parfaitement adaptée à chaque utilisateur, ce qui est impossible en pratique du fait de la variabilité de la géométrie et de la taille des mains. On peut voir par exemple sur la figure 3.4 que deux utilisateurs ayant des doigts de taille différente auront des orientations différentes de leur phalange distale pour une position donnée (sans compter le fait que les articulations de la main ne correspondent pas exactement à des liaisons pivot avec des axes fixes). On notera par ailleurs que même pour un utilisateur donné, il est difficile de garantir le positionnement exact de l'interface sur la main dans la mesure où celle-ci est fixée manuellement sur chaque utilisateur. Dans ces conditions, on préférera utiliser une structure robotique différente de celle du doigt. Il est alors nécessaire de tenir compte du nombre de mobilités cartésiennes de la phalange distale non pas par rapport à la paume mais par rapport à la base du robot dont la configuration par rapport à la paume peut varier légèrement d'un utilisateur à l'autre ou d'une utilisation à l'autre. D'une manière générale, on a besoin de mesurer et de suivre les mouvements de la phalange distale suivant 6DDLs. On notera que si les axes d'abduction-adduction du doigt et du robot sont alignés, le robot sera dans une configuration singulière lorsqu'il se trouve le long de cet axe. Pour rejeter ces singularités en dehors de l'espace parcouru par le doigt, on choisit volontairement de ne pas aligner ces axes.

Le pouce a quant à lui une mobilité supplémentaire (soit 5DDLs) pour permettre les mouvements d'opposition (différents couplages existent aussi pour ce dernier). Cependant, et pour les mêmes raisons que pour l'index, il sera là aussi nécessaire de pouvoir mesurer et suivre les mouvements de la phalange distale suivant 6DDLs.

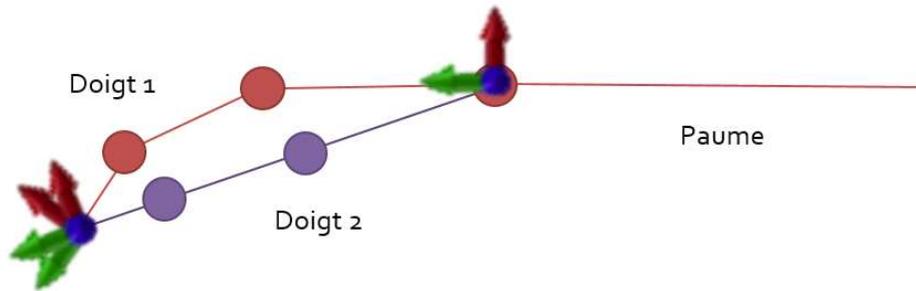


Figure 3.4 : Schéma illustrant le fait que deux doigts différents peuvent atteindre une même position alors que leur orientation est différente.

Sur ces deux doigts, l'interface doit traquer la phalange distale dans l'intégralité de son espace de travail pour permettre à l'utilisateur d'avoir des mouvements naturels. Par ailleurs cette mesure doit pouvoir être effectuée sans équiper l'utilisateur de marqueurs divers ou de systèmes ayant un contact résiduel avec le doigt.

3. SOLUTION TECHNIQUE RETENUE

3.1. UN EFFECTEUR CONCAVE INSTRUMENTÉ

Il existe dans la littérature plusieurs dispositifs répondant partiellement à notre besoin :

- [Yoshikawa et Nagura 1997] ont proposé l'utilisation d'un effecteur circulaire creux intégrant sur son pourtour des capteurs optiques tout-ou-rien permettant de détecter la présence du doigt à leur regard. Cette solution très simple, qui évite tout marqueur ou système se fixant sur le doigt de l'utilisateur, permet, une fois montée à l'extrémité d'un robot à deux degrés de liberté, de mesurer et de suivre la position d'un doigt en 2D dans un plan. Elle a été étendue au cas 3D dans [Yoshikawa et Nagura 1999]. La capsule intègre pour cela un nombre plus élevé de capteurs disposés dans plusieurs plans le long de l'axe de la phalange distale du doigt, et elle est reliée à deux robots intégrant chacun 3 moteurs. Dans les deux cas cependant, la mesure est relativement peu précise. Par ailleurs, la capsule est relativement encombrante, ce qui rend son intégration sur une interface dextre difficile.
- La capsule proposée dans [Gonzalez et al. 2015] utilise pour obtenir une mesure plus précise des proximateurs infrarouges placés tout autour du doigt. Cette interface est cependant limitée à des mouvements 2D, les proximateurs étant intégrés dans un anneau circulaire. La mesure de la distance entre la peau de la phalange et l'effecteur permet, après calibration, de reconstruire précisément le contour de la section du doigt traversant l'anneau. On en déduit ensuite la position du doigt en 2D. Le diamètre intérieur a été dimensionné en prenant en compte les erreurs de suivi d'un doigt par une interface haptique PHANTOM Premium 1.5 [Massie et Salisbury 1994] utilisée comme référence. En tenant compte de la dynamique de cette interface et des vitesses et accélérations maximales de l'index par rapport à la paume, le diamètre intérieur de l'effecteur a été fixé à 24mm. Ces dimensions permettent au robot de suivre le doigt sans rentrer en contact avec lui.

En pratique, les auteurs ont intégré autant de capteurs que possible pour reconstruire précisément le contour du doigt, soit 16 compte tenu de la taille des capteurs. Les études menées avec cette interface ont cependant montré que la connaissance précise du profil du doigt permise par ces 16 capteurs n'est pas nécessaire pour suivre ses mouvements. Pour suivre le doigt en 2D, il n'y a aucun avantage à utiliser un modèle précis du doigt (par exemple elliptique). Le contour du doigt peut être simplement modélisé par un cylindre. Quatre capteurs, placés avantageusement à 90° les uns des autres, suffisent alors à estimer le centre et le rayon de la section du doigt [Gonzalez 2015]. Les auteurs basent leurs algorithmes sur les équations de [Chernov et Lesort 2005] et [Fitzgibbon et al. 1999] pour calculer le rayon R et les coordonnées (x_c, y_c) du centre à partir des coordonnées (x_i, y_i) ($i=1..4$) des quatre points mesurés. Avec cette méthode, une erreur en position de 0.3 ± 0.2 mm et une erreur sur le rayon de 0.2 ± 1 mm sont obtenues. Cela se montre suffisant en pratique pour une commande précise de l'interface.

La plupart des autres interfaces, comme par exemple celles de [Nakagawara et al. 2005] et [Fang et al. 2009], utilisent des systèmes qui introduisent un contact résiduel avec les doigts, ce qui réduit la transparence en espace libre.

Dans ces conditions, nous avons décidé de retenir comme dans [Gonzalez et al. 2015] l'utilisation d'un effecteur creux intégrant des capteurs de distance. Cette solution est étendue ici dans le cas général des interactions dextres nécessitant une mesure en 6D.

3.2. NOMBRE ET PLACEMENT DES CAPTEURS

Notre but est de mesurer la position et l'orientation de la phalange distale en 6D. Cette phalange est souvent modélisée par un cylindre avec une demi-sphère à son extrémité ou un cylindre elliptique avec un demi-ellipsoïde. En pratique, comme nous l'avons souligné ci-dessus, un modèle cylindrique, plus simple que le modèle elliptique, suffit pour assurer le bon fonctionnement d'une interface à contacts intermittents. Nous choisissons donc le modèle le plus simple pour limiter la complexité et le nombre de capteurs à intégrer. Ainsi nous pourrions avoir un effecteur plus compact, ce qui est très important pour deux raisons :

- Il est important de minimiser l'épaisseur sous le doigt afin d'éviter la collision entre les deux systèmes lors de la saisie et la manipulation de petits objets.
- Il est utile de minimiser la largeur des capsules dans l'optique de la conception future d'une interface à 3 ou 4 doigts.

Avec un modèle cylindrique, nous avons six paramètres à identifier : le rayon du cylindre et de la demi-sphère d'extrémité, les trois positions de l'une de ses extrémités, le tangage et le lacet (le cylindre étant une forme de révolution, il possède un axe de symétrie et reste invariant en roulis).

On notera aussi qu'une telle mesure suivant 5 degrés de liberté est suffisante en pratique pour caractériser complètement la configuration des phalanges distales des doigts. En effet, la phalange distale de l'index ne tourne que marginalement autour de son axe lorsque l'on ferme la main. Pour le pouce, cette rotation nécessaire au mouvement d'opposition est couplée avec les autres mouvements du doigt. Dans ces conditions, on peut déduire la rotation autour de l'axe de la phalange distale des mesures précédentes. On obtient ainsi la configuration 6D des phalanges distales du pouce et de l'index.

Avec cette modélisation, la section du doigt est un cercle si l'axe de l'effecteur et celui du doigt sont parallèles. Comme précisé précédemment, la position de son centre dans un plan perpendiculaire à l'axe de la phalange peut facilement être obtenue à l'aide de quatre capteurs placés autour du doigt. En utilisant deux fois cette configuration, il est possible de mesurer les positions de deux points de l'axe du doigt et ainsi obtenir sa position et son orientation par rapport à l'axe de l'effecteur. Un autre capteur est nécessaire pour connaître la position du centre de la demi-sphère sur l'axe du cylindre (voir Figure 3.5). Par conséquent neuf capteurs sont suffisants pour connaître la configuration complète du doigt.

On notera que les capteurs sont avantageusement placés à 45° par rapport au plan sagittal de la phalange, ce qui permet de minimiser l'encombrement sous et sur le côté du doigt.

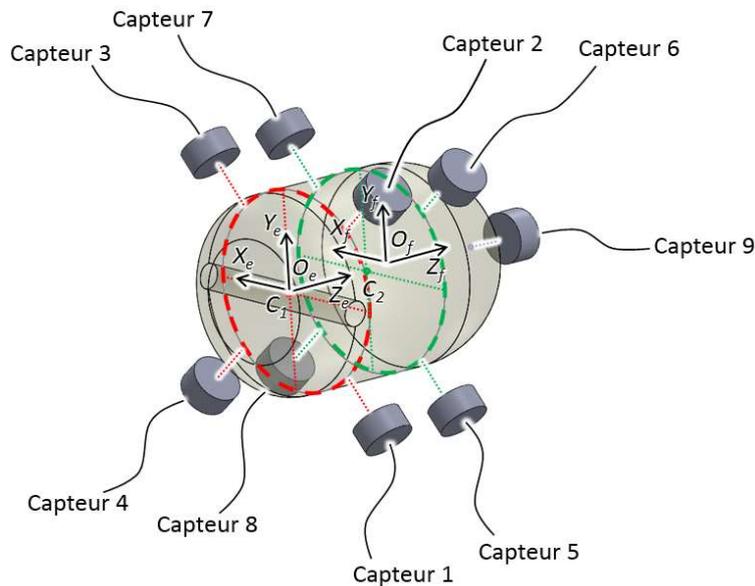


Figure 3.5 : Positionnement des 9 capteurs autour du doigt. (O_e, X_e, Y_e, Z_e) est le repère de l'effecteur et (O_f, X_f, Y_f, Z_f) le repère du doigt. C_1 est le centre du cercle fourni par les capteurs 1 à 4 et C_2 le centre du cercle fourni par les capteurs 5 à 8.

3.3. CALCUL DE LA CONFIGURATION DU DOIGT DANS LA CAPSULE

Pour les calculs, l'origine O_e du repère de l'effecteur (O_e, X_e, Y_e, Z_e) est placée au centre du premier anneau de capteurs. L'axe Z_e est aligné avec l'axe de l'effecteur, l'axe Y_e est dirigé vers le haut et l'axe X_e est orienté vers la gauche. L'origine O_f de la phalange distale est quant à elle placée au centre de la demi-sphère. Son axe Z_f est l'axe du cylindre vers l'extrémité du doigt, son axe Y_f est dirigé vers l'ongle et son axe X_f est choisi pour avoir un repère direct.

En se référant à la figure 3.5, les capteurs de 1 à 4 donnent les coordonnées $(x_1, y_1, 0)$ du centre C_1 de la première section du doigt (en utilisant la modélisation cylindrique) et les capteurs de 5 à 8 les coordonnées (x_2, y_2, z_2) du centre C_2 de la seconde section. Ils pourraient aussi être utilisés pour mesurer le rayon du doigt, mais en pratique et comme il sera expliqué dans le paragraphe 4, cela nécessiterait une recalibration précise de chacun des capteurs pour avoir une estimation rigoureuse de ce paramètre. Pour éviter cette procédure longue et fastidieuse, nous faisons l'hypothèse que le rayon du doigt sera mesuré

à l'aide d'un pied-à-coulisse avant chaque utilisation puis entré en dur dans le contrôleur du robot (nous verrons plus loin que cela pose peu de problèmes en pratique pour les calculs des centres des sections puisque les erreurs des capteurs face à face se compensent).

En modélisant l'orientation de la phalange distale par deux rotations successives d'angles α autour de X_e et β autour de l'axe Y obtenu après cette première rotation (on rappelle que l'on ne tient pas compte d'une rotation autour de l'axe de la phalange puisque le cylindre possède un axe de symétrie), la matrice d'orientation du doigt peut être écrite sous la forme suivante :

$$R(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & 0 & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Sachant que l'axe Z_f de la phalange, qui correspond à la dernière colonne de cette matrice, est le vecteur unitaire passant par C_1 et suivant le vecteur $\overrightarrow{C_1 C_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2)$, c'est-à-dire que $Z_f = \overrightarrow{C_1 C_2} / \|\overrightarrow{C_1 C_2}\|$, on peut en déduire les angles α et β comme suit :

$$\begin{cases} \alpha = -a \sin \frac{y_2 - y_1}{\|\overrightarrow{C_1 C_2}\|} \\ \beta = a \tan \frac{x_2 - x_1}{z_2} \end{cases} \quad (3.2)$$

Le dernier capteur 9 est placé en face du bout du doigt et mesure donc la position $(0, 0, z_s)$ d'un point S de la demi-sphère à l'extrémité de la phalange. Le centre du doigt $O_f = (x_f, y_f, z_f)$ est l'intersection entre une sphère de rayon R centrée en S (dont l'équation est donnée par la formule 3.3) et la droite représentant l'axe Z_f du doigt (dont l'équation paramétrique est donnée par la formule 3.4).

$$x^2 + y^2 + (z - z_s)^2 = R^2 \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} x = (x_2 - x_1)t + x_1 \\ y = (y_2 - y_1)t + y_1 \\ z = z_2 t \end{cases} \quad \text{avec } t \in \mathbb{R} \quad (3.4)$$

En remplaçant dans l'équation (3.3) x , y et z par leurs expressions fournies par l'équation (3.4), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_2^2 \\ 2((x_2 - x_1)x_1 + (y_2 - y_1)y_1 - z_s z_2) \\ x_1^2 + y_1^2 + z_s^2 - R^2 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} t^2 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.5)$$

Parmi les deux solutions de ce système, nous sélectionons celle avec le plus faible z_f , puisque le centre du doigt est toujours en arrière par rapport au point mesuré S . Donc avec $a = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_2^2$, $b = 2((x_2 - x_1)x_1 + (y_2 - y_1)y_1 - z_s z_2)$ et $c = x_1^2 + y_1^2 + z_s^2 - R^2$, la coordonnée t_f de C_f sur la droite d'équation (3.4) est :

$$t_f = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.6)$$

La position du centre de la phalange (x_f, y_f, z_f) est calculée en remplaçant t_f par sa valeur dans l'équation (3.4). A partir de ces données, nous obtenons directement la matrice homogène de passage entre le repère de l'effecteur et celui du doigt :

$$H = \begin{bmatrix} R(\alpha, \beta) & x_f \\ & y_f \\ & z_f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Si l'angle entre les axes du doigt et de l'effecteur est non nul, la section n'est plus un cercle mais une ellipse, ce qui provoque des erreurs de modélisation. Cependant, l'interface à contacts intermittents a pour but de maintenir l'effecteur aligné avec le doigt. Sous réserve que le robot soit suffisamment dynamique, l'angle relatif entre les deux axes restera donc relativement petit. On montrera par ailleurs plus loin que notre modèle est assez robuste aux inclinaisons du doigt.

3.4. DIMENSIONS DES CAPSULES

La conception des capsules a été effectuée en parallèle de celle des bras robots qui les déplacent. Dans ces conditions, et en attendant d'avoir des informations précises sur les performances de ces derniers, nous avons dimensionné les capsules en faisant l'hypothèse que nos robots auront une dynamique proche de celle du PHANTOM Premium 1.5 [Massie et Salisbury 1994].

Cela nous a permis, pour l'index, de reprendre les résultats de [Gonzalez et al. 2015], obtenus dans les mêmes conditions. On arrive à un diamètre intérieur de 24mm. Une fois la conception finie, il sera possible d'ajuster cette valeur pour qu'elle corresponde à la dynamique de notre interface.

La dynamique du pouce étant similaire à celle de l'index, nous avons conservé des erreurs de suivi potentielles similaires sur ce doigt et nous les avons ajoutées aux dimensions moyennes d'un pouce humain. Pour le pouce, le mouvement le plus rapide est l'abduction-adduction. Il faut donc ajouter la plus grande erreur de suivi (3.1mm) au demi grand-axe de la phalange distale (12mm). L'erreur maximale de suivi en flexion-extension est plus faible, de même que l'épaisseur du pouce. Nous aurions donc pu concevoir une capsule elliptique mais cela nous aurait obligés à tenir compte de l'orientation du pouce autour de son axe, ce que notre modèle ne permet pas. Nous avons donc choisi d'utiliser ici aussi une capsule à base cylindrique, de diamètre intérieur égal à environ 30mm. Comme pour l'index, ces valeurs, déterminées en tenant compte de la dynamique du PHANTOM Premium 1.5, pourront être ajustées en fonction de la dynamique réelle du système. Pour le reste de la conception mécanique de l'effecteur associé au pouce, nous gardons les mêmes éléments avec une mise à l'échelle.

3.5. CHOIX DES PROXIMÈTRES

Pour calculer la configuration du doigt par rapport à la capsule à l'aide des modèles présentés ci-dessus, il est nécessaire de connaître la position des points du doigt en regard des 9 capteurs intégrés à la capsule. Dans la pratique, nous proposons de calculer ces positions en mesurant simplement la distance entre chacun des capteurs et la peau en regard.

Si l'on note (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) la position (connue par conception) du capteur i dans le repère lié à la capsule, Z_{ci} le vecteur normal à ce capteur (également connu) et d_i la distance mesurée pour ce capteur, on peut écrire que la peau en regard se trouve à la position :

$$\begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ z_{pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{bmatrix} + Z_{ci} \cdot d_i \quad (3.8)$$

Nous avons donc besoin de capteurs aptes à mesurer la distance d_i . Sur les systèmes existants, l'intervalle de mesure est généralement de 0 à 10mm. Ici, il correspond à la distance maximale entre le doigt et la capsule, soit environ 10mm aussi pour un doigt de faible diamètre. Pour assurer un meilleur suivi, la résolution et la fréquence d'échantillonnage doivent être les plus élevées possible (habituellement 1kHz pour les interfaces haptiques classiques). On reprend ces spécifications pour le choix de nos proximètres. On notera que pour ne pas gêner l'utilisateur dans ses interactions, on ne souhaite pas utiliser de marqueurs passifs ou actifs à placer sur sa main.

Pour répondre à ce cahier des charges, plusieurs types de capteurs sont utilisés en réalité virtuelle :

- Les capteurs acoustiques, qui se basent sur des ondes sonores créées par un émetteur et se réfléchissant sur la cible avant de parvenir à un récepteur. Ils fonctionnent sur le principe de mesure par temps de vol ou par différence de phase. Cependant, leur précision, habituellement de l'ordre de 0.5 à 6mm pour un taux de rafraîchissement maximal de 200Hz, et la distance minimale de mesure de 250mm, ne correspondent pas aux performances requises.
- Les capteurs capacitifs à effet périphérique qui mesurent la perturbation d'un champ électrique par une cible, dont les propriétés de capacité propre sont connues, pour en déduire sa proximité. De tels systèmes possèdent un encombrement important par rapport à leur intervalle de mesure (une électrode de 25mm de diamètre n'effectue des mesures que sur une profondeur de champ de 10mm par exemple) et leur résolution et taux de rafraîchissement sont faibles.
- Les capteurs optiques qui permettent une mesure à faible portée et sans marqueurs. Ils peuvent se baser sur différentes technologies. Les systèmes par temps de vol sont généralement encombrants, ce qui complique leur intégration, et leur rafraîchissement n'est pas suffisant, ce qui les écarte de cette étude. Les capteurs de proximité infrarouges sont basés sur une diode électroluminescente émettant un flash lumineux qui se réfléchit sur la cible. Le récepteur mesure l'intensité de la lumière réfléchie et, grâce à un modèle de réflectance, en déduit la mesure de distance. Ils disposent d'une plage de mesure de 1 à 200mm et d'un taux de rafraîchissement de 1kHz.

En comparant ces données à notre cahier des charges, on en conclut que les capteurs de proximité infrarouges semblent être la solution la plus adaptée. Parmi les capteurs de ce type, nous avons choisi le capteur Vishay VCNL4010 (c'est la nouvelle version des capteurs utilisés dans [Gonzalez et al. 2015], ce qui nous permet d'utiliser les mêmes modèles et les mêmes méthodes de calibrations). Ce composant intègre un proximètre infrarouge ainsi qu'un capteur de lumière ambiante (que l'on n'utilisera pas dans cette application). Il a un volume de 4mm x 4mm x 0.75mm, ce qui facilite son intégration, et une plage de mesure allant de 1mm à 20cm. Sa résolution spatiale croît avec la proximité.

3.6. INTÉGRATION SUR LA CAPSULE

L'effecteur à contacts intermittents que nous avons développé en reprenant les principes présentés ci-dessus est illustré sur les figures 3.6 et 3.7. On notera que lors des interactions avec l'environnement virtuel, des contacts peuvent se produire sur la pulpe mais aussi sur les côtés ou sur le dessus du doigt. Par conséquent, l'effecteur, qui sert aussi de surface de contact entre l'utilisateur et l'interface, possède une forme cylindrique terminée par une demi-sphère. Son diamètre intérieur est de 24mm pour l'index et de 30mm pour le pouce. Comme expliqué précédemment, il intègre neuf proximateurs infrarouges. Huit d'entre eux sont placés autour du doigt sur deux plans, le dernier étant en face de celui-ci.

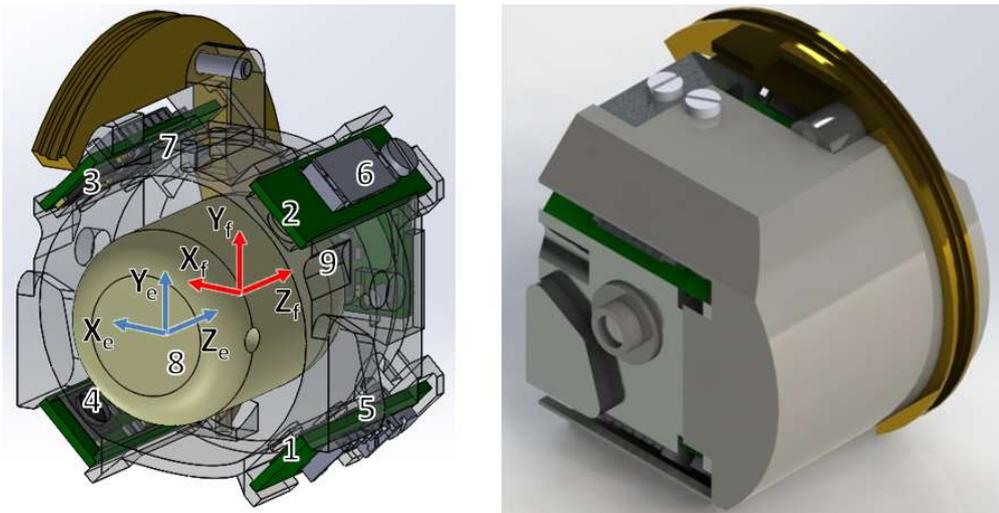


Figure 3.6 : Gauche : vue CAO semi-transparente de l'effecteur montrant le positionnement des 9 capteurs et le modèle du doigt. Droite : vue CAO de l'effecteur et de son capot.

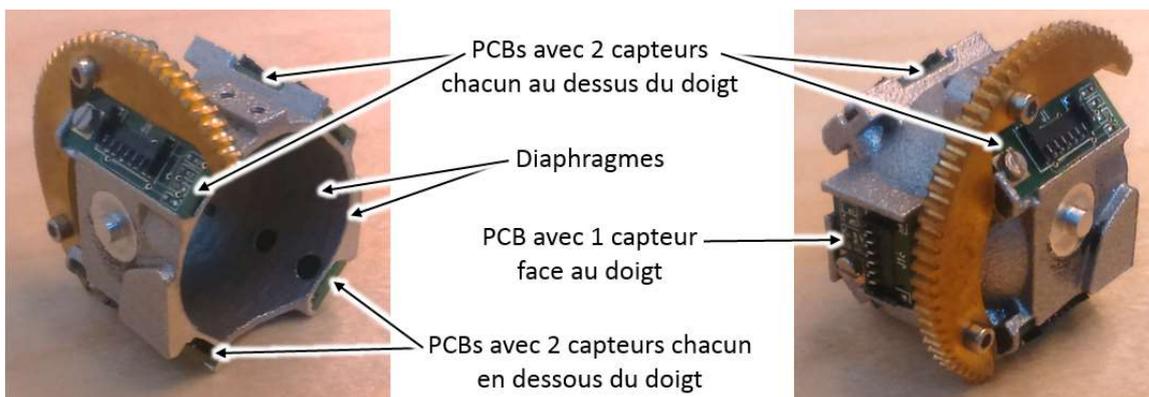


Figure 3.7 : Prototype de l'effecteur avec les 9 capteurs répartis en 5 circuits imprimés.

La distance z_2 entre les deux anneaux de capteurs est maximisée pour réduire l'influence des incertitudes de mesures dans le calcul des angles de rotation. En pratique, elle est fixée à 7mm pour garder le système compact et pour ne pas gêner la flexion du doigt (la forme cylindrique de l'effecteur à une longueur de 11mm).

Pour chaque groupe de quatre capteurs, les proximateurs sont placés à 90° des uns des autres et tournés de 45° par rapport au repère de l'effecteur. Ainsi il n'y a pas de capteurs sous le doigt, ce qui permet de minimiser l'épaisseur de l'effecteur et de simuler naturellement la saisie de petits objets. Cela permettra aussi à terme d'y intégrer un dispositif annexe pour simuler des formes locales ou des textures. Cette configuration permet enfin de minimiser la largeur de l'effecteur, ce qui est un avantage pour le développement d'une interface avec plus de doigts.

Dans la pratique, les capteurs sont intégrés sur cinq circuits imprimés miniatures conçus spécifiquement pour cette application et utilisés pour les positionner précisément autour du doigt. Quatre de ces PCBs intègrent 2 capteurs chacun, le dernier n'en intègre qu'un (cf. figure 3.8).

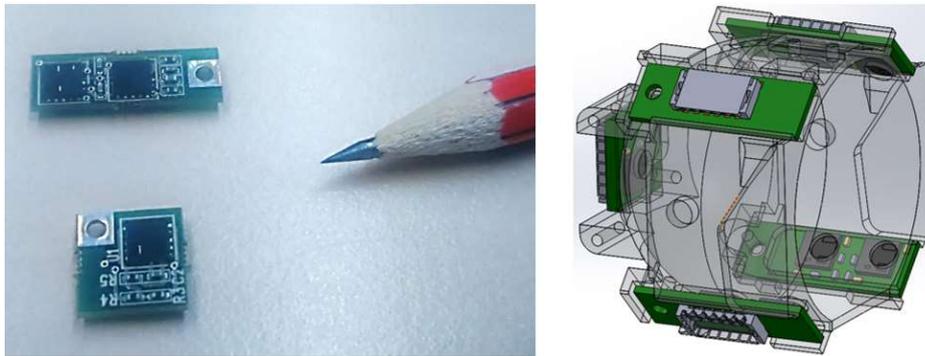


Figure 3.8 : Les deux types de PCBs utilisés et leur intégration sur la capsule de l'index.

Un diaphragme de diamètre 2mm est intégré en face de chaque capteur afin de limiter son champ de vision, de contrôler la direction de la mesure et de protéger les capteurs d'un contact avec l'utilisateur. La distance entre le proximateur et la surface supérieure du diaphragme est minimisée pour limiter l'encombrement. Elle est fixée à 1mm.

Pour le pouce, nous avons choisi de garder la même disposition des capteurs, de manière à pouvoir utiliser les mêmes modèles, calculs et optimisations pour l'ensemble des effecteurs. Cela simplifie les choses pour la commande puisqu'un seul programme peut être utilisé pour les deux effecteurs avec seulement des valeurs initiales différentes.

3.7. ÉLECTRONIQUE DE MESURE

3.7.1. Carte d'acquisition et de traitement des données capteurs

Les capsules du pouce et de l'index comportent un nombre important de capteurs de proximité (9 par doigt soit 18 en tout). Ces capteurs communiquent via un bus série I2C. En théorie, on peut les relier ensemble à l'aide d'un seul bus de données. Dans la pratique cependant, leur adresse est fixée en usine et ne peut pas être changée. Dans ces conditions, si on les relie tous au même bus, on ne peut pas envoyer de trames à un capteur précis et on ne sait pas de quel capteur proviennent les données. Pour résoudre ce problème, il serait possible de les mettre en série avec un interrupteur pour les interroger les uns après les autres. Cela augmenterait toutefois sensiblement le temps nécessaire à l'interrogation des 18 capteurs et il ne serait pas possible de tourner à une fréquence de 1 kHz, ce qui est nécessaire pour assurer la stabilité du dispositif dans les conditions habituelles de simulation.

Pour contourner ce problème, nous utilisons un PCB développé sur mesure par le CEA LIST. Cette carte, illustrée par la figure 3.9, est équipée de 18 ports I2C, 9 pour chaque doigt (dans l'optique de pouvoir faire évoluer ultérieurement le prototype en intégrant une pièce suivant la paume à distance à l'aide d'autres proximètres, 6 liaisons I2C supplémentaires ont été prévues), d'un module FPGA permettant de créer différents bus I2C afin de pouvoir acquérir l'ensemble des données en parallèle et d'un microcontrôleur chargé du traitement des données obtenues et de leur transmission à un module EtherCAT qui transfère ces dernières à un PC maître chargé de calculer les positions et les orientations des doigts.

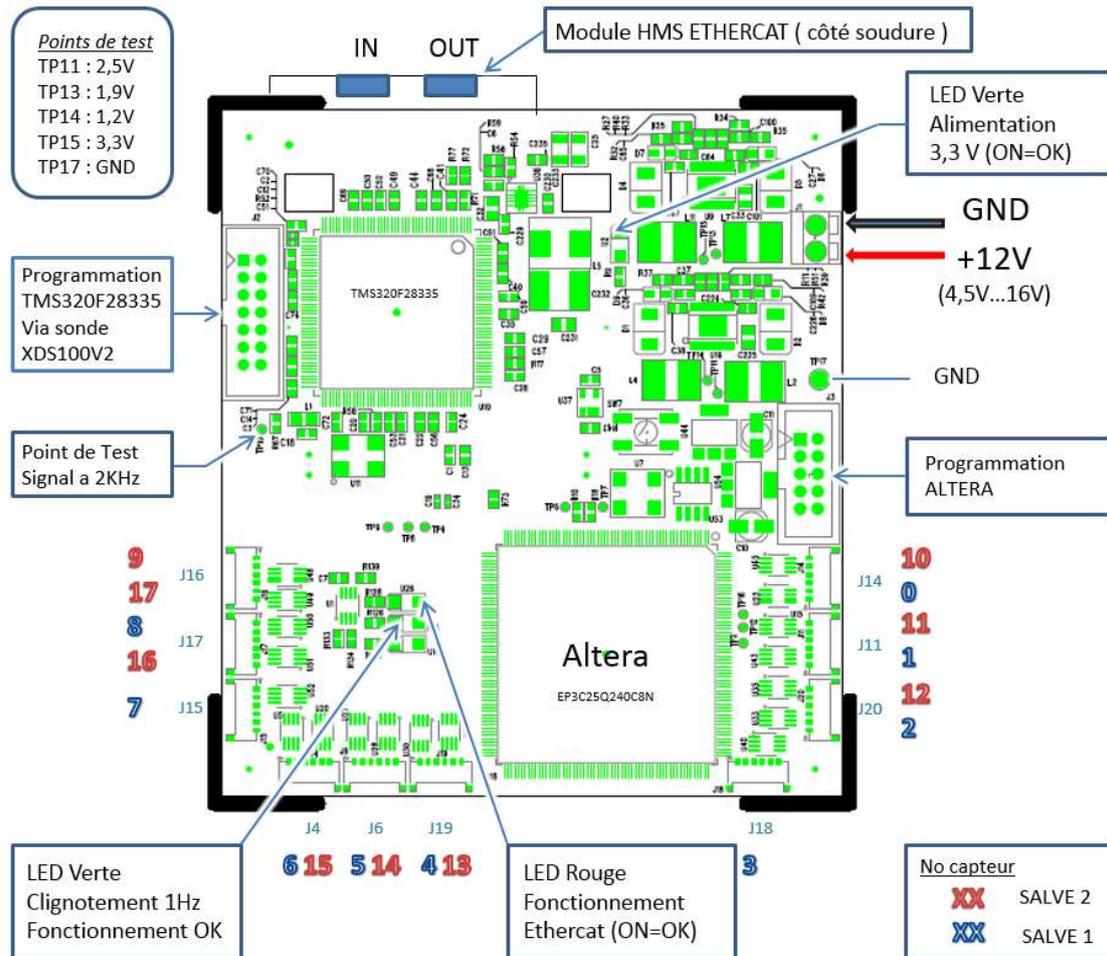


Figure 3.9 : Schéma électronique de la carte d'acquisition et de traitement des données des proximètres.

Parmi les différents réseaux fonctionnant en temps réel, nous avons choisi d'utiliser un bus EtherCAT (un bus de terrain dérivé de l'Ethernet) car sa vitesse de transfert maximale de 200Mbits/s est nettement plus élevée que celle d'un bus CANopen (un bus dérivé du bus CAN souvent utilisé dans l'industrie) qui est limitée à 1Mbits/s. Le bus EtherCAT est particulièrement adapté à une utilisation temps réel. Il est favorisé pour des systèmes nécessitant un court temps de rafraîchissement. Le délai de transmission étant pour nous aussi important que l'exactitude des données, l'interface haptique échangeant de nombreuses informations avec le contrôleur, que ce soit pour calculer la position des doigts ou pour gérer la commande des moteurs, cet avantage est décisif.

3.7.2. Architecture électronique globale

La mesure de la position de chacun des doigts par rapport à la capsule correspondante nécessite l'utilisation des 5 cartes intégrant les proximètres (appelées cartes filles) et de la carte d'acquisition et de traitement illustrée par la figure 3.9 (appelée capteur mère). Le bus I2C en sortie des proximètres infrarouges est utilisé pour la communication entre ces cartes. Ce réseau, illustré par la figure 3.10, permet d'envoyer une requête à un capteur spécifique grâce à son adresse unique.

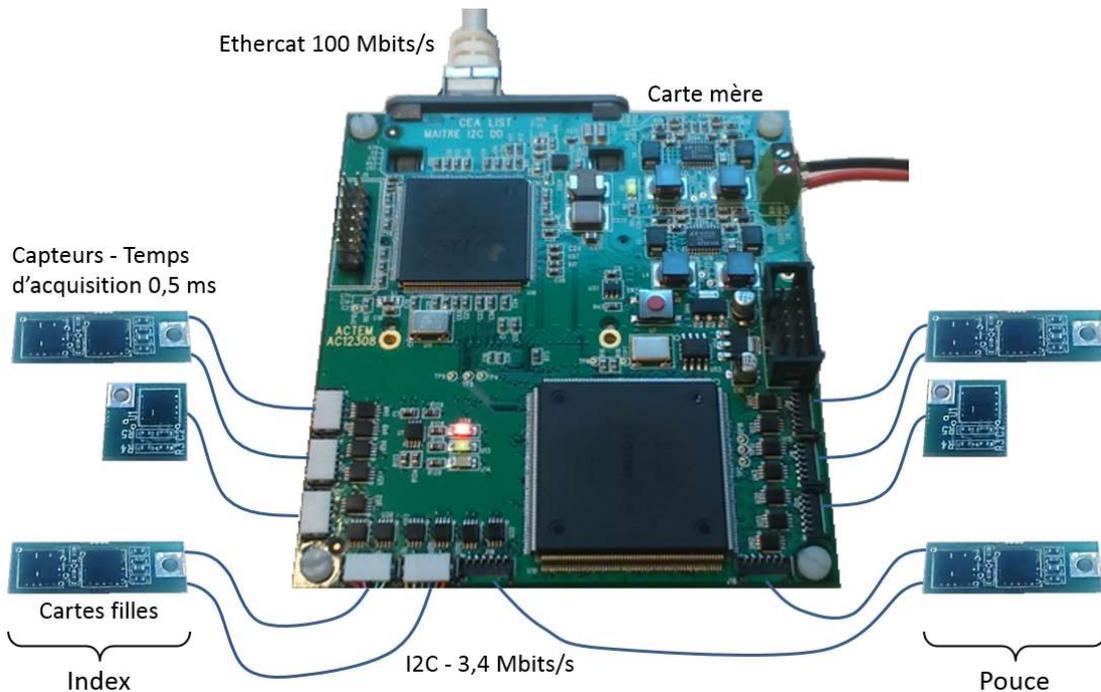


Figure 3.10 : Architecture électronique globale du système de mesure.

Notre système comporte donc :

- Des cartes capteurs filles avec le minimum d'électronique et une liaison I2C.
- Une carte capteur mère avec 24 liaisons I2C, la puissance de calcul nécessaire pour mettre en forme ces données et une liaison EtherCAT pour transmettre l'ensemble de ces informations au réseau de communication.

3.7.3. Stratégie de mesure

Un problème courant sur les dispositifs tels que celui que nous avons conçu est le parasitage des capteurs entre eux. En effet, si deux capteurs proches lancent une acquisition simultanée, ils vont s'entre-perturber. Pour éviter ce phénomène, il est nécessaire de procéder en plusieurs vagues d'acquisition, le nombre de vagues devant toutefois rester le plus faible possible puisque l'on cherche à avoir la fréquence d'échantillonnage la plus élevée possible (typiquement 1kHz comme sur les interfaces haptiques classiques).

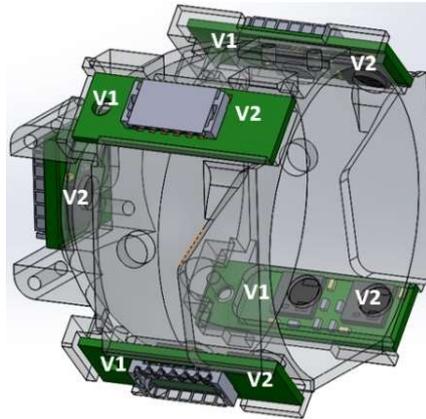


Figure 3.11 : Répartition des capteurs suivant les différentes vagues de mesures.

Comme le montre la figure 3.11, nous avons choisi ici de séparer l'acquisition des capteurs des deux anneaux, puisque ces derniers se situent seulement à 7mm les uns des autres. La mesure du capteur situé au fond de la capsule est effectuée en même temps que la vague d'acquisition de l'anneau de capteurs le plus éloigné de celui-ci. Cette stratégie est intégrée à la carte capteur mère, son rôle étant de gérer les différentes acquisitions.

Des mesures effectuées à l'aide d'une carte Arduino ont permis de montrer que la demande d'une mesure prend $88\mu\text{s}$, que le temps d'acquisition est de $250\mu\text{s}$ et que la lecture de la valeur prend $112\mu\text{s}$ si on se contente de lire les 8 bits de poids fort et $224\mu\text{s}$ si on lit l'ensemble des 16 bits de données. Comme le montre la figure 3.12, cela permet théoriquement de faire les acquisitions de chaque vague en $500\mu\text{s}$ si on se contente de lire les 8 bits de poids fort de chaque capteur. Les acquisitions des deux vagues ne pouvant pas être simultanées, on procède à la lecture des données et à la demande d'une mesure de la première vague pendant le temps d'acquisition de la seconde, et réciproquement.

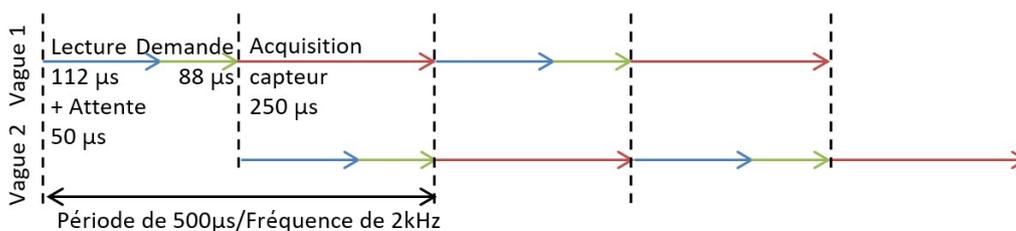


Figure 3.12 : Chronogramme de l'ordonnancement des mesures des données capteurs pour une lecture des 8 bits de poids fort.

Avec ce principe, la fréquence de fonctionnement théorique est de 2kHz en mode 8 bits et de 1.6kHz en mode 16 bits. Il faut noter que ces tests ont été faits avec une carte Arduino dont la fréquence I2C est de 0.8MHz alors que la fréquence maximale des capteurs est de 3.4MHz. On peut donc espérer de meilleurs résultats lors de la communication de la carte capteur mère. Dans la pratique, pour éviter des sauts de cycle si une des actions prend plus de temps (l'acquisition du capteur photosensible est par exemple dépendante du temps), nous utiliserons le mode 16 bits à 1kHz, qui est la fréquence de fonctionnement souhaitée. Cette solution est en outre plus robuste (si on interroge le capteur avant la fin de la mesure, le résultat est erroné alors que si on augmente la durée de l'acquisition on est sûr d'avoir un résultat cohérent). Le détail du mode 16 bits à 1kHz est présenté sur la figure 3.13.

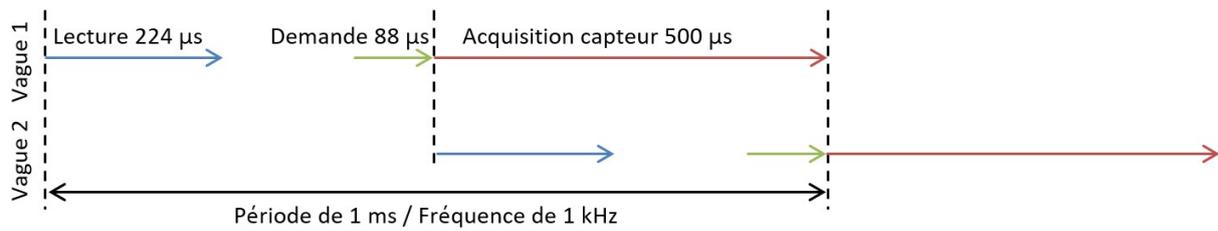


Figure 3.13 : Chronogramme de l'ordonnancement des mesures des données capteurs pour une lecture des 16 bits à 1kHz comme implanté dans la carte capteur mère.

4. ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES

4.1. PRÉ-ÉTALONNAGE DES CAPTEURS

Dans la pratique, il existe de légers écarts entre les réponses des différents capteurs VCNL4010 à cause des différences de fabrication et d'intégration (la structure mécanique est faite à l'aide d'une technologie d'impression rapide, ce qui diminue les coûts mais aussi la précision par rapport à une méthode d'usinage traditionnelle). Pour limiter l'influence de ces variations, tous les capteurs sont étalonnés.

Le doigt ayant une géométrie différente et une réflectance variable d'une personne à l'autre, on peut difficilement l'employer pour un étalonnage précis. Par conséquent, nous utiliserons ici un marqueur de capture de mouvement (MoCap) comme proposé dans [Gonzalez et al. 2015]. Ce marqueur possède une forme connue et une réflectance proche de celle du doigt.

