



**Développement d'un mécanisme parallèle entraîné
par câbles utilisé comme interface à retour haptique
visant la réadaptation physique en environnement
immersif**

Thèse

Alexis Fortin-Côté

Doctorat en génie mécanique
Philosophiæ doctor (Ph. D.)

Québec, Canada

© Alexis Fortin-Côté, 2017

**Développement d'un mécanisme parallèle entraîné
par câbles utilisé comme interface à retour haptique
visant la réadaptation physique en environnement
immersif**

Thèse

Alexis Fortin-Côté

Sous la direction de:

Philippe Cardou, directeur de recherche
Clément Gosselin, codirecteur de recherche

Résumé

Les robots parallèles à câbles sont de plus en plus utilisés et étudiés, particulièrement dans le domaine de la recherche. Une des applications d'intérêts est leur usage en tant qu'interface haptique. Leur grand espace de travail et leur faible inertie en font de bons candidats pour en faire des interfaces de taille humaine. Une des applications intéressantes serait d'utiliser ce type d'interfaces dans le domaine de la santé, plus spécifiquement en réadaptation physique. Comme ces interfaces sont capables de reproduire des efforts à l'utilisateur, celles-ci peuvent être utilisées pour faire travailler les muscles. C'est dans cette optique que les recherches rapportées dans cette thèse ont été accomplies. Cette thèse présente donc premièrement des avancées plus générales aux mécanismes parallèles à câbles permettant leur utilisation en tant qu'interface haptique, pour ensuite se spécialiser dans la création d'un prototype d'interface haptique entraîné par câble combiné à un retour visuel immersif comme un casque de réalité virtuelle par exemple. La thèse se termine avec l'évaluation préliminaire du prototype développé qui est installé dans un centre de recherche en réadaptation physique et qui, dans un avenir rapproché, pourra servir à l'avancement de la recherche dans le domaine de la réadaptation physique.

Abstract

Cable driven parallel robots are studied and used more every day, especially in the research community. One interesting application is their use as haptic interfaces. Their big workspace and relatively low inertia makes them great candidates for human scale interfaces. One application of haptic interfaces of this scale is in health and physical readaptation. Since those interfaces are able to render forces, they can be used to train or evaluate physical capabilities. Research presented in this thesis aims at furthering knowledge in this domain. Some more general advances needed to make cable driven parallel mechanisms suitable haptic interfaces are presented first and then more specific developments toward the creation of a prototype haptic interface combined with a visual feedback are presented. The thesis ends with preliminary studies on the developed prototype installed in a research facility on physical readaptation.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des vidéos	xiv
Remerciements	xviii
1 Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 Méthodologie	2
1.3 Revue de la littérature disponible sur les robots à câbles, leurs utilisations en haptique et en réadaptation physique	3
1.4 Réalité virtuelle, augmentée et retour haptique	11
1.5 Considération de bases pour les mécanismes à câbles	12
2 Étalonnage de mécanismes à câbles	22
2.1 Paramètres du modèle à identifier	23
2.2 Revue de littérature	25
2.3 Identification des positions des points d’ancrage	27
2.4 Identification de la longueur initiale des câbles	30
2.5 Identification complète	51
2.6 Conclusion : choix de la méthode d’étalonnage	57
3 Précision des mécanismes à câbles augmentés d’un capteur d’angle	59
3.1 Revue de littérature	60
3.2 Présentation du capteur d’angles utilisé	61
3.3 Cinématique reliant les mesures à la pose	62
3.4 Fusion de données	65
3.5 Simulation	66
3.6 Expérimentation	68
3.7 Conclusion	75

4	Gestion des tensions dans les câbles hors de l'espace de travail	76
4.1	Revue de littérature	77
4.2	Problème de la distribution des tensions	79
4.3	Solution proposée	80
4.4	Simulations hors-ligne	82
4.5	Mise en œuvre temps réel	84
4.6	Conclusion	88
5	Contrôle de l'interface haptique	89
5.1	Revue de littérature et choix du type de commande	90
5.2	Composantes de l'interface haptique	93