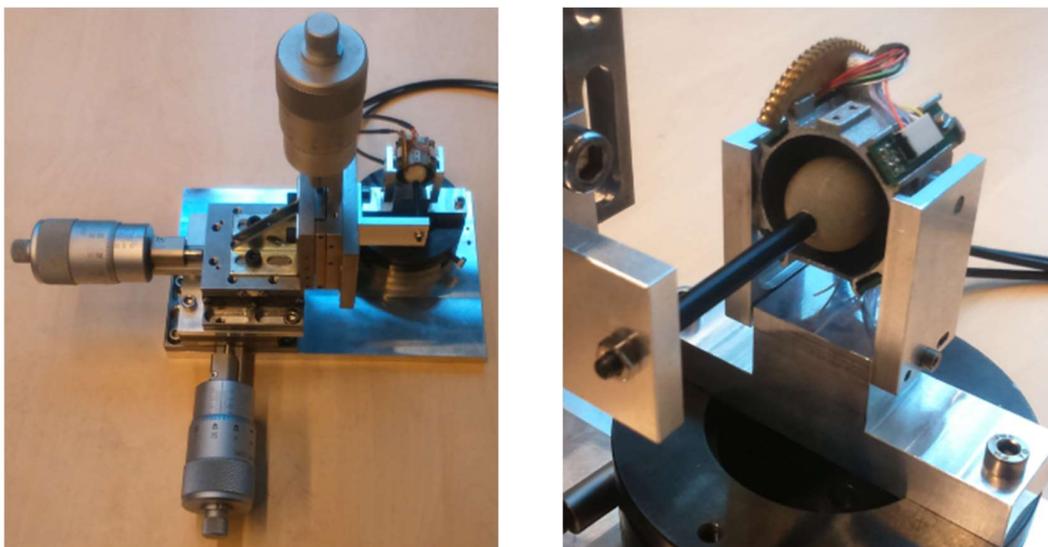


Figure 3.14 : Pré-étalonnage des capteurs de distance.

Notre banc de test est un assemblage d'instruments de métrologie permettant de placer la sphère de MoCap en face de chaque capteur et de la déplacer dans une plage de distance de 1mm à 10mm (cf. figure 3.14). Ainsi leur réponse peut être enregistrée comme une fonction de la distance entre celui-ci et la cible. Les résultats obtenus pour un des capteurs sont représentés sur la Figure 3.15 (cercles bleus).

La sortie capteur suit un modèle d'illumination de Phong $d(E) = \sqrt{K/E}$ avec d la distance entre le capteur et la cible, E L'absorption d'énergie de la photodiode et K une constante représentant les propriétés réfléchives de la cible [Novotny et Ferrier 1999] [Akenine et al. 2008]. Comme proposé dans [Gonzalez et al. 2015], nous ajoutons à ce modèle deux décalages, α sur d et β sur E .

$$d(E) = \alpha + \sqrt{K/(E + \beta)} \quad (3.9)$$

La courbe verte illustrée par la figure 3.15 montre la réponse du modèle après une optimisation des paramètres α , β et K par la méthode des moindres carrés totaux non linéaires [Markovsky et Van Huffel 2007].

Cette figure montre que les variations du signal sont non monotones entre 1 et 1.5mm. Cela correspond à une distance inférieure à 0.5mm entre le doigt et l'effecteur. Ce cas se produit seulement pendant la phase de transition entre espace libre et contact (voir paragraphe 2.1). On notera que pendant cette phase de fonctionnement, le suivi du doigt n'est plus actif. De ce fait, des erreurs importantes dans cette configuration sont moins gênantes et nous avons décidé de focaliser l'optimisation sur les valeurs allant de 1.5mm à 10mm. Dans cet intervalle, les informations reçues nous sont plus utiles et la réponse du capteur est monotone. De cette façon, l'erreur maximale entre les mesures obtenues et le modèle peut être minimisée. Elle est de 0.88mm à 1mm du capteur (au contact de l'effecteur), de 0.27 mm à 1.5 mm et elle reste inférieure à 0.04mm entre 2mm et 10mm. Le même étalonnage est réalisé pour l'ensemble des proximètres, avec des résultats similaires.

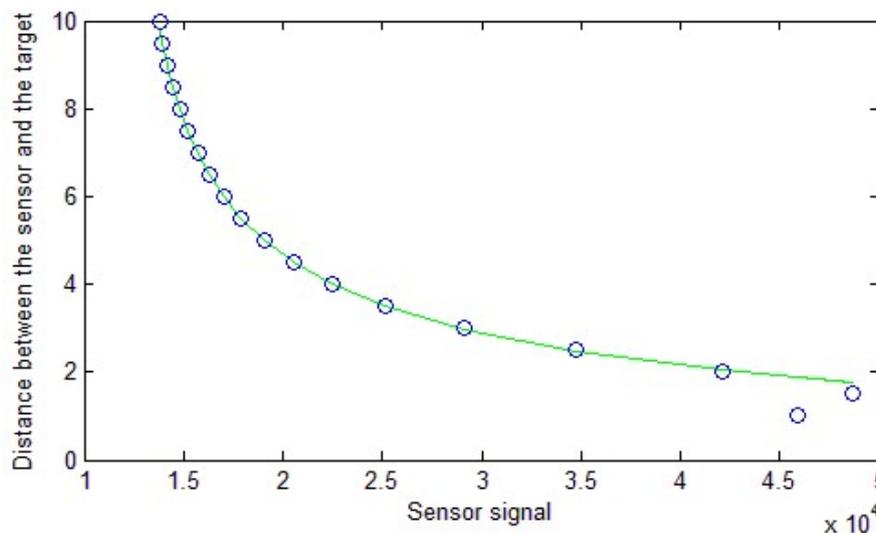


Figure 3.15 : Étalonnage des proximètres. Les points bleus représentent les différentes mesures et la courbe verte le modèle optimisé.

4.2. PERFORMANCES DE L'EFFECTEUR ASSOCIÉ À L'INDEX

Il est compliqué de connaître précisément la position et l'orientation d'un vrai doigt à cause de sa forme incertaine. Par conséquent, nous avons utilisé pour évaluer les performances de notre instrumentation une pièce usinée en aluminium ayant globalement la forme d'un doigt, mais avec une géométrie connue

(voir figure 3.16). Ses dimensions correspondent à la phalange distale d'un index de taille moyenne (50ème percentile de la population masculine occidentale adulte [Gosselin 2004]). Il a été recouvert d'un revêtement similaire à celui utilisé pour les sphères de MoCap afin d'obtenir à la fois une forme et des propriétés réfléchives proches de celles d'un vrai doigt. Ce revêtement n'est toutefois pas exactement le même que celui de la sphère de MoCap utilisée pour le pré-étalonnage des capteurs. Il serait donc théoriquement nécessaire de recalibrer chaque capteur avec la nouvelle cible. C'est aussi vrai pour chaque utilisateur de l'interface puisque les caractéristiques de la peau changent légèrement d'une personne à l'autre. Cette recalibration serait cependant longue et fastidieuse et en pratique peu utile.

[Gonzalez et al. 2015] ont en effet montré que les erreurs des capteurs s'annulent lors du calcul de la position du centre du doigt puisqu'ils sont disposés sur des côtés opposés du doigt. Il n'est donc pas utile de recalibrer les capteurs 1 à 8. Seul le capteur 9 situé en face du doigt doit être réétalonné. Pour cela, nous utiliserons la méthode simplifiée d'étalonnage proposée dans [Gonzalez et al. 2015]. Le doigt est placé à une distance connue du capteur infrarouge, ici 1.5mm (dans la pratique on utilise pour cela une calle de 0.5mm d'épaisseur placée entre la cible et le diaphragme qui se situe lui-même à 1mm du capteur), et la réponse mesurée $E_{1.5}$ est utilisée pour ajuster la valeur de α (et seulement α). On ajoute à cette dernière la différence α_{cal} entre la distance réelle et la distance mesurée par l'ancien modèle.

$$\alpha_{cal} = 1.5 - \left(\alpha + \sqrt{K/(E_{1.5} + \beta)} \right) \quad (3.10)$$

$$d(E) = \alpha + \alpha_{cal} + \sqrt{K/(E + \beta)} \quad (3.11)$$

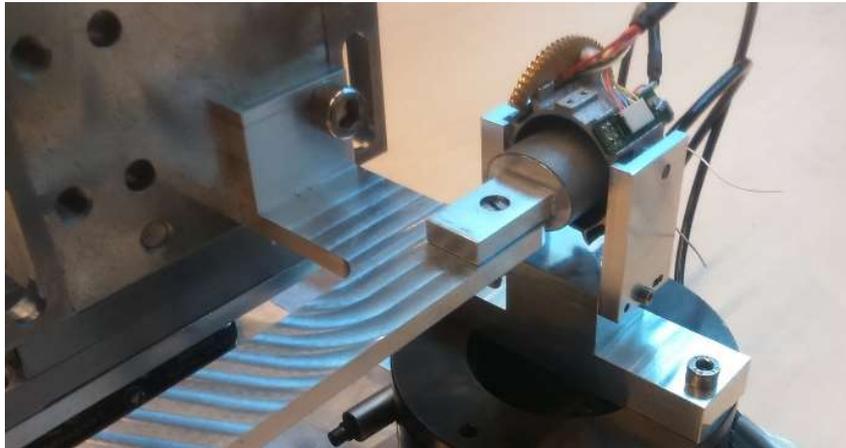


Figure 3.16 : Le banc de test équipé avec la cible ressemblant à un doigt.

Un inconvénient de cette méthode simplifiée est que nous ne pouvons pas mesurer le rayon du doigt puisque les capteurs permettant ce calcul ne sont pas recalibrés. Nous devons donc le mesurer avant que l'utilisateur ne se serve de l'interface. Cette méthode est moins précise qu'un réajustement complet de l'ensemble des paramètres servant dans les modèles capteurs, mais elle est bien plus simple et rapide, et montre des résultats satisfaisants (voir ci-dessous). Elle permettra d'alterner entre plusieurs utilisateurs très aisément.

Après cette calibration, nous plaçons le faux doigt à l'intérieur de l'effecteur et nous comparons les mesures fournies par les platines de notre banc de test et les positions calculées par notre modèle. Les résultats sont donnés sur les figures 3.17 à 3.19.

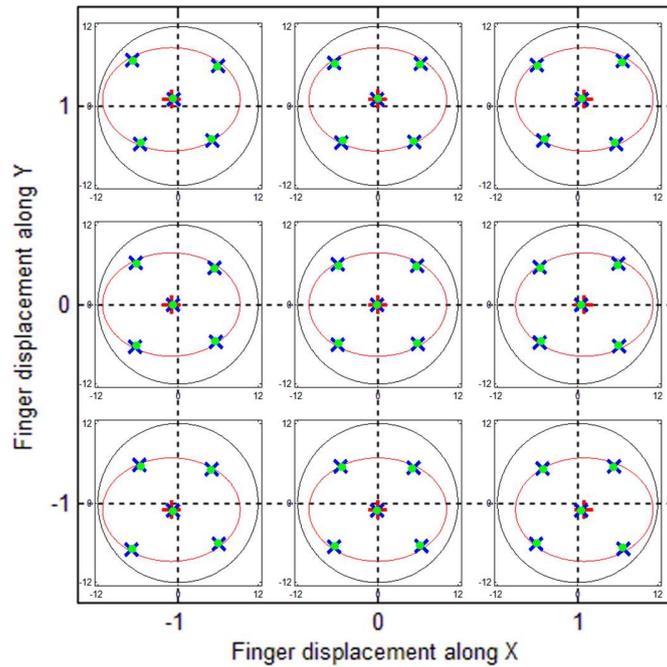


Figure 3.17 : Mesures des déplacements suivant X et Y pour l'index. Le contour et le centre de la cible sont tracés en rouge, le diamètre intérieur de l'effecteur en noir. Les croix bleues représentent les points mesurés et le centre calculé de la première section, les points verts ceux de la seconde.

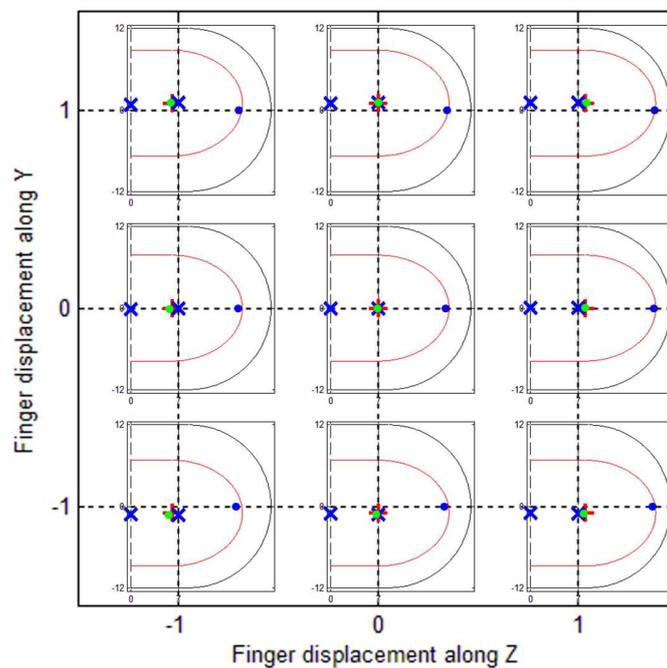


Figure 3.18 : Mesures des déplacements suivant Y et Z pour l'index. Le contour et le centre de la cible sont tracés en rouge, la forme intérieure de l'effecteur en noir. Les croix bleues représentent les centres calculés des sections, le point bleu le bout du doigt et le point vert le centre calculé de la forme globale.

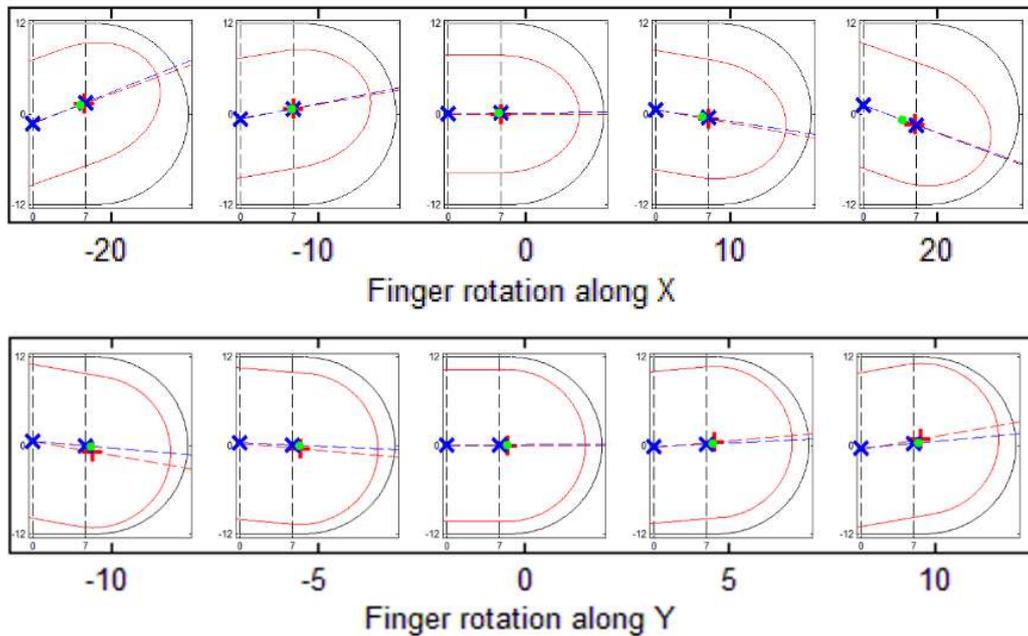


Figure 3.19 : Mesures des rotations de la cible pour l'index. Le contour, le centre et l'axe de la cible sont tracés en rouge, la forme intérieure de l'effecteur en noir. Les centres calculés des sections et l'axe calculé sont représentés en bleu, le centre calculé de la forme globale en vert.

Dans la configuration de référence (au centre de l'effecteur), les erreurs de mesure sont d'environ 0.1mm sur les axes X et Y, de 0.2mm sur l'axe Z et de 0.4° pour les deux rotations. Elles augmentent jusqu'à 0.5mm sur l'axe X, 0.2mm sur l'axe Y, 0.65mm sur l'axe Z et 2.5° en orientation pour un déplacement de 1mm dans les différentes directions. La forme elliptique du faux doigt explique les disparités observées entre les erreurs sur X et sur Y. La différence entre l'ellipsoïde à l'extrémité de la cible et la modélisation sphérique ainsi que la calibration simplifiée impactent la précision sur l'axe Z. Il en est de même pour les orientations. En effet, la section de la phalange est une ellipse qui s'étend lorsque l'on tourne autour de Y. Le modèle circulaire ne correspond plus à la forme réelle du doigt pour des angles importants. Dans ce cas, l'erreur de mesure peut atteindre environ 50%. On peut toutefois noter que le sens de la rotation reste toujours correct. À l'opposé, la section se rapproche progressivement d'un cercle lorsque l'on tourne autour de X. La précision est alors meilleure et l'erreur est de seulement 2° environ. Heureusement, les rotations autour de Y correspondent au mouvement d'abduction-adduction du doigt, qui possède une vitesse et un débattement plus faible que le mouvement de flexion-extension (correspondant à une rotation suivant X). Ces résultats semblent globalement suffisants pour estimer la forme globale du doigt et ainsi assurer que la commande du robot puisse le suivre.

4.3. PERFORMANCES DE L'EFFECTEUR ASSOCIÉ AU POUCE

Nous utilisons la même méthode pour pré-étalonner les capteurs de la capsule du pouce et pour calibrer le capteur 9 à l'aide du faux doigt (n'ayant pas de pièce correspondant à la taille du pouce, nous utilisons la même pièce en aluminium recouverte du revêtement de MoCap que pour l'index). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures de 3.20 à 3.22.

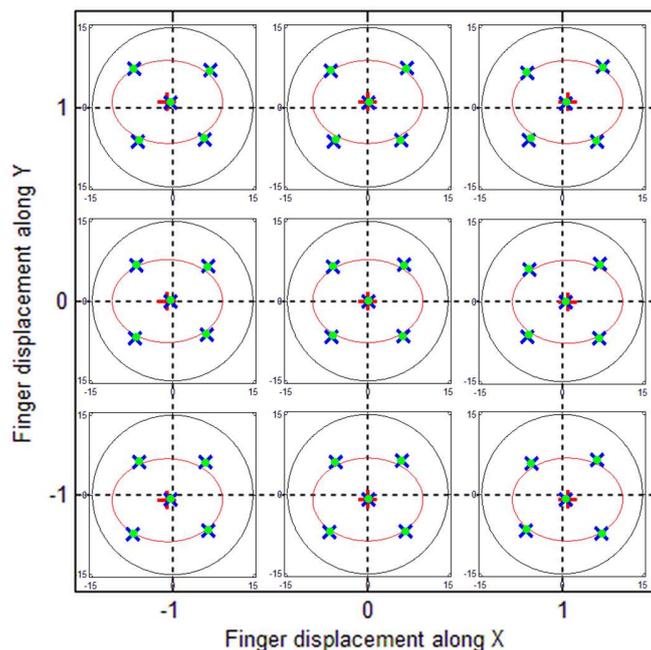


Figure 3.20 : Mesures des déplacements suivant X et Y pour le pouce. La forme et le centre de la cible sont tracés en rouge, le diamètre intérieur de l'effecteur en noir. Les croix bleues représentent les points mesurés et le centre calculé de la première section, les points verts ceux de la seconde.

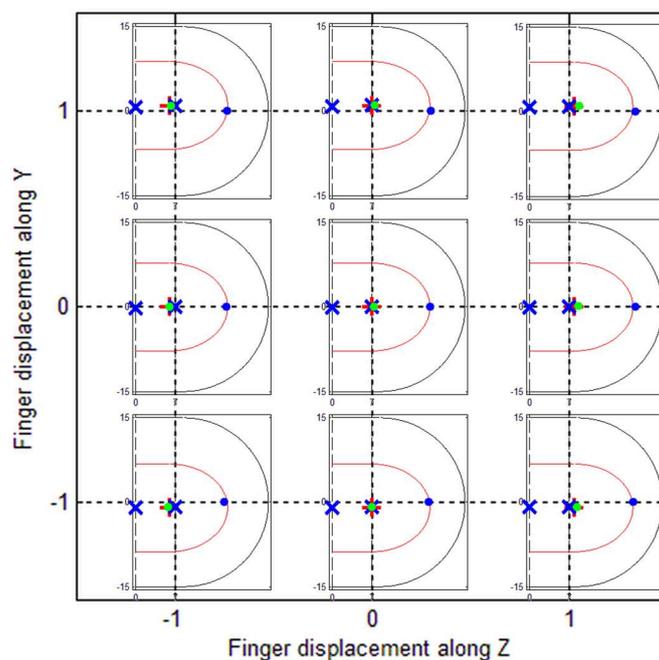


Figure 3.21 : Mesures des déplacements suivant Y et Z pour le pouce. Le contour et le centre de la cible sont tracés en rouge, la forme intérieure de l'effecteur en noir. Les croix bleues représentent les centres calculés des sections, le point bleu le bout du doigt et le point vert le centre calculé de la forme globale.

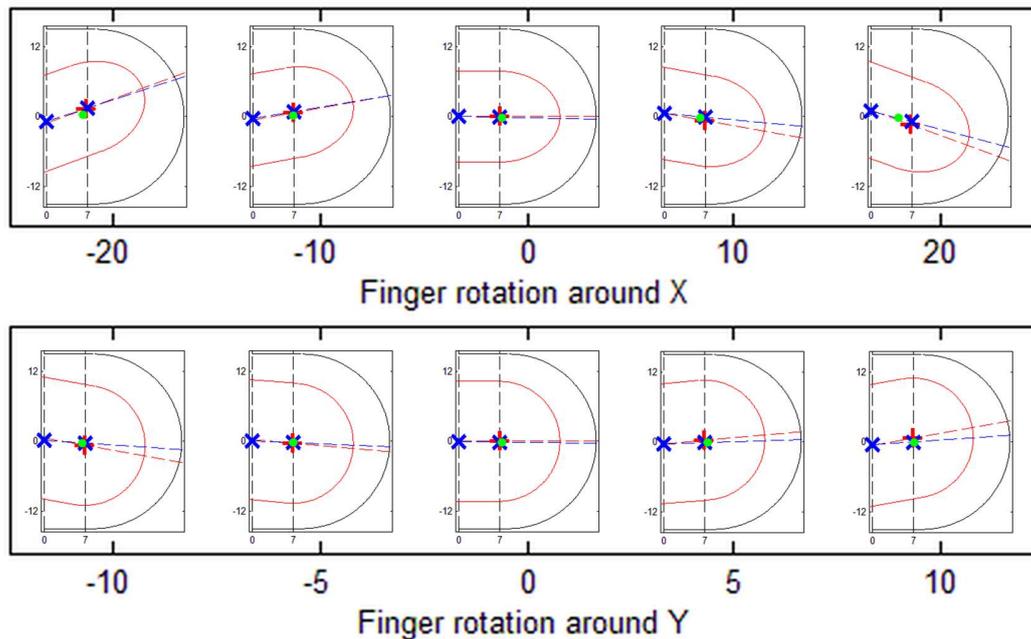


Figure 3.22 : Mesures des rotations de la cible pour le pouce. Le contour, le centre et l'axe de la cible sont tracés en rouge, la forme intérieure de l'effecteur en noir. Les centres calculés des sections et l'axe calculé sont représentés en bleu, le centre calculé de la forme globale en vert.

Dans la position initiale, au centre de l'effecteur, les erreurs de mesure sont d'environ 0.16mm sur les axes X et Y, 0.3mm sur l'axe Z et 1.3° pour les deux rotations. Pour un déplacement de 1mm dans chacune des directions, elles augmentent jusqu'à 0.6mm sur l'axe X, 0.25mm sur l'axe Y, 0.8mm sur l'axe Z et 2.7° en orientation. La cause des disparités entre les erreurs sur X et sur Y, et entre les erreurs en rotation autour de X et Y, est la même que pour l'index, à savoir une différence entre le modèle cylindrique utilisé et la forme elliptique du doigt. Ainsi pour des rotations de grandes amplitudes, les erreurs vont jusqu'à 4° quand on tourne autour de X et elles atteignent 50% quand on tourne autour de Y. De même, la différence entre l'ellipsoïde réelle du bout de la phalange et la demi-sphère utilisée dans le modèle diminue la précision sur l'axe Z.

5. OPTIMISATION DU CALCUL DE LA CONFIGURATION DU DOIGT

5.1. PROBLÉMATIQUE

Une interface haptique doit avoir une fréquence de fonctionnement de l'ordre du kilohertz pour garantir un fonctionnement stable et un retour d'effort de qualité. Il est donc important de savoir si les calculs précédents peuvent être faits en moins d'une milliseconde.

Le calcul de la position et de l'orientation du doigt à partir de la position de chaque centre de section ne pose pas de problème. Il y a peu de fonctions complexes et aucune optimisation demandant plusieurs itérations.

Par contre, la modélisation du contour de la section d'un doigt à l'aide d'un cercle, si on utilise les équations de [Chernov et Lesort 2005] et [Fitzgibbon et al. 1999], se base sur la recherche de valeurs et vecteurs propres avec une matrice de contraintes, et donc sur la diagonalisation d'une matrice. Pour estimer le temps nécessaire à ces opérations, nous avons implanté sur notre contrôleur la diagonalisation numérique obtenue via le solveur de la bibliothèque Eigen (cf. https://eigen.tuxfamily.org/dox/classEigen_1_1EigenSolver.html). Sa documentation nous indique un ordre de grandeur du nombre d'itérations de $25n^3$, où n est la taille de la matrice. Les tests que nous avons effectués ont montré que le temps de cycle varie entre 115 et 300 μ s en fonction du nombre d'itérations nécessaires avant la convergence de l'algorithme. Par conséquent, cette méthode, si elle a pu être utilisée pour l'application [Gonzalez 2015] car elle ne requière le calcul que d'un seul centre de section, ne permet pas de garantir un fonctionnement au kilohertz dans notre cas puisque ces calculs doivent être effectués quatre fois pour notre interface (deux sections pour chacun des deux doigts).

5.2. NOUVEL ALGORITHME

Pour notre problème, nous cherchons le cercle qui correspond au mieux aux données fournies par les capteurs. Un cercle a trois paramètres : (x_c, y_c) , les coordonnées de son centre et R son rayon, et notre système possède quatre capteurs. Donc nous possédons plus de données que de paramètres à estimer et nous sommes dans le cas d'une régression. La régression avec la méthode classique des moindres carrés se base sur la minimisation de la somme des carrés des écarts ϵ entre les points du cercle et les mesures des capteurs (x_k, y_k) en ajustant les paramètres (x_c, y_c, R) .

$$\epsilon_{(x_c, y_c, R)}^2 = \sum_{k=1}^4 \left(y_c - y_k \pm \sqrt{R^2 - (x_k - x_c)^2} \right)^2 \quad (3.12)$$

Nous nous retrouvons avec un cas non linéaire demandant une optimisation numérique, ce qui pose les mêmes problèmes que l'algorithme précédent. L'auteur [Jacquelin 2007] propose une méthode modifiée des moindres carrés se basant sur les écarts ϵ_k suivants.

$$\epsilon_k = R^2 - (x_k - x_c)^2 - (y_k - y_c)^2 \quad (3.13)$$

La somme des carrés des écarts peut être écrite sous la forme suivante :

$$\epsilon_{(a_1, a_2, a_3)}^2 = \sum_{k=1}^4 \left(F_0(x_k, y_k) + \sum_{i=1}^3 a_i F_i(x_k, y_k) \right)^2 \quad (3.14)$$

$$\text{Avec : } F_0(x, y) = -x^2 - y^2; \quad F_1(x, y) = 2x; \quad F_2(x, y) = 2y; \quad F_3(x, y) = 1; \quad (3.15)$$

$$a_1 = x_c; \quad a_2 = y_c; \quad a_3 = R^2 - x_c^2 - y_c^2 \quad (3.16)$$

La régression est alors linéaire avec la méthode dite des moindres carrés modifiés. Cette méthode a l'avantage d'être complètement déterministe. Son temps de calcul est donc fixe pour une machine donnée. D'après [Jacquelin 2007], le centre d'une section est donné par la formule suivante (il est aussi possible de calculer R , mais cela ne nous intéresse pas) :

$$\begin{cases} x_c = \frac{(\delta_{30} + \delta_{12}) \cdot \delta_{02} - (\delta_{03} + \delta_{21}) \cdot \delta_{11}}{2(\delta_{20} \cdot \delta_{02} - \delta_{11}^2)} \\ y_c = \frac{(\delta_{03} + \delta_{21}) \cdot \delta_{20} - (\delta_{30} + \delta_{12}) \cdot \delta_{11}}{2(\delta_{20} \cdot \delta_{02} - \delta_{11}^2)} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \delta_{11} = n \sum_{k=1}^4 x_k y_k - \sum_{k=1}^4 x_k \sum_{k=1}^4 y_k \\ \delta_{20} = n \sum_{k=1}^4 x_k^2 - \left(\sum_{k=1}^4 x_k \right)^2 ; & \delta_{02} = n \sum_{k=1}^4 y_k^2 - \left(\sum_{k=1}^4 y_k \right)^2 \\ \delta_{30} = n \sum_{k=1}^4 x_k^3 - \sum_{k=1}^4 x_k^2 \cdot \sum_{k=1}^4 x_k ; & \delta_{03} = n \sum_{k=1}^4 y_k^3 - \sum_{k=1}^4 y_k^2 \cdot \sum_{k=1}^4 y_k \\ \delta_{21} = n \sum_{k=1}^4 x_k^2 \cdot y_k - \sum_{k=1}^4 x_k^2 \cdot \sum_{k=1}^4 y_k ; & \delta_{12} = n \sum_{k=1}^4 y_k^2 \cdot x_k - \sum_{k=1}^4 y_k^2 \cdot \sum_{k=1}^4 x_k \end{cases} \quad (3.18)$$

Une fois intégrée à notre contrôleur, cette méthode possède un temps de calculs de 17µs. Cela nous permet de garantir la fréquence de fonctionnement souhaitée.

5.3. COMPARAISON DES RÉSULTATS

Un compromis entre rapidité et précision doit souvent être fait pour un algorithme. Nous avons pu voir que cette nouvelle méthode était plus rapide. Nous nous intéressons maintenant à la différence de précision entre les deux. Pour cela, nous étudions la norme du vecteur entre la réponse de ces deux algorithmes pour les 23 configurations de référence utilisées dans l'évaluation expérimentale.

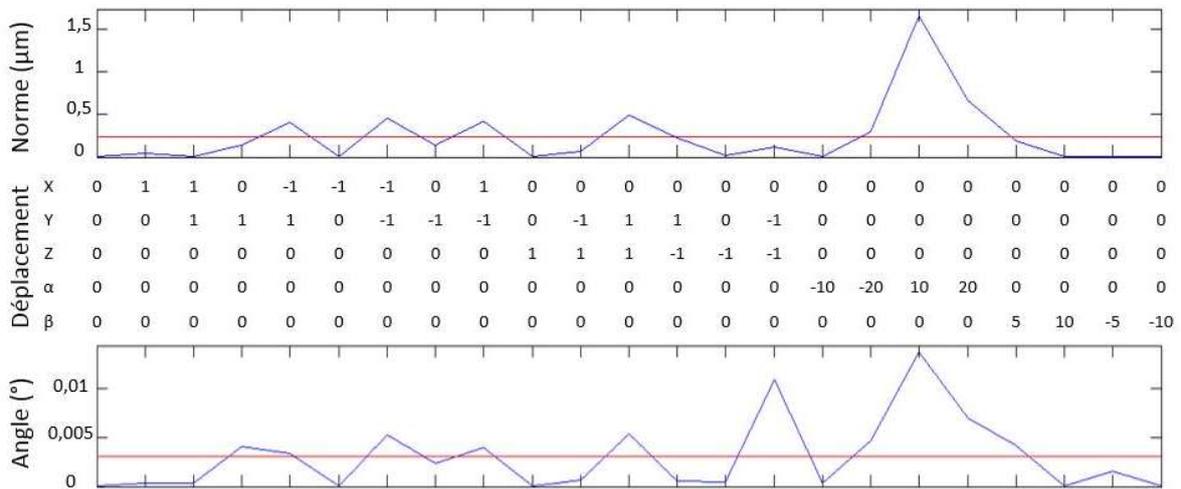


Figure 3.23 : Écarts absolus entre les réponses des deux algorithmes. La différence pour chaque configuration est tracée en bleu, leur moyenne est tracée en rouge.

Sur ces deux graphiques, nous pouvons observer que la différence moyenne en position est de 0.25µm avec un maximum à 1.6 µm et la différence moyenne en orientation est de 0.003° (soit 11'') avec un maximum à 0.013° (soit 47''). Au vu de l'ordre de grandeur de ces différences, nous admettons que les résultats des deux méthodes sont similaires. Par conséquent, nous intégrerons l'algorithme de la régression circulaire dans notre PC maître.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effecteur concave que nous avons conçu pour mesurer les mouvements d'une phalange distale en 6D (on rappelle que la dernière orientation est déduite des autres mesures grâce aux contraintes imposées par la cinématique du doigt). La position du doigt peut être reconstruite dans l'ensemble de l'effecteur et les plages de mesure des rotations vont de -10° à 10° en abduction-adduction et de -20° à 20° en flexion-extension. En position, les erreurs de mesure au centre sont au maximum de 0.3mm. Elles augmentent jusqu'à 0.6mm quand la cible s'éloigne de la configuration de référence pour les axes perpendiculaires au doigt et jusqu'à 0.8 mm pour un mouvement suivant l'axe du doigt. En orientation, l'erreur angulaire reste sous les 2° pour la flexion de l'index et 4° pour le pouce mais pour l'abduction elle est de 6° au maximum dans les deux cas. Cependant, cela pose peu de problèmes puisque notre système se base sur de faibles mouvements relatifs entre le doigt de l'utilisateur et l'effecteur en orientation. Ces résultats semblent suffisants pour estimer correctement les mouvements du doigt.

CHAPITRE 4.

DÉVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE DEXTRE À CONTACTS INTERMITTENTS

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons concevoir une interface à retour d'effort à contacts intermittents sur le pouce et l'index. Pour cela, il est nécessaire de monter les effecteurs concaves que nous avons étudiés dans le chapitre 3 sur un robot capable de suivre les mouvements des doigts de l'utilisateur en espace libre et de générer des efforts suffisamment importants sur la main lors des contacts avec l'environnement virtuel. Ce chapitre est consacré à la présentation de cette interface illustrée par la figure 4.1 et de ses principaux composants.

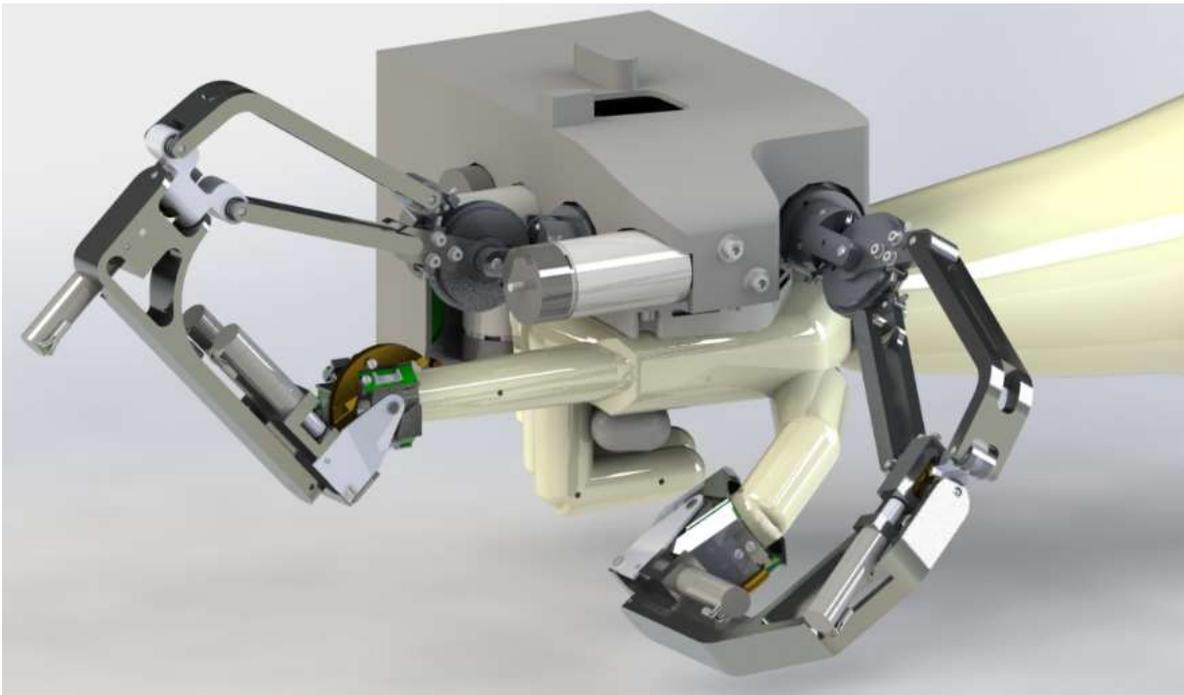


Figure 4.1 : Vue CAO générale de l'interface dextre à contacts intermittents.

On notera que, dans un contexte de manipulation fine avec le bout des doigts, les doigts humains pris isolément permettent essentiellement d'appliquer des forces sur l'environnement, les couples étant générés par l'action simultanée de plusieurs doigts. Dans ces conditions, le retour d'effort n'est nécessaire qu'en translation. Il sera généré sur chaque doigt par un étage de positionnement à 3 degrés de liberté à retour d'effort fixé sur une base liée à la paume de la main. Une telle solution ne suffit cependant pas à

suivre les mouvements des phalanges distales par rapport à la base des robots. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, ces mouvements font intervenir 6 degrés de liberté. Il faudra donc ajouter à l'extrémité des étages de positionnement des étages d'orientation aptes à suivre les rotations des phalanges distales par rapport à la base des robots. On notera que ces mouvements ne nécessitent pas un actionnement réversible puisqu'ils ne seront pas utilisés pour le retour d'effort. On rappelle par ailleurs que dans un premier temps, aucun dispositif de déformation globale ou locale de la pulpe des doigts ne sera intégré sur cette interface pour ne pas complexifier davantage sa conception. On rappelle également que, dans le cadre de cette thèse, le contact intermittent ne sera assuré que sur les phalanges distales du pouce et de l'index. Nous ne serons pas en mesure d'assurer cette fonctionnalité sur la paume. L'interface sera donc tenue par l'utilisateur. Pour qu'il n'ait pas à en supporter le poids, elle sera portée par un équilibreur passif comme le montre la figure 4.2.



Figure 4.2 : Vue CAO de l'interface droite à contacts intermittents montée sur son équilibreur.

Ainsi, hormis les effecteurs capables de mesurer la configuration de la phalange distale du pouce et de l'index par rapport au robot qui ont déjà été présentés dans le chapitre 3, cette interface est composée des éléments suivants pour chacun des deux doigts :

- Un étage de positionnement permettant de suivre le doigt en position en espace libre et d'appliquer des forces sur la phalange distale au contact.
- Un étage d'orientation qui permet d'adapter l'orientation de l'effecteur à celle de l'extrémité du doigt sans modifier sa position.

Elle comprend également des éléments communs aux deux robots :

- Une pièce de base sur laquelle viennent se fixer les robots des deux doigts et intégrant la poignée tenue par l'utilisateur.
- Un équilibreur permettant de compenser le poids de l'interface et de mesurer la configuration en position et en orientation de la paume dans l'espace.
- Un contrôleur chargé de récupérer et de traiter les données de l'ensemble des capteurs de l'interface et de gérer la commande des moteurs afin d'assurer à la fois le suivi des doigts en espace libre et le retour d'effort au contact.

Ces différents éléments sont présentés en détail ci-dessous.

2. ÉTAGE DE POSITIONNEMENT DES EFFECTEURS

2.1. CAHIER DES CHARGES

Comme nous l'avons vu ci-dessus, un étage de positionnement à 3 degrés de liberté à retour d'effort est nécessaire sur chacun des doigts pour suivre le mouvement des phalanges distales en espace libre et appliquer sur celles-ci des efforts au contact.

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons au choix, au dimensionnement et à la conception de cet étage de positionnement. Les principaux critères à respecter sont les suivants :

- Le robot doit être capable de suivre les mouvements du doigt (pouce ou index) dans tout son espace de travail. On notera que pour une interface à contacts intermittents, il faut prendre en compte les incertitudes dues au fait que le doigt (et dans une version future la paume) ne se trouve(nt) pas toujours au centre de la capsule. En effet si l'effecteur est au contact du doigt, son centre est décalé par rapport au doigt. Dans notre cas, au vu du diamètre de la capsule, l'espace de travail du doigt doit être agrandi de 3mm au minimum. Par sécurité, on prend en compte une erreur maximale de 5mm pour tenir compte des différentes incertitudes du système. Pour le suivi de la paume, que l'on prévoit d'intégrer à terme, on fait l'hypothèse d'un décalage maximal deux fois plus grand, soit 10mm. En cumulant ces décalages potentiels, nous en concluons que le robot doit être capable d'atteindre n'importe quel point de l'espace de travail du doigt agrandi de 15mm dans toutes les directions.
- Le robot ne doit jamais se trouver dans une configuration singulière, quelle que soit la configuration du doigt.

- Il doit pouvoir appliquer des efforts suffisants pour que l'utilisateur ressente clairement la présence des obstacles dans l'environnement virtuel, sans que cela conduise à un poids trop important ni à une situation où le robot deviendrait dangereux. Plusieurs études se sont intéressées au dimensionnement en effort des interfaces dextres [Gosselin 2012] [Gonzalez et al. 2014]. Les auteurs préconisent une capacité en effort de 10N environ. On notera que la plupart des interfaces haptiques existantes utilisent des moteurs à courant continu. Ces moteurs présentent l'avantage, sous réserve d'une conception adaptée, d'avoir une bonne capacité en effort crête et une très faible ondulation de couple, synonyme d'un retour d'effort de qualité. Ils sont également très simples à piloter. Ils souffrent cependant d'une capacité en effort continu limitée due à la difficulté d'évacuer la chaleur produite par les bobinages du rotor. Dans la pratique, si certains constructeurs annoncent une capacité en crête allant jusqu'à 10 fois le couple continu, le couple qui peut être maintenu pendant quelques dizaines de secondes, temps nécessaire pour effectuer la plupart des tâches élémentaires typiques en Réalité Virtuelle, est limité à environ 3 fois le couple continu sur les moteurs usuellement utilisés [Gosselin et al. 2005]. Dans ces conditions, il est raisonnable de prévoir un retour d'effort de 5N en continu et 15N en crête.
- Il doit être le plus transparent possible, c'est-à-dire qu'il doit avoir à la fois des frottements et une inertie apparente minimaux, afin que l'utilisateur puisse le déplacer facilement au contact. On notera que les frottements et l'inertie doivent être les plus homogènes possible dans tout l'espace de travail du robot et les plus isotropes afin que l'utilisateur ne soit pas perturbé par un ressenti variable suivant la configuration du robot [Gosselin 2000].
- Enfin, dans le contexte de la simulation d'assemblages, il doit avoir une raideur apparente suffisante pour pouvoir simuler des environnements rigides (cela ne serait pas le cas par exemple si on simulait des interactions avec des tissus mous en chirurgie). En théorie, une raideur supérieure à 24.2N/mm est requise pour percevoir une surface comme rigide à main nue sans retour visuel [Tan et al. 1994]. Nous chercherons à nous rapprocher au mieux de cette valeur, sachant qu'elle ne constitue qu'une moyenne qui peut varier en fonction des conditions (par exemple suivant le type de mouvement, l'individu ou les autres retours sensoriels, en particulier les retours sonores et visuels puisqu'il est par exemple possible, en exploitant la prédominance de la vision sur l'haptique, de créer l'illusion d'une telle rigidité avec une raideur plus faible). On notera aussi que, si cette raideur est nécessaire pour assurer la sensation de rigidité une fois arrivé au contact de l'environnement, la sensation de toucher une surface rigide est également liée au ressenti au moment du contact. Ce dernier est fonction de la dynamique du robot qui dépend de sa raideur mais aussi de sa masse que l'on cherche à minimiser comme indiqué précédemment.

Afin de dimensionner notre interface au mieux par rapport à ce cahier des charges, nous utiliserons les outils suivants :

- Nous étudierons son architecture cinématique pour choisir la structure la plus adaptée (types des liaisons, inclinaison des axes, etc.).
- Nous procéderons ensuite à son dimensionnement géométrique pour optimiser la longueur des différents segments.
- Nous ferons un dimensionnement en effort, c'est-à-dire que nous utiliserons les ellipses de dimensionnement en effort pour calculer les couples articulaires nécessaires pour générer les efforts cartésiens souhaités, et en raideur d'asservissement. Nous utiliserons pour cela des ellipses

de raideur apparente. Cela nous permettra de choisir les moteurs et d'optimiser les rapports de réduction.

- Nous caractériserons enfin la raideur de la structure mécanique du robot, la raideur des câbles et la raideur apparente des moteurs.

2.2. ARCHITECTURE CINÉMATIQUE

2.2.1. Type de structure

Il existe dans la littérature différentes architectures de bras robotiques. Les plus usuelles sont les architectures série et les structures parallèles. Les mécanismes série ont l'avantage d'avoir un espace de travail important. Ils ont par contre l'inconvénient d'avoir des moteurs embarqués, ce qui augmente grandement l'inertie du système. De plus, la puissance des actionneurs doit être croissante de l'effecteur vers la base, puisque le moteur à la base doit bouger l'ensemble du robot alors que le dernier ne doit bouger que l'effecteur. Les structures parallèles permettent un meilleur équilibre entre les différents actionneurs, qui peuvent par ailleurs être fixés sur la base, ce qui permet d'avoir une inertie réduite et un actionnement plus homogène. Leur principal inconvénient est un espace de travail plus réduit. Un bon compromis est d'avoir une structure mixte intégrant un étage parallèle associé à des axes en série.

Pour l'étage de positionnement, nous proposons d'utiliser un parallélogramme ou un mécanisme à cinq barres en série avec une liaison pivot. Cette solution, utilisée sur de nombreuses interfaces à retour d'effort, permet d'avoir un espace de travail important tout en conservant tous les moteurs proches de la base, ce qui permet de limiter l'inertie apparente. Dans la pratique, un mécanisme à cinq barres comme celui utilisé par [Monroy et al. 2008] possède un modèle complexe, ce qui entraîne des calculs plus longs pour le contrôleur, alors qu'un parallélogramme permet d'avoir des modèles plus simples dont les calculs sont immédiats. Nous privilégierons donc cette solution en retenant finalement une architecture constituée d'un parallélogramme monté sur une liaison pivot.

On notera que nous utiliserons aussi une architecture mixte sur le robot complet, l'étage de positionnement étant complété par un poignet série dont nous verrons dans le paragraphe 3 que la motorisation est plus légère.

2.2.2. Placement des moteurs

Il existe différentes solutions pour motoriser une structure composée d'un parallélogramme en série avec une liaison pivot. Si l'on compare ces solutions en termes d'espace de travail, de capacité en effort, de raideur et de masse apparentes, deux solutions paraissent particulièrement avantageuses [Gosselin 2000] [Gosselin et Riwan 2001] :

- Structure à actionnement découplé avec des moteurs mobiles : cette solution, utilisée par exemple sur le bras Geomagic Touch X (ex. Sensable PHANTOM Desktop, <http://www.geomagic.com/>) et sur les bras Virtuose de la société Haption (<http://www.haption.com>), consiste à placer le moteur de la liaison pivot en base et les moteurs du parallélogramme sur le premier corps mobile. Elle est très simple puisque l'on actionne directement les corps à proximité des moteurs. Par contre deux des moteurs sont mobiles. Même s'ils restent proches de la base, ils ajoutent de l'inertie au système.

- Structure à actionnement découplé avec des moteurs fixes : cette solution, utilisée par exemple sur le MA23 [Vertut et al. 1977] ou l'interface WHIPFI [Gosselin et al. 2005b] consiste à placer tous les moteurs en base et à utiliser des transmissions, habituellement à câbles, pour actionner les différents axes à distance. Dans ce cas l'inertie apparente est minimale, au prix de la complexité introduite par les transmissions. On notera que l'utilisation d'un parallélogramme facilite la mise en œuvre de ce principe en limitant la transmission du troisième moteur au second axe.

Ici, comme nous le verrons ci-dessous, le poids des moteurs est similaire voir supérieur au poids des segments mobiles. L'inertie qu'ils introduiraient s'ils étaient mobiles serait donc conséquente. Par ailleurs il serait nécessaire de faire cheminer les câbles d'alimentation des moteurs et les câbles des capteurs jusqu'à ces derniers, ce qui accroîtrait presque autant la complexité du système que si on devait faire passer des câbles de transmission mécanique. Dans ces conditions, nous avons choisi d'utiliser une structure à actionnement découplé avec des moteurs fixes qui semble plus adaptée à notre interface.

On notera aussi que l'on cherche, dans la mesure du possible, à ce que l'actionnement des différents axes ne soit pas couplé. Pour cela, on fera passer les câbles d'actionnement du parallélogramme le long ou à proximité de l'axe du pivot comme sur le MA23 [Vertut et al. 1977] ou l'interface WHIPFI [Gosselin et al. 2005b], l'axe de la liaison pivot étant creux pour y faire passer les câbles d'actionnement des deux autres axes. Ces câbles passant à proximité de l'axe 1, ils sont peu déformés par une rotation autour de ce dernier.

2.2.3. Agencement des axes

La plupart des robots usuels ont une base fixe. Ceux utilisant une structure cinématique constituée d'un parallélogramme en série avec une liaison pivot possèdent en général un premier axe vertical. Ainsi le poids du deuxième et du troisième segment influe peu sur le premier moteur. Dans le cas d'une interface dextre portée par la main, cela n'est plus vrai. L'interface suit les mouvements de l'utilisateur et l'orientation de l'axe 1 varie au cours du temps. Dans ces conditions, il faudra aussi l'équilibrer et il n'y a pas d'avantage à utiliser une orientation particulière.

Malgré cela, sur beaucoup d'interfaces manuelles, qui sont souvent positionnées au-dessus de la main pour ne pas gêner la flexion des doigts, le premier axe est aligné avec l'axe d'abduction-adduction des doigts, qu'elles utilisent une structure semblable à celle que nous avons choisie ou non. Cela a théoriquement l'avantage de permettre d'utiliser une structure cinématique plus simple puisque le robot reste toujours dans le même plan que le doigt. Cela a cependant l'inconvénient majeur que l'on atteint une configuration singulière quand on ferme la main et que la phalange distale se retrouve le long de cet axe. On ne peut alors plus se déplacer ou appliquer un effort suivant une direction normale au plan du doigt. Pour éviter ce défaut, on peut :

- Soit reculer suffisamment cet axe pour qu'il ne coupe plus l'espace de travail du doigt : dans la pratique il faut pour cela beaucoup le reculer. Dans ces conditions il faut utiliser des segments de grande taille pour pouvoir toujours atteindre l'ensemble de l'espace de travail du doigt, ce qui augmente l'inertie et nécessite de plus gros moteurs pour conserver la même capacité en effort.
- Soit l'incliner pour repousser cette singularité en dehors de l'espace de travail du doigt comme sur l'interface WHIPFI [Gosselin et al. 2005b]. Cette solution a l'avantage de ne pas nécessiter d'agrandir sensiblement les corps du robot. Ce sera donc celle que nous utiliserons.

Les segments et axes suivants forment un parallélogramme. Pour réaliser ce mécanisme, il est possible d'utiliser un parallélogramme à câbles ou à bielles. Le premier a l'avantage d'avoir une raideur constante,

mais relativement faible. Par ailleurs un tel système est plus complexe à réaliser et à intégrer. En effet, si on veut que la raideur ne soit pas trop faible il faut intégrer des ridoirs, ce qui accroît le nombre de pièces mécaniques. Il est par ailleurs nécessaire d'intégrer des systèmes de tension pour éviter l'apparition d'un brin mou à cause du fluage et la fixation d'un câble de faible diamètre sur les poulies n'est pas évidente. D'un autre côté, le parallélogramme à bielles augmente légèrement l'inertie du système mais possède une raideur supérieure, même si non constante, et est plus simple à intégrer. Notre choix se porte donc sur une solution à bielles.

Au final, on arrive à la structure illustrée par les figures 4.3 et 4.4. Cette structure est constituée d'un pivot en série avec un parallélogramme. L'axe du pivot est incliné et placé au-dessus de la main pour repousser toutes les singularités en dehors de l'espace de travail du doigt. Le parallélogramme est réalisé avec des bielles. Son positionnement et ses dimensions sont optimisées pour couvrir au mieux les débattements du doigt et maximiser l'efficacité en effort et en raideur (cf. ci-dessous). On notera que ces figures montrent aussi l'étage d'orientation qui sera présenté dans le paragraphe 3.

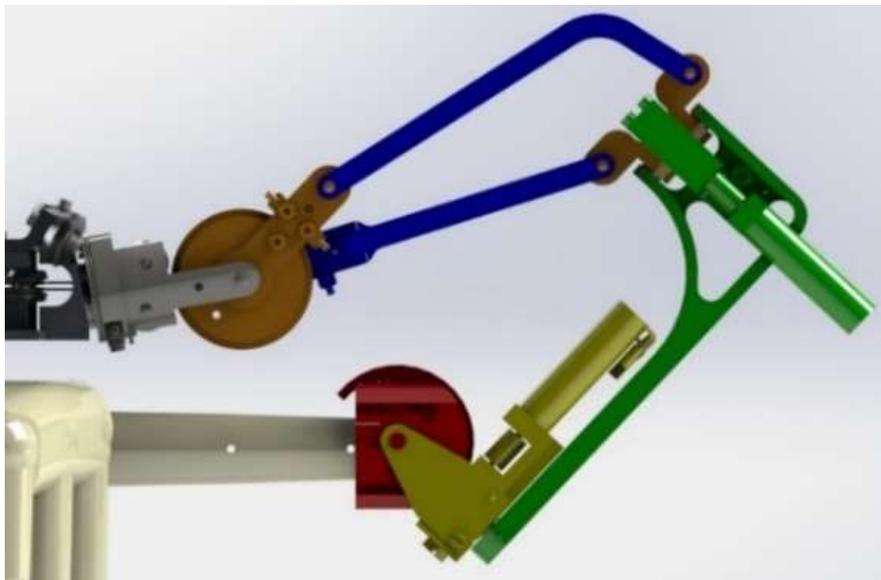


Figure 4.3 : Vue CAO de l'architecture mécanique du robot associé à chaque doigt.

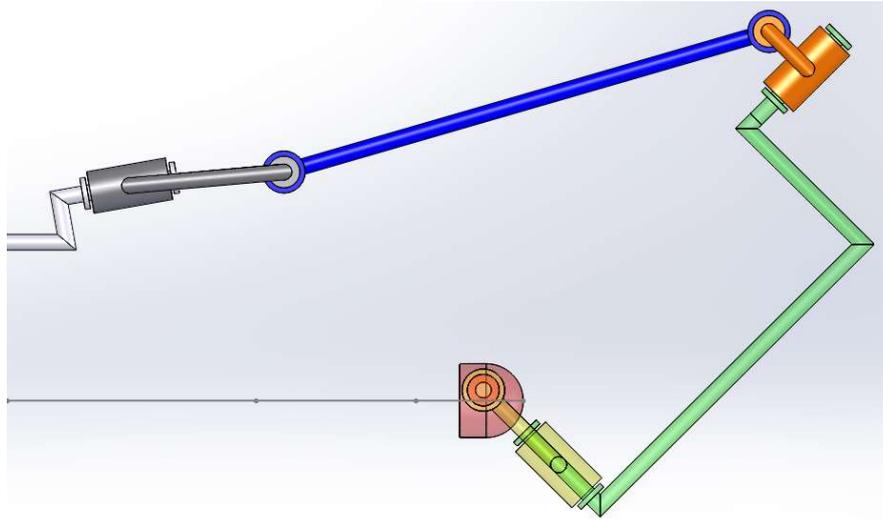


Figure 4.4 : Architecture cinématique du robot associé à chaque doigt. L'ensemble de pièces blanches correspond au bâti, les pièces grises au premier segment, les bleues au second segment et le reste des pièces inclue le dernier segment de l'étage de positionnement et le système d'orientation qui sera présenté dans le paragraphe 3.

2.3. DIMENSIONNEMENT GÉOMÉTRIQUE

La longueur des différents segments influe sur l'ensemble des performances du robot. Il est donc important de les dimensionner correctement. Ils doivent être suffisamment longs pour pouvoir atteindre l'ensemble de l'espace de travail du doigt mais ils doivent en même temps être les plus courts possible pour minimiser les couples nécessaires pour générer les efforts cartésiens désirés en bout de bras, maximiser la raideur de la structure mécanique ou encore limiter l'inertie du système. Pour cela, on cherche à minimiser la distance entre les axes de rotation à la base du système et le centre de l'espace de travail du doigt :

- Le premier axe, qui est incliné pour éviter toute configuration singulière, sera placé au plus près de la main, tout comme les deux autres axes.
- On cherchera les dimensions minimales du mécanisme à 4 barres permettant d'atteindre tous les points désirés, avec comme contrainte que l'angle minimal de déploiement reste supérieur à 30° et l'angle maximal inférieur à 150° afin d'éviter les singularités de ce mécanisme.

Dans la pratique, nous avons effectué un premier prédimensionnement théorique, en faisant les hypothèses que le pivot et les axes de base du parallélogramme sont concourants et que les deux segments du parallélogramme font la même taille pour permettre d'utiliser les mêmes moteurs sur les deux axes et éviter les trous dans l'espace de travail (cf. figure 4.5).

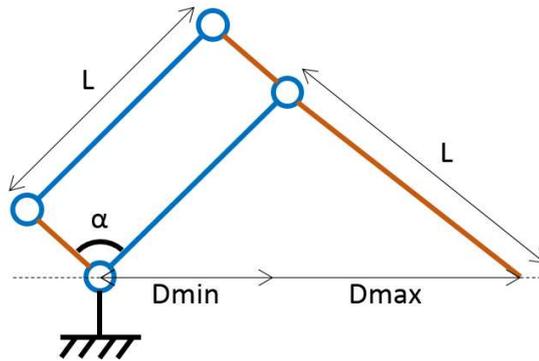


Figure 4.5 : Schéma d'un mécanisme à 4 barres classique.

Sous ces hypothèses, on peut déterminer la longueur des différents segments du parallélogramme en prenant en compte les distances minimale et maximale entre le cardan de base et n'importe quel point de l'espace de travail grâce au système d'équations suivant :

$$D^2 = 2L^2 - 2L^2 \cos \alpha \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} D_{max}^2 < (2 + \sqrt{3})L^2 \\ D_{min}^2 > (2 - \sqrt{3})L^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

La longueur minimale L_{min} des segments permettant d'avoir un déploiement maximal de D_{max} est donc égale à :

$$L_{min} = \sqrt{\frac{D_{max}^2}{2 + \sqrt{3}}} \quad (4.3)$$

Il convient également de vérifier que cette valeur respecte bien la seconde condition, qui est d'atteindre les points les plus proches. Pour cela nous utilisons l'équation suivante :

$$D_{min}^2 > (2 - \sqrt{3})L_{min}^2 \quad (4.4)$$

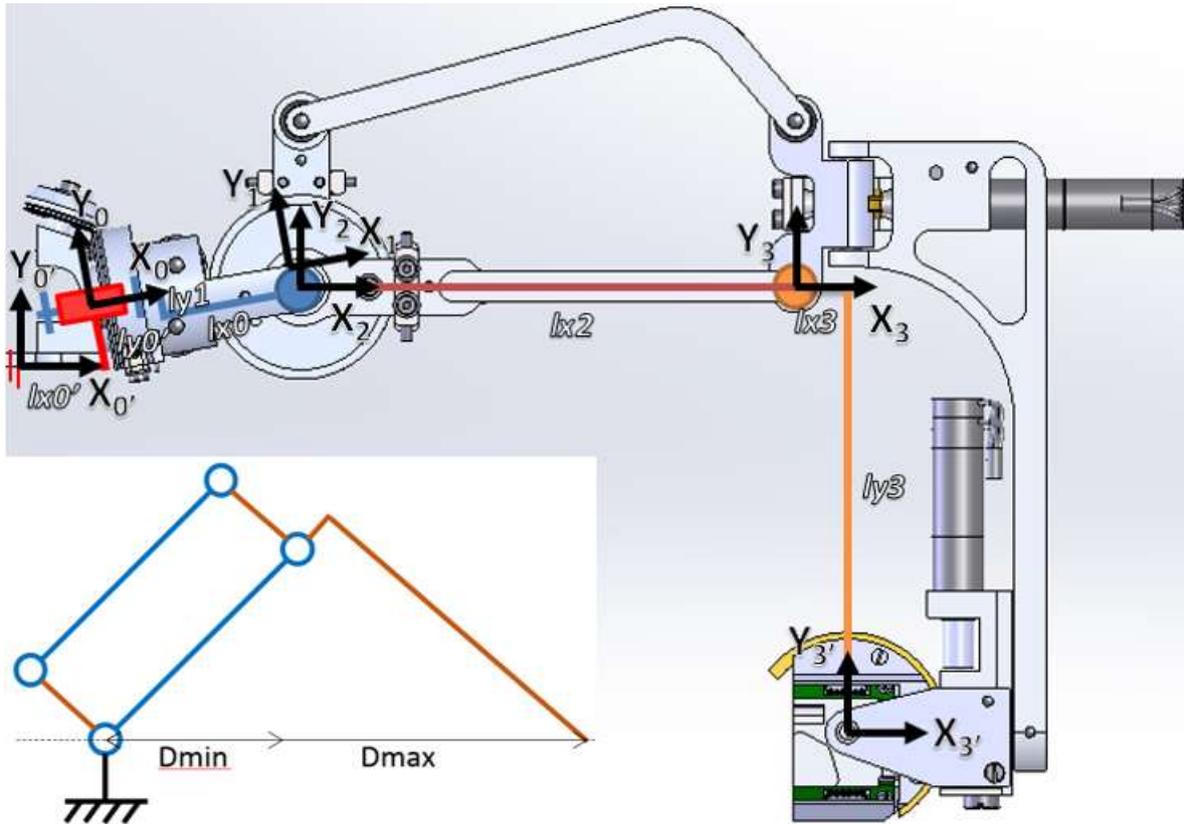


Figure 4.6 : Modèle CAO et modèle cinématique de l'étage de positionnement dans sa configuration de référence (variables articulaires nulles). Le schéma du mécanisme à 4 barres modifié que nous utilisons est illustré en bas à gauche.

Nous avons en parallèle mené la conception CAO de cette structure pour permettre de la positionner au mieux sur la main. Après plusieurs itérations sur le placement du cardan de base, on peut montrer avec le modèle CAO de la main et de l'interface que le parallélogramme doit avoir une amplitude allant de 50 à 170 mm pour l'index. Dans ces conditions, les segments du parallélogramme doivent avoir des longueurs de 88 mm pour atteindre tous les points de notre espace de travail.

La conception CAO a ensuite été mise à jour pour pouvoir intégrer les moteurs et divers éléments, ainsi que pour éviter les collisions entre les segments et le doigt. Comme le montrent la figure 4.6, il a notamment été nécessaire d'introduire un décalage (appelé $ly1$) entre l'axe de la liaison pivot et les axes de base du parallélogramme, et un second décalage (appelé $lx3$) entre le dernier segment du parallélogramme et le premier axe de l'étage d'orientation. Les segments du parallélogramme ont également dû être courbés.

Le modèle géométrique de notre système peut alors être écrit sous la forme d'une fonction des variables angulaires θ_{art1} , θ_{art2} et θ_{art3} (toutes nulles sur la figure 4.6). On notera que pour simplifier l'interprétation des résultats et l'étude en effort, nous rajoutons un repère $R_{0'}$ parallèle à la paume et $R_{3'}$ au niveau de l'effecteur.

$$T_{0'0} = trans(X_{0'}, lx_{0'}) \cdot trans(Y_{0'}, ly_{0'}) \cdot rot(Z_{0'}, qz_{0'}) \quad (4.5)$$

$$T_{01} = \text{trans}(X_0, lx_0). \text{rot}(X_1, \theta_{art1}) \quad (4.6)$$

$$T_{12} = \text{trans}(Y_1, -ly_1). \text{rot}(Z_2, \theta_{art2} - qz_0') \quad (4.7)$$

$$T_{23} = \text{trans}(X_2, lx_2). \text{rot}(Z_3, \theta_{art3}) \quad (4.8)$$

$$T_{33'} = \text{trans}(X_3, lx_3). \text{trans}(Y_3, -ly_3) \quad (4.9)$$

Après optimisation sous Solidworks, les différentes longueurs et angles de notre modèle sont alors :

$$lx_0' = 9.52mm \quad ly_0' = 8.37mm \quad qz_0' = 10^\circ \quad lx_0 = 40mm$$

$$ly_1 = 2.5mm \quad lx_2 = 95mm \quad lx_3 = 10mm \quad ly_3 = 86mm$$

On notera que les longueurs des segments restent proches de celles trouvées pour un parallélogramme classique. Une fois l'interface conçue, on peut vérifier graphiquement les résultats en observant que l'espace de travail du doigt gonflé de 15mm est bien inclus dans l'espace de travail de notre système comme le montre la figure 4.7.

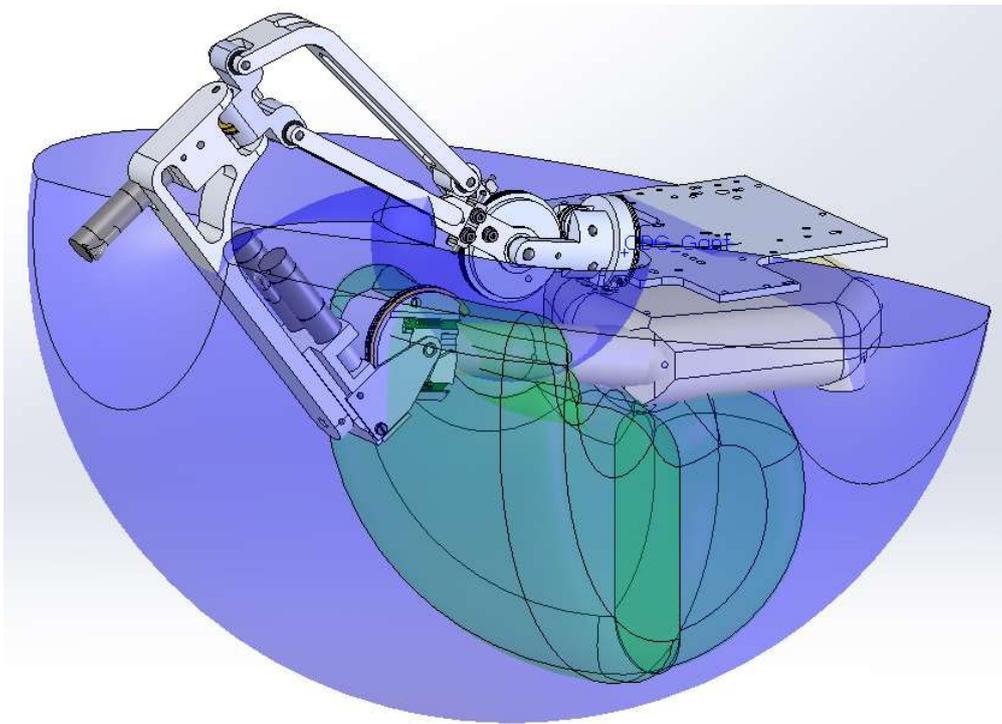


Figure 4.7 : Vérification du dimensionnement géométrique. L'espace de travail de l'interface (en bleu) englobe bien celui du doigt gonflé de 15mm (en vert).

Cette architecture a ensuite été adaptée pour le pouce. Pour cela, nous nous sommes assurés que l'espace de travail du pouce, augmenté de l'incertitude de 15mm due au suivi à distance du doigt (et dans le futur de la paume) soit inclus dans l'espace de travail du robot du pouce. Le schéma cinématique de ce robot est donné en figure 4.8.

Pour minimiser les développements et rationaliser le nombre de pièces mécaniques différentes, on a modifié le moins possible de paramètres. La principale différence concerne la pièce de fixation au bâti qui est modifiée pour s'adapter à l'espace de travail du pouce, les bras robotiques du pouce et de l'index étant disposés à 90° l'un de l'autre (cf. paragraphe 4). Le dernier segment du système de positionnement est également modifié pour mieux centrer la position initiale de l'effecteur par rapport au débattement angulaire du pouce. Globalement, seuls les paramètres suivants diffèrent pour le robot du pouce :

$$lx0' = 2,3 \text{ mm} \quad ly0' = 8,5 \text{ mm} \quad qz0' = 0^\circ$$

On notera que, comme le montrent les figures 4.1 et 4.2, les robots du pouce et de l'index partent dans des directions opposées de l'espace. Ils ne peuvent donc pas entrer en collision entre eux, sauf au niveau des effecteurs. Il serait possible de faire évoluer cette interface en ajoutant des bras robotiques associés aux autres doigts pour simuler un plus grand nombre de prises différentes mais dans ce cas, on devrait tenir compte des collisions entre les pièces mécaniques des robots de l'index, du majeur, de l'annulaire et de l'auriculaire. Pour minimiser ces collisions, nous imposons une limite maximale de 30mm (qui est la taille minimale de l'effecteur pour ces doigts) sur la largeur des robots.

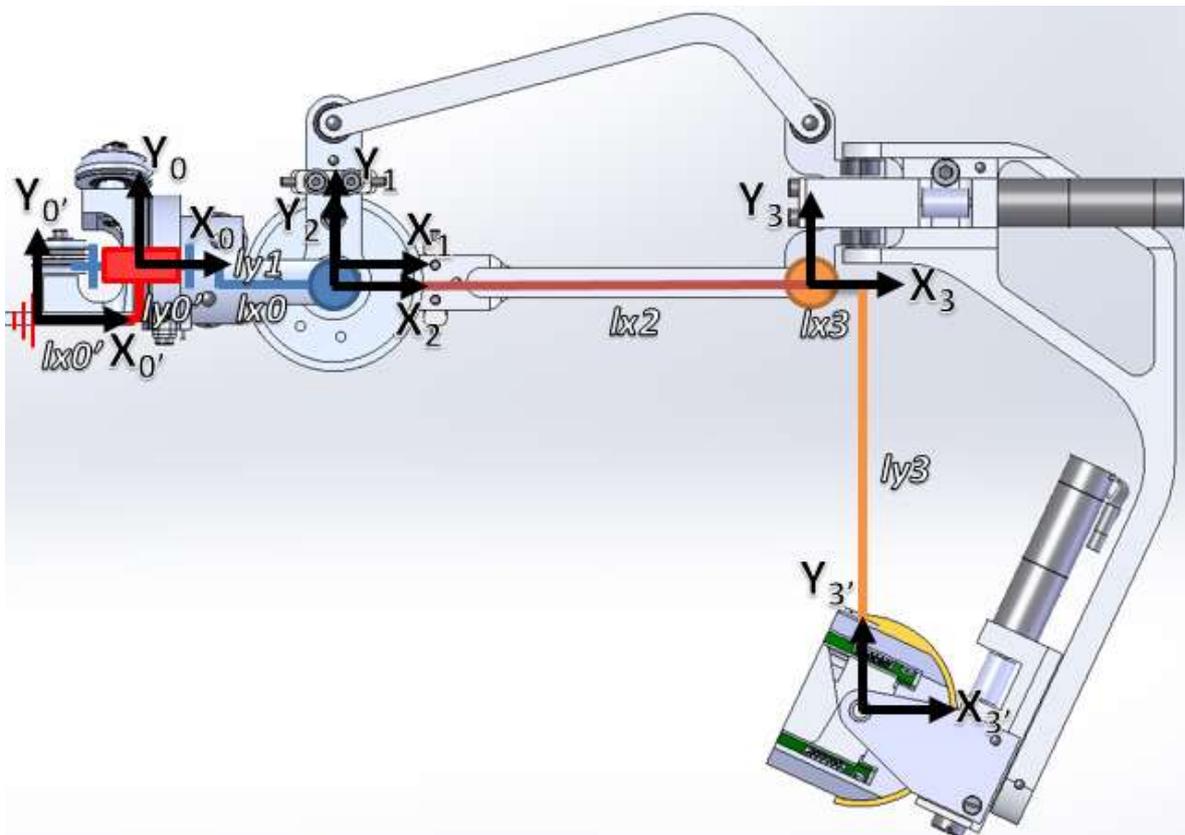


Figure 4.8 : Schéma cinématique du bras robotique suivant le pouce.

2.4. DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES ACTIONNEURS

2.4.1. Problématique

Le choix des actionneurs (un actionneur étant défini ici comme un ensemble constitué d'un moteur et d'un réducteur) est une étape critique dans la conception d'une interface à retour d'effort. Ainsi, comme rappelé dans [Gosselin 2000] :

- La capacité en effort du robot dépend de celle des actionneurs qui est égale, au rendement près, à celle des moteurs multipliée par les rapports de réduction.
- Les frottements moteurs sont également multipliés par les rapports de réduction.
- La raideur apparente des asservissements des moteurs est multipliée par le rapport de réduction au carré.
- La masse apparente des rotors des moteurs est également multipliée par le rapport de réduction au carré.

Le choix des moteurs et des réducteurs aura donc une influence très importante sur la quasi-totalité des performances du robot. Pour les choisir, nous tiendrons compte plus spécifiquement des efforts et des raideurs. En effet, pour simplifier la conception et la commande de l'interface, nous choisirons d'utiliser des actionneurs réversibles combinant des moteurs à courant continu et des réducteurs à cabestan à câbles qui ont en outre l'avantage de transmettre à la fois les efforts et les vibrations dues aux impacts (on notera que dans notre cas, il serait difficile d'utiliser des actionneurs et/ou des réducteurs non réversibles et de réversibiliser le système à l'aide d'un capteur d'effort car la géométrie de la capsule rend difficile l'intégration d'un tel capteur). Dans ces conditions les frottements des moteurs sont égaux à une fraction de sa capacité en effort et on ne peut pas les optimiser indépendamment des efforts. Par ailleurs l'inertie des rotors de tels moteurs est faible. Dans la pratique elle est souvent nettement inférieure à celle de la structure du robot et il n'est pas indispensable d'en tenir compte pour le choix des moteurs.

2.4.2. Dimensionnement en effort

Le modèle statique inverse du robot, qui permet de calculer les couples articulaires nécessaires pour appliquer des efforts opérationnels donnés, s'écrit :

$$\tau_{art} = J_{art}^T \cdot F \quad (4.10)$$

Avec :

$$J_{art} = \left[\begin{array}{ccc} {}^0\vec{x}_1 \times {}^0\vec{O}_1O_{3'} & {}^0\vec{z}_2 \times {}^0\vec{O}_2O_{3'} & {}^0\vec{z}_3 \times {}^0\vec{O}_3O_{3'} \end{array} \right] \quad (4.11)$$

Cette expression suppose que les variables articulaires correspondent aux angles entre les différents corps du robot. Or sur le parallélogramme, les actionneurs ne pilotent pas directement ces angles. Ils commandent les angles absolus des bielles. On peut exprimer les couplages entre les variables en sortie des actionneurs et les variables articulaires sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{art1} = \theta_{act1} \\ \theta_{art2} = \theta_{act2} \\ \theta_{art3} = \theta_{act3} - \theta_{ac} - \frac{\pi}{2} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Dans ces conditions, on peut exprimer le modèle statique inverse et le Jacobien dans l'espace des actionneurs sous la forme suivante :

$$\tau_{act} = J_{act}^T \cdot F \quad (4.13)$$

Avec :

$$J_{act} = J_{art} \cdot T_{act \rightarrow art} \quad (4.14)$$

$$T_{act \rightarrow art} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Ce modèle permet de calculer les couples en sortie des actionneurs nécessaires pour générer les efforts F_{max} désirés en bout d'effecteur. Afin d'être sûr de pouvoir générer ces efforts dans toutes les directions, nous utilisons la notion d'ellipsoïdes de dimensionnement en effort [Gosselin 2000]. Ces ellipsoïdes sont définis comme le volume engendré dans l'espace des couples actionneurs par une force et/ou un couple donné(s) dans l'espace cartésien. Cette méthode permet donc de calculer les couples nécessaires en sortie des actionneurs pour que le bras puisse appliquer des efforts et/ou des couples identiques dans toutes les directions. Ici, pour l'étage de positionnement, nous ne tiendrons compte que des forces. Les ellipsoïdes seront donc de dimension 3 et définis par l'équation (4.16).

$$\|F\|^2 \leq F_{max}^2 \quad \text{soit} \quad \tau_{act}^T \cdot (J_{act}^{-1} \cdot J_{act}^{-T} / F_{max}^2) \cdot \tau_{act} \leq 1 \quad (4.16)$$

Pour que les actionneurs puissent atteindre tous les points de cet ellipsoïde, leurs couples sont choisis pour correspondre à sa boîte englobante.

Les résultats obtenus en tenant compte de toutes les configurations du robot dans son espace de travail sont les suivants : le couple en sortie des actionneurs doit être au minimum de 764mN.m sur le premier axe, 475mN.m sur le second et 433mN.m sur le dernier.

On peut théoriquement choisir n'importe quelle combinaison de moteurs et de réducteurs permettant d'atteindre ces valeurs. Dans la pratique cependant, les moteurs à courant continu permettant d'atteindre de tels couples continus sont lourds et encombrants, ce qui impose un rapport de réduction minimum si l'on veut pouvoir les embarquer sur l'interface pour éviter de recourir à des transmissions à distance qui introduiraient des frottements et une flexibilité importants comme sur le Cybergrasp [Aiple et Schiele 2013]. D'un autre côté les réducteurs à cabestan sont relativement encombrants pour des rapports de réduction élevés, ce qui fixe une limite supérieure aux rapports de réduction. Par ailleurs un moteur trop petit (associé à un réducteur de grand rapport de réduction) risque de ne pas avoir une raideur d'asservissement suffisante [Gosselin 2011].

Après avoir analysé les catalogues de fabricants de moteurs et calculé les rapports de réduction associés, nous avons finalement choisi d'utiliser un moteur RE25 de chez Maxon Motors (tension d'alimentation de 24V, couple nominal de 30.4mN.m, vitesse à vide de 10900tr/min, masse de 130g). Pour obtenir les couples désirés en sortie des actionneurs et avoir ainsi une capacité en effort de 5N en continu sur tout l'espace de travail et dans toutes les directions, il faut donc un rapport de réduction de 25.13:1 sur l'axe 1, 15.63:1 sur l'axe 2 et 14.24:1 sur l'axe 3. On notera que sur les systèmes de ce type, on utilise en général les mêmes actionneurs sur les axes 2 et 3 pour limiter le nombre de pièces mécaniques différentes. Dans ces conditions on arrive à des rapports de réduction de 25.13:1 sur l'axe 1 et 15.63:1 sur les axes 2 et 3.

2.4.3. Dimensionnement en raideur

On fait ici l'hypothèse d'un couplage en impédance (qui a l'avantage d'être passif si l'on choisit bien les gains des asservissements) entre l'interface et la simulation. Dans ces conditions, le gain des asservissements des moteurs sera ressenti comme une raideur k_{mot} . Sachant que cette raideur est multipliée par le rapport de réduction r au carré en sortie de l'actionneur, on peut écrire la raideur apparente des actionneurs sous la forme :

$$k_{mot_act} = r^2 \cdot k_{mot} \quad (4.17)$$

Le couple τ_{act} produit par un déplacement infinitésimal dq_{act} en sortie de l'actionneur s'exprime alors :

$$\tau_{act} = k_{mot_act} \cdot dq_{act} \quad (4.18)$$

Afin de déterminer la raideur ressentie par l'utilisateur, il faut exprimer cette relation dans l'espace cartésien. Pour cela, nous utiliserons le modèle statique direct et le modèle cinématique inverse du robot qui s'expriment :

$$F = J_{act}^{-T} \cdot \tau_{act} \quad (4.19)$$

$$dq_{act} = J_{act}^{-1} \cdot dX \quad (4.20)$$

Nous obtenons ainsi une relation liant un déplacement infinitésimal dX dans l'espace cartésien à la force F générée par ce déplacement, via une matrice de raideur apparente des asservissements k_{ass} .

$$F = J_{act}^{-T} \cdot k_{mot_act} \cdot J_{act}^{-1} \cdot dX = k_{ass} \cdot dX \quad (4.21)$$

Avec :

$$k_{ass} = J_{act}^{-T} \cdot k_{mot_act} \cdot J_{act}^{-1} \quad (4.22)$$

À l'aide de cette matrice, il est possible de définir un ellipsoïde de raideur apparente qui est l'image dans l'espace de forces opérationnelles d'une sphère définie dans l'espace des déplacements cartésiens. Cet ellipsoïde est défini par l'équation (4.23).

$$\|dX\|^2 \leq 1 \quad \text{soit} \quad F^T \cdot (k_{ass} \cdot k_{ass}^T)^{-1} \cdot F \leq 1 \quad (4.23)$$

Sachant que la raideur moteur, qui est déterminée par le gain proportionnel maximum que l'on peut appliquer au moteur en restant dans son domaine de stabilité, est de l'ordre de 1N/mm pour le moteur Maxon RE25 [Gosselin 2009], on obtient après calculs une raideur apparente minimale de 21.53N/mm en abduction-adduction et 15.96N/mm en flexion-extension si l'on tient compte des rapports de réduction obtenus à l'issue du dimensionnement en effort (25.13:1 sur l'axe 1 et 15.63:1 sur les axes 2 et 3).

On constate que cette raideur n'est pas homogène. Pour obtenir des raideurs minimales identiques en abduction-adduction et en flexion-extension, il faut multiplier le rapport de réduction sur les axes 2 et 3 par $\sqrt{21.53/15.96} = 1.16$, ce qui conduit à des rapports de réduction de 18.15:1 sur les axes 2 et 3. Avec ces valeurs, on obtient une raideur apparente due aux asservissements de 21.52N/mm, légèrement inférieure à notre cahier des charges.

On notera que dans la pratique, la raideur du robot résulte à la fois de la raideur k_{ass} des asservissements des moteurs, mais aussi de la raideur k_{cab} des câbles et de la raideur k_{str} de la structure mécanique du robot. Ces trois éléments agissant en première approximation en série, la raideur apparente totale pour l'utilisateur k_{tot} s'exprime sous la forme suivante :

$$\frac{1}{k_{tot}} = \frac{1}{k_{ass}} + \frac{1}{k_{cab}} + \frac{1}{k_{str}} \quad (4.24)$$

En faisant l'hypothèse que ces trois composantes ont la même importance, il faudrait théoriquement que la raideur des asservissements des moteurs soit le triple de la raideur spécifiée dans notre cahier des charges, soit $3 \times 24.2 = 72.6 \text{ N/mm}$ (cf. paragraphe 2.1). Pour cela il faudrait des rapports de réduction de 46.2 sur l'axe 1 et 33.3 sur les axes 2 et 3.

2.4.4. Contraintes d'intégration

Pour la conception des actionneurs, nous tiendrons compte dans la mesure du possible des valeurs les plus dimensionnantes afin d'être sûrs de pouvoir respecter à la fois le cahier des charges en effort et en raideur. Dans ces conditions, il faudrait théoriquement des rapports de réduction de 46.2 sur l'axe 1 et 33.3 sur les axes 2 et 3.

Ces rapports de réduction sont très élevés et ne peuvent pas être obtenus avec un seul étage de réduction dans un volume raisonnable. Nous avons donc décidé de développer un réducteur à câbles à plusieurs étages, en nous limitant à 2 étages, ce qui paraît le maximum pour un réducteur à cabestan.

Dans la pratique, ce réducteur est composé d'un premier étage identique sur tous les axes (on parlera de motoréducteur à câbles, cf. figure 4.9) et d'un second étage spécifique à chaque axe (cf. figure 4.10). L'axe du moteur étant de 5mm, on ne peut pas avoir un diamètre de poulie inférieur à 6mm. Nous souhaitons par ailleurs que la plus grande poulie n'ait pas un diamètre supérieur à celui du moteur, soit 25mm. Ainsi il est aisé de fixer les modules les uns à côtés des autres. La réduction de ce motoréducteur est donc de 4:1, avec une poulie secondaire de 24mm de diamètre solidaire de la poulie motrice du second étage de réduction dont le diamètre est de 5mm. Afin d'éviter les problèmes de fluage, un système de tension est incorporé à la boucle d'actionnement (cf. figure 4.11).



Figure 4.9 : Les 6 motoréducteurs à câbles identiques utilisés sur notre robot.

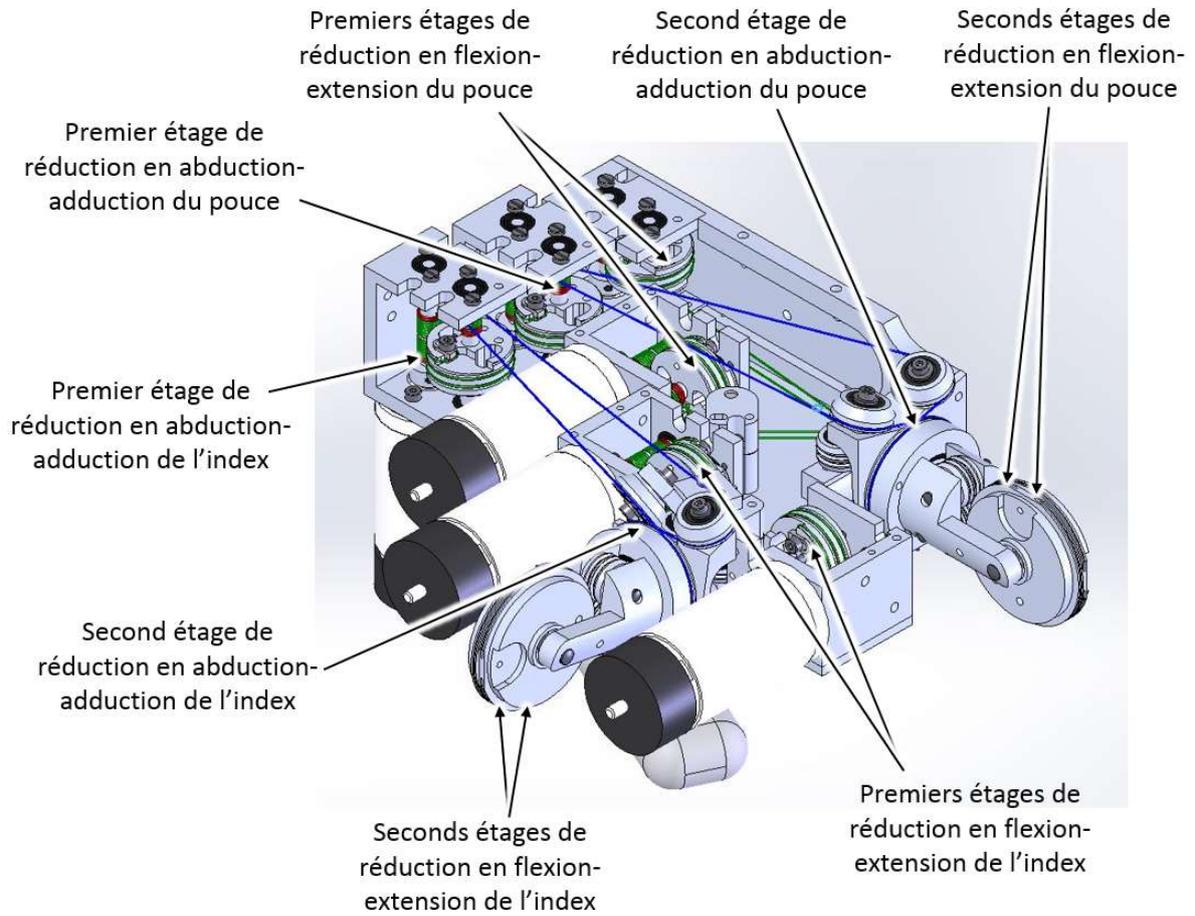


Figure 4.10 : Agencement des étages de réduction primaires et secondaires sur les robots du pouce et de l'index.

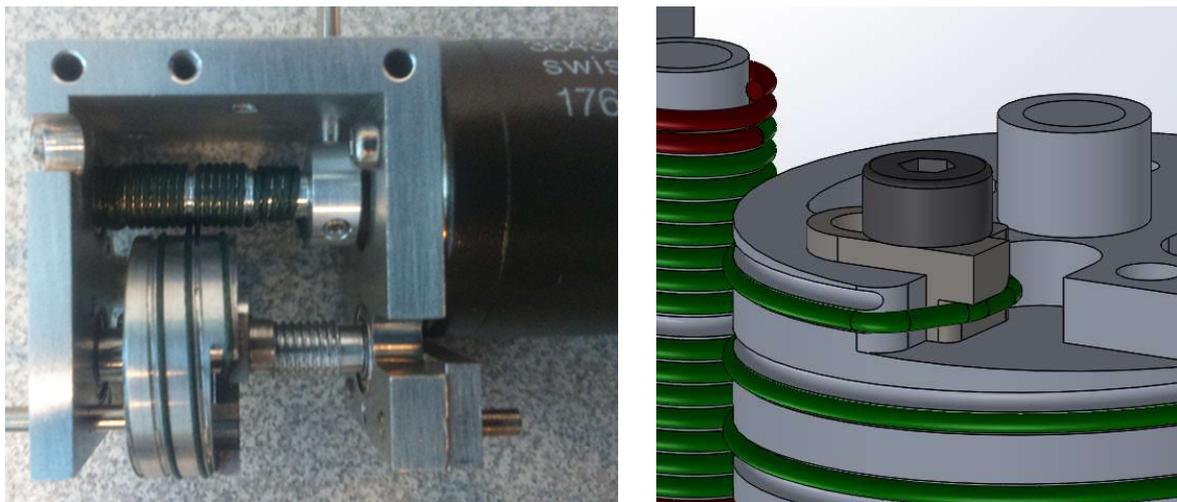


Figure 4.11 : Zoom sur le premier étage de réduction (gauche) et sur le système de tension (droite).

Le second étage de réduction devrait donc avoir un rapport de 11.55:1 sur l'axe 1 et de 8.33:1 sur les axes 2 et 3. Il faudrait pour cela que le diamètre de la poulie articulaire en sortie du second étage de réduction ait un diamètre de 57.75mm sur l'axe 1 et de 41.63mm sur les axes du parallélogramme. Ces valeurs ne permettraient pas de respecter la contrainte de largeur maximale de 30mm des robots que nous avons imposée précédemment. Pour cela, il faut limiter le diamètre de la poulie articulaire à 30mm sur l'axe 1, soit un rapport de 6:1. Des contraintes d'intégration nous conduisent aussi à limiter ce diamètre sur les autres poulies. Il est fixé à 35mm, soit un rapport de réduction de 7:1.

2.4.5. Bilan et spécification de la chaîne d'actionnement

Au vu des études précédentes, nous avons choisi des moteurs à courant continu RE25 de chez Maxon Motors (tension d'alimentation de 24V, couple nominal de 30.4mN.m, vitesse à vide de 10900tr/min, masse de 130g) associés à des réducteurs à cabestan à deux étages de rapport 24:1 sur l'axe 1 (premier étage de rapport 4:1 et second étage de rapport 6:1) et 28:1 sur les axes 2 et 3 (premier étage de rapport 4:1 et second étage de rapport 7:1).

Avec ces valeurs, on obtient une capacité en couple de 729.6N.mm sur l'axe 1, ce qui est légèrement plus faible que la valeur permettant d'obtenir une capacité en effort de 5N en tout point et dans toutes les directions, et de 851.2N.mm sur les axes 2 et 3, ce qui est nettement plus que nécessaire. Les raideurs apparentes minimales k_{mot_app} en tout point de l'espace de travail dues aux asservissements sont quant à elles théoriquement de 19.6N/mm en abduction-adduction et 54.9N/mm en flexion-extension.

2.5. CARACTÉRISATION DES PERFORMANCES EN RAIDEUR

2.5.1. Problématique

Comme nous l'avons vu précédemment, la raideur apparente totale du robot résulte de la raideur des asservissements des moteurs, de la raideur des câbles et de la raideur de la structure, ces trois éléments agissant en série. Si la raideur des asservissements des moteurs a été étudiée dans le chapitre précédent, les autres raideurs doivent également être caractérisées si l'on veut être capable d'évaluer les performances théoriques du robot. Nous étudierons donc dans ce paragraphe chacun de ces paramètres en allant de l'effecteur, où est appliquée la force de l'utilisateur, jusqu'aux moteurs.

2.5.2. Raideur de la structure mécanique

Quand on optimise une structure mécanique, on doit faire un compromis entre la raideur et le poids des segments. On peut atténuer ce problème en utilisant des profils de poutres adaptés, mais cela implique souvent un usinage coûteux, ou des matériaux les plus raides possibles. Parmi les matériaux ayant le meilleur rapport entre leur module d'Young et leur masse volumique, on trouve la fibre de carbone, l'aluminium et le titane. La fibre de carbone, surtout utilisée pour fabriquer des tubes, impose des contraintes sur les formes des pièces. Elle est difficile et coûteuse à mettre en forme pour des géométries complexes. Le titane est lui aussi relativement coûteux. Notre structure sera donc usinée en aluminium (2017A).

Dans la pratique, notre interface sera composée d'un nombre important d'éléments mécaniques et de moteurs. Son poids risque donc d'être conséquent. Pour cette raison, nous limitons le poids d'un bras

mécanique complet à 250g. La déformation n'étant pas la même suivant la configuration et la direction de la force, nous effectuons plusieurs analyses en éléments finis sous SolidWorks, avec la structure en parallélogramme ouverte et fermée au maximum et dans plusieurs directions, afin d'en déduire les plus grandes déformations. Pour évaluer la raideur de la structure, nous mesurons le déplacement des deux points d'attache de l'effecteur sous un effort de 15N.

On notera que d'après l'étude des mouvements d'exploration dont nous avons parlé dans le chapitre 2, la discrimination de la raideur se fait avec un mouvement de flexion de l'index. La plupart des manipulations à deux doigts utilisent aussi un mouvement de flexion des deux doigts [Cutkosky 1989] [Feix et al. 2009] (mise à part la saisie C16 vue dans le chapitre 2). Nous optimiserons donc la structure pour qu'elle soit la plus raide possible en flexion-extension, puis nous caractériserons la raideur obtenue à l'issue de cette optimisation en flexion-extension et en abduction-adduction.

On constate ainsi lors de l'optimisation de la raideur dans le plan sagittal du doigt que le parallélogramme à bielle raidit grandement le second segment comme présagé précédemment, et que par conséquent les plus grandes déformations sont obtenues avec une force normale au dernier segment. Suite à cela, nous en déduisons l'épaisseur et la largeur des segments de notre structure afin d'obtenir la plus grande raideur possible, sans dépasser la limite de poids que nous avons imposée. Dans la pratique, la déformation maximale est obtenue quand le parallélogramme est replié au maximum. Elle est de 0.37mm sous une force de 15N (cf. figure 4.12). Cela correspond à une raideur k_{str_app} de 40.54N/mm.

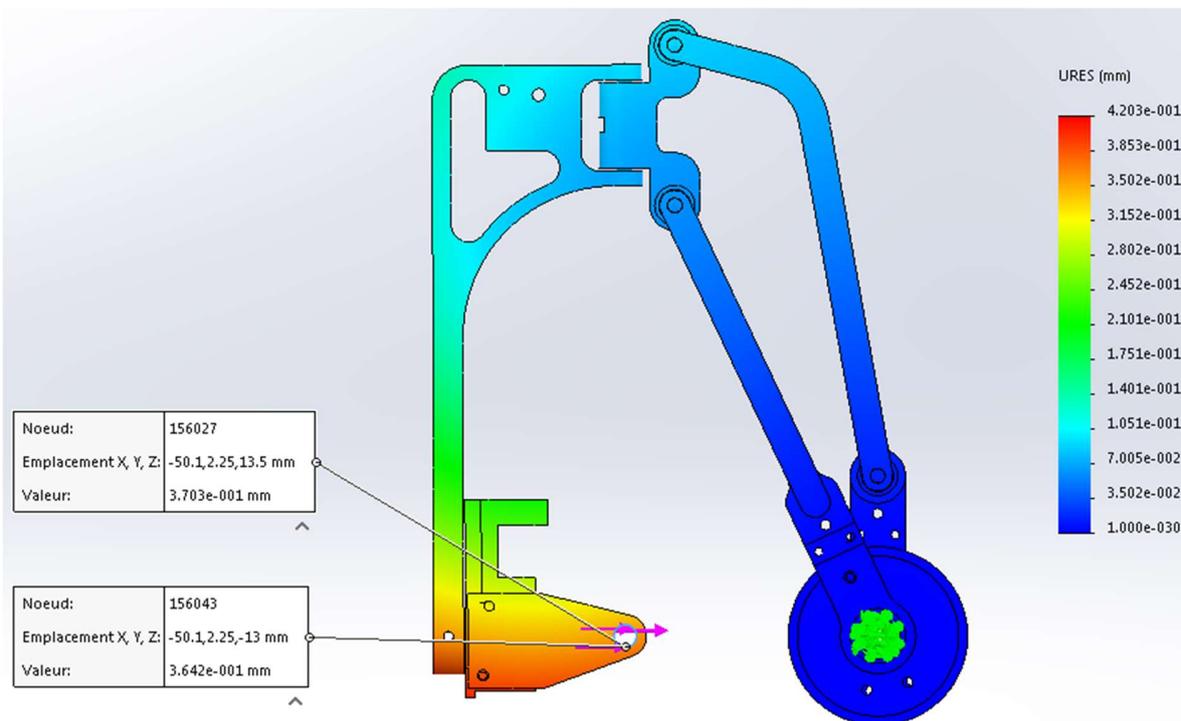


Figure 4.12 : Analyse par éléments finis de la déformation en flexion-extension dans le cas le plus défavorable (parallélogramme replié au maximum).

En abduction-adduction, elle est de 1.66mm sous 15N (cf. figure 4.13), on a donc une raideur mécanique k_{str_app} de 9.04N/mm.

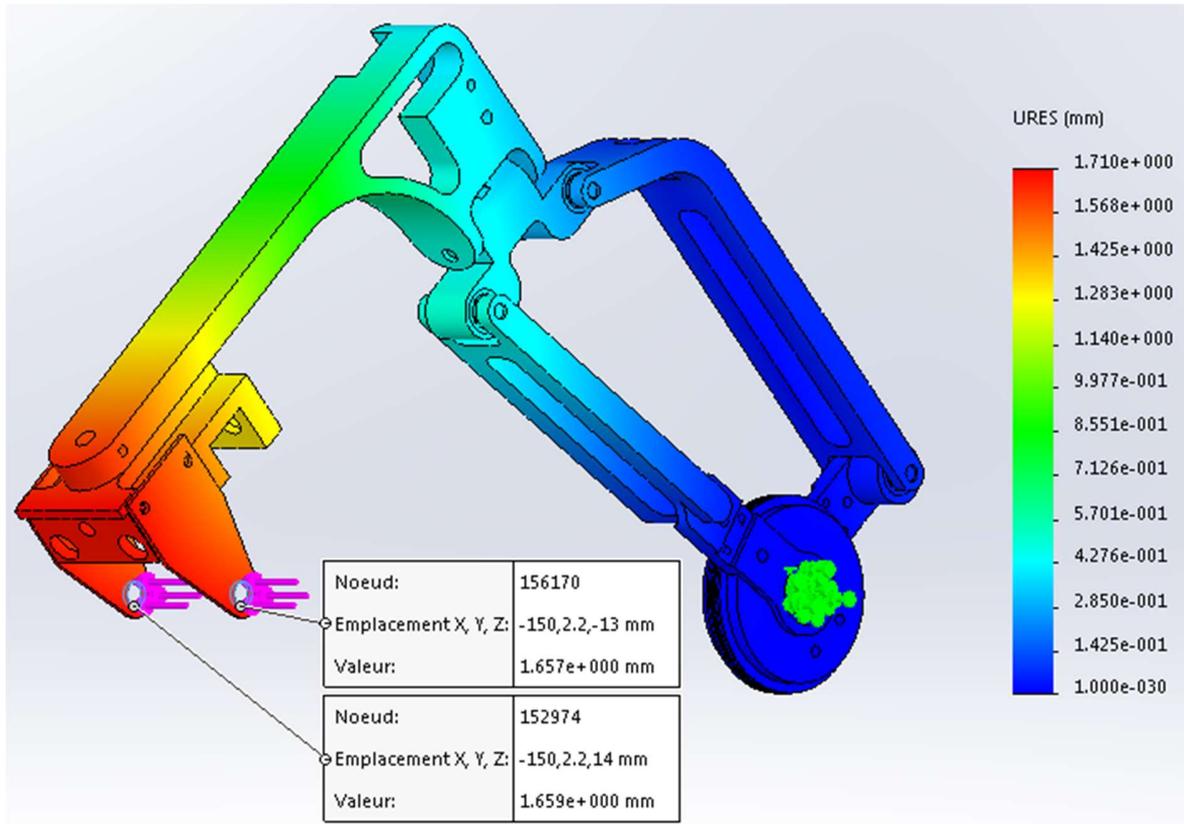


Figure 4.13 : Analyse par éléments finis de la déformation en abduction-adduction dans le cas le plus défavorable (parallélogramme ouvert au maximum).

2.5.3. Raideur des câbles

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la raideur des câbles utilisés dans les réducteurs à cabestan. Contrairement aux engrenages ou aux réducteurs usuels, ces câbles sont relativement souples. D'une manière générale, on cherchera à minimiser la distance entre les axes des moteurs et les axes des liaisons actionnées pour avoir des passages de câbles aussi courts et simples que possible afin d'améliorer la raideur apparente, sous la contrainte de contourner tous les obstacles entre les moteurs et les articulations, de minimiser l'encombrement du système et si possible de découpler l'actionnement des différents axes du robot.

On notera que pour minimiser l'encombrement, il faut utiliser les câbles dont le rayon de courbure minimal est le plus faible possible, ce qui permet de minimiser la taille des poulies d'actionnement et de renvoi. On a donc fait le choix d'utiliser des câbles en Dyneema. Contrairement aux câbles en acier usuellement utilisés sur les interfaces haptiques, ces câbles peuvent s'enrouler sur des poulies de très faible diamètre, tout en conservant une raideur linéaire semblable à celle des câbles en acier de même diamètre. Ainsi, le câble Berkley Whiplash Pro de 0.56mm de diamètre que nous avons choisi a une résistance théorique de

44.9kg et son module d'Young E_{cab} , qui a été identifié sur banc d'essais [Gosselin 2009], est de 41.42kN/mm², ce qui est proche des câbles en acier multibrins [Loos & Co.]. Le principal défaut des câbles en Dyneema est le fluage. L'étude [Gosselin 2009] a cependant montré que ce phénomène est quasiment nul après plusieurs heures sous tension. Par sécurité, nous placerons tout de même des systèmes de tension sur chaque chemin de câbles.

Compte tenu de l'importance toute particulière du mouvement de flexion-extension qui sert comme nous l'avons vu ci-dessus à appuyer sur les objets lors des mouvements d'exploration et pour réguler la force de saisie lors des gestes de manipulation, nous privilégierons ici les actionneurs du parallélogramme, les blocs moteurs étant intégrés au plus près de ces articulations pour limiter la longueur des câbles associés, en particulier pour l'index. Les autres blocs moteurs sont disposés au mieux sur la base pour limiter la longueur des autres câbles et l'encombrement de la pièce au-dessus de la paume. La figure 4.14 montre l'agencement des différents câbles après une optimisation effectuée sous Solidworks.

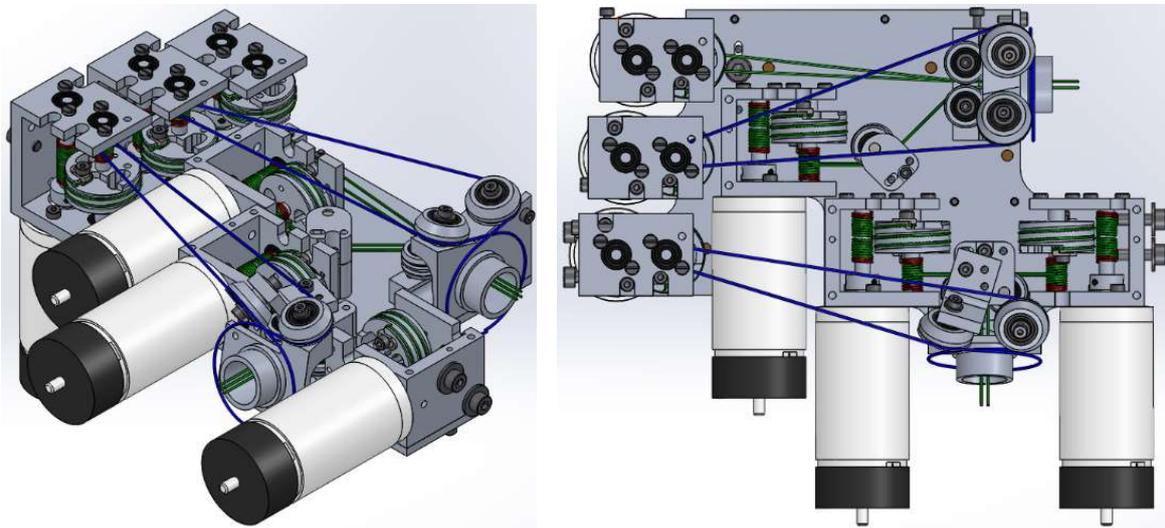


Figure 4.14 : Vue en perspective et de dessus du bâti avec les nombreux passages de câbles.

Les longueurs l_{cab} des brins de câble utilisés pour actionner les différents segments des robots de l'index et du pouce dans le sens positif et dans le sens négatif de rotation sont fournies dans le tableau 4.1 (on suppose que seuls les brins libres de câbles travaillent, pas les longueurs enroulées sur les poulies).

Tableau 4.1 : Longueur des différents brins de câbles.

l_{cab}	Index		Pouce	
	Sens +	Sens -	Sens +	Sens -
Axe 1 (Abd.)	106.8mm	90.7mm	101.2mm	104.5mm
Axe 2 (Flex.)	42.8mm	42.8mm	102.8mm	102.9mm
Axe 3 (Flex.)	42.8mm	42.8mm	71.5mm	71.3mm

Les systèmes de tension permettent de compenser les problèmes dus au faible fluage des câbles et aux imprécisions de montage, mais leur débattement n'est pas suffisant pour précharger suffisamment les câbles pour éviter l'apparition d'un brin mou sous charge. Par conséquent, nous ferons l'hypothèse que

seul le brin de câble qui s'oppose au mouvement travaille pour calculer la raideur linéaire k_{lincab} des câbles en fonction de leur longueur l_{cab} et de l'aire A_{cab} de leur section grâce à la formule suivante.

$$k_{lincab} = \frac{E_{cab} \cdot A_{cab}}{l_{cab}} \quad (4.25)$$

Les valeurs minimales obtenues sur chacun des axes sont résumées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Raideurs minimales des câbles sur les différents axes du robot.

k_{cab}	Index	Pouce
Axe 1 (Abd.)	95.5 N/mm	97.6 N/mm
Axe 2 (Flex.)	238.2 N/mm	99.1 N/mm
Axe 3 (Flex.)	238.2 N/mm	143 N/mm

Ces valeurs nous permettent de calculer les raideurs équivalentes k_{cab_act} au niveau de la sortie des actionneurs (cf. tableau 4.3). Pour cela, on utilise la formule suivante, où R_p est le rayon des poulies articulaires sur lesquelles agissent les câbles en sortie du second étage de réduction (ce rayon est de 15mm sur l'axe 1 et 17.5mm sur les axes 2 et 3, cf. paragraphe 2.4.4).

$$k_{cab_act} = k_{lincab} \cdot R_p^2 \quad (4.26)$$

Tableau 4.3 : Raideurs articulaires équivalentes aux raideurs minimales des câbles sur les différents axes du robot.

k_{cab_act}	Index	Pouce
Axe 1 (Abd.)	21.5 N.m/rad	22 N.m/rad
Axe 2 (Flex.)	72.9 N.m/rad	30.3 N.m/rad
Axe 3 (Flex.)	72.9 N.m/rad	43.8 N.m/rad

Ces raideurs relient un déplacement infinitésimal dq_{act} des poulies actionnées en sortie des actionneurs au couple τ_{act} généré par ce déplacement.

$$\tau_{act} = k_{cab_act} \cdot dq_{act} \quad (4.27)$$

Pour calculer la raideur k_{cab} ressentie par l'utilisateur dans l'espace cartésien, on utilise les modèles du robot écrits au niveau articulaire (cf. équation 4.19 et 4.20). On a alors :

$$F = J_{act}^{-T} \cdot k_{cab_act} \cdot J_{act}^{-1} \cdot dX = k_{cab} \cdot dX \quad (4.28)$$

Avec :

$$k_{cab} = J_{act}^{-T} \cdot k_{cab_act} \cdot J_{act}^{-1} \quad (4.29)$$

Cette matrice peut être utilisée pour définir l'ellipsoïde de raideur apparente liée aux câbles.

$$\|dX\|^2 \leq 1 \quad \text{soit} \quad F^T \cdot (k_{cab} \cdot k_{cab}^T)^{-1} \cdot F \leq 1 \quad (4.30)$$

Cet ellipsoïde nous permet de calculer la raideur apparente minimale k_{cab_app} dans tout l'espace de travail du doigt pour un mouvement d'abduction-adduction (perpendiculaire au plan parallélogramme) et pour un mouvement de flexion-extension (dans le plan de ce système). De cette manière, nous trouvons les valeurs suivantes.

Tableau 4.4 : Raideurs apparentes minimales dues aux câbles.

k_{cab_app}	Index	Pouce
Abduction	0.92 N/mm	0.94 N/mm
Flexion	5.01 N/mm	2.70 N/mm

2.5.4. Bilan

Nous avons calculé la raideur apparente minimale k_{mot_app} due aux moteurs dans le paragraphe 2.4.5 et les raideurs apparentes minimales k_{str_app} et k_{cab_app} dues à la structure et aux câbles dans les paragraphes 2.5.2 et 2.5.3. Cela nous permet de calculer la raideur apparente globale du robot, k_{tot_app} , grâce à la formule (4.24). On notera que ces calculs doivent être effectués en chaque point avant de calculer le minimum des valeurs ainsi obtenues. Pour éviter d'avoir à calculer la raideur de la structure en chaque point, ce qui serait très long car cela nécessiterait à chaque fois un calcul éléments finis, nous avons commencé par vérifier en quels points les raideurs dues aux moteurs et aux câbles sont minimales. Sans surprise, elles sont les plus faibles lorsque le bras est tendu. La raideur totale a donc été calculée en ces points. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.5 ci-dessous (on notera que pour la raideur de structure, la valeur en flexion-extension, obtenue au point où le parallélogramme est tendu, est légèrement supérieure au minimum indiqué dans le paragraphe 2.5.2 qui est obtenu dans la configuration où il est replié).

Tableau 4.5 : Raideurs apparentes du robot et de ses principaux composants.

	Index		Pouce	
	Flexion	Abduction	Flexion	Abduction
k_{mot_app}	54.9 N/mm	19.6 N/mm	54.9 N/mm	19.6 N/mm
k_{cab_app}	5.01 N/mm	0.92 N/mm	2.70 N/mm	0.94 N/mm
k_{str_app}	46.01 N/mm	9.04 N/mm	46.01 N/mm	9.04 N/mm
k_{tot_app}	4.17 N/mm	0.80 N/mm	2.44 N/mm	0.82 N/mm

On notera que nous avons supposé, pour éviter d'avoir à refaire des calculs éléments finis supplémentaires, que la raideur de la structure du robot du pouce est la même que celle de la structure du robot de l'index. Il aurait théoriquement fallu faire une étude spécifique pour le robot du pouce. Cependant, comme le montre les figures 4.6 et 4.8, ces robots diffèrent peu et leur raideur doit donc rester très proche.

2.6. COMPARAISON ENTRE LE CAHIER DES CHARGES ET LE DIMENSIONNEMENT DU ROBOT

La figure ci-dessous montre les étages de positionnement des capsules du pouce et de l'index une fois assemblés sur la pièce de base commune (cf. paragraphe 4). Ces robots ont été réalisés suivant les dimensions spécifiées précédemment.



Figure 4.15 : Prototype intégrant les étages de positionnement des capsules du pouce et de l'index.

Le tableau ci-dessous rappelle le cahier des charges en effort et en raideur et résume les performances théoriques du robot après dimensionnement et optimisation.

Tableau 4.6 : Comparaison entre le cahier des charges et les performances théoriques de l'étage de positionnement des capsules.

		Effort en continu	Raideur
Flexion-Extension	Valeur souhaitée	5 N	24.2 N/mm
	Valeur calculée	9 N	4.17 N/mm (index) 2.44 N/mm (pouce)
Abduction-Adduction	Valeur souhaitée	5 N	24.2 N/mm
	Valeur calculée	4.78 N	0.80 N/mm (index) 0.82 N/mm (pouce)

Nous pouvons remarquer que le robot répond assez bien au cahier des charges en effort. La capacité en force est même nettement supérieure à celle que nous avons spécifiée en flexion-extension. Il sera donc nécessaire d'appliquer une limitation au niveau des variateurs pour éviter de produire un couple trop important, susceptible de blesser l'utilisateur.

La raideur apparente, par contre, est nettement plus faible que celle que nous avons spécifiée, principalement à cause des câbles. Il conviendra de vérifier, lors des évaluations, que cela n'est pas préjudiciable au suivi du mouvement des doigts. Pour l'améliorer, il faudrait essayer de placer les moteurs plus près des articulations et/ou utiliser des câbles plus raides (câbles de plus grand diamètre, ridoirs, ...). Cela constitue une des perspectives de ce travail.

On notera que, grâce au placement des moteurs que nous avons proposé, la raideur en flexion-extension est nettement supérieure à celle qui est obtenue en abduction-adduction. C'est très positif puisque c'est ce type de mouvement qui est utilisé pour identifier la raideur des objets touchés.

3. ÉTAGE D'ORIENTATION DES EFFECTEURS

3.1. ARCHITECTURE CINÉMATIQUE

Nous avons expliqué précédemment qu'il est nécessaire d'avoir un système d'orientation 3D pour s'adapter à la fois aux mouvements de l'utilisateur et aux variations géométriques des mains des différents utilisateurs, sans réglages. Pour simplifier ce problème, nous avons mis en place un système d'orientation avec trois axes concourants. Ainsi nous obtenons un mécanisme équivalent à une liaison rotule centrée par rapport à l'effecteur, ce qui permet de décomposer la commande de suivi du doigt en position et en orientation.

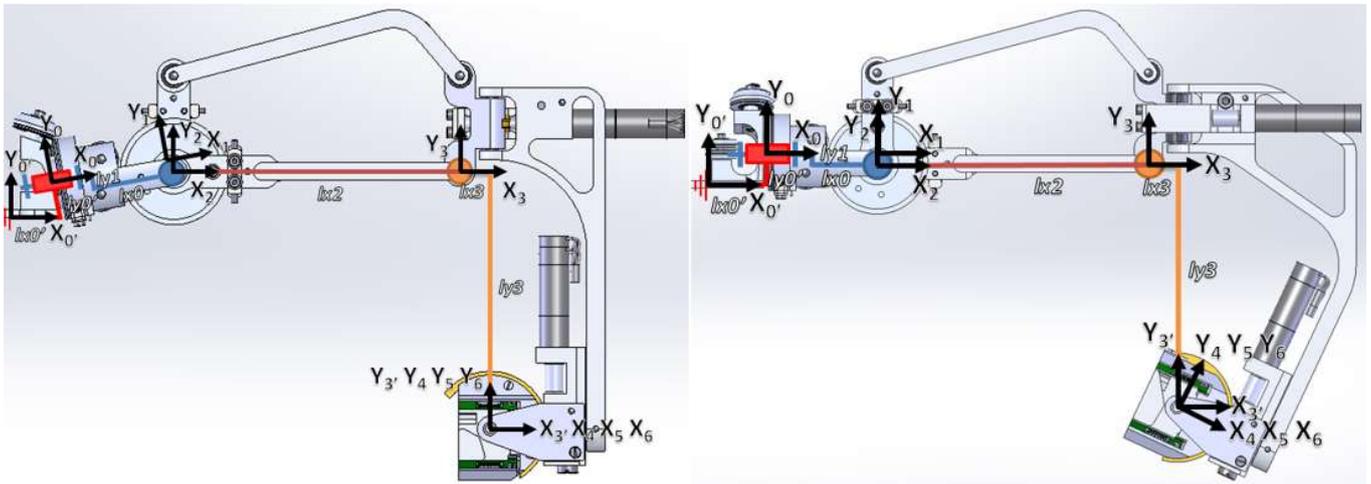


Figure 4.16 : Schéma cinématique des bras de l'index et du pouce.

Le modèle géométrique direct de cet étage de suivi en orientation est le suivant :

$$T_{3'4} = \text{rot}(Y_{3'}, \theta_{\text{mot}4}) \cdot \text{rot}(Z_4, qz4) \quad (4.31)$$

$$T_{45} = \text{rot}(X_4, \theta_{\text{mot}5}) \quad (4.32)$$

$$T_{56} = \text{rot}(Z_5, \theta_{\text{mot}6}) \quad (4.33)$$

Le paramètre $qz4$ est introduit pour pouvoir utiliser le même modèle pour le pouce et l'index. Il vaut $qz4 = 0^\circ$ pour le robot de l'index et $qz4 = -25^\circ$ pour le pouce.

Le modèle géométrique du bras complet peut être calculé en associant celui du système de l'étage de positionnement de la capsule et celui de l'étage d'orientation. Il en est de même pour la matrice Jacobienne.

3.2. MOTORISATION

3.2.1. Choix du type de réducteurs

Pour éviter d'avoir recours à une transmission complexe, les trois moteurs de l'étage d'orientation de la capsule seront embarqués. Dans ces conditions, ils doivent être compacts et légers. Pour avoir malgré cela des couples suffisants, il est nécessaire d'avoir un mécanisme avec un grand rapport de réduction et un faible encombrement.

On rappelle que si le suivi du doigt doit être fait en position et en orientation, le retour d'effort n'est proposé qu'en translation. Il y a en effet peu d'intérêt à avoir un retour d'effort en couple pour une interface dextre étant donné que nous appliquons rarement des moments sur notre environnement avec un seul doigt. L'actionnement de l'étage d'orientation n'a donc pas besoin d'être réversible.

Dans ces conditions, nous choisirons d'utiliser des réducteurs à roue et vis sans fin qui ont un grand rapport de réduction pour un faible encombrement. On notera que ce type de réducteur a l'avantage d'être irréversible (pour une faible inclinaison de l'hélice). Par conséquent, la capsule restera immobile quelles que soient les contraintes appliquées par l'utilisateur, ces efforts étant absorbés dans les contraintes internes du mécanisme. Le principal défaut de cette solution est son faible rendement, qui est un inconvénient inhérent aux systèmes irréversibles. Nous en tiendrons compte lors du dimensionnement du système, qui nous impose que l'actionnement puisse adapter l'orientation de l'effecteur sous une charge de 5N en continu et 15N en crête (avec un système réversible, il faudrait augmenter la taille des moteurs, en particulier si l'utilisateur applique ponctuellement plus de 15N).

3.2.2. Dimensionnement en effort et choix des moteurs

Les axes de notre système d'orientation se croisent en un point situé à proximité du centre de notre effecteur (dans la pratique, pour des raisons d'intégration, on ne peut pas les faire se croiser exactement au centre de l'effecteur), à 2mm au-dessus de celui-ci. La distance maximale entre la rotule et la surface de contact au niveau de la sphère d'extrémité est donc égale à son rayon augmenté de 2mm. Pour tenir compte de possibles contacts sur la partie cylindrique à l'arrière de l'effecteur, nous prendrons une légère marge de 1mm. Dans ces conditions, nous tiendrons compte pour notre dimensionnement d'une distance maximale entre le point de contact et le centre de la rotule de 15mm pour l'index (le rayon intérieur de la capsule de l'index est de 12mm) et 18mm pour le pouce (rayon intérieur de 15mm). Ainsi le couple continu $\tau_{continu}$ nécessaire au mouvement, même au contact de l'utilisateur, est de 90mN.m, et le couple crête $\tau_{crête}$ vaut 270mN.m. Un réducteur à roue et vis sans fin irréversible possédant un rendement η compris habituellement entre 0.3 et 0.4, il faut un couple de 300mN.m en continu et 900mN.m en crête en sortie du réducteur.

Après étude des différentes combinaisons possibles de moteurs et de réducteurs, nous avons choisi un moteur RE10 de chez Maxon Motors pour son bon rapport couple/masse (tension d'alimentation de 12 V, couple nominal de 1.55mN.m, vitesse à vide de 12500tr/min, masse de 10g). Le rapport entre son couple crête et son couple nominal n'étant que de 2.1 (son couple maximal $\tau_{mot\ max}$ est de 3.24mN.m), le cas le plus dimensionnant est l'effort crête et le rapport de réduction nécessaire est le suivant.

$$r = \frac{\tau_{crête}}{\tau_{mot\ max} \cdot \eta} = 278 \quad (4.34)$$

Ce rapport de réduction est trop élevé pour l'obtenir en un seul étage de réduction. Nous utiliserons donc un réducteur à 2 étages associant un réducteur épicycloïdal compatible avec le RE10, le GP10A de chez

Maxon Motors, avec un rapport de 16:1, et un mécanisme à roue et vis sans fin ayant un rapport de réduction de 17.4:1 au minimum. Par sécurité, nous choisirons une réduction un peu plus importante pour éviter que le moteur n'atteigne son couple maximal, ce qui pourrait engendrer une surchauffe et donc une panne. Nous avons cherché des réducteurs miniatures répondant à ce cahier des charges dans les catalogues des fournisseurs de roues et vis sans fin mais les seuls que nous avons trouvés sont relativement encombrants. Pour éviter d'avoir à réaliser des pièces sur mesure qui auraient été coûteuses, nous avons décidé d'utiliser des pièces de modélisme ferroviaire disponibles sur <http://www.micro-modele.fr>. Nous avons choisi des roues à 25 dents en laiton HO59/7 combinées avec des vis à simple filet HO58, ce qui permet d'atteindre un rapport de réduction global de 400.

On notera que dans un souci d'intégration et d'encombrement, nous ne souhaitons pas placer la roue du dernier axe de la rotule sur le côté de la capsule. Nous la ferons passer autour de la capsule, en la taillant pour l'adapter à la forme de notre effecteur (voir figure 4.17, on remarquera que la partie inférieure de la roue est enlevée pour minimiser l'épaisseur de la capsule sous la pulpe du doigt, cette dernière n'étant ici que de 3.2mm). Les petites roues, dont celle à 25 dents, ayant un trop faible diamètre pour cela, nous avons choisi une roue plus grande. En pratique, nous avons choisi une roue à 75 dents en laiton HO59/11. Pour ne pas sur-dimensionner le système, le réducteur de rapport 16:1 a été remplacé par un autre réducteur GP10A de rapport 4:1 sur cet axe. Ainsi nous obtenons un rapport de réduction total de 300:1.

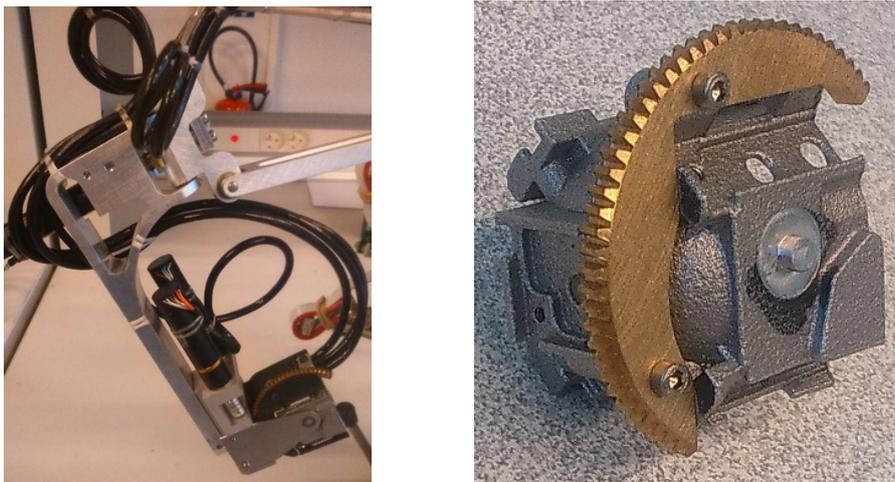


Figure 4.17 : Étage d'orientation de l'index (gauche) et zoom sur la capsule (droite).

3.2.3. Caractérisation des performances des réducteurs

Pour obtenir un système compact, nous avons dû utiliser des pièces de modélisme. Le problème de ces pièces est l'absence de données 'constructeur'. Nous avons donc dû concevoir un banc d'essais afin d'identifier leur rendement. Ce banc de test permet de tester les roues à 25 dents et les roues à 75 dents. Il reproduit le plus fidèlement possible les montages utilisés sur l'interface, pour que les résultats obtenus soient utilisables pour le dimensionnement de cette dernière.

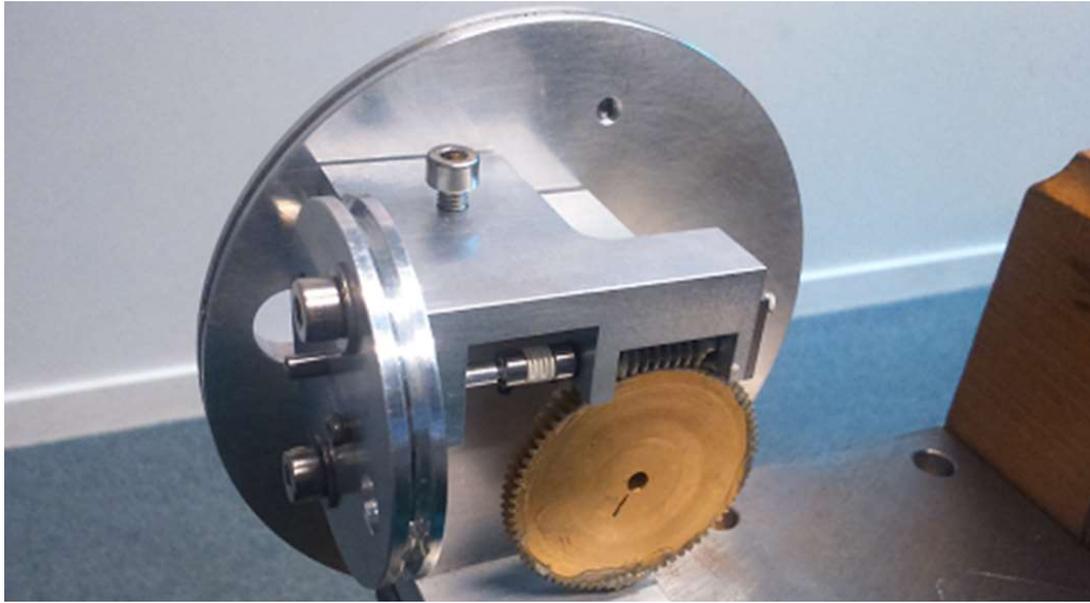


Figure 4.18 : Banc d'essais des réducteurs à roue et vis sans fin avec la roue à 75 dents.

Ce banc de test nous a permis d'étudier le comportement des réducteurs dans les sens direct et indirect de transmission et dans les deux sens de rotation explicités sur la figure 4.19.

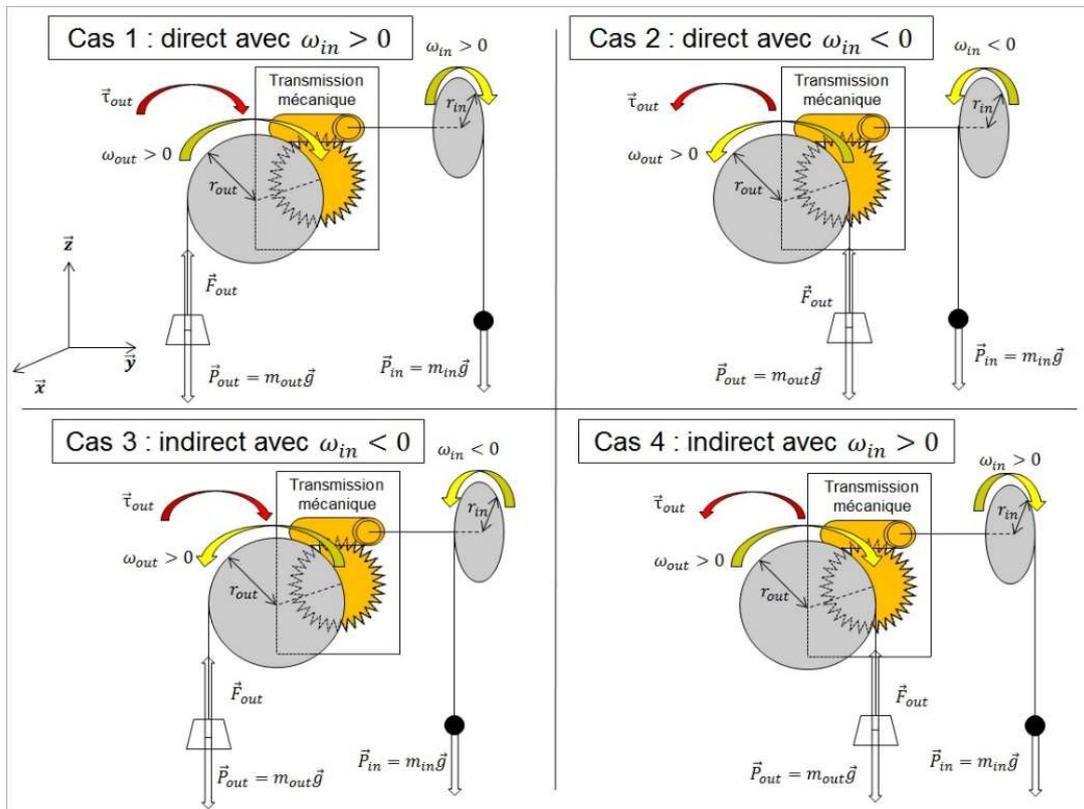


Figure 4.19 : Les différents cas de déplacement et de chargement étudiés.

Cela nous a permis d'identifier complètement le diagramme de transfert, avec les rendements et les coefficients de frottements secs des deux ensembles roue et vis sans fin (cf. figure 4.20 pour le couple composé de la roue à 25 dents HO59/7 et de la vis à simple filet HO58). Chaque roue est chargée avec un poids représentant le couple d'entrée ou de sortie, et chaque point d'équilibre est reporté sur le graphe. Sur la figure 4.20, le couple de sortie est divisé par le rapport de réduction pour que les dérivées des droites nous renseignent directement sur le rendement. Avec les courbes obtenues, nous pouvons en déduire que le frottement sec est de 0.22mN.m et le rendement de 0.33 pour la roue dentée à 25 dents, et de 0.13mN.m et 0.35 pour la roue à 75 dents. Ces données semblent cohérentes avec les caractéristiques classiques de ce type de mécanisme.

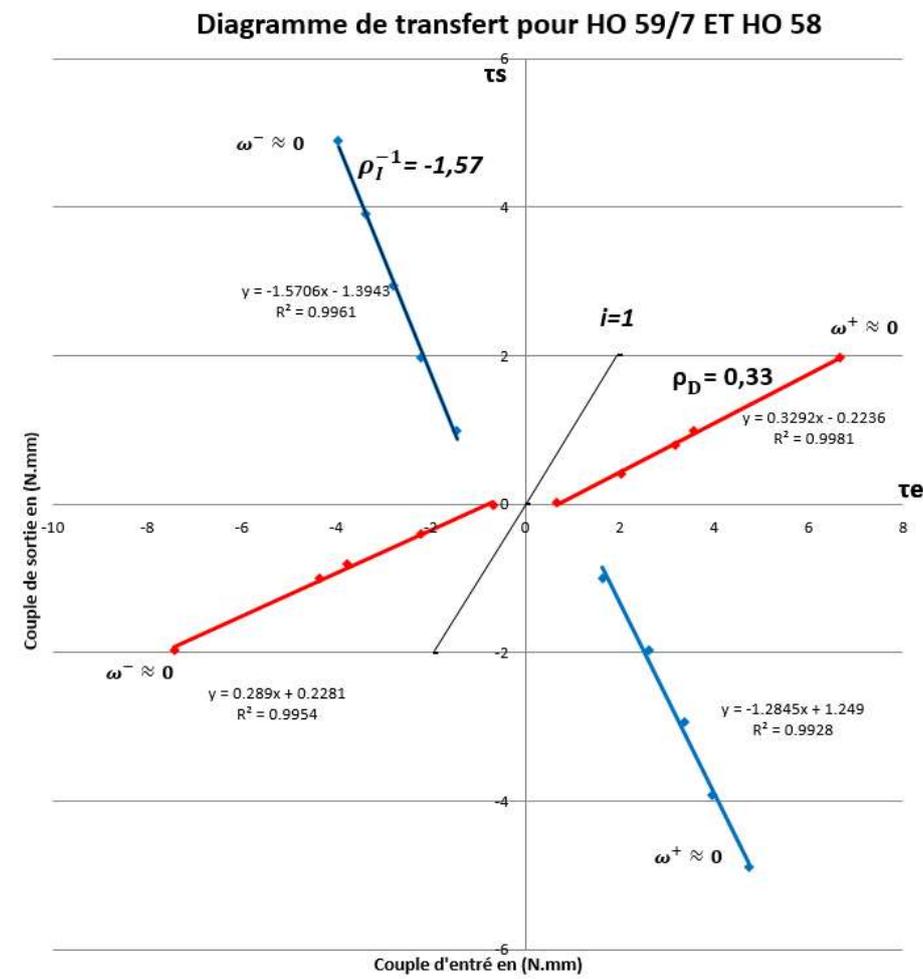


Figure 4.20 : Diagramme de transfert et approximations linéaires équivalentes pour la roue à 25 dents.

4. BASE DU GANT

Les deux robots associés au pouce et à l'index sont fixés sur une base commune. La figure ci-dessous illustre le positionnement des repères de base $R_{0'i}$ du robot de l'index visible sur la figure 4.6 et $R_{0'p}$ du robot du pouce illustré par la figure 4.8 par rapport au repère de référence $R_{0'e}$ de la base qui se trouve au centre de gravité du gant (qui est aussi l'extrémité de l'équilibreur présenté dans le paragraphe 5).

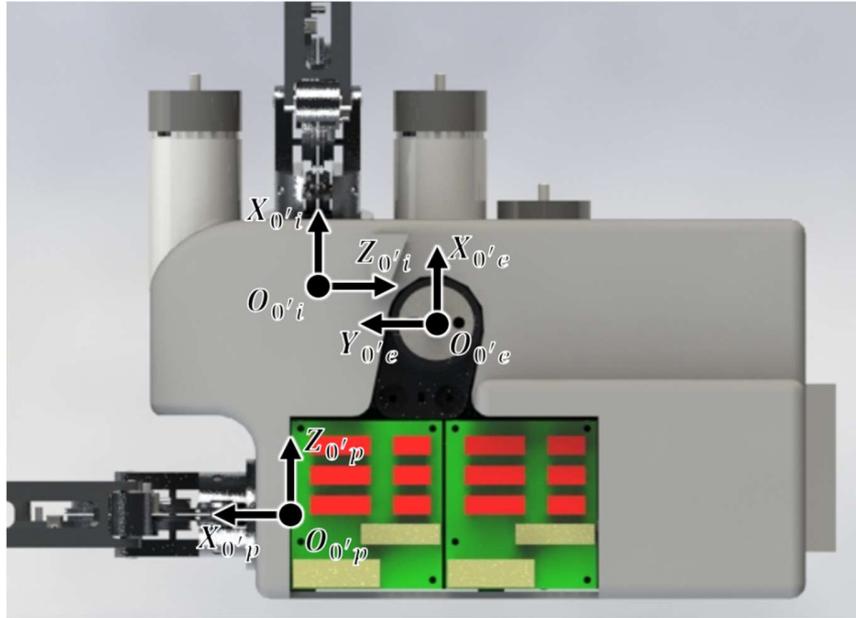


Figure 4.21 : Positionnement des robots du pouce et de l'index sur la base du gant.

Les matrices de passage entre ces repères s'écrivent :

$$T_{0'e}^{0'i} = \text{trans}(X_{0'e}, lxi) \cdot \text{trans}(Y_{0'e}, lyi) \cdot \text{trans}(Z_{0'e}, lzi) \cdot \text{rot}\left(X_{0'e}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.35)$$

$$T_{0'e}^{0'p} = \text{trans}(X_{0'e}, -lxp) \cdot \text{trans}(Y_{0'e}, lyp) \cdot \text{trans}(Z_{0'e}, lzp) \cdot \text{rot}\left(X_{0'e}, \frac{\pi}{2}\right) \cdot \text{rot}\left(Y_{0'e}, \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.36)$$

$$\text{Avec : } \quad lxi = 9.9\text{mm} \quad lyi = 31.41\text{mm} \quad lzi = 4.56\text{mm}$$

$$lxp = 51.3\text{mm} \quad lyp = 38.61\text{mm} \quad lzp = 4.56\text{mm}$$

On rappelle que notre prototype ne possède pas de système permettant de suivre la paume à distance. Il doit donc être fixé à la paume de l'utilisateur. Pour cela deux solutions sont envisagées :

- La première consiste à plaquer la main de l'utilisateur contre la base du robot à l'aide d'un ruban élastique (cf. figure 4.22, à gauche, en intégrant sur la partie inférieure de la base une pièce dont la forme est adaptée à un contact avec le dessus de la main). Les autres doigts seraient alors laissés libres, ce qui aurait l'avantage de ne pas contraindre les mouvements de l'utilisateur. Cependant, la peau de la main n'étant pas fixe par rapport aux structures osseuses, la liaison entre l'utilisateur et la base du robot comporterait des incertitudes importantes. Par ailleurs on ne connaîtrait pas la position du majeur, de l'annulaire et de l'auriculaire et nous n'aurions aucun moyen d'empêcher qu'ils entrent en collision avec l'interface.

- La seconde se base sur l'utilisation d'une poignée fixée à la base du robot que l'utilisateur vient saisir avec les trois autres doigts (cf. figure 4.22, à droite). Dans ce cas, l'utilisateur peut facilement ajuster la saisie pour que l'interface ne le gêne pas. Par ailleurs le majeur, l'annulaire et l'auriculaire sont situés sur la poignée et il n'est pas possible qu'ils interfèrent avec l'interface.

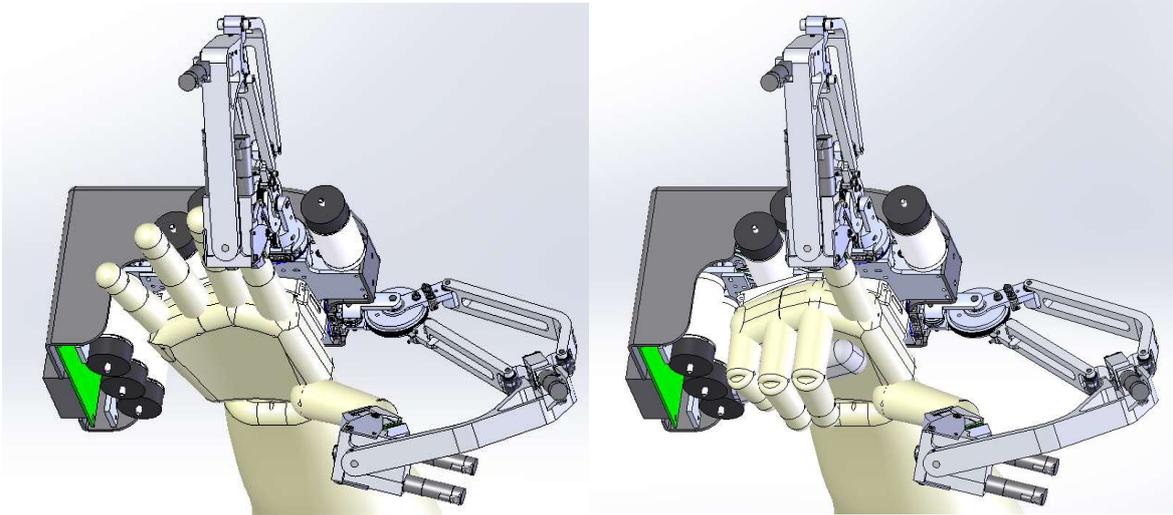


Figure 4.22 : Les deux solutions envisagées pour fixer la base du gant sur la paume de l'utilisateur.

La seconde solution étant plus sûre pour l'utilisateur, c'est celle que nous avons choisie. Le prototype final assemblé et câblé est illustré par la figure ci-dessous.



Figure 4.23 : Prototype de gant à retour d'effort à contacts intermittents sur le pouce et l'index.

5. ÉQUILIBREUR STATIQUE

5.1. PROBLÉMATIQUE

Pour pouvoir commander un avatar de la main et des doigts dans un environnement de réalité virtuelle avec un retour d'effort cohérent sur les doigts, il est essentiel de connaître leur configuration dans l'espace, ce que ne permettent pas les effecteurs qui, étant reliés à la paume, ne permettent l'acquisition de la position et de l'orientation de la phalange distale du pouce et de l'index que par rapport à la main de l'utilisateur. Pour pouvoir calculer ces informations dans un repère fixe, il est nécessaire de mesurer la configuration de la main dans l'espace. Pour rester cohérents avec les performances du gant, on vise une précision de l'ordre du dixième de millimètre en position et du dixième de degré en orientation et une fréquence d'acquisition d'environ 1kHz.

Deux types de solutions peuvent être envisagés pour cela :

- Un système de mesure à distance se basant sur la détection de marqueurs placés sur l'interface par l'intermédiaire de plusieurs caméras. Un tel système ne gêne pas l'utilisateur puisqu'il n'y a aucun contact entre eux. Cependant, cette solution pose des problèmes d'occlusion. Par ailleurs les systèmes de capture de mouvement usuels ont, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 sur l'effecteur, une précision et une fréquence de mesure trop faibles pour nos besoins, sauf à utiliser des dispositifs professionnels très haut de gamme et très coûteux.
- Un système mécanique supportant le gant et équipé de capteurs permettant de mesurer sa configuration. Moyennant l'utilisation de capteurs précis et rapides, cette solution permet de répondre à notre besoin pour un coût raisonnable. Par ailleurs, ce système peut être utilisé pour compenser le poids du gant. Il pourrait même être motorisé pour permettre un retour d'effort sur la paume, mais cette solution sort du cadre de cette thèse. Le principal défaut de cette solution est que les déplacements de l'utilisateur sont limités à l'espace de travail du porteur. Ce défaut n'est cependant pas gênant si le dispositif est dimensionné correctement.

Compte tenu de ses avantages, on opte pour la seconde solution.

5.2. COMPENSATION DU POIDS DE L'INTERFACE

Le poids du gant est légèrement inférieur à 2kg. Il est trop lourd pour pouvoir être porté par l'utilisateur. On utilisera donc un équilibreur statique afin de le compenser. Il existe plusieurs solutions pour cela dans la littérature :

- On peut utiliser un équilibreur d'atelier à ressort comme sur le WHIPFI [Gosselin 2005b] ou un contrepoids relié par un câble à l'interface et à un portique fixe ou suivant l'interface. Ces deux solutions permettent de compenser le poids du gant mais pas de mesurer ses mouvements dans l'espace. Il faut les associer à un système de capture de mouvements dont nous avons vu les limites dans le paragraphe précédent. Nous ne retiendrons donc pas cette solution.

- Un bras motorisé fixé à l'interface permettrait aussi de compenser le poids à l'aide d'un modèle approprié. Cette solution est cependant complexe et ne sera pas retenue. On notera qu'elle permettrait de réaliser un système traquant la paume à distance suivant le concept illustré par la figure 3.3. L'étude d'un tel système, qui permettrait de supprimer tout contact avec l'utilisateur et par conséquent toute gêne due au poids ou aux frottements du système en espace libre, sort du cadre de cette thèse mais en constitue une perspective intéressante.
- Enfin, on peut utiliser un bras passif équipé d'un contrepoids d'équilibrage. Cette solution est très simple et peut intégrer les capteurs nécessaires à l'acquisition de la position du gant. Ce sera donc elle que nous retiendrons, malgré le fait qu'elle accroît l'inertie ressentie par l'utilisateur quand il bouge la main.

5.3. DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

5.3.1. Architecture cinématique

Après étude des différentes architectures utilisables sur le bras passif d'équilibrage, nous avons choisi d'utiliser une structure en pantographe comme l'illustre la figure 4.24. Un tel mécanisme conserve constant le rapport des distances entre le contrepoids, l'axe central et le centre de gravité du gant quels que soient les mouvements de ce dernier. Ainsi, quelle que soit la position de la main dans l'espace de travail, l'utilisateur ne ressentira pas le poids de l'interface.



Figure 4.24 : Structure en pantographe utilisée pour mesurer les mouvements de la main et compenser le poids du gant.

On notera que l'utilisateur doit pouvoir déplacer librement sa main en 6D. Il est nécessaire pour cela d'intégrer sur cet équilibreur un poignet pour suivre l'orientation de la main. Pour ne pas modifier l'équilibrage du système, les axes du poignet seront concourants et se croiseront au niveau du centre de gravité du gant dans sa configuration de référence (pouce et index tendus). Le mouvement des doigts et des effecteurs modifiera la position de ce centre de masse mais le déséquilibre engendré restera minime puisque la pièce de paume représente les deux tiers de la masse globale.

5.3.2. Espace de travail

Pour définir l'espace de travail de cet équilibreur, on se base sur les normes des plans de travail [INRS] [ISO 14738]. Si on observe l'espace de travail conseillé d'un agent de caisse pour le membre supérieur, les dimensions à atteindre sont de 290x240x250mm.

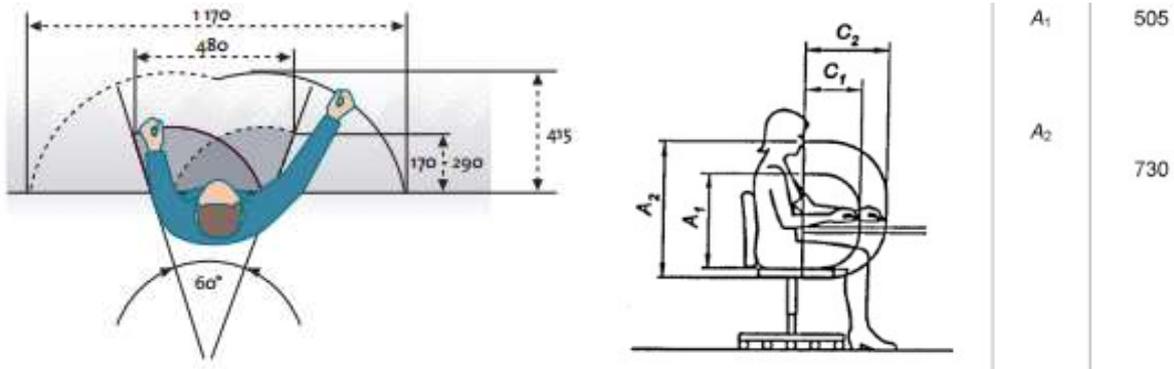


Figure 4.25 : Extraits des normes sur les postes de travail [INRS] [ISO 14738].

5.3.3. Dimensionnement géométrique

En utilisant des formules similaires à celles utilisées pour le dimensionnement des parallélogrammes des doigts, on peut déterminer la longueur des différents segments de notre structure. Après optimisation, on trouve que les segments du pantographe doivent avoir une longueur de 405mm.

5.3.4. Dimensionnement du contrepoids

Notre gant pèse presque 2kg. Pour que le contrepoids reste de taille raisonnable, on choisit un rapport de réduction de 1:3. Dans la pratique, il faut aussi équilibrer les différents segments du porteur. Dans ces conditions, le contrepoids, optimisé de façon itérative sous Solidworks, pèse 7.43kg. Il permet de ramener le poids du système complet sur l'axe de rotation vertical.

Les simulations ne prenant pas en compte le poids des câbles ou des composants électroniques, plusieurs réglages ont été prévus sur le porteur. On peut ainsi déplacer le contrepoids pour parfaire l'alignement entre le centre de masse du gant, l'axe de rotation et le centre du contrepoids. Il est également possible d'ajouter des rondelles ou autres poids pour ajuster l'équilibrage du système.

5.3.5. Choix des capteurs

Compte tenu des dimensions du système, la distance maximale entre le centre des rotations du porteur et le centre de gravité du gant est de 750mm. On désire une précision de 0.1mm. Il est donc nécessaire que nos codeurs aient une résolution de 1.3×10^{-4} rad, soit 16 bits. Afin de réduire les coûts, nos trois capteurs à la base ont une résolution de 15 bits, soit 32768 points par tour et 1.9×10^{-4} rad. Le porteur a donc une résolution minimale de 0.14mm en position. La distance minimale est de 340mm, ce qui équivaut donc à une résolution maximale de 0.07mm. On a donc une résolution moyenne d'un dixième de millimètre en position. Pour respecter le cahier des charges, les codeurs du poignet ont une résolution de 4096 point par tour, soit 0.09°.

5.4. RECONSTRUCTION DE LA POSITION DE LA MAIN

La figure ci-dessous illustre le schéma cinématique de l'équilibreur.

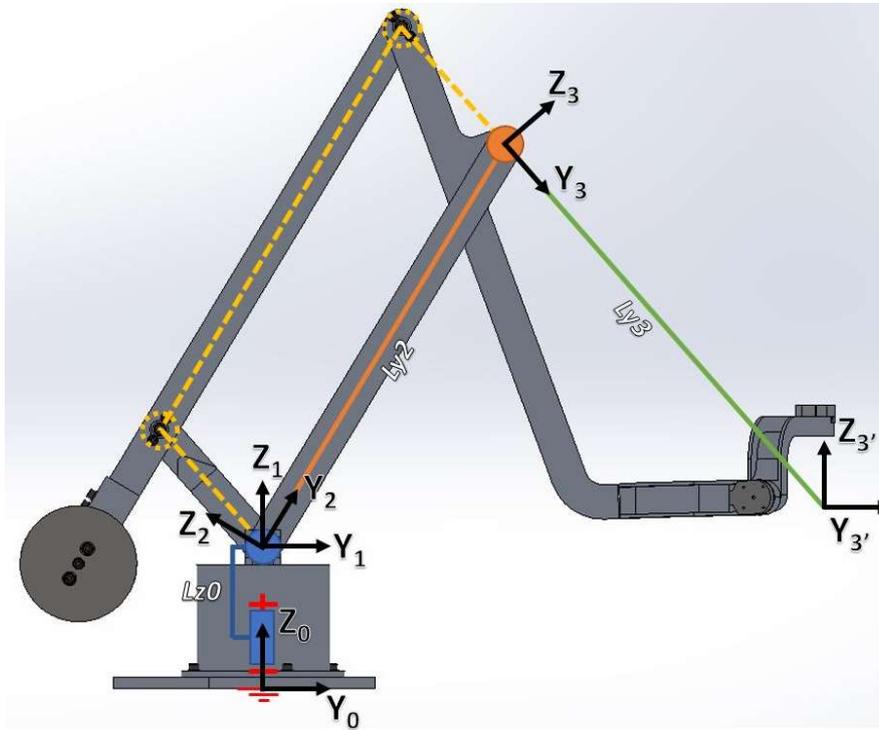


Figure 4.26 : Schéma cinématique de l'équilibreur.

Le modèle géométrique direct articulaire peut être calculé par la combinaison des transformations entre les différents repères, ce qui permet de recalculer la position et l'orientation de la main.

$$T_{01} = \text{trans}(Z_0, lz_0). \text{rot}(Z_0, \theta_{art1}) \quad (4.37)$$

$$T_{12} = \text{rot}(X_1, \theta_{art2}) \quad (4.38)$$

$$T_{23} = \text{trans}(Y_2, ly_2). \text{rot}(X_2, \theta_{art3}) \quad (4.39)$$

$$T_{33'} = \text{trans}(Y_3, ly_3). \text{rot}(X_3, qx_3) \quad (4.40)$$

$$T_{3'4} = \text{trans}(X_{3'}, -lx_{3'}). \text{rot}(Y_{3'}, \theta_{art4}) \quad (4.41)$$

$$T_{45} = \text{rot}(Z_4, qz_4). \text{rot}(Y_4, \theta_{art5}) \quad (4.42)$$

$$T_{56} = \text{rot}(Z_5, \theta_{art6} - qz_4) \quad (4.43)$$

Avec, après optimisation des dimensions du système :

$$lz_0 = 122\text{mm} \quad ly_2 = ly_3 = 405\text{mm} \quad lx_{3'} = 6\text{mm}$$

$$qx_3 = 50^\circ \quad qz_4 = 70^\circ$$

On notera que tout comme pour le mécanisme des bras allant de la paume à la phalange distale, nous utilisons ici une structure parallèle. Pour limiter le passage des câbles, les codeurs mesurant la position du gant sont intégrés au niveau du cardan à la base du pantographe. Il est donc nécessaire de définir les relations entre les angles articulaires et codeurs.

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{art1} = \theta_{cod1} \\ \theta_{art2} = \theta_{cod2} \\ \theta_{art3} = \theta_{cod3} - \theta_{cod} - \pi \\ \theta_{art4} = \theta_{cod4} \\ \theta_{art5} = \theta_{cod} \\ \theta_{art} = \theta_{cod6} \end{array} \right. \quad (4.44)$$

6. ARCHITECTURE ÉLECTRONIQUE

6.1. CAHIER DES CHARGES DU CONTRÔLEUR

Notre interface haptique droite possède un nombre important de capteurs (capteurs de proximité et codeurs) et de moteurs. Elle nécessite donc une architecture électronique pensée et organisée pour gérer de la manière la plus efficace possible l'ensemble de ces éléments. Ces éléments sont les suivants :

- 6 codeurs pour acquérir la position de la paume, situés sur l'équilibre.
- 12 moteurs équipés de codeurs (chaque bras intègre 3 moteurs Maxon RE25 pour la mise en position et 3 moteurs Maxon RE10 pour l'orientation de l'effecteur).
- 18 proximitaires intégrés dans 10 cartes capteurs (5 par doigt) liées aux effecteurs.
- Une carte électronique dédiée à la commande des capteurs infrarouges, à la récupération des données et à leur transfert au contrôleur du robot.
- Un bus de données EtherCAT regroupant les informations de l'ensemble des éléments de l'interface haptique.

Comme précisé précédemment, on cherche à avoir la fréquence d'échantillonnage la plus élevée possible (typiquement 1 kHz pour les interfaces haptiques classiques).

Pour gérer l'ensemble de ces éléments, nous intégrerons les composants suivants dans notre contrôleur :

- Un bloc modulaire permettant de récupérer les signaux des codeurs de l'équilibre et de les transférer au bus de données.
- Deux variateurs 6 axes, chacun gérant le contrôle des moteurs pour un doigt. Entre les moteurs et ces variateurs, des cartes ont été conçues pour prolonger les câbles provenant des moteurs, tout en séparant les signaux moteurs des signaux capteurs, afin d'éviter les perturbations et le bruit.
- Des capteurs permettant de détecter le contact entre les doigts et les effecteurs, pour améliorer le traitement des données.

Ces différents éléments sont illustrés sur la figure 4.27. Leur choix sera détaillé dans les paragraphes suivants.

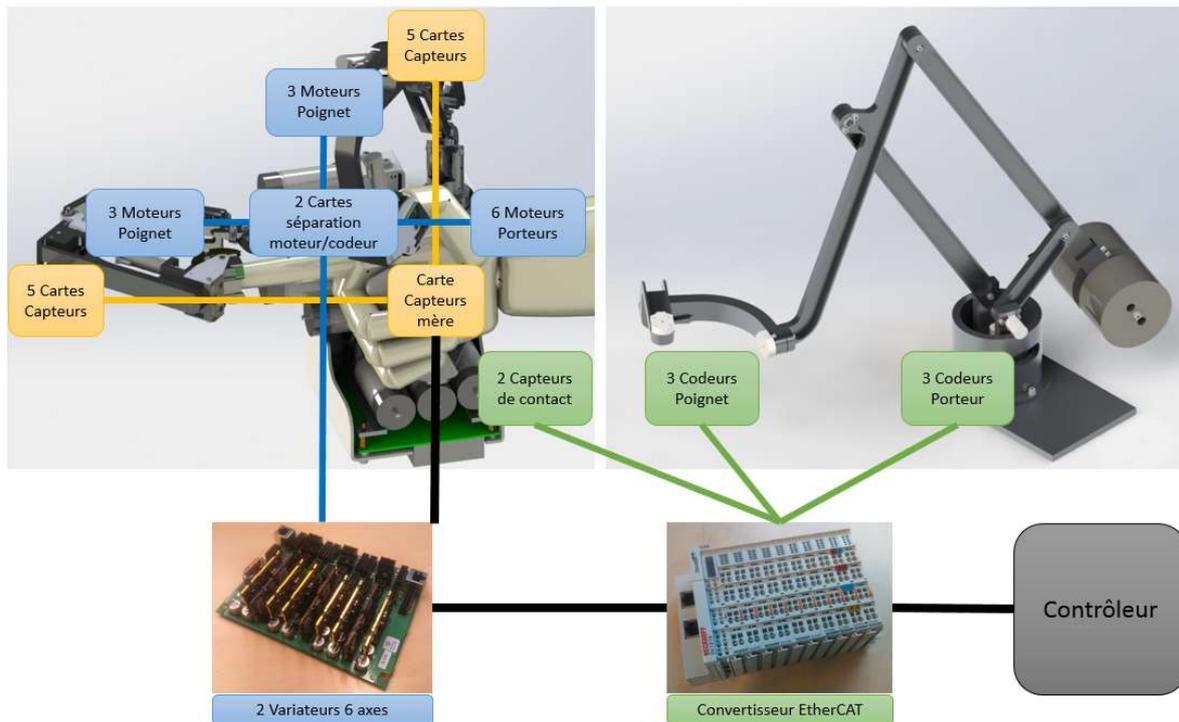


Figure 4.27 : Architecture complète du système. Les liaisons jaunes représentent les signaux I2C, en bleu les différents câbles des motoréducteurs, en vert les signaux des capteurs divers et les liaisons noires représentent le bus de données EtherCAT.

6.2. TRANSFERT DES SIGNAUX DES CODEURS DE L'ÉQUILIBREUR AU BUS DE DONNÉES ETHERCAT

Les capteurs de l'équilibre ont été choisis pour leur faible encombrement et leur résolution adaptée à notre application et non en fonction du type de signaux qu'ils génèrent. Les capteurs permettant de connaître la position du gant sont des codeurs absolus Gurley A19. Leur résolution est de 15 bits et ils fournissent un signal de réponse SSI. Les capteurs pour l'orientation sont quant-à-eux des codeurs incrémentaux CUI AMT11. Ils ont une résolution de 4096 points par tour avec une sortie différentielle. Toutes ces informations doivent être envoyées sur notre réseau de communication. Il est donc nécessaire d'intégrer un élément permettant de récupérer ces différents signaux et de les transférer en EtherCAT.

Nous avons choisi pour cela une combinaison de blocs Beckhoff. C'est une solution modulaire adaptée à notre application. En effet, le bus de communication EtherCAT étant développé par Beckhoff, ce constructeur a conçu un panel important de systèmes facilitant son emploi. Dans la pratique, comme le montre la figure ci-dessous, on combine un module EK1818 (coupleur EtherCAT) avec 3 modules EL5101 (interfaces pour un codeur incrémental chacune), 2 modules EL5002 (interfaces pour deux codeurs SSI chacune) et 2 modules EL505 et EL9185 permettant d'alimenter ces codeurs. Avec cette solution, on possède un seul élément personnalisé permettant de récupérer toutes les informations des codeurs de l'équilibre et de les transférer sur le réseau EtherCAT.

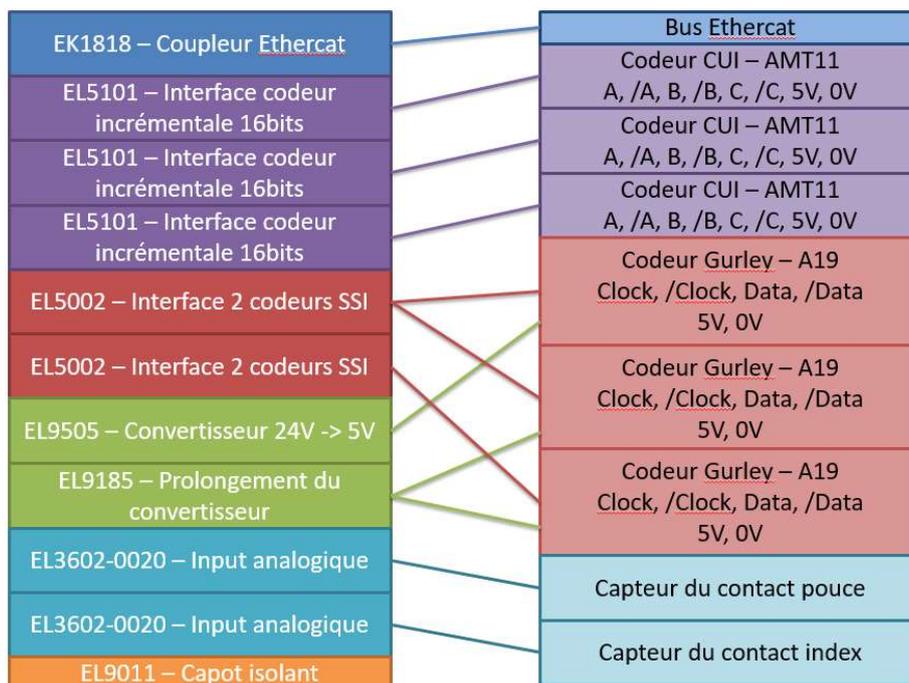


Figure 4.28 : Références et câblage des différents éléments du bloc modulaire Beckhoff (le capteur de contact sera détaillé ci-dessous).

6.3. CHOIX DU VARIATEUR

Notre interface haptique à contact intermittents nécessite l'utilisation de 6 moteurs par doigt, soit un total de 12 moteurs (6 RE25 et 6 RE10). Pour le choix de leur variateur, la difficulté vient à la fois des faibles puissances de ces moteurs et de la communication en EtherCAT. En effet, les moteurs RE25 et RE10 ont des courants nominaux respectifs de 1.5 A et 0.176 A, le système étant dimensionné pour subir des pics d'effort égaux à 3 fois les efforts nominaux. Pour que les bruits du variateur ne viennent pas perturber la commande, il est recommandé d'adapter le courant fourni à l'intensité nécessaire pour les moteurs. Les variateurs doivent donc être capables de fournir les courants adéquats.

Dans ces gammes de puissances, les solutions technologiques sont limitées :

- Les modules Beckhoff EL7342 et EL7332 ont des courants maximaux de 3.5 A et 1 A. Les pics de courants nécessaires pouvant aller jusqu'à 4.5 A pour les RE25, ces variateurs pourraient être limitants. De plus, les boucles de contrôle bas niveau ne sont pas totalement modifiables. Cela pourrait donc contraindre les réglages de notre commande.
- Les variateurs Maxon sont ceux recommandés par le constructeur mais ils utilisent un bus CAN, ce qui nécessiterait l'utilisation d'un convertisseur CAN-EtherCAT qui engendrerait une chute importante du débit.
- Technosoft conçoit des cartes communiquant en EtherCAT, iPOS360x SX et SY, pouvant accueillir respectivement 4 et 6 variateurs. Deux modèles de variateurs peuvent être combinés : iPOS3604 VX et iPOS3602 VX, fournissant des courants nominaux respectifs de 4 A et 2 A, et des courants maximums de 10 A et 3.2 A. Ils sont légèrement surdimensionnés mais restent dans des gammes de puissance acceptables.

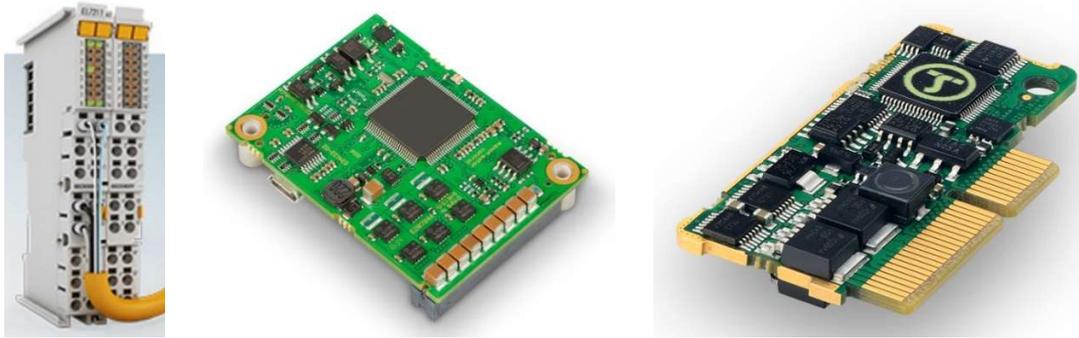


Figure 4.29 : Les différents variateurs pouvant être utilisés pour commander les moteurs RE25 : Beckhoff EL7342 gérant 2 axes à gauche, Maxon EPOS4 50/5 au centre et Technosoft iPOS3604 VX à droite, tous deux pour un seul axe.

Au vu de leurs caractéristiques, les variateurs Technosoft semblent les plus adaptés à notre système, que ce soit au niveau de la communication, de la commande ou de la puissance des moteurs. Avec cette technologie, il est possible d’avoir une carte 6 axes (iPOS360x SY) par doigt accueillant 3 variateurs (iPOS3604 VX) dimensionnés pour commander les RE25 et 3 autres (iPOS3602 VX) pour les RE10.

6.4. CONCEPTION DE CAPTEURS DE CONTACT

L’instrumentation présentée ci-dessus est suffisante pour le fonctionnement de notre interface. Cependant, on a constaté lors de différents tests effectués avec l’interface [Gonzalez et al. 2015] qu’il était difficile de déterminer le moment exact du contact entre l’anneau et le doigt de l’utilisateur, ce qui rend complexe l’analyse des données récupérées. Pour éviter un problème similaire avec notre interface, nous avons décidé d’intégrer des capteurs spécifiques pour détecter le contact entre les doigts et les capsules.

Pour cela, plusieurs solutions peuvent être mises en place :

- Des capteurs mécaniques se basant sur la mise en contact de deux surfaces : l’intégration d’un tel capteur dans l’effecteur augmenterait son encombrement. De plus, le contact entre le doigt de l’utilisateur et l’effecteur peut avoir lieu sur l’ensemble de la surface intérieure de ce dernier. Il faudrait donc que ce capteur recouvre totalement l’intérieur de l’effecteur, ce qui est difficile en pratique.
- La fermeture d’une boucle de courant : si on place l’utilisateur à un certain potentiel, on peut détecter un transfert de courant entre l’effecteur et l’utilisateur au cours du contact. Cela nécessiterait de placer un bracelet conducteur à son bras avec une tension de 5 à 10 V. Du fait de la gêne due à l’équipement porté et du danger potentiel, cette solution ne sera pas retenue.
- La variation de la capacité de l’effecteur avec le contact du doigt : sur les cartes Arduino, il existe une librairie permettant de mesurer la capacité d’une pièce conductrice (<http://playground.arduino.cc/Code/ADCTouch>). Après des tests avec diverses pièces en aluminium et autres métaux, nous avons montré qu’il est possible de détecter le contact avec le doigt par un changement brusque de la capacité du système. Nos effecteurs étant fabriqués par impression 3D en aluminium, il suffit de les relier à une carte Arduino via un câble quelconque.

Cette dernière solution est simple à intégrer à notre système et permet de détecter un contact entre la phalange distale de l’utilisateur et la surface intérieure de l’effecteur. C’est celle que nous utiliserons.

6.5. INTÉGRATION DE LA BAIE

Par mesure de sécurité et par ergonomie, l'ensemble des composants électroniques qui ne sont pas intégrés au gant sont fixés à l'intérieur d'une baie. Comme le montre la figure ci-dessous, celle-ci intègre les deux cartes variateurs 6 axes, le bloc modulaire Beckhoff et trois alimentations, deux en 24V pour les variateurs et les autres modules, l'une pour la puissance et l'autre pour la logique, et une en 12V qui alimente la carte capteur mère.

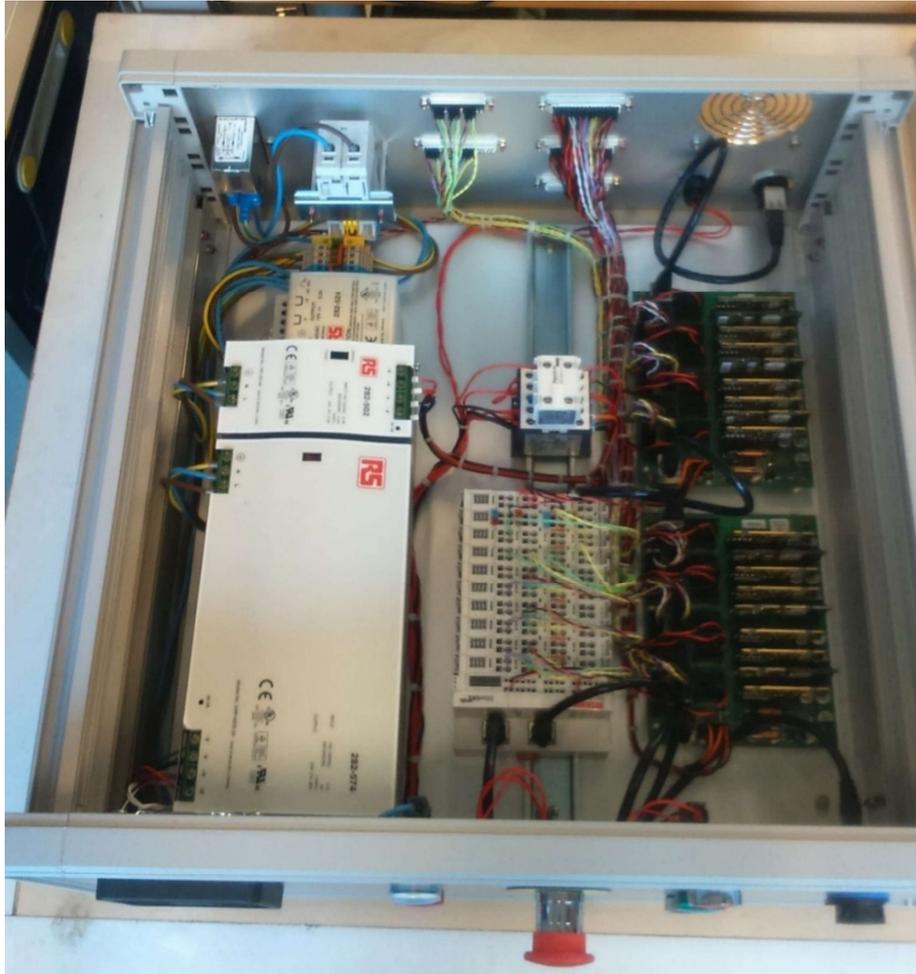


Figure 4.30 : La baie de commande du gant à retour d'effort.

L'équilibreur, le gant haptique et la baie sont reliés entre eux par un ensemble de câbles gainés afin de pouvoir les positionner à notre convenance. De plus, des connecteurs ont été prévus pour les déconnecter si on doit changer une pièce du système ou si on doit le déplacer. Cela a aussi permis d'intégrer à notre interface haptique un dispositif d'arrêt d'urgence, essentiel pour les évaluations expérimentales.

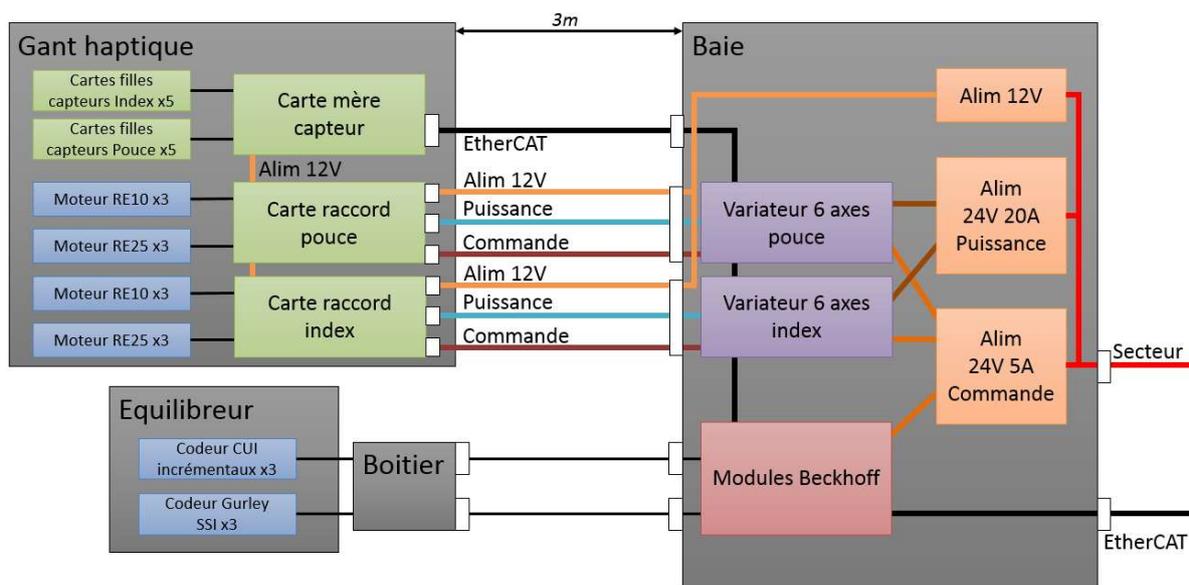


Figure 4.31 : Répartition des différents composants électroniques dans notre système.

6.6. TEMPS DE CYCLE ET RETARD

Afin que la commande de notre robot soit pertinente, il est nécessaire de garantir une fréquence de fonctionnement suffisamment élevée (la fréquence de fonctionnement d'une interface haptique doit être de l'ordre de 1kHz) et de minimiser le retard de notre chaîne d'acquisition.

Les fréquences maximales théoriques de chaque composant sont reportées dans le tableau 4.7. On peut remarquer que ces fréquences sont bien supérieures à la fréquence souhaitée de l'ordre du kilohertz.

Tableau 4.7 : Fréquences maximales théoriques extraites des différentes fiches techniques.

Codeur RE10 – MR 16 201933	8 kHz
Codeur RE25 – MR 256 225773	200 kHz
Lecture des codeurs par les variateurs Technosoft	500kHz
Codeur CUI AMT11	273 kHz
Module Beckhoff EL5101	4 MHz
Codeur Gurley A19	0.1 – 1 MHz
Module Beckhoff EL5002	1 MHz

Dans le paragraphe 3.7.3 du chapitre 3 sur l'effecteur nous avons déjà explicité les temps de fonctionnement des cartes capteurs. Dans le graphique suivant, nous allons compléter cette étude avec l'ensemble des temps nécessaires à chacun des éléments de notre architecture électronique.

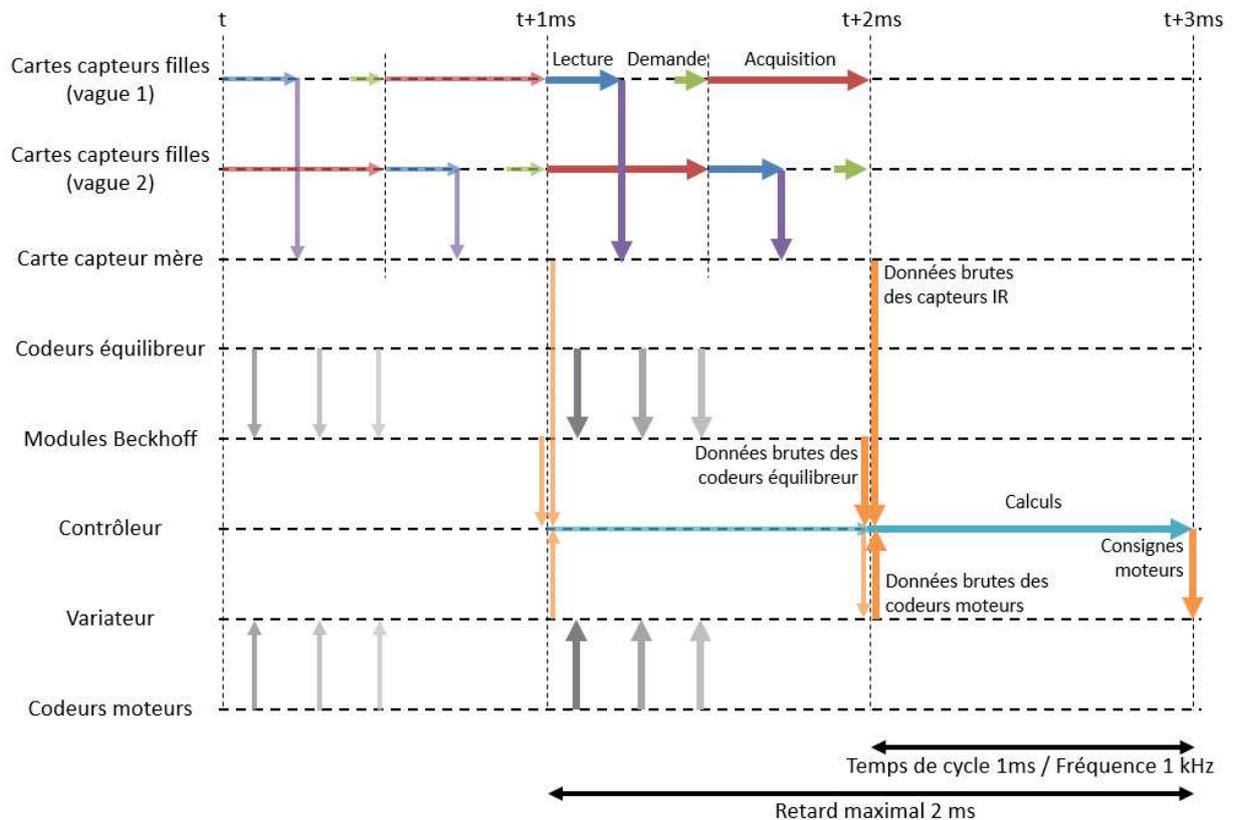


Figure 4.32 : Temps de cycle complet de notre interface. Les flèches violettes représentent les transferts en I2C et celles en orange, les transferts en EtherCAT.

Pour respecter la fréquence de fonctionnement souhaitée, il est essentiel que l'ensemble des calculs faits par le contrôleur prenne moins de 1 ms. Dans ce laps de temps, il doit calculer la position et l'orientation des phalanges distales par rapport aux effecteurs à l'aide des données capteur et de l'algorithme de régression circulaire. Il doit ensuite calculer la configuration des effecteurs par rapport à la paume en utilisant les données des codeurs moteur et les MGD des deux robots, puis dans le repère global en se basant sur les valeurs des codeurs de l'équilibreur et son MGD. Il doit enfin calculer l'ensemble des consignes moteur avec les différentes boucles de contrôle détaillées dans le chapitre 5.

Il faut bien sûr pour cela que l'ensemble des données soient disponibles à la milliseconde. C'est le cas pour les données des proximètres. Pour les codeurs de l'équilibreur et des moteurs, nous ne connaissons pas l'instant précis où les données sont transmises aux modules Beckhoff et aux variateurs (flèches grises sur la figure 4.32), mais au vu des fréquences de fonctionnement de ces dispositifs, on peut admettre qu'elles sont récupérées par les différents buffers en moins d'une milliseconde. Le bus de donnée EtherCAT assure alors une bonne synchronisation de l'ensemble de ces données (flèches de couleur orange) et garantit un temps de cycle régulier d'une milliseconde.

Dans ces conditions la totalité des calculs s'effectue avec des données ayant un retard maximum d'une milliseconde. En prenant en compte le temps de calcul, les consignes envoyées aux variateurs se basent sur des données ayant un retard maximal de 2ms. Cela nous permet d'assurer des signaux moteurs cohérents.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le dimensionnement et la conception des deux bras robotiques nécessaires pour déplacer les effecteurs et appliquer un retour d'effort sur le pouce et l'index. Dans un premier temps, nous avons analysé la partie mécanique en prenant en compte les différents besoins en effort et en raideur. Le dimensionnement de notre interface nous permet d'assurer un retour d'effort de 5N en flexion-extension (il est limité par le variateur) et 4.78N en abduction-adduction en continu. Ces valeurs atteignent respectivement 15N et 14.34N en crête dans l'ensemble de l'espace de travail du doigt. La raideur apparente de notre système lors d'un mouvement de flexion est de 4.17N/mm pour l'index et 2.44N/m pour le pouce. Elle est de 0.80N/mm en abduction pour l'index et 0.82N/mm pour le pouce. Afin de ne pas gêner l'utilisateur, le gant haptique est équilibré par un mécanisme servant à la fois à annuler l'influence du poids et aussi à mesurer la position et l'orientation de la main.

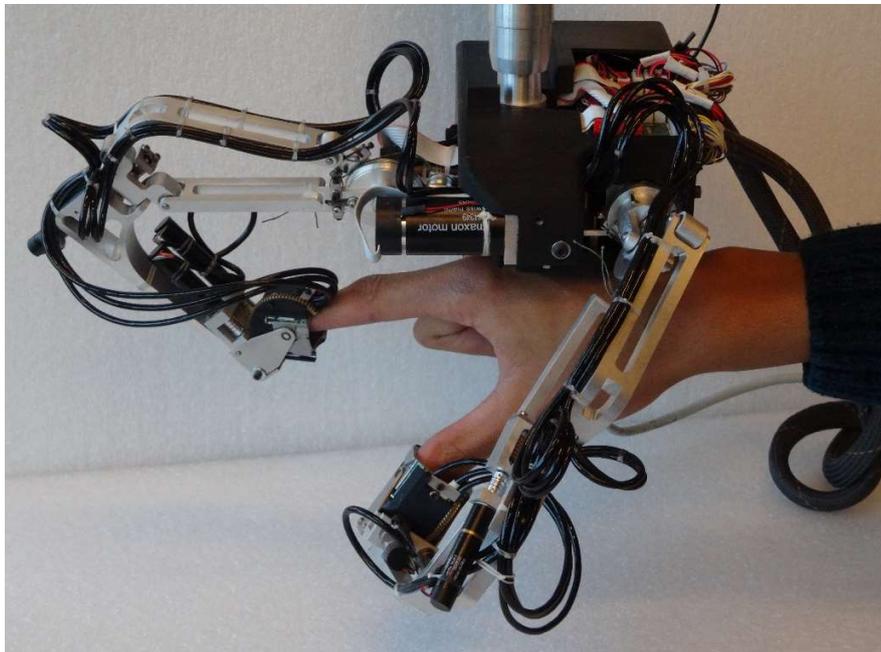


Figure 4.33 : Prototype de gant à retour d'effort à contacts intermittents sur la main d'un utilisateur.

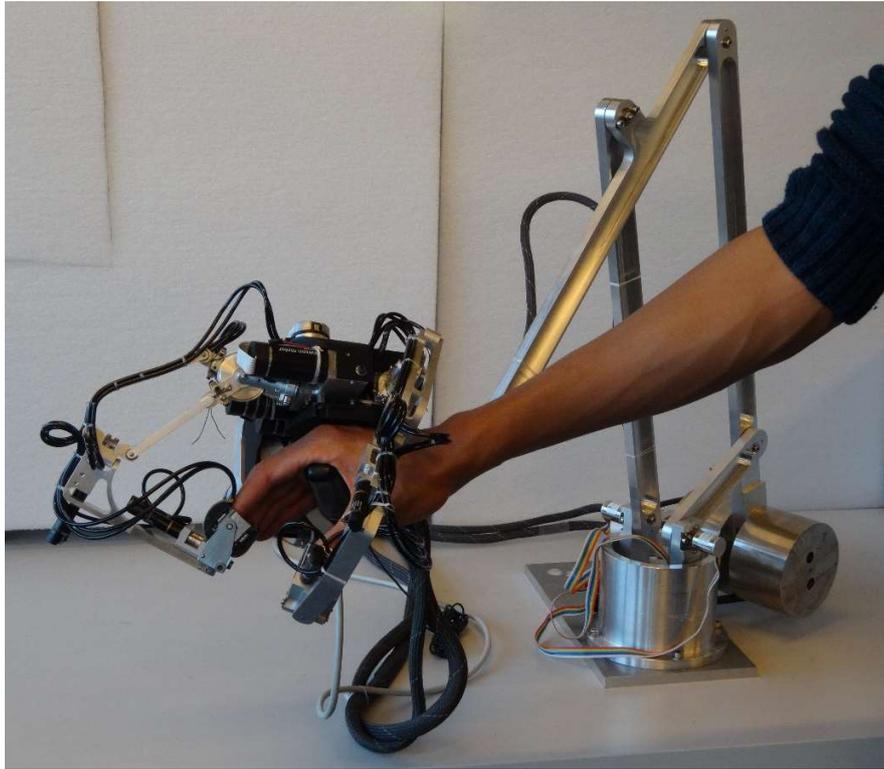


Figure 4.34 : Prototype de gant à retour d'effort à contacts intermittents monté sur son équilibreur.

Dans un second temps, nous avons étudié l'ensemble de l'électronique nécessaire au bon fonctionnement de cette interface haptique. Le choix des différents éléments a été analysé pour avoir une fréquence de fonctionnement de l'ordre du kilohertz et pour correspondre au mieux aux besoins de notre système. Tous ces composants ont ensuite été intégrés à une baie électronique pour respecter les règles de sécurité lors de l'utilisation future de notre interface.



Figure 4.35 : Prototype de gant à retour d'effort à contacts intermittents et son contrôleur.

CHAPITRE 5.

COMMANDE ET

ÉVALUATIONS EXPÉRIMENTALES

1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les effecteurs creux que nous avons conçus pour mesurer la position et l'orientation de la phalange distale du pouce et de l'index. Nous avons ensuite présenté le dimensionnement de l'interface capable de déplacer ces effecteurs en 6D et de générer un retour d'effort maximum proche de ou supérieur à 5N en continu et 15N en crête dans toutes les directions et dans la totalité de l'espace de travail de ces doigts. Nous avons également développé pour ce dispositif un contrôleur dont l'électronique a été pensée pour avoir une fréquence de fonctionnement de 1kHz.

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les lois de commande étudiées pour être implantées dans ce contrôleur. Ces lois de commande sont adaptées aux contacts intermittents. Elles couvrent les différentes phases de fonctionnement de ce type de systèmes, ainsi que les transitions entre ces phases. L'effecteur doit ainsi suivre le doigt à distance et sans rentrer en collision avec ce dernier en espace libre. Une fois à proximité d'un objet virtuel, l'effecteur doit attendre le contact de l'utilisateur. Enfin, une fois au contact, l'interface doit restituer à l'utilisateur des forces d'interaction en accord avec les caractéristiques du matériau touché.

Pour présenterons également dans ce chapitre les résultats de l'ensemble des évaluations expérimentales que nous avons menées pour étudier le comportement de notre interface.

2. PROBLÉMATIQUE ET APPROCHE PROPOSÉE

2.1. COMMANDE D'UNE INTERFACE À CONTACTS INTERMITTENTS

L'interface haptique à contacts intermittents que nous avons développée doit, comme toutes les interfaces de ce type, répondre à deux objectifs. Elle doit en premier lieu suivre les mouvements de l'utilisateur en espace libre sans rentrer en collision avec ce dernier, et en second lieu reproduire les forces d'interaction générées par les contacts avec les objets virtuels.

Dans la littérature, cet objectif est en général atteint en utilisant deux lois de commande différentes, chacune adaptée à l'une de ces phases. En espace libre, on utilise une loi de commande permettant à l'effecteur de suivre le doigt sans le toucher. Au contact, on simule les interactions entre l'utilisateur et les objets virtuels à l'aide de lois de commande usuelles en retour d'effort. Enfin, on gère au mieux les transitions entre ces deux modes de commande. Plusieurs solutions ont été proposées pour cela. Certains auteurs se basent sur l'utilisation d'un capteur d'effort pour connaître avec précision l'instant où passer

d'une loi de commande à l'autre [Fang et al. 2009] [Nakagawara et al. 2005]. Le changement de mode de contrôle se traduit alors par un mouvement rapide de l'interface vers le doigt pour restituer les forces d'interactions. Les auteurs de [Yoshikawa et Nagura 1997] proposent une autre approche consistant à décaler progressivement le point suivi par la commande de tracking pour que le doigt se rapproche de l'interface avant le déclenchement du mode au contact. La principale limite de cette solution est que, pour ajuster le décalage à appliquer, on doit connaître avec précision le rayon du doigt, ce qui n'est pas toujours possible en pratique comme le fait remarquer [Gonzalez 2015]. Ce dernier propose des solutions ne nécessitant pas de connaître le diamètre du doigt. Ces méthodes sont basées sur l'intégration d'un freinage pour arrêter l'effecteur au contact de la surface virtuelle, en compensant progressivement les efforts dus au suivi. Ainsi l'effecteur est immobile lorsque l'utilisateur arrive au contact. Dans la pratique, cette méthode fonctionne correctement lors de contacts à vitesse limitée mais présente des limites à grande vitesse.

Pour résoudre ces difficultés, nous proposons ici de traiter le passage d'un mode à l'autre non pas comme une transition entre ces deux phases mais comme une troisième phase à part entière, destinée à stabiliser l'anneau en attendant que l'utilisateur le touche. Il sera alors nécessaire de gérer les transitions entre la phase en espace libre et la phase de stabilisation et entre la phase de stabilisation et la phase au contact. Tous ces éléments seront détaillés ci-dessous.

On notera que nous nous placerons dans le cadre de la commande en impédance pour l'étage de positionnement, largement utilisée sur les interfaces haptiques classiques car elle a l'avantage d'être stable quelles que soient les actions de l'utilisateur, sous réserve que les gains soient réglés correctement. Nous ne prouverons pas sa passivité de façon théorique, mais nous réglerons empiriquement les gains des asservissements au mieux, dans les différentes phases et pendant les transitions, afin que notre robot soit à la fois stable et le plus performant possible. L'étage d'orientation intégrera une commande en vitesse classique.

2.2. SPÉCIFICITÉS DE NOTRE INTERFACE

On rappelle que durant nos interactions quotidiennes avec le monde qui nous entoure, nous appliquons principalement des forces sur les objets environnants quand on utilise un seul doigt, et rarement des couples. Les couples sont générés par l'emploi de plusieurs doigts. De ce fait, notre interface est composée de deux mécanismes différents pour le contrôle en position et en orientation. Un étage de positionnement constitué d'un parallélogramme monté sur une liaison pivot gère le suivi en position, avec un actionnement réversible à câbles, alors que l'orientation est gérée par un poignet à axes concourants actionné par des systèmes à roue et vis sans fin irréversibles. Ainsi, notre interface peut déplacer l'effecteur en 6D mais ne peut générer un retour d'effort qu'en translation sur les phalanges distales du pouce et de l'index. L'étage d'orientation et la boucle d'asservissement associée a uniquement pour but d'adapter l'orientation de l'effecteur à celle de la phalange distale. Seule la phase de suivi, expliquée dans le paragraphe suivant, est donc appliquée à ce mécanisme. Les autres phases de fonctionnement ne concernent que l'étage de positionnement.

3. LOIS DE COMMANDE UTILISÉES PENDANT LES DIFFÉRENTES PHASES DE FONCTIONNEMENT

3.1. COMMANDE BAS NIVEAU

3.1.1. Étage de positionnement

Pour l'étage de positionnement, nous nous plaçons dans le cadre d'une commande en impédance (cf. figure 5.1). Pour garantir le bon fonctionnement du système, on compense à l'extérieur du variateur le coefficient K_p du correcteur proportionnel de la boucle de vitesse interne au variateur (ce coefficient dépend de la constante de couple du moteur) et on réinjecte dans la boucle la vitesse du moteur pour annuler son influence. On a ainsi une équivalence entre l'effort désiré τ et l'intensité moteur i quelle que soit la vitesse de ce dernier (on notera que la boucle de vitesse interne au variateur ne peut pas comprendre de terme dérivé ou intégral, puisqu'ils seraient complexes à compenser). Le fait de reboucler la vitesse permet aussi d'avoir une plus grande transparence au contact dans les directions libres puisque le mouvement initié par l'utilisateur est entretenu par le robot. Dans ce schéma, la position et la vitesse articulaires q_{pos} et \dot{q}_{pos} sont données par les codeurs de l'étage de positionnement.

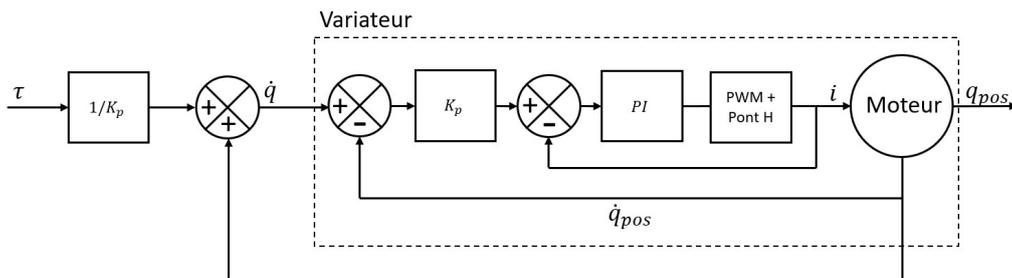


Figure 5.1 : Schéma de commande en impédance des trois premiers axes.

3.1.2. Étage d'orientation

Dans le cas de l'orientation, nous aurions aussi pu intégrer une commande en impédance pour la phase de suivi. Malheureusement les codeurs disponibles pour ces moteurs de petite taille ne présentent pas une résolution suffisante pour avoir des résultats satisfaisants. Nous faisons donc le choix d'implanter une commande en vitesse. Il est alors possible d'ajouter un intégrateur dans la commande du variateur pour augmenter la précision. Les valeurs des positions et vitesses articulaires, q_{ori} et \dot{q}_{ori} , sont aussi mesurées par les codeurs des moteurs.

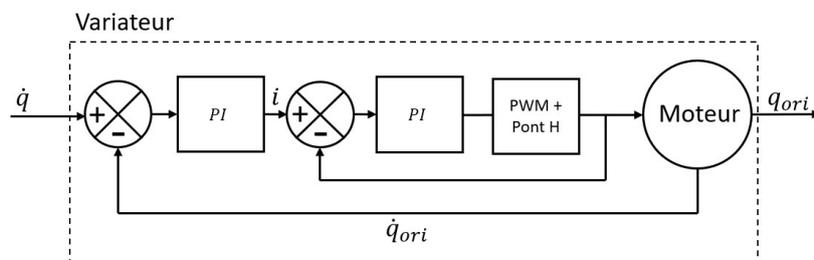


Figure 5.2 : Schéma de commande en vitesse des trois derniers axes.

3.2. PHASE DE SUIVI EN ESPACE LIBRE

En espace libre, l'effecteur doit suivre le doigt tout en restant à distance pour ne pas le toucher. Nous utilisons pour cela une commande en impédance pour l'étage de positionnement permettant de minimiser la distance cartésienne $\epsilon_{f/e,X}$ entre la position absolue $X_{e/0}$ du centre de l'effecteur et la position absolue $X_{f/0}$ du doigt. Dans la pratique, cette commande est implantée dans l'espace articulaire pour augmenter la robustesse de la commande [Plumet et al. 1995]. Le couple τ_t (l'indice t se référant à la phase de suivi ou de *tracking*) assurant le suivi du doigt est ainsi fonction de l'impédance $Z_t = K_t + B_t s$ et de l'erreur articulaire $\epsilon_{f/e,q}$ (c'est-à-dire en sortie des actionneurs) calculée en utilisant l'inverse de la matrice Jacobienne $J(q)$ du robot. Cette loi de commande, régie par les équations (5.1) à (5.3) et illustrée par la figure 5.3, est similaire à une contrainte de Kelvin-Voigt avec une élasticité K_t et une viscosité B_t . Ces gains doivent être réglés pour permettre un suivi réactif et stable de la part de l'interface.

$$\epsilon_{f/e,X} = X_{f/0} - X_{e/0} \quad (5.1)$$

$$\epsilon_{f/e,q} = J^{-1}(q) \cdot \epsilon_{f/e,X} \quad (5.2)$$

$$\tau_t = Z_t \cdot \epsilon_{f/e,q} \quad \text{avec} \quad Z_t = K_t + B_t s \quad (5.3)$$

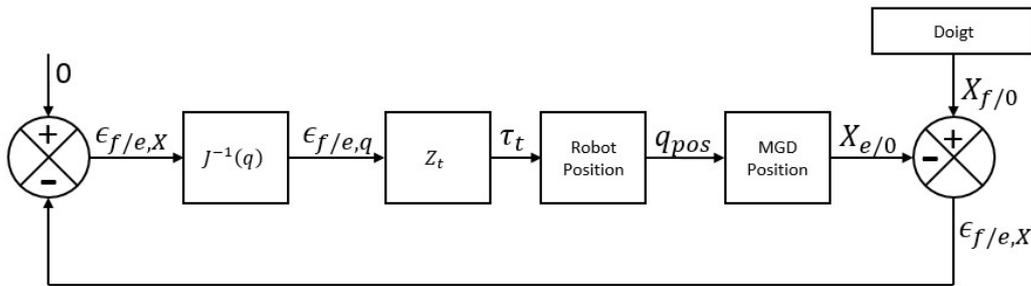


Figure 5.3 : Schéma de commande pour la phase de suivi en position.

Pour les raisons évoquées précédemment, on intègre un asservissement en vitesse articulaire, \dot{q} , pour l'étage d'orientation en se basant sur le temps d'échantillonnage, t_{ec} .

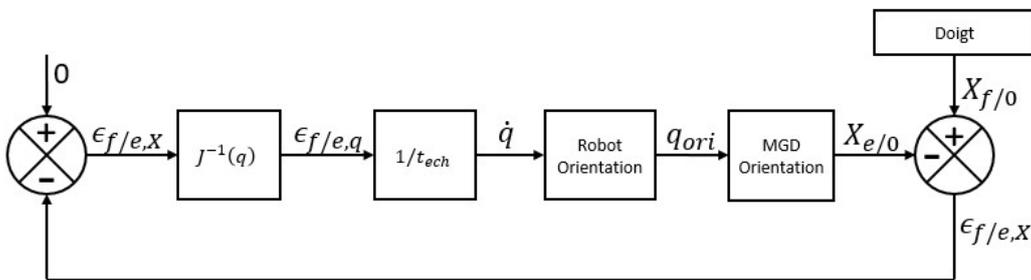


Figure 5.4 : Schéma de commande correspondant à la phase de suivi en orientation.

Cette phase commence quand la phalange de l'utilisateur est loin de tout objet virtuel et finit quand l'avatar de l'effecteur rentre en collision avec un objet de l'environnement virtuel. Pour rappel, cette phase est toujours active pour l'étage d'orientation. Les autres phases décrites dans ce chapitre ne s'appliquent qu'à l'étage de positionnement.

3.3. PHASE DE CONTACT

Une fois le doigt au contact de l'effecteur, ce dernier doit simuler les interactions entre l'utilisateur et l'objet virtuel à l'aide du retour d'effort généré par l'étage de positionnement.

Ici, nous modéliserons les objets virtuels en faisant l'hypothèse qu'ils ont un comportement viscoélastique régi par les paramètres K_{vo} et B_{vo} représentant les caractéristiques physiques de chaque objet touché (l'indice vo faisant référence à l'objet virtuel ou *virtual object*). La force d'interaction dépend alors de la distance $\epsilon_{f/vo,x}$ entre la peau du doigt et l'objet virtuel, et de leur vitesse relative $\dot{\epsilon}_{f/vo,x}$. L'étude de [Achhammer et al. 2010] montre qu'un moyen réaliste de simuler un contact avec de tels objets est d'utiliser une contrainte de Kelvin-Voigt modifiée avec une impédance Z_{vo} décrite ci-dessous.

$$\begin{cases} \text{Si } \dot{\epsilon}_{e/vo,x} < 0 & \text{alors } Z_{vo} = K_{vo} + B_{vo}s \\ \text{Si } \dot{\epsilon}_{e/vo,x} > 0 & \text{alors } Z_{vo} = K_{vo} \end{cases} \quad (5.4)$$

On notera que pendant cette phase de fonctionnement, le doigt de l'utilisateur est en contact avec l'effecteur. La distance entre la peau du doigt (dont la position est obtenue en retranchant le rayon R_f du doigt à la position $X_{f/0}$ de son centre) et l'objet virtuel est donc la même que celle entre le bord intérieur de l'effecteur (dont la position est obtenue en retranchant le rayon R_e de l'effecteur à la position $X_{e/0}$ de son centre) et la surface de l'objet. Comme le montre l'équation (5.5), on peut donc substituer ces deux expressions pour contourner les incertitudes sur le rayon du doigt.

$$\epsilon_{f/vo,x} = X_{f/0} - R_f - X_{vo/0} = \epsilon_{e/vo,x} = X_{e/0} - R_e - X_{vo/0} \quad (5.5)$$

La force d'interaction $F_{f/vo}$ vaut alors :

$$F_{f/vo} = Z_{vo} \cdot \epsilon_{f/vo,x} \quad (5.6)$$

Les couples τ_{vo} équivalents sont ensuite calculés en utilisant le modèle statique inverse du robot.

$$\tau_{vo} = J^T(q) \cdot F_{f/vo} \quad (5.7)$$

Comme le montre la figure 5.5, le couple articulaire τ appliqué à l'interface est alors la somme de ce couple et du couple τ_f fourni par le doigt.

$$\tau = \tau_f + \tau_{vo} \quad (5.8)$$

Cette phase commence quand le doigt vient au contact de l'effecteur et finit quand le contact est rompu.

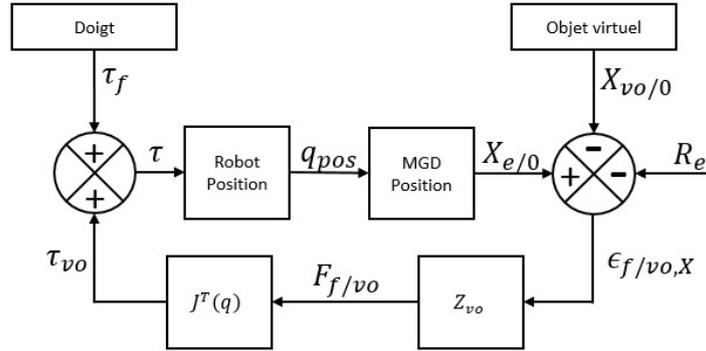


Figure 5.5 : Schéma de commande pour la phase de contact.

3.4. PHASE DE STABILISATION

Comme expliqué précédemment, nous étudierons ici la phase de transition entre espace libre et contact comme une phase à part entière dédiée à la stabilisation de l'anneau. Pendant cette phase, l'effecteur doit rester immobile à la surface de l'objet en attendant le contact du doigt. Dans ce cas, si le doigt se rapproche, le système mécanique ne doit pas le suivre. Par conséquent, nous implantons une boucle de commande qui diminue la distance entre le rayon intérieur de l'effecteur et le bord de l'objet virtuel. Cette loi, illustrée par la figure 5.6, est très similaire à celle utilisée durant la phase de contact, si ce n'est que les gains K_s et B_s (l'indice s faisant référence à la phase de stabilisation ou *stabilization*) sont choisis pour avoir une stabilisation aussi rapide que possible de l'effecteur et non pour représenter les caractéristiques mécaniques du matériau de l'objet touché. Pour cela, nous nous plaçons dans le cas d'un système sur amorti, ce qui évite les oscillations de l'effecteur quand il entre en contact avec l'environnement virtuel (il possède en effet à ce moment là encore une certaine vitesse, ce qui pourrait générer des oscillations ressenties par l'utilisateur durant le contact, dégradant ainsi son expérience).

$$\epsilon_{e/v0,X} = X_{e/0} - R_e - X_{vo/0} \quad (5.9)$$

$$F_{e/v0} = Z_s \cdot \epsilon_{e/v0,X} \quad \text{avec} \quad Z_s = K_s + B_s s \quad (5.10)$$

$$\tau_s = J^T(q) \cdot F_{e/v0} \quad (5.11)$$

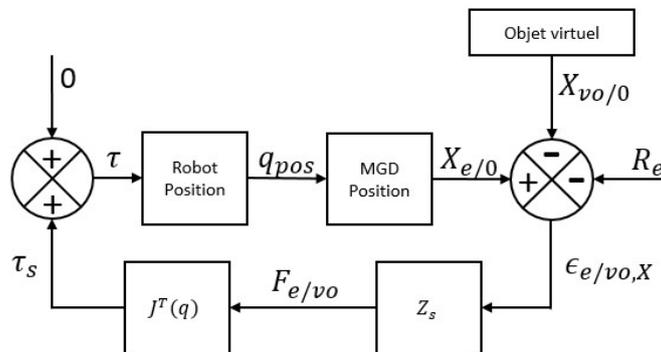


Figure 5.6 : Schéma de commande pour la phase de stabilisation de l'anneau.

Cette phase débute lorsque l'avatar de l'effecteur rencontre une surface virtuelle. Elle se termine soit quand le doigt vient au contact de l'effecteur (dans ce cas elle est suivie d'une phase de contact), soit quand le doigt s'éloigne de l'objet virtuel (dans ce cas nous repassons dans une phase de suivi).

3.5. TRANSITIONS ENTRE DEUX PHASES

Le fait de passer d'une loi de commande à une autre peut générer des instabilités, des vibrations ou d'autres problèmes qui pourraient perturber le fonctionnement de nos diverses boucles de contrôle. Il convient donc de gérer avec attention les transitions entre ces différentes phases.

3.5.1. Transition du suivi à la stabilisation

Une transition brutale entre les modes de commande en espace libre et pendant la phase de stabilisation pourrait perturber le bon fonctionnement de notre interface. Même si l'utilisateur ne touche pas encore le dispositif, des mouvements brusques de l'effecteur pourraient l'amener à percuter le doigt, ce qui provoquerait un ressenti non désiré. Pour éviter ces problèmes, on fera une combinaison pondérée de ces deux modes de commande, avec des pondérations variables, pour permettre une transition douce entre ces deux phases. On notera que, prise séparément, chacune des deux phases est stable, donc une combinaison linéaire entre elles est aussi stable. Cette méthode est employée dans [Gonzalez 2015] pour effectuer la transition entre la phase de suivi et celle de contact. Dans la pratique, nous ajoutons une fonction $\beta(t)$ pour diminuer progressivement l'influence de la première loi de commande et augmenter celle de la seconde (cf. équation 5.12). Cette fonction varie de 1 à 0, pendant un laps de temps le plus court possible. Nous la choisissons linéaire pour assurer la continuité, mais il serait aussi possible d'intégrer une fonction du second ordre ou même une tangente hyperbolique pour être C^∞ .

$$\tau = \beta(t) \cdot \tau_t + (1 - \beta(t)) \cdot \tau_s \quad (5.12)$$

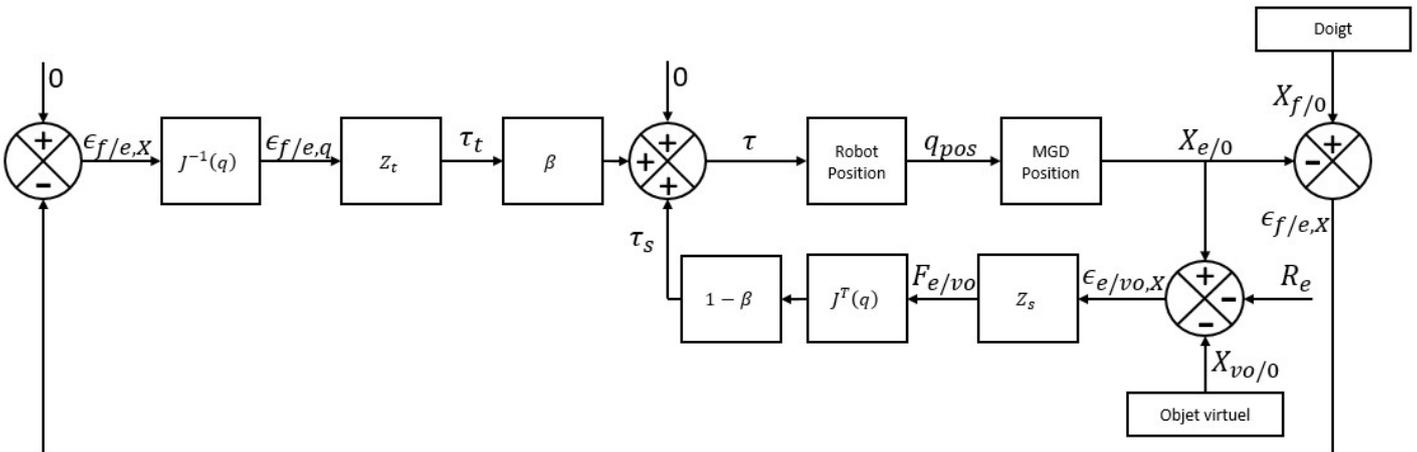


Figure 5.7 : Schéma de commande pendant la transition entre le suivi et la stabilisation.

Le temps de la transition dépend de la fonction. Elle doit donc être la plus rapide possible tout en restant dans les limites du système. On notera que de faibles vibrations lors du passage d'un mode à l'autre sont acceptables puisque le doigt n'est pas encore au contact de l'effecteur.

3.5.2. Transition de la stabilisation au contact

Les lois de commande de ces deux modes sont vraiment similaires. Elles sont toutes les deux basées sur un contrôleur proportionnel dérivé sur la distance entre le bord intérieur de l'effecteur et la surface de l'objet virtuel. Seuls leurs gains ne sont pas les mêmes. Pour passer de l'une à l'autre, nous nous contenterons de les adapter avec un gain scaling.

On notera que quand le doigt arrive au contact de l'effecteur, les gains de la boucle de contrôle doivent déjà représenter les caractéristiques du matériau touché. Le but de la phase de stabilisation est de réduire, avant cela, les oscillations du système. En d'autres termes, on cherche à atteindre une vitesse v_{min} suffisamment faible au niveau de l'effecteur. Une fois cette vitesse atteinte, la commande de stabilisation n'a plus d'utilité. Les gains du contrôleur sont alors progressivement modifiés pour passer de ceux de la stabilisation à ceux du contact. Il est important de préciser que les gains choisis pour la stabilisation sont les plus élevés possibles tout en restant dans le domaine stable. Donc si nous souhaitons simuler une surface la plus rigide possible, les gains ne changeront pas. Le gain scaling n'est actif que pour la simulation d'un contact avec un objet mou.

3.6. COMMANDE GLOBALE

En combinant l'ensemble des phases : le suivi en espace libre, la transition entre suivi et stabilisation (atténuation du suivi), la stabilisation, la transition entre stabilisation et contact (modification du gain) et la restitution du contact, nous obtenons le schéma global suivant pour l'étage de positionnement (composé des trois premiers axes de notre robot qui sont réversibles pour permettre un retour d'effort).

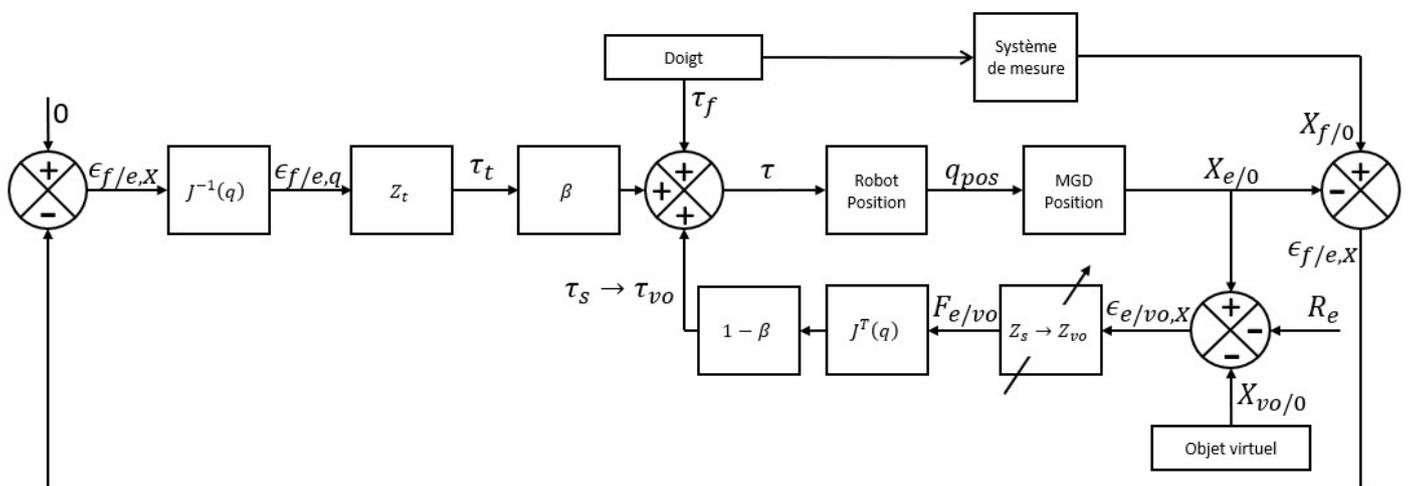


Figure 5.8 : Schéma de commande globale pour la position.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'étage d'orientation doit aligner les axes de notre effecteur avec ceux de la dernière phalange du doigt durant l'ensemble des différentes étapes. Cela signifie que la boucle de suivi est toujours active pour les trois derniers axes de notre robot. Le schéma suivant regroupe l'ensemble des lois de commande pour l'étage de positionnement et pour celui d'orientation pour une meilleure compréhension du fonctionnement global de l'interface.

4. ÉVALUATIONS EXPÉRIMENTALES

4.1. CAS D'USAGE ENVISAGÉ POUR LES ÉVALUATIONS

Pour évaluer les performances de notre interface, nous avons retenu un cas d'usage consistant à l'utiliser pour approcher et entrer en contact avec une surface virtuelle. Ce cas d'usage permet de tester son comportement pendant ses différentes phases de fonctionnement et pendant les transitions.

4.2. COMPORTEMENT ATTENDU

Lorsque l'on s'approche d'un objet virtuel avec le doigt, le système doit d'abord suivre le doigt à distance sans le toucher (phase de suivi). Une fois que l'avatar de l'effecteur touche une paroi virtuelle, la commande de suivi va diminuer le plus rapidement possible pour laisser la commande de stabilisation prendre le dessus (transition 1). L'effecteur se stabilisera alors à la surface de l'objet virtuel avec des gains maximaux (phase de stabilisation). Une fois la vitesse minimale de référence atteinte, on estime que le robot ne vibre plus et on passe progressivement des gains de stabilisation aux gains réels du matériau, s'ils sont différents (transition 2). Le doigt vient alors toucher l'effecteur qui doit restituer les forces d'interaction en fonction de la pénétration dans le mur (phase de contact). L'évolution de la pondération des différentes lois de commande en fonction de ces différentes étapes est représentée sur les figures suivantes.

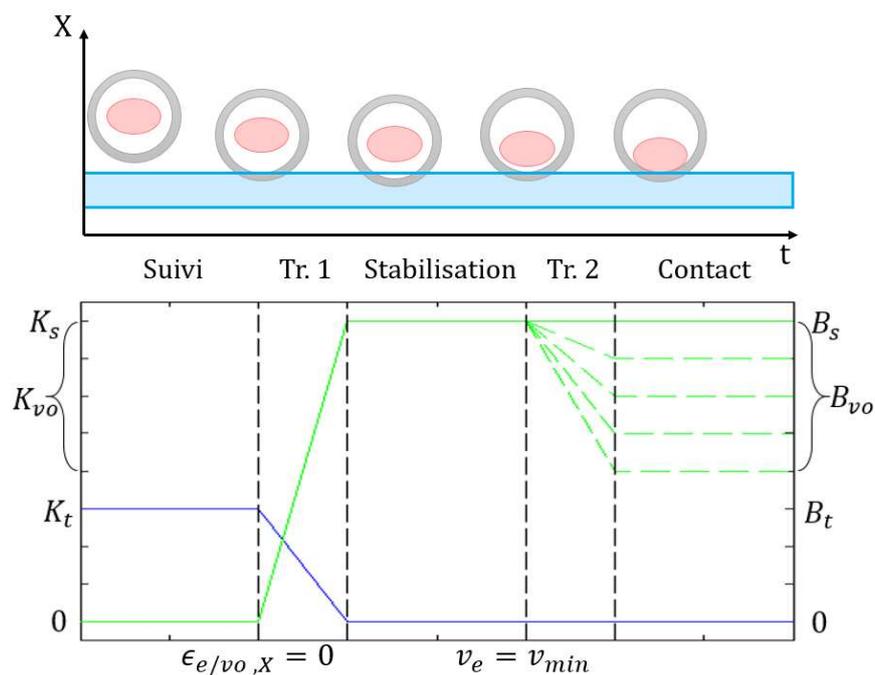


Figure 5.10 : Évolution de la pondération de la commande de suivi (bas, en bleu) et de celles de stabilisation et de contact (bas, en vert) pendant les différentes phases de fonctionnement (haut).

4.3. SUIVI EN ORIENTATION

Nous avons implémenté l'ensemble des lois de commande présentées ci-dessus dans le contrôleur du robot. Cependant, avant de tester le comportement de notre interface dans un cas complexe, nous avons testé chaque mode de fonctionnement de façon unitaire.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au suivi en orientation de la phalange distale par notre interface, l'effecteur étant maintenu en position fixe. La mesure de l'orientation est acquise par les différentes cartes filles capteurs dont les données sont synchronisées par la carte mère capteur. Le bus EtherCAT est ensuite utilisé pour transmettre cette information au contrôleur qui calcule et régule les vitesses des trois moteurs du système d'orientation via les lois de commande implantées (cf. Figure 5.11).

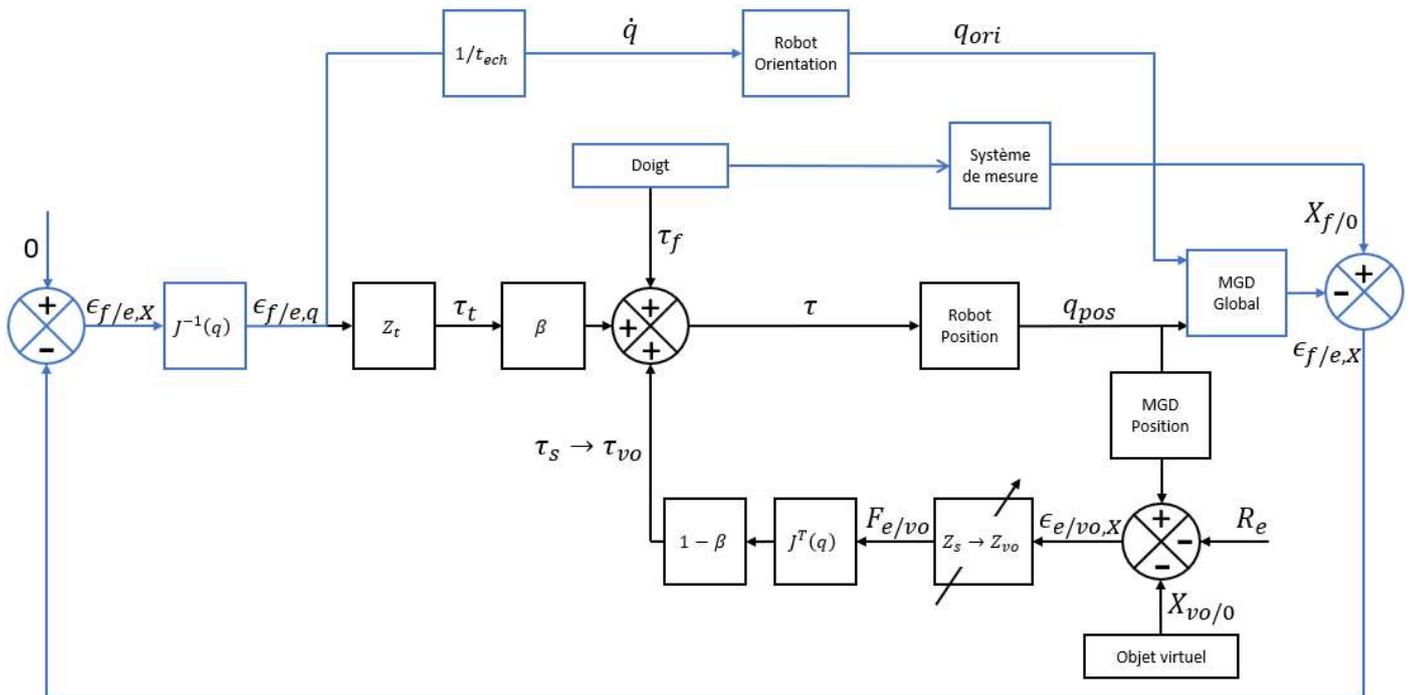


Figure 5.11 : Partie de la commande utilisée pour le suivi en orientation (en bleu).

En pratique, l'utilisateur bouge sa phalange à l'intérieur de l'effecteur et l'interface compense ces mouvements pour maintenir l'axe de l'effecteur parallèle à celui du doigt. La supination du doigt n'étant pas mesurée, seuls les deux autres angles relatifs sont mesurés.

Le premier test effectué concerne un mouvement similaire à l'abduction – adduction (rotation autour de l'axe $Z_{0'e}$ défini sur la Figure 4.21 et lié à la base du robot, cf. Figure 5.12).

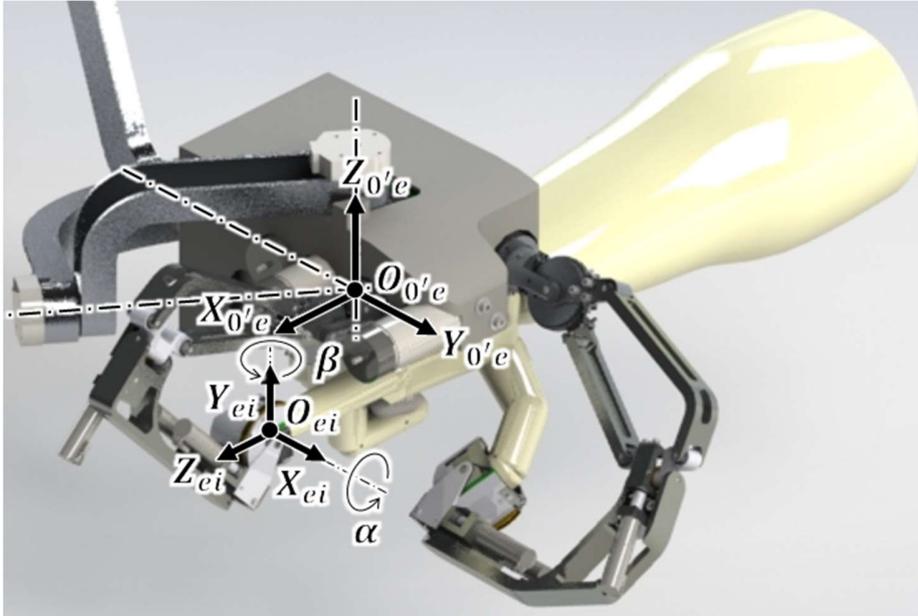


Figure 5.12 : Définition des repères utilisés pour les évaluations du suivi en orientation.

$R_{0'e} = (O_{0'e}, X_{0'e}, Y_{0'e}, Z_{0'e})$ est le repère de base du robot.

$R_{ei} = (O_{ei}, X_{ei}, Y_{ei}, Z_{ei})$ est le repère lié à l'effecteur creux du robot de l'index.

On notera que, l'effecteur étant maintenu en position fixe, l'utilisateur ne peut pas garder sa main à proximité de la base du robot lorsqu'il tourne son doigt autour de l'axe $Z_{0'e}$. Il doit déplacer sa main au fur et à mesure qu'il modifie l'orientation du doigt. Dans la pratique, le maintien en position est assuré mécaniquement par des pions. Dans ces conditions, la position fixe de référence n'est pas libre. Elle est placée nettement en dessous de la base du robot (cf. Figure 5.13).

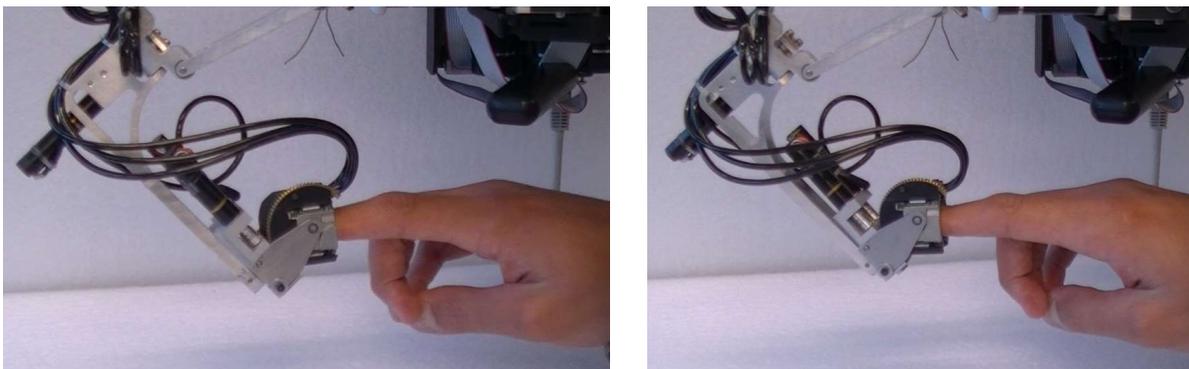


Figure 5.13 : Rotation autour de de l'axe $Z_{0'e}$ pour simuler un mouvement d'abduction – adduction.

Les résultats ci-dessous montrent que pour suivre le doigt, le robot effectue des mouvements de grande amplitude, 30° pour ce test, autour de l'axe $Z_{0'e}$ (cf. Figure 5.14). Le mouvement du doigt n'étant pas contraint, on voit aussi un léger mouvement du robot de 8° autour de l'axe $Y_{0'e}$.

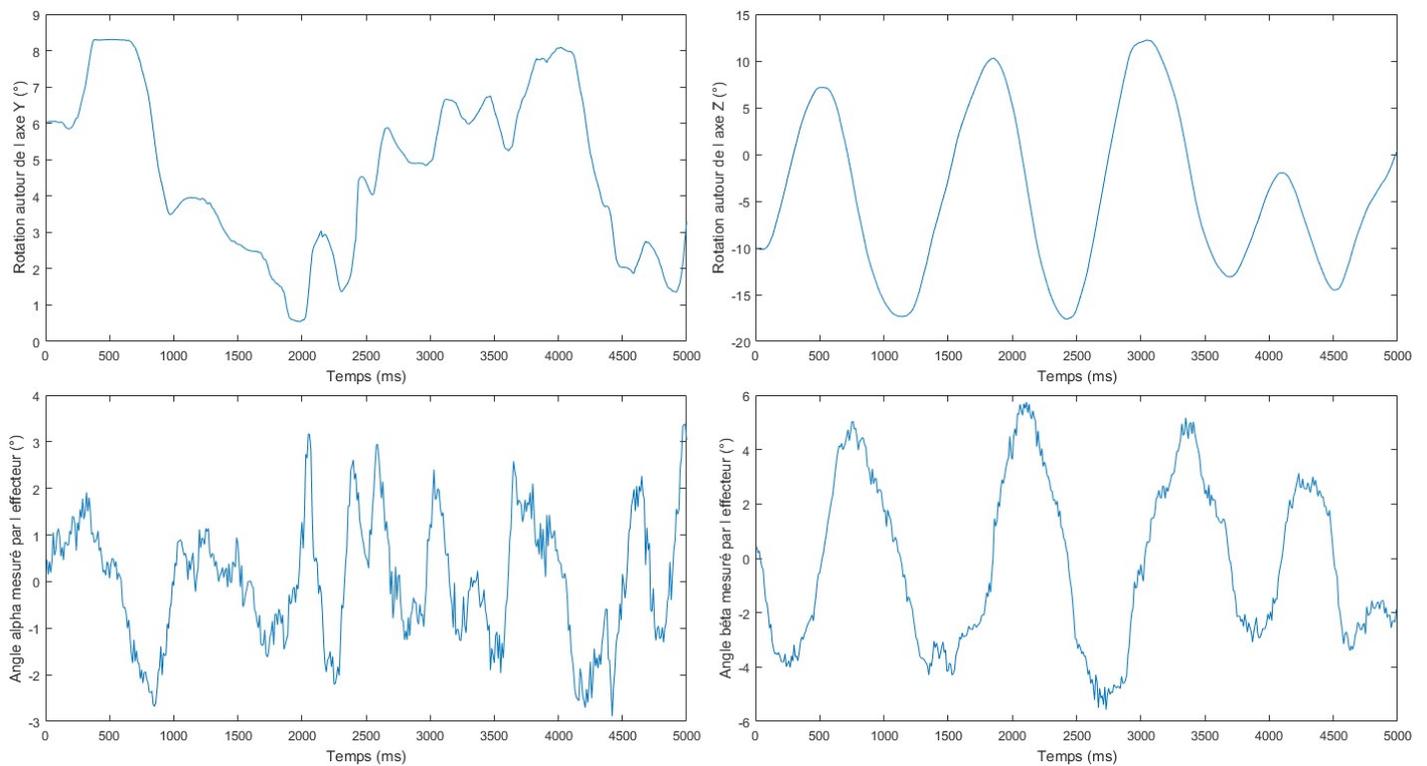


Figure 5.14 : Orientations de la capsule autour des axes Y_{0re} et Z_{0re} lors d'un mouvement similaire à un mouvement d'abduction-adduction de l'index et évolution des angles relatifs α et β entre l'axe de l'effecteur et celui de la phalange distale au cours de ce mouvement.

Pour juger de la qualité du suivi, on mesure l'écart angulaire entre le doigt et le robot au cours de ce mouvement. Les angles de référence utilisés pour cela sont les angles α et β définis dans le paragraphe 3.3. Ils permettent de passer du repère R_{ei} lié à l'effecteur de l'index au repère R_{fi} lié à sa phalange distale en tournant successivement de l'angle α autour de X_{ei} puis de l'angle β autour de l'axe Y obtenu après cette première rotation (cf. Figure 5.12). Comme le montre la Figure 5.14, on observe au cours du suivi un retard maximum inférieur à 6° entre le doigt et l'effecteur (angle beta). Ce retard ne dérange pas le suivi puisqu'il ne crée pas de contact entre l'utilisateur et les bords de l'effecteur.

Le même essai a ensuite été réalisé avec un mouvement de flexion (cf. Figure 5.15).

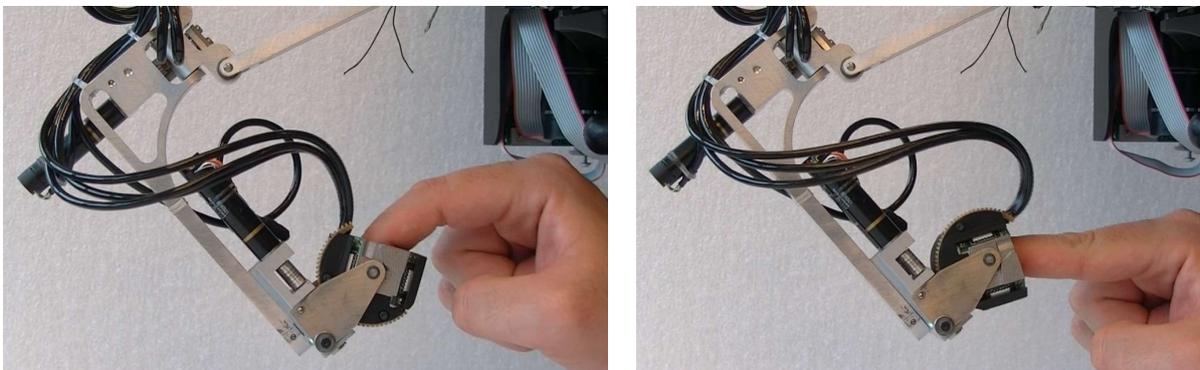


Figure 5.15 : Rotation autour de l'axe Y_{0re} pour simuler un mouvement de flexion - extension.

Les résultats obtenus montrent que, pour une rotation autour de l'axe $Y_{0're}$ de 70° environ, l'effecteur arrive à suivre le doigt avec un retard qui reste inférieur à 4° pendant la majorité du mouvement (cf. Figure 5.16, angle alpha). Ce retard est plus faible lors d'un mouvement de flexion – extension que lors d'un mouvement d'abduction – adduction, la précision de mesure étant meilleure en flexion – extension. La rotation parasite autour de l'axe $Z_{0'e}$ a ici une amplitude de 7° . Comme précédemment, il n'y a aucun contact entre l'interface et l'utilisateur au cours de ce mouvement.

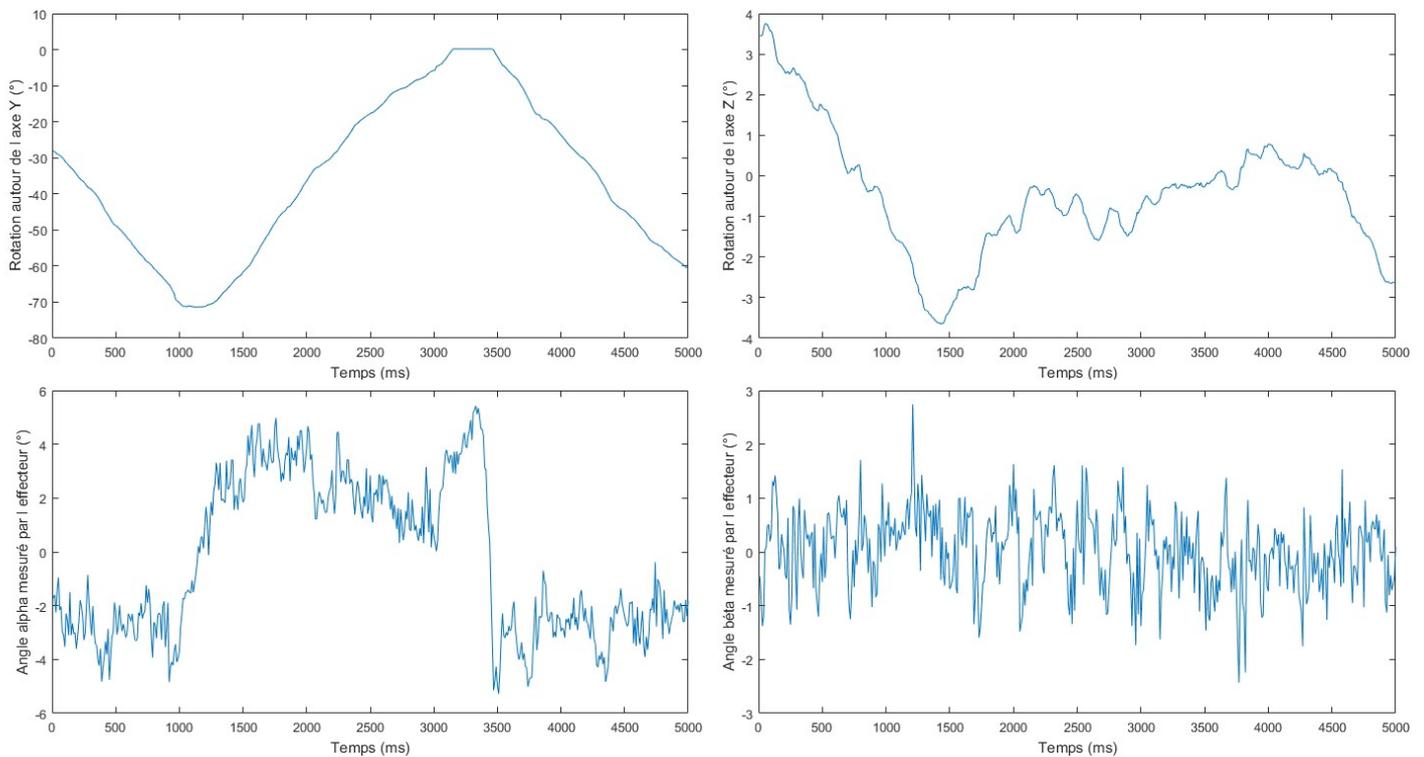


Figure 5.16 : Orientations de la capsule autour des axes $Y_{0're}$ et $Z_{0'e}$, lors d'un mouvement similaire à un mouvement de flexion-extension de l'index et évolution des angles relatifs α et β entre l'axe de l'effecteur et celui de la phalange distale au cours de ce mouvement.

Ce test a enfin été effectué pour un mouvement oblique faisant intervenir plusieurs axes de rotation. Ce mouvement ressemble à un mouvement d'abduction-adduction mais avec un doigt incliné (cf. Figure 5.17).



Figure 5.17 : Rotation autour de l'axe $Z_{0'e}$ avec le doigt incliné pour produire un suivi combiné de l'effecteur autour des axes $Y_{0'e}$ et $Z_{0'e}$.

Dans ces conditions, on observe que le mouvement de grande amplitude (environ 85°) autour de l'axe $Z_{0'e}$ est accompagné d'une rotation autour de l'axe $Y_{0'e}$ atteignant 10° environ (cf. Figure 5.18). Comme le montrent les résultats obtenus, nous constatons que l'interface suit aussi le doigt en orientation lors de ce mouvement. Le retard de l'effecteur sur le doigt reste inférieur à 4° sur l'un des axes et bien qu'il atteigne presque 10° sur l'autre, cela ne dérange pas le suivi puisqu'il ne crée pas de contact entre l'utilisateur et les bords de l'effecteur.

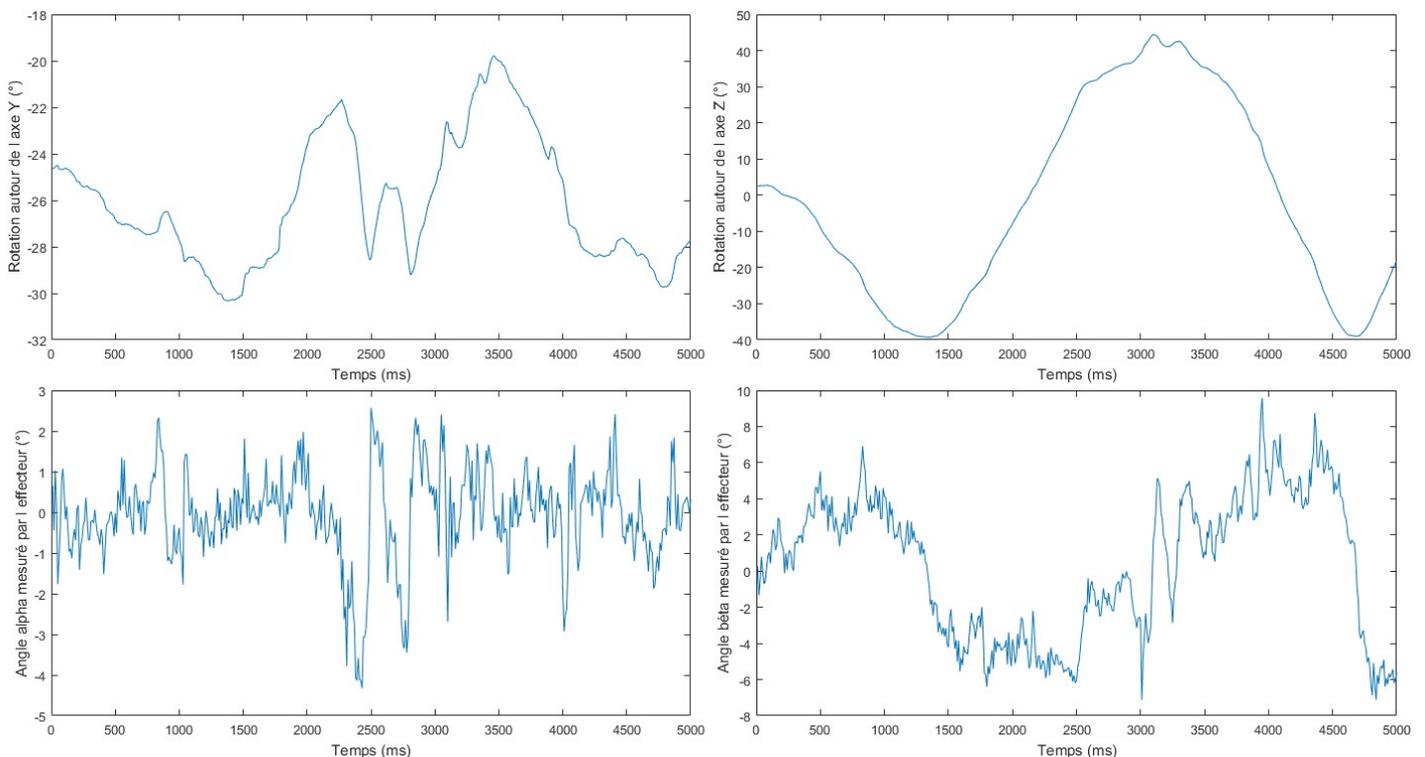


Figure 5.18 : Orientations de la capsule autour des axes Y_0 et Z_0 , lors d'un mouvement oblique de l'index et évolution des angles relatifs α et β entre l'axe de l'effecteur et celui de la phalange distale au cours de ce mouvement.

Nous pouvons conclure de ces différents essais que l'interface mesure et compense correctement l'orientation du doigt.

4.4. SUIVI EN POSITION

Dans un second temps, nous avons testé le suivi en position de l'extrémité du doigt par notre interface, l'orientation de l'effecteur étant maintenue fixe. Le cheminement de l'information est le même que pour le suivi en orientation. Cependant, ce sont cette fois-ci les trois premiers axes qui sont actionnés et nous utilisons ici une commande en impédance (cf. Figure 5.19) et un actionnement réversible à câbles, et non une commande en vitesse et un actionnement irréversible comme le système de suivi en orientation, afin de pouvoir intégrer ultérieurement le retour d'effort.

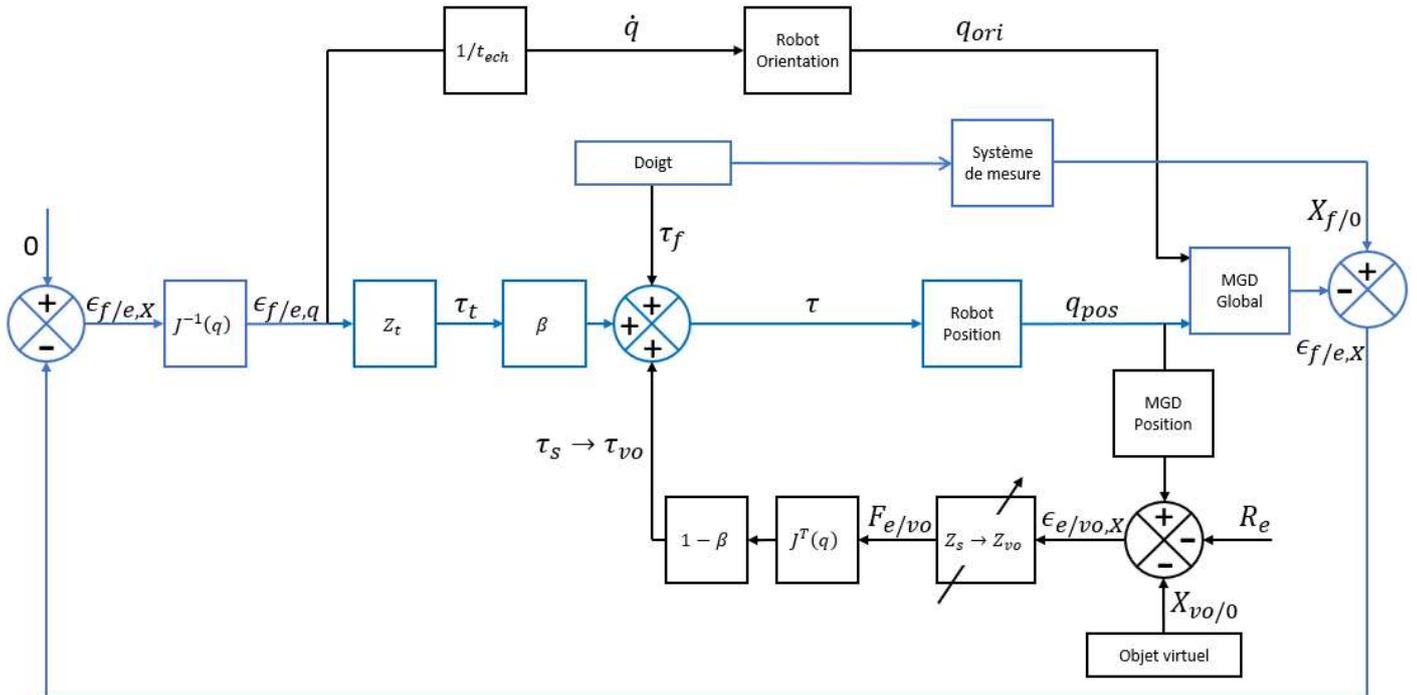


Figure 5.19 : Partie de la commande utilisée pour le suivi en position (en bleu).

Les couples en jeu étant bien plus importants sur ces trois axes, nous avons utilisé le modèle de doigt en aluminium (pièce usinée ayant la forme de la phalange distale d'un index de taille moyenne et recouverte d'un revêtement similaire à celui utilisé sur les sphères de MoCap afin d'obtenir à la fois une forme et des propriétés réfléchives proches de celles d'un vrai doigt comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3) pour effectuer le réglage de l'impédance Z_t , correspondant au tracking, en toute sécurité. Dans la pratique, nous perturbons légèrement le système, après en avoir réglé les gains, pour en éprouver la stabilité.

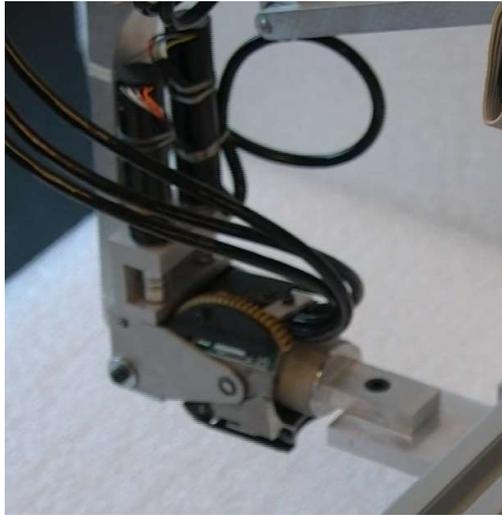


Figure 5.20 : Doigt en aluminium monté à l'intérieur de l'effecteur pour le test de suivi en position.

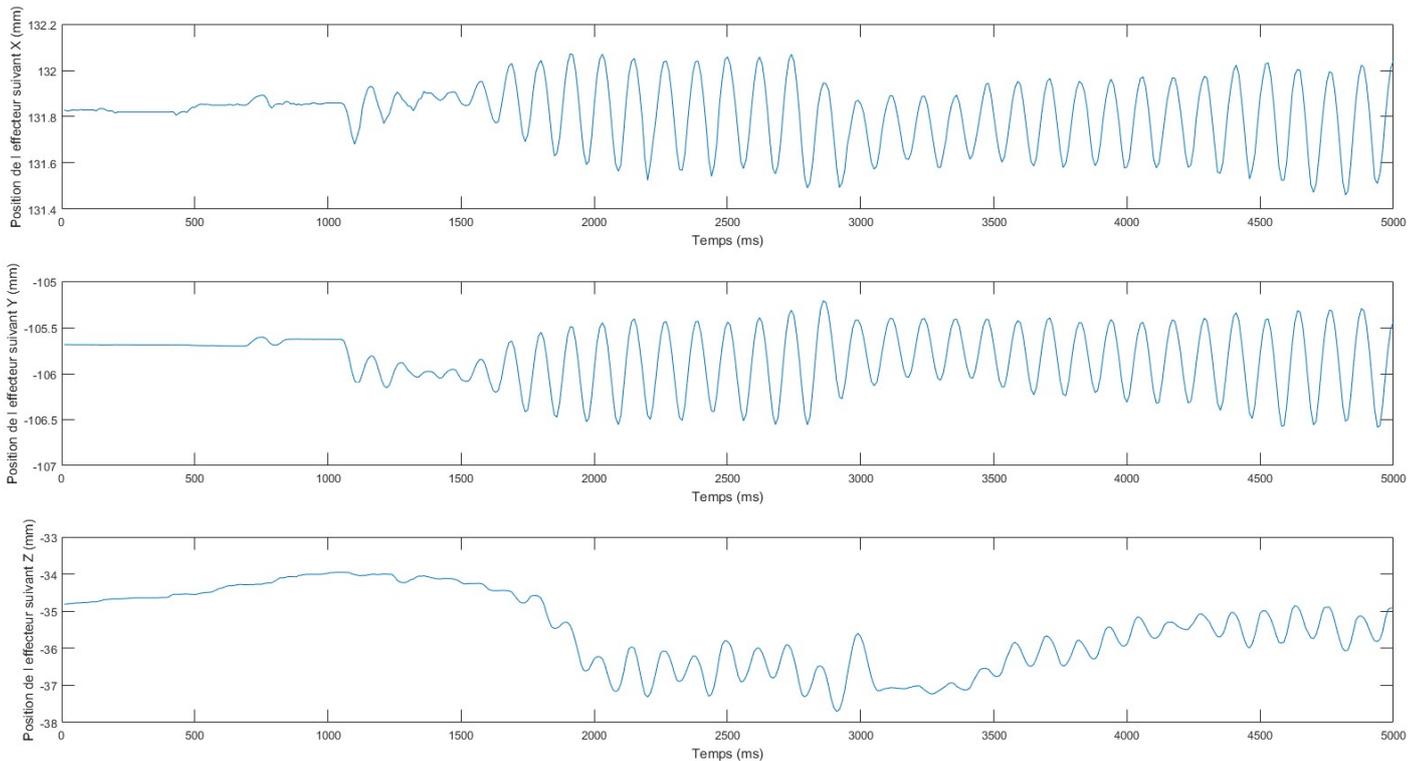


Figure 5.21 : Déplacement de l'effecteur suivant les axes X_{0re} , Y_{0r} et Z_{0re} suite à une faible perturbation.

Les résultats obtenus montrent que l'asservissement en position de notre effecteur est instable même avec des gains faibles (1500 N/m dans le cas illustré, cf. figure 5.18). Cela est probablement dû aux jeux présents sur les différents axes, même si des systèmes de tension ont été mis en place pour réduire ces problèmes, ainsi qu'à la faible raideur de notre système engendrée par des chemins de câbles trop longs compte tenu du diamètre des câbles utilisés. Malheureusement les gains obtenus ne permettent pas d'assurer un suivi correct du doigt en position. On notera que les robots du pouce et de l'index ne sont pas équilibrés statiquement et qu'actuellement nous n'avons pas implémenté de modèle de gravité sur ces

robots. Dans ces conditions, les gains de l'asservissement en position ne peuvent pas être diminués pour stabiliser le système car des gains plus faibles ne permettraient pas de suivre le doigt en Z à cause du poids du robot.

Pour résoudre ce problème, il faudrait revoir la conception et le montage de l'interface. Ces évolutions demanderaient un temps et des moyens dont je ne dispose pas dans le cadre de ces travaux de thèse. Elles en constituent une perspective importante.

4.5. RETOUR D'EFFORT

Lors des tests du retour d'effort, seuls les moteurs de l'étage de positionnement du robot sont actifs (cf. Figure 5.22). Sur ces trois axes, seule la commande en impédance est active. Cela permet ainsi d'avoir un mode transparent en dehors de tout contact dans l'espace virtuel et un retour d'effort restituant les interactions avec ce dernier.

On notera que, les mécanismes de suivi en orientation étant irréversibles, les capsules ne suivent pas le doigt en orientation lors de ces essais. Pour que cela ne soit pas gênant, on effectue des mouvements de faible amplitude. Par ailleurs, afin de pouvoir tester le retour d'effort de notre interface sans utiliser le suivi à distance, il est nécessaire de figer la phalange distale à l'intérieur de l'effecteur. Pour cela, nous avons utilisé une pièce intermédiaire servant à compenser l'espace entre le doigt et la surface intérieure de notre effecteur concave. Dans ces conditions, il est possible d'utiliser ce gant à retour d'effort comme une interface haptique classique sans contacts intermittents, tel le gant IHS10 [Gosselin 2012].

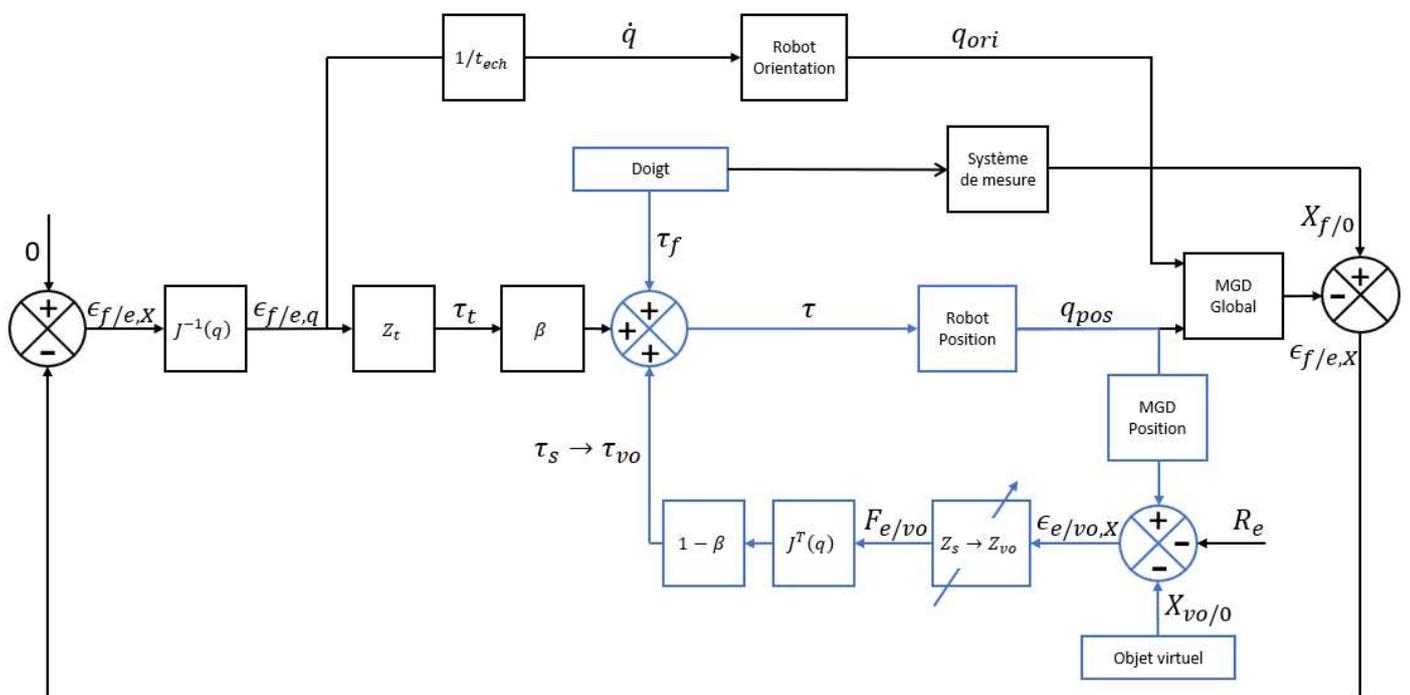


Figure 5.22 : Partie de la commande utilisée pour le retour d'effort (en bleu).

Pour évaluer ce mode de fonctionnement, nous reprenons le cas d'usage évoqué précédemment consistant à approcher d'une surface virtuelle puis à entrer en contact avec cette dernière. Les gains de cet objet virtuel sont réglés arbitrairement à 1500 N/m.

Le test est d'abord effectué avec une surface virtuelle normale à l'axe Y_{0re} , le contact avec cette surface étant provoqué par un mouvement d'abduction – adduction (cf. Figure 5.23).



Figure 5.23 : Contact avec une surface normale à l'axe Y_{0re} .

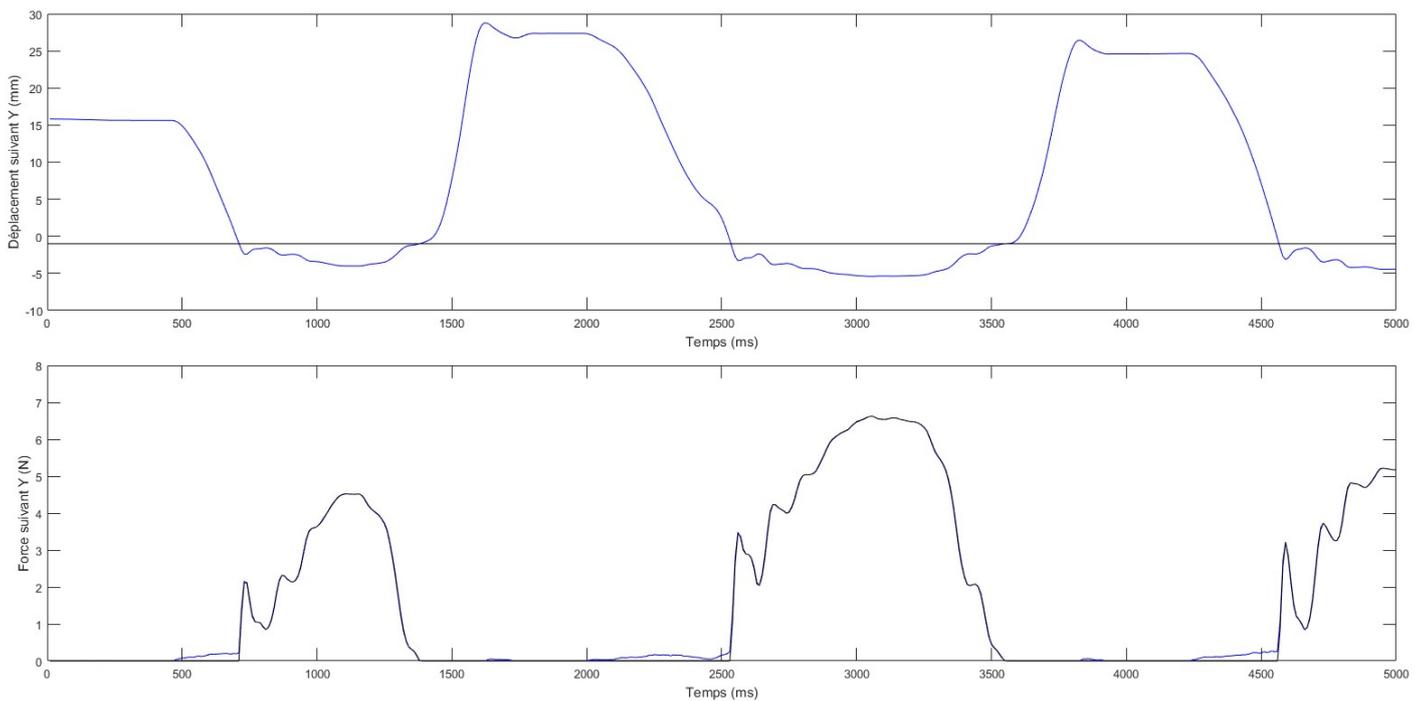


Figure 5.24 : Évolution de la position de l'effecteur et de l'effort généré lors d'un contact avec une surface virtuelle normale à l'axe Y_{0re} , le contact étant provoqué par un mouvement d'abduction – adduction. En haut, la position de l'effecteur en bleu et la position de la surface virtuelle en noir. En bas, l'amplitude du retour d'effort théorique en fonction du gain et du dépassement (consigne d'effort) en noir et les efforts réels (recalculés à partir de l'enregistrement des couples moteurs) en bleu.

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 5.24, l'effort $F_{e/v0}$ engendré par un contact avec un objet virtuel est nul lorsqu'il n'y a pas d'interaction. Puis il évolue en fonction de l'enfoncement de l'avatar du doigt dans la surface virtuelle (lors de ce test, nous ne testons pas la limite des 15 N par sécurité). Enfin lors de la remontée du doigt, cet effort diminue pour redevenir nul quand l'interaction prend fin.

Le même test a ensuite été réalisé avec une surface virtuelle normale à l'axe Z_{0r} . Dans ce cas le contact est provoqué par un mouvement de flexion – extension (cf. Figure 5.25).

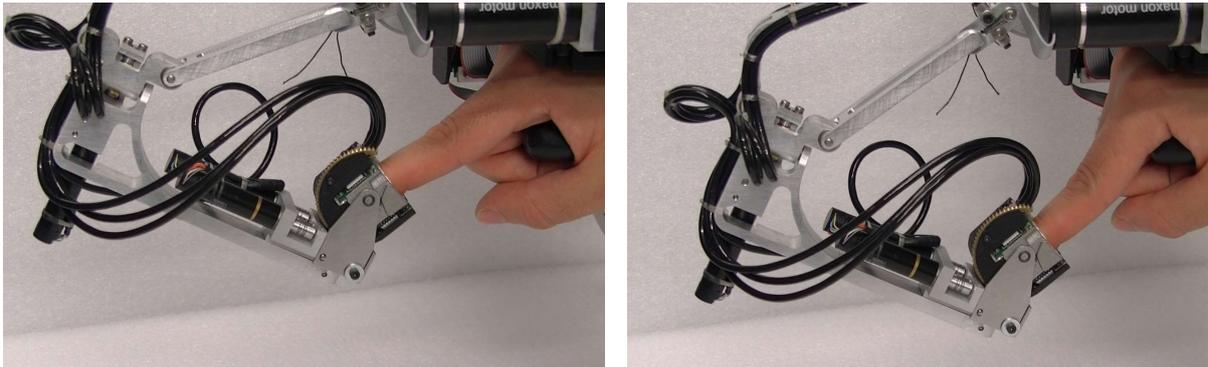


Figure 5.25 : Contact avec une surface normale à l'axe Z_{0re} .

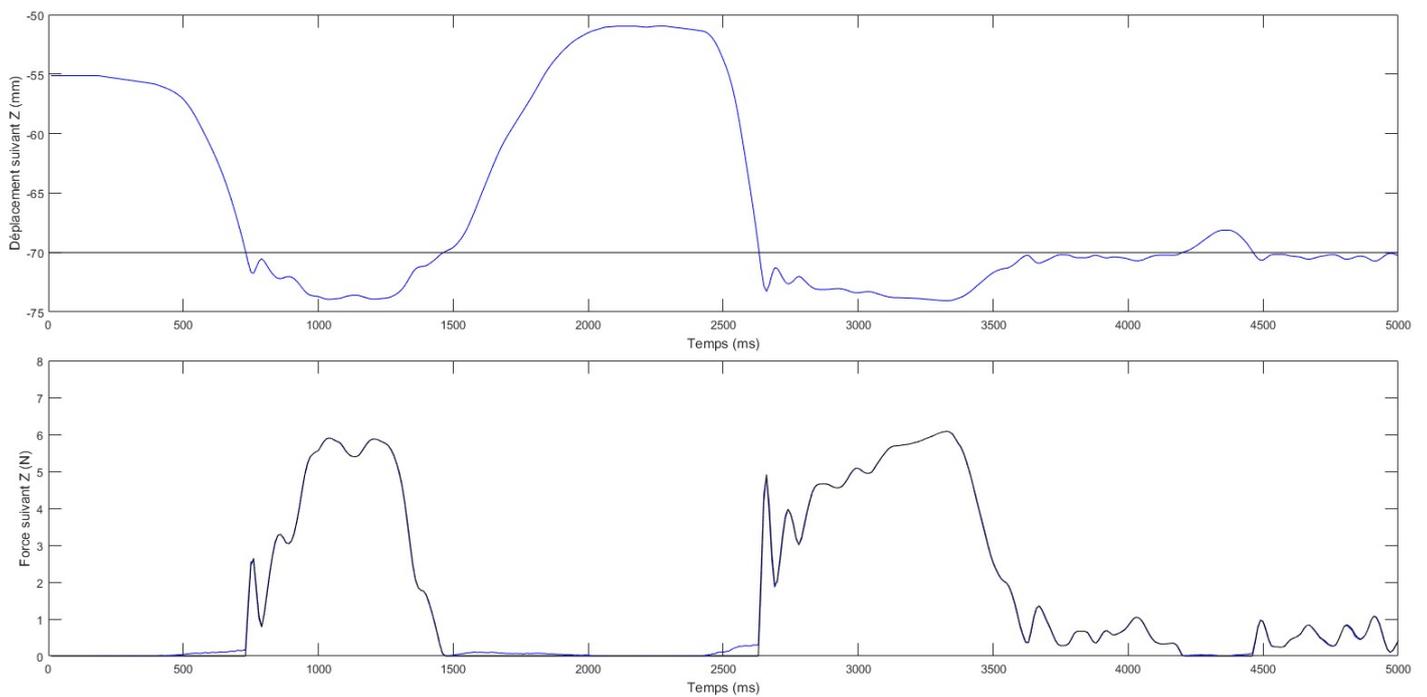


Figure 5.26 : Évolution de la position de l'effecteur et de l'effort généré lors d'un contact avec une surface virtuelle normale à l'axe Z_{0r} , le contact étant provoqué par un mouvement de flexion - extension. En haut, la position de l'effecteur en bleu et la position de la surface virtuelle en noir. En bas, l'amplitude du retour d'effort théorique en fonction du gain et du dépassement (consigne d'effort) en noir et les efforts réels (recalculés à partir de l'enregistrement des couples moteurs) en bleu.

Les conclusions de ce test sont similaires aux précédentes. Nous remarquons ici aussi une évolution de l'effort généré en fonction de l'enfoncement de l'avatar de l'effecteur dans la surface virtuelle. Entre le deuxième et le troisième contact (vers 4200 ms), nous constatons qu'un faible déplacement hors de l'objet virtuel suffit pour annuler le retour d'effort.

Ces résultats nous permettent d'attester du bon fonctionnement du retour d'effort de notre interface à la fois lors d'un mouvement d'abduction – adduction et lors d'un mouvement de flexion – extension. L'effort ainsi généré a été testé jusqu'à 6.5 N par sécurité, ce qui est supérieur au 5 N souhaités en continu.

4.6. PROPOSITION D'AMÉLIORATION DE LA LOI DE COMMANDE : AVANCE DE L'EFFECTEUR SUR LE DOIGT

Dans le modèle que nous utilisons, la phase de suivi reprend seulement quand le doigt a dépassé le centre de l'effecteur. À ce moment-là, l'effecteur est toujours immobile alors que le doigt possède déjà une vitesse non nulle. Il est donc possible que le doigt percute l'effecteur avant que ce dernier n'ait le temps de rattraper son retard.

Un autre problème est l'avance que possède le doigt sur l'effecteur lors de l'approche d'un objet virtuel. En effet, le diamètre intérieur de notre effecteur concave a été dimensionné en tenant compte des erreurs de suivi entre le doigt et le robot. Donc si le doigt se déplace avec sa dynamique maximale, il sera déjà au bord de l'effecteur lorsque ce dernier rentrera en contact avec le mur virtuel. Il y aura alors très peu de temps pour la phase de stabilisation et les deux transitions associées. Ainsi le contact se produira au mauvais instant et le ressenti ne sera pas celui souhaité.

Pour remédier à ces deux problèmes, nous proposons de prendre en compte non seulement la position du doigt mais aussi sa vitesse. Ainsi, nous pouvons calculer une position virtuelle $X_{f'}$ de ce dernier qui sera prise en compte à la place de la position réelle du doigt pour nos lois de commande. Le but est de ramener le centre de la phalange au centre de l'effecteur quelle que soit sa vitesse. En sachant que l'erreur de suivi maximale est la différence entre le rayon du doigt, R_f , et le rayon de l'effecteur, R_e , nous introduisons ce décalage modulé par le rapport entre la vitesse actuelle du doigt, \bar{V}_f , et sa vitesse maximale, $V_{f\ max}$. Pour cela, nous nous basons sur le fait que le robot possède une dynamique supérieure à celle du doigt.

$$X_{f'/0} = X_{f/0} - (R_e - R_f) \cdot \frac{\bar{V}_f}{V_{f\ max}} \quad (5.13)$$

Les avantages apportés par cette modification sont théoriquement multiples. Pendant la phase de suivi, les changements de direction du doigt peuvent être anticipés par une diminution de sa vitesse. Pour la phase d'approche, l'effecteur, étant moins en retard sur le doigt, touche plus tôt la surface de l'objet virtuel, laissant plus de temps à la stabilisation. Enfin, lors de l'éloignement de l'utilisateur par rapport à l'objet virtuel, la phase de suivi commence avant que le doigt ne dépasse le milieu de l'effecteur, si la direction et l'amplitude de son vecteur vitesse permettent de prédire un dépassement futur.

Ces avantages n'ont cependant pas pu être validés expérimentalement, cette amélioration n'ayant malheureusement pas pu être mise en place compte tenu des limites actuelles du suivi en position.

5. CONCLUSION

Notre étude s'est portée sur les différentes lois de commande à mettre en place pour le bon fonctionnement de notre interface. Nous avons pu distinguer trois phases différentes qui sont le suivi, la stabilisation et le contact, toutes ayant leurs spécificités et une boucle de commande adaptée. La première se base sur une diminution de l'erreur entre la position du centre du doigt et celle de l'effecteur, alors que pour les deux autres, l'asservissement se fera entre le bord intérieur de l'effecteur et la surface de l'objet virtuel, chacune avec des gains adaptés. Pour augmenter la stabilité de notre système, des transitions entre ces lois ont été étudiées.

Toutes ces lois de commande ont été implantées dans le contrôleur et les essais que nous avons effectués ont montré que le suivi en orientation et le retour d'effort sont fonctionnels, ce qui n'est malheureusement pas le cas du suivi en position. Les gains obtenus en restant dans un domaine stable sont trop faibles pour permettre un suivi opérationnel de la phalange distale. Ces instabilités sont très probablement dues au jeu présent dans les diverses articulations du robot et à la faible raideur apparente en flexion – extension et abduction – adduction, comme évoqué dans le Chapitre 4. Dans ces conditions, nous n'avons pas pu tester les transitions.

Comme indiqué précédemment, il faudrait pour résoudre ce problème revoir la conception et le montage de l'interface, ce qui nécessiterait du temps et des moyens conséquents dont je ne dispose pas dans le cadre de cette thèse. Ces évolutions en constituent une perspective.

CHAPITRE 6.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce manuscrit, nous nous sommes intéressés à l'étude d'une interface haptique multimodale permettant d'avoir un rendu plus réaliste du toucher en environnement virtuel. Plusieurs étapes ont été nécessaires à sa conception et à son développement.

Dans un premier temps, nous avons décrit une démarche permettant de déterminer les aspects du toucher les plus importants à restituer pour un retour haptique plus réaliste. Cette démarche repose sur la mise en place d'une taxonomie du toucher et sur sa confrontation avec l'état de l'art des interfaces existantes. Nous en avons conclu qu'il serait intéressant de développer une interface haptique couplant la restitution de l'arrivée au contact, le retour d'effort et la déformation globale et locale de la pulpe. On notera que nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux interfaces dextres permettant une interaction naturelle avec la main et les doigts. Dans ce contexte, nous avons également mené une étude sur les zones de la main à stimuler, en enrichissant les informations disponibles dans la littérature par des données directionnelles. Cette étude nous a permis de déterminer la fréquence de stimulation des différentes zones de la main en fonction de la direction des efforts appliqués. En confrontant les résultats obtenus d'une part aux interfaces dextres existantes et d'autre part aux interfaces à contacts intermittents de la littérature, nous avons décidé de nous concentrer dans le cadre de cette thèse sur les interfaces à retour d'effort à contacts intermittents en bout de doigts, et ce uniquement sur le pouce et l'index. Au-delà, il serait intéressant de développer une interface combinant les trois modalités majeures (transitions, retour d'effort et déformation de la pulpe) sur les phalanges distales des doigts (hors auriculaire) et le côté extérieur de l'index. Dans cette perspective, nous nous sommes intéressés à l'enrichissement de l'information haptique transmise à l'utilisateur, soit à l'aide d'un système déformant réellement la pulpe des doigts, soit à l'aide d'illusions haptiques.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié la réalisation d'effecteurs instrumentés permettant la mise en place de la modalité des contacts intermittents. Pour cela, nous avons d'abord analysé les différentes structures possibles pour en conclure qu'un système proche de la paume suivant les phalanges distales des doigts à l'aide d'effecteurs instrumentés était la solution la plus adaptée pour une interface dextre. Nous avons montré que neuf proximètres infrarouges disposés en deux cercles de quatre capteurs associés à un dernier capteur face au doigt étaient suffisants pour connaître la configuration de la dernière phalange d'un doigt en 6D. Puis nous avons défini la mécanique et l'électronique de l'effecteur pour accueillir ces capteurs en prenant en compte les contraintes d'encombrement, de fréquence de fonctionnement et le futur ajout de doigts supplémentaires et d'un système déformant la pulpe. Afin de caractériser ce dispositif, nous avons procédé à un ensemble de mesures sur un banc de test. Les résultats obtenus sont satisfaisants et montrent que nos effecteurs peuvent estimer correctement les mouvements du pouce et de l'index.

Dans un troisième temps, nous avons développé une interface capable de déplacer ces effecteurs en 6D et de restituer un retour d'effort en 3D. Nous avons montré qu'il est possible de décomposer l'architecture des robots allant de la paume aux phalanges distales en deux sous-ensembles : un étage de mise en position réversible pouvant générer les forces d'interaction et un étage d'orientation irréversible. Nous en avons dimensionné les actionneurs pour permettre un retour d'effort de 5N en continu et 15N en crête dans l'ensemble des directions, tout en tenant compte des raideurs simulables. L'utilisateur pouvant être gêné par le poids de notre interface, nous avons conçu un équilibreur passif permettant à la fois de compenser le poids du gant et de mesurer la position et l'orientation de la main. Sa cinématique a été étudiée pour que l'utilisateur puisse déplacer sa main en 6D.

Finalement, nous avons étudié une commande adaptée au pilotage de notre interface dextre à contacts intermittents dans ses différentes phases de fonctionnement : le suivi du doigt, l'attente au contact d'un objet virtuel et la restitution des efforts à l'utilisateur. Afin d'éviter tout problème d'instabilité dû à la transition entre deux phases, différentes solutions ont été proposées après une étude de la littérature. Elles combinent une composition de lois de commande et une modification des gains. Suite à l'implantation de ces boucles de contrôle, divers essais ont pu être effectués afin d'évaluer le fonctionnement de notre interface haptique. La mise en place du suivi en orientation a démontré la pertinence des mesures de notre effecteur et les bonnes performances du système de mise en orientation. Nous avons également pu montrer que le retour d'effort est fonctionnel. Cependant, les gains du système de mise en position sont trop faibles pour permettre d'en assurer le bon fonctionnement. Nous n'avons donc pas pu tester le fonctionnement global du système.

PERSPECTIVES À COURT TERME

Nos travaux ouvrent différentes perspectives qu'il serait intéressant d'implémenter à court terme.

Amélioration des performances : nous avons vu que la raideur de notre interface est relativement faible et qu'elle présente des jeux. Il serait intéressant de faire évoluer sa conception pour améliorer ces points. L'utilisation de câbles Dyneema de diamètre plus important pourrait permettre d'augmenter la raideur pour le second étage de réduction et la reconception des tendeurs pourrait garantir un fonctionnement sans jeu.

Ajustement des diamètres des effecteurs : le dimensionnement des diamètres de nos effecteurs a été fait à l'aide des caractéristiques d'une interface haptique type. Il serait possible, maintenant que la conception de nos effecteurs est terminée, d'identifier précisément leur dynamique pour ajuster ces dimensions. Il pourrait aussi être intéressant de mesurer précisément la vitesse de déplacement des doigts dans le cadre de manipulations fines, pour la prendre en compte lors du calcul du diamètre des effecteurs.

Couplage avec un logiciel de simulation : l'évaluation expérimentale que nous avons prévue repose sur un scénario simple. Il serait intéressant de coupler notre interface avec un logiciel de simulation (par exemple le logiciel XDE du CEA LIST) pour tester des scénarios plus complexes incluant la manipulation d'objets mobiles ou l'utilisation de mécanismes.

PERSPECTIVES À LONG TERME

On peut également envisager des évolutions de notre prototype à plus long terme.

Ajout d'une modalité supplémentaire : nous avons constaté que le ressenti de l'utilisateur peut être enrichi par une déformation locale de la pulpe. Cela pourrait lui permettre de percevoir les arêtes, les coins ou les aspérités des objets virtuels. Il serait donc intéressant de développer un système miniature, de préférence basé sur une illusion haptique pour diminuer sa complexité, pouvant être intégré dans l'espace libre de l'effecteur sous la pulpe du doigt.

Ajout d'un dispositif à contacts intermittents sur la paume : lors de l'étude sur les dispositifs à contacts intermittents, nous avons mis en avant l'avantage de supprimer les contacts résiduels. Une interface totalement déconnectée de l'utilisateur pourrait augmenter sa sensibilité. Or durant la phase de suivi, notre interface ne touche ni l'index ni le pouce, mais elle reste en contact avec la paume. Afin d'avoir une séparation totale, il faudrait implanter un système permettant de suivre la paume à distance et remplacer l'équilibreur passif par un bras motorisé. On notera que nous avons laissé un espace vide entre la base du gant et la paume de l'utilisateur en prévision de l'intégration d'un tel dispositif.

Ajout d'effecteurs pour les autres doigts : il serait également intéressant d'ajouter des robots et des effecteurs sur les autres doigts. Une interface permettant un retour d'effort sur plus de phalanges distales permettrait en effet la simulation d'un plus grand panel de prises. On notera que la contrainte que nous avons imposée sur la largeur des robots des doigts et des effecteurs devrait faciliter ce travail.

Prédiction des mouvements : contrairement au tracking d'objets quelconques, nos effecteurs suivent les phalanges distales dont les mouvements possibles sont complètement définis. Il serait donc possible de prendre en compte une prédiction des actions de l'utilisateur dans notre commande.

BIBLIOGRAPHIE DE L'AUTEUR

1. ARTICLES EN RAPPORT AVEC LA THÈSE

A. Chabrier, F. Gonzalez, F. Gosselin, W. Bachta, 'Analysis of the Directions in which Forces are Applied on the Hand During Manual Manipulation and Exploration', Proc. IEEE Int. Conf. World Haptics, Chicago, IL, USA, 22-26 juin 2015, pp. 280-285.

A. Chabrier, F. Gosselin, F. Gonzalez, W. Bachta, 'Design and experimental evaluation of an infrared instrumentation for haptic interfaces', Proc. IEEE Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf., Turin, Italie, 22-25 mai 2017, pp.727-729.

2. AUTRES ARTICLES ET BREVETS DE L'AUTEUR

F. Gosselin, D. Ponsort, A. Chabrier, 'Gant pour la manipulation virtuelle ou à distance et système de manipulation virtuelle ou à distance associé', Demande de brevet FR1558301, 8 sept. 2015.

A. Girard, M. Marchal, F. Gosselin, A. Chabrier, F. Louveau et A. Lécuyer, 'HapTip: Displaying Haptic Shear Forces at the Fingertips for Multi-Finger Interaction in Virtual Environments', Frontiers in ICT, Vol. 3, Article 6, 22 avril 2016, 15 pages.

Y. Gaffary, M. Marchal, A. Girard, M. Pellan, A. Asselin, B. Peigne, M. Emily, F. Gosselin, A. Chabrier et A. Lécuyer, 'Studying One and Two-Finger Perception of Tactile Directional Cues', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Londres, Royaume-Uni, 4-7 juillet 2016, pp. 396-405.

F. Gosselin, A. Chabrier, V. Weistroffer et A. Girard, 'Design and development of miniature wearable haptic interfaces for the fingertips', Proc. IEEE Int. Conf. Worldhaptics 2017, Munich, Allemagne, 6-9 juin 2017.

BIBLIOGRAPHIE

- [Achhammer et al. 2010] A. Achhammer, C. Weber, A. Peer et M. Buss, 'Improvement of model-mediated teleoperation using a new hybrid environment estimation technique', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Anchorage, Canada, USA, Mai 2010, pp. 5358–5362.
- [Aiple et Schiele 2013] M. Aiple et A. Schiele, 'Pushing the limits of the CyberGraspTM for haptic rendering', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, May 2013, pp. 3541–3546.
- [Akenine et al. 2008] T. Akenine-Möller, E. Haines et N. Hoffman, 'Advanced Shading', Real-Time Rendering, Third Edition, Taylor & Francis, CRC Press, 2008, Chapter 7, pp. 201–283.
- [Ambrosi et al. 1999] G. Ambrosi, A. Bicchi, D. De Rossi et E.P Scilingo, 'The role of contact area spread rate in haptic discrimination of softness', Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, Detroit, USA, May 1999, pp. 305-310.
- [Benali-Khoudja et al. 2007] M. Benali-Khoudja, M. Hafez et A. Kheddar, 'VITAL: An electromagnetic integrated tactile display', Displays, Vol. 28, No. 3, July 2007, pp. 133-144.
- [Biet 2007] M. Biet, 'Conception et contrôle d'actionneurs électro-actifs dédiés à la stimulation tactile', thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Déc. 2007, 200 pages.
- [Bordegoni et al. 2010] M. Bordegoni, U. Cugini, M. Covarrubias et M. Antolini, 'A force and touch sensitive self-deformable haptic strip for exploration and deformation of digital surfaces', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Amsterdam, Nederland, July 2010, pp. 65–72.
- [Bouzit et al. 2002] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu et R. Boian, 'The Rutgers Master 2 – new design force-feedback glove', IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 7, No. 2, June 2002, pp. 256–263.
- [Bresciani et al. 2008] J.P. Bresciani, K. Drewing et M.O. Ernst, 'Human haptic perception and the design of haptic enhanced virtual environments', The Sense of Touch and Its Rendering, A. Bicchi et al. eds, Springer, 2008, pp. 61-106.
- [Brooks 1990] T.L. Brooks, 'Telerobotic response requirements', Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Los Angeles, California, August 1990, pp. 113–120.
- [Cai et al. 2010] V.A.D. Cai, B. Bru, P. Bidaud, V. Hayward, V. Pasqui et F. Gosselin, 'Experimental evaluation of a goniometer for the identification of anatomical joint motions', Proc. 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Nagoya, Japan, Aug.-Sept 2010, pp. 1255-1262.
- [Chabrier et al. 2015] A. Chabrier, F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachtá, 'Analysis of the directions in which forces are applied on the hand during manual manipulation and exploration', Proc. IEEE World Haptics Conference, Evanston, Illinois, USA, June 2015, pp. 280-285.
- [Chen 1999] E. Chen., 'Six Degree-of-Freedom Haptic System For Desktop Virtual Prototyping Applications', Proc. Int. Conf. Laval Virtual, Laval, France, Juin 1999, 10p.

-
- [Chernov et Lesort 2005] N. Chernov et C. Lesort, 'Least square fitting of circles', Springer Journal of Mathematical Imaging and Vision, Vol. 23, No. 3, Nov. 2005, pp. 239–252.
- [Chinello et al. 2015] F. Chinello, M. Malvezzi, C. Pacchierotti et D. Prattichizzo, 'Design and development of a 3RRS wearable fingertip cutaneous device', Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Busan, Korea, July 2015, pp. 293-298.
- [Cutkosky 1989] M.R. Cutkosky, 'On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks', IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3, 1989, pp. 269-279.
- [Declerck et Lenay 2010] G. Declerck et C. Lenay, 'La fonction de la résistance dans le contrôle haptique du déplacement. Étude sur une tâche de suivi de contour avec rétine tactile artificielle', Revue des Interactions Humaines Médiatisées, Vol. 11, No. 2, 2010, pp. 29-56.
- [Demers et al. 1998] J.-G. Demers, J. Boelen et I. Sinclair, 'Freedom 6S Force Feedback Hand Controller', Proc. 1st IFAC Workshop on Space Robotics, Montreal, Canada, Oct. 1998, 6p.
- [Dexta Robotics 2016] Dexmo, <http://www.dextarobotics.com/>, 2016.
- [Dostmohamed et Hayward 2005] H. Dostmohamed et V. Hayward, 'Contact Location Trajectory on the Fingertip as a Sufficient Requisite for Illusory Perception of Haptic Shape and Effect of Multiple Contacts', Multi-Point Interaction with Real and Virtual Objects, Springer, Oct. 2005, Chap. 12, pp. 189-198.
- [Dun et al. 2007] S. Dun, G.S. Fleisig, J. Loftice, D. Kingsley et J.R. Andrews, 'The relationship between age and baseball pitching kinematics in professional baseball pitchers', Journal of Biomechanics, Vol. 40, No. 2, Feb. 2007, pp. 265–270.
- [Elgendi et al. 2012] M. Elgendi, F. Picon et N. Magnenat-Thalmann, 'Real-time speed detection of hand gesture using Kinect', Proc. Int. Conf. on Computer Animation and Social Agents, Workshop on Autonomous Social Robots and Virtual Humans, Singapore, May 2012.
- [Endo et al. 2011] T. Endo, H. Kawasaki, T. Mouri, Y. Ishigure, H. Shimomura, M. Matsumura et K. Koketsu, 'Five-fingered haptic interface robot: Hiro III', IEEE Trans. on Haptics, Vol. 4, No. 1, Jan.-March 2011, pp. 14–27.
- [Fang et al. 2009] H. Fang, Z. Xie et H. Liu, 'An exoskeleton master hand for controlling DLR/HIT hand', Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, USA, Oct. 2009, pp. 3703–3708.
- [Feix et al. 2009] T. Feix, R. Pawlik, H.B. Schmiebmayer, J. Romero et D. Kragic, 'A comprehensive grasp taxonomy', Proc. Robotics, Science and Systems Conf.: Workshop Understanding Human Hand for Advancing Robotic Manipulation, Seattle, USA, June-July 2009, pp. 2-3.
- [FESTO 2014] ExoHand – human-machine interaction, <http://www.festo.com/>, 2014.
- [Fitzgibbon et al. 1999] A. Fitzgibbon, M. Pilu et R.B. Fisher, 'Direct least square fitting of ellipses', IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No.5, Mai 1999, pp. 476–480.
- [Fontana et al. 2009] M. Fontana, A. Dettori, F. Salsedo et M. Bergamasco, 'Mechanical design of a novel hand exoskeleton for accurate force displaying', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, May 2009, pp. 1704–1708.

-
- [Foumashi et al. 2011] M.M. Foumashi, M. Troncossi et V. Parenti Castelli, 'State-of-the-Art of Hand Exoskeleton Systems', Rapport Interne, Université de Bologne, 2011, 54p.
- [Frisoli et al. 2007] A. Frisoli, F. Simoncini; M. Bergamasco et F. Salsedo, 'Kinematic design of a two contact points haptic interface for the thumb and index fingers of the hand', ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 129, No. 5, May 2007, pp. 520–529.
- [Frisoli et al. 2008] A. Frisoli, M. Solazzi, F. Salsedo et M. Bergamasco, 'A fingertip haptic display for improving curvature discrimination', Presence, Vol. 17, No. 6, Dec. 2008, pp. 550-561.
- [Gallo et al. 2012] S. Gallo, L. Santos-Carreras, G. Rognini, M. Hara, A. Yamamoto, T. Higuchi et H. Bleuler, 'Towards multimodal Haptics for teleoperation: Design of a Tactile Thermal Display', Proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, Sarajavo, Bosnia and Herzegovina, March 2012, 5p.
- [Garcia-Hernandez et al. 2011] N. Garcia-Hernandez, N. G. Tsagarakis et D. G. Caldwell, 'Feeling through Tactile Displays: A Study on the Effect of the Array Density and Size on the Discrimination of Tactile Patterns', IEEE Trans. on Haptics, Vol. 4, No. 2, April-June 2011, pp. 100-110.
- [Giachristis et al. 2009] C. Giachristis, J. Barrio, M. Ferre, A. Wing et J. Ortego, 'Evaluation of weight perception during unimanual and bimanual manipulation of virtual objects', Proc. IEEE Int. Conf. World Haptics, Salt Lake City, USA, March 2009, pp. 629–634.
- [Girard et al. 2016] A. Girard, M. Marchal, F. Gosselin, A. Chabrier, F. Louveau et A. Lecuyer, 'HapTip: Displaying Haptic Shear Forces at the Fingertips for Multi-Finger Interaction in Virtual Environments', Frontiers in ICT, Vol. 3, Article 6, 22 avril 2016, 15 pages.
- [Gonzalez 2015] F. Gonzalez, 'Contribution au développement d'une interface haptique à contacts intermittents', Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Avril 2015, 162p.
- [Gonzalez et al. 2013] F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachtá, 'A framework for the classification of dexterous haptic interfaces based on the identification of the most frequently used hand contact areas', Proc. IEEE World Haptics Conference, Daejeon, Korea, April 2013, pp. 461-466.
- [Gonzalez et al. 2014] F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachtá, 'Analysis of hand contact areas and interaction capabilities during manipulation and exploration', IEEE Transactions on Haptics, Vol. 7, No. 4, Oct.-Dec. 2014, pp. 415-429.
- [Gonzalez et al. 2015] F. Gonzalez, F. Gosselin et W. Bachtá, 'A 2D Infrared Instrumentation for Close-Range Finger Position Sensing', IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 64, No. 10, Oct. 2015, pp. 2708-2719.
- [Gosselin 2000] F. Gosselin, 'Développements d'outils d'aide à la conception d'organes de commande pour la téléopération à retour d'effort', Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, Juin 2000, 360 p.
- [Gosselin 2004] F. Gosselin, 'IKD H3DI detailed technical report', Rapport technique interne CEA LIST, réf. DTSI/SCRI/LPR/04RT.036, Oct. 2004, Annex 1 : 'Hand dimensions', pp. 46-52.
- [Gosselin 2009] F. Gosselin, 'Mise à jour du dimensionnement préliminaire du Virtuose 6D médical Evolution II', note technique DTSI/SRCI/09.114, 27 mars 2009, 18p.

-
- [Gosselin 2011] F. Gosselin, 'Caractérisation du câble Berkley Whiplash Pro 0.28mm', note technique DIASI/11-031, 2011, 20p.
- [Gosselin 2012] F. Gosselin, 'Guidelines for the design of multi-finger haptic interfaces for the hand', Proc. 19th CISM-IFTOMM RoManSy Symposium, Paris, France, June 2012, pp. 167-174.
- [Gosselin et al. 2005] F. Gosselin, C. Bidard et J. Brisset, 'Design of a high fidelity haptic device for telesurgery', Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation, 2005, pp. 205–210.
- [Gosselin et al. 2005b] F. Gosselin, T. Jouan, J. Brisset et C. Andriot, 'Design of a wearable haptic interface for precise finger interactions in large virtual environments', Proc. IEEE Worldhaptics, Pisa, Italy, March 2005, pp 202-207.
- [Gosselin et al. 2017] F. Gosselin, A. Chabrier, V. Weistroffer et A. Girard, 'Design and development of miniature wearable haptic interfaces for the fingertips', Proc. Worldhaptics 2017, 6-9 June 2017, Munich, Germany (to appear).
- [Gosselin et Riwan 2001] F. Gosselin et A. Riwan, 'Design of VIRTUOSE 3D : a new haptic interface for teleoperation and virtual reality', Proc. Int. Conf. on Advanced Robotics, Budapest, Hungary, Aug. 2001, pp. 205-212.
- [Grange et al. 2001] S. Grange, F. Conti, P. Rouiller, P. Helmer et C. Baur, 'Overview of the Delta Haptic Device', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Birmingham, UK, July 2001, pp. 164-166.
- [Greibenstein et al. 2012] M. Grebenstein, M. Chalon, W. Friedl, S. Haddadin, T. Wimböck, G. Hirzinger et R. Siegwart, 'The hand of the DLR Hand Arm System: Designed for interaction', International Journal of Robotics Research, Vol. 31, No. 13, Nov. 2012, pp. 1531–1555.
- [Gu et al. 2016] X. Gu, Y. Zhang, W. Sun, Y. Bian, D. Zhou et P. O. Kristensson, 'Dexmo: An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR', Proc. ACM Conf. on Human-Computer Interaction, San Jose, USA, May 2016, pp. 1991-1995.
- [Happich 2016] J. Happich, 'Feeling virtual objects at your fingertips', Electronic Eng. Times Europe, July-Aug. 2016, pp. 24-25.
- [Haptex 2005] HAPTEX, HAPtic sensing of virtual TEXTiles, 'Specifications of the whole haptic interface', Livrable D4.1, Janv. 2005, 98 pages.
- [Hayward 2004] V. Hayward, 'Display of haptic shape at different scales', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Munich, Germany, June 2004, pp. 20-27.
- [Hayward 2008] V. Hayward, 'A brief taxonomy of tactile illusions and demonstrations that can be done in a hardware store', Brain Research Bulletin, Vol. 75, No. 6, April 2008, pp 742-752.
- [Hayward et al. 1994] V. Hayward, J. Choksi, G. Lanvin et C. Ramstein, 'Design And MultiObjective Optimization Of A Linkage For A Haptic Interface', Advances in Robot Kinematics, J. Lenarcic and B. Ravani Eds., Kluwer Academic, pp. 352-359.
- [Hayward et MacLean 2007] V. Hayward et K.E. MacLean, 'Do it yourself haptics: part I', IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 14, No. 4, Dec. 2007, pp. 88-104.

-
- [Heo et al. 2012] P. Heo, G. Min Gu, S.J. Lee, K. Rhee et J. Kim, 'Current Hand Exoskeleton Technologies for Rehabilitation and Assistive Engineering', *Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 5, May 2012, pp.807-824.
- [Hirashima et al. 2008] M. Hirashima, K. Yamane, Y. Nakamura et T. Ohtsuki, 'Kinematic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis', *Journal of Biomechanics*, Vol. 41, No. 13, Sept. 2008, pp. 2874–2883.
- [Hirota et Hirose 1995] K. Hirota et M. Hirose, 'Simulation and presentation of curved surface in virtual reality environment through surface display', *Proc. Virtual Reality Annual Int. Symp.*, Research Triangle Park, North Carolina, USA, March 1995, pp. 211–216.
- [INRS] INRS, ED79 - Conception et aménagement des postes de travail
- [ISO 14738] NF EN ISO 14738 - Sécurité des machines - Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines, Nov. 2008
- [Jacquelin 2007] J. Jacquelin, 'Régression circulaire', *Quadrature* n°63, janvier 2007, pp.33-40.
- [Jami 1992] L. Jami, 'Golgi tendon organs in mammalian skeletal muscle: functional properties and central actions', *Physiological Reviews*, Vol. 72, No. 3, 1992, pp. 623-666.
- [Jansen et al. 2013] S. Jansen, W. Bergmann Tiest et A. Kappers, 'Identifying Haptic Exploratory Procedures by Analyzing Hand Dynamics and Contact Force', *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 4, Oct.-Dec. 2013, pp. 464-472.
- [Johansson et Vallbo 1993] R.S. Johansson et A.B. Vallbo, 'Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand', *Trends in Neuroscience*, Vol. 6, No. 1, 1993, pp. 27-32.
- [Johnson 2001] K.O. Johnson, 'The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors', *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 11, No. 4, 2001, pp.455-461.
- [Johnson et Hsiao 1992] K.O. Johnson et S.S. Hsiao, 'Neural mechanisms of tactual form and texture perception', *Annual Review of Neuroscience*, Vol. 15, No. 1, 1992, pp. 227-250.
- [Jones 1997] L. Jones, 'Dextrous hands: human, prosthetic, and robotic', *Presence*, Vol. 6, No. 1, Feb. 1997, pp. 29–56.
- [Jones et Lederman 2006] L. Jones et S. Lederman, 'Human Hand Function', Oxford University Press, 2006, 280p.
- [Jubien 2014] A. Jubien, 'Identification dynamique des robots à flexibilités articulaires', thèse de doctorat de l'Université de Nantes, 14 Nov. 2014, 215 pages.
- [Konyo et al. 2008] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto et S. Tadokoro, 'Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force', *Proc. Int. Conf. Eurohaptics*, Madrid, Spain, June 2008, pp. 619-629.
- [Kuchenbecker et al. 2008] K. J. Kuchenbecker, D. Ferguson, M. Kutzer, M. Moses et A. M. Okamura, 'The touch thimble: providing fingertip contact feedback during point-force haptic interaction', *Proc. IEEE*

Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, Reno, Nevada, USA, March 2008, pp. 239–246.

- [Kyung et al. 2006] K.-U. Kyung, S.-C. Kim, D.-S. Kwon et M.A. Srinivasan, 'Texture Display Mouse KAT: Vibrotactile Pattern and Roughness Display', Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct. 2006, pp. 478-483.
- [Lelieveld et al. 2006] M.J. Lelieveld, T. Maeno et T. Tomiyama, 'Design and development of two concepts for a 4 DOF portable haptic interface with active and passive multi-point force feedback for the index finger', Proc. ASME Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conf., Philadelphia, Pennsylvania, USA, Sept. 2006, pp. 547-556.
- [Lévesque et al. 2007] V. Lévesque, J. Pasquero et V. Hayward, 'Braille display by lateral skin deformation with the STReSS2 tactile transducer', Proc. IEEE Worldhaptics, Tsukuba, Japan, March 2007, pp. 115-120.
- [Liu et al. 2014] L. Liu, S. Miyake, N. Maruyama, K. Akahane et M. Sato, 'Development of Two-handed multi-finger haptic interface SPIDAR-10', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Versailles, France, July 2014, pp. 176–183.
- [Loos & Co.] Loos & Co. Inc., Encyclopedia of: wire, wire rope, cable, hardware, fittings, tools, assemblies and more, 68p.
- [Markovsky et Van Huffel 2007] I. Markovsky et S. Van Huffel, 'Overview of total least squares methods', Signal Processing, Vol. 87, No. 10, Oct. 2007, pp. 2283–2302.
- [Martinot et al. 2005] F. Martinot, P. Plénacoste et C. Chaillou, 'Stimulateurs tactiles : de l'analyse au design', 12èmes journées du Groupe de Travail Animation et Simulation, Lille, France, 31 mai-1er juin 2005.
- [Maschmeyer et Cameron 2012] R. Maschmeyer et G. Cameron, 'Methods and systems for providing haptic control', Demande de brevet US2012/010533, May 2012.
- [Massie et Salisbury 1994] T.H. Massie et J.K. Salisbury, 'The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects', Proc. ASME Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, Illinois, Nov. 1994.
- [Monroy et al. 2008] M. Monroy, M. Oyarzabal, M. Ferre, A. Campos et J. Barrio, 'MasterFinger: multi-finger haptic interface for collaborative environments', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Madrid, Spain, June 2008, pp. 411–419.
- [Nakagawara et al. 2005] S. Nakagawara, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi et I. Kawabuchi, 'An encounter-type multi-fingered master hand using circuitous joints', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Avril 2005, pp. 2667–2672.
- [Nakatani et al. 2006] M. Nakatani, R. D. Howe et S. Tachi, 'The Fishbone Tactile Illusion', Proc. Int. Conf. EuroHaptics, Paris, France, July 2006, pp. 69-73.

-
- [Nakatani et al. 2008] M. Nakatani, A. Sato, S. Tachi et V. Hayward, 'Tactile Illusion Caused by Tangential Skin Strain and Analysis In Terms of Skin Deformation', Proc. Int. Conf. EuroHaptics, Madrid, Spain, June 2008, pp. 229-237.
- [Nishino et al. 1997] Y. Nishino, Y. Kunii et H. Hashimono, '20 DOF haptic device for the interaction with virtual environments', Proc. Int. Conf. on Artificial Reality and Telexistence, Tokyo, Japan, 1997, pp. 85-92.
- [Niwa et al. 2006] M. Niwa, H. Nowa, Y. Yanagida, K. Hosaka et R.W. Lindeman, 'Controlling the perceived vibrational frequency and amplitude of a voice coil type tactor', Proc. Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems, Alexandria, USA, March 2006, pp. 55-56.
- [Novotny et Ferrier 1999] P.M. Novotny et N.J. Ferrier, 'Using Infrared Sensors and the Phong illumination model to measure distances', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, Mai 1999, pp. 1644-1649.
- [Pasquero et Hayward 2003] J. Pasquero et V. Hayward, 'STReSS: A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate', Proc. Int. Conf. Eurohaptics, Dublin, Ireland, July 2003, pp. 94-110.
- [Plumet et al. 1995] F. Plumet, G. Morel et P. Bidaud, 'Shall we use a dynamic model to control the motions of industrial manipulators ?', Proc. of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milano, Italy, Aug.-Sept. 1995, pp. 235-240.
- [Prattichizzo et al. 2013] D. Prattichizzo, F. Chinello, C. Pacchierotti et M. Malvezzi, 'Towards wearability in fingertip haptics: a 3-DoF wearable device for cutaneous force feedback', IEEE Trans. on Haptics, Vol. 6, No. 4, Oct.-Dec. 2013, pp. 506-516.
- [Provancher et al. 2005] W. Provancher, M. Cutkosky, K. J. Kuchenbecker et G. Niemeyer, 'Contact Location Display for Haptic Perception of Curvature and Object Motion', The International Journal of Robotics Research, Vol. 24, No. 9, Sept. 2005, p. 691-702.
- [Ramstein et Hayward 1994] C. Ramstein et V. Hayward, 'The PANTOGRAPH: a large workspace haptic device for a multi-modal human-computer interaction', Proc. ACM CHI, Boston, Massachusetts, USA, April 1994, pp. 57-58.
- [Samur 2012] E. Samur, 'Performance Metrics for Haptic Interfaces', Springer-Verlag, London, 2012, 130p.
- [Sarakoglou et al. 2012] I. Sarakoglou, N. Garcia-Hernandez, N. G. Tsagarakis et D. G. Caldwell, 'A High Performance Tactile Feedback Display and Its Integration in Teleoperation', IEEE Trans. on Haptics, Vol. 5, No. 3, July-Sept. 2012, pp. 252-263.
- [Sato 2002] M. Sato, 'SPIDAR and virtual reality', Proc. 5th Biannual World Automation Congress, Orlando, Florida, USA, June 2002, pp. 17-23.
- [Sato et al. 2007] K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami et S. Tachi, 'Haptic telexistence', Proc. ACM SIGGRAPH, San Diego, California, USA, Aug. 2007.
- [Scilingo et al. 2007] E.P. Scilingo, N. Sgambelluri, G. Tonietti et A. Bicchi, 'Integrating two haptic devices for performance enhancement', Proc. IEEE World Haptics, Tsukuba, Japan, Mars 2007, pp. 139-144.

-
- [Silva et al. 2009] A.J. Silva, O.A.D. Ramirez, V.P. Vega et J.P.O. Oliver, 'Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability', Proc. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conf., Cuernavaca, Morelos, Mexico, Sept. 2009, pp. 193-198
- [Solazzi et al. 2007] M. Solazzi, A. Frisoli, F. Salsedo et M. Bergamasco, 'A fingertip haptic display for improving local perception of shape cues', Proc. IEEE Int. Conf. World Haptics, Tsukuba, Japan, March 2007, pp. 409-414.
- [Solazzi et al. 2010] M. Solazzi, A. Frisoli et M. Bergamasco, 'Design of a novel finger haptic interface for contact and orientation display', Proc. IEEE Haptics symposium, Waltham, Massachusetts, USA, March 2010, pp. 129-132.
- [Song et al. 2008] A. Song, J. Liu et J. Wu, 'Softness Haptic Display Device for HumanComputer Interaction', Human Computer Interaction, I. Pavlidis Ed., Intech, Oct. 2008, pp. 257-278.
- [Tachi et al. 1994] S. Tachi, T. Maeda, R. Hirata et H. Hoshino, 'A construction method of virtual haptic space, Proc. Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence, Tokyo, Japan, July 1994, pp. 131-138.
- [Tan et al. 1994] H.Z. Tan, M.A. Srinivasan, B. Eberman et B. Cheng, 'Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces', Dynamic Systems and Control, Vol. 55, No. 1, 1994, pp. 353-359.
- [Tsetserukou et al. 2014] D. Tsetserukou, S. Hosokawa et K. Terashima, 'LinkTouch: a Wearable Haptic Device with Five-Bar Linkage Mechanism for Presentation of Two-DOF Force Feedback at the Fingertip', Proc. IEEE Haptics Symposium, Houston, Texas, USA, Feb. 2014, pp. 307-312.
- [Turki et Coiffet 1995] L. Turki et P. Coiffet, 'Dextrous telemanipulation with force feedback in virtual reality', Proc. VRST, Chiba, Japan, Nov. 1995, pp. 193-202.
- [Vallbo et Johansson 1984] A.B. Vallbo et R.S. Johansson, 'Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand', Human Neurobiology, Vol. 3, No. 1, 1984, pp. 3-14.
- [Vertut et al. 1977] J. Vertut, J. Charles, P. Coiffet et M. Petit, 'Advance of the new MA 23 force reflecting manipulator system', Proc. CISM/IFTOMM Int. Symp. on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, Warsaw, Poland, Sept. 1977, pp. 307-322.
- [Walairacht et al. 2002] S. Walairacht, K. Yamada, S. Hasegawa, Y. Koike et M. Sato, '4+4 Fingers Manipulating Virtual Objects in Mixed Reality Environment', Presence, Vol. 11, No. 2, April 2002, pp. 134-143.
- [Wang et Hayward 2005] Q. Wang et V. Hayward, 'Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation', Proc. Symp. on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems, March 2005, pp. 67-72.
- [Watanabe et Fukui 1995] T. Watanabe et S. Fukui, 'A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, May 1995, pp. 1134-1139.
- [Yang et al. 2005] G.H. Yang, K.U. Kyung, Y.J. Jeong et D.S. Kwon, 'Novel haptic mouse system for holistic haptic display and potential of vibrotactile stimulation', Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alberta, Canada, Aug. 2005, pp. 1109-1114.

-
- [Yang et al. 2007] G.H. Yang, T.H. Yang, S.C. Kim, D.S. Kwon et S.C. Kang, 'Compact tactile display for fingertips with multiple vibrotactile actuator and thermoelectric module', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Roma, Italy; April 2007, pp. 491-496.
- [Yao et al. 2005] H.-Y. Yao, V. Hayward et R.E. Ellis, 'A tactile enhancement instrument for minimally invasive surgery', Computer Aided Surgery, Vol. 10, No. 4, July 2005, pp. 233-239.
- [Ying et al. 2012] M. Ying, A.P. Bonifas, N. Lu, Y. Su, R. Li, H. Cheng et J.A. Rogers, 'Silicon nanomembranes for fingertip electronics', Nanotechnology, Vol. 23, No. 34, Aug. 2012, Paper 344004, 7p.
- [Yoshikawa et Nagura 1997] T. Yoshikawa et A. Nagura, 'A touch and force display system for haptic interface', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, Avril 1997, pp. 3018–3024.
- [Yoshikawa et Nagura 1999] T. Yoshikawa et A. Nagura, 'A three-dimensional touch/force display system for haptic interface', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, Mai 1999, pp. 2943–2951.
- [Zaremski et Krabak 2012] J.L. Zaremski et B.J. Krabak, 'Shoulder injuries in the skeletally immature baseball pitcher and recommendations for the prevention of injury', Journal of the American Academy of Physical Medicine and Rehabilitation, Vol. 4, No. 7, July 2012, pp. 509–516.
- [Zheng et al. 2011] J. Zheng, S. De La Rosa et A. Dollar, 'An investigation of grasp type and frequency in daily household and machine shop tasks', Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, May 2011, pp. 4169–4175.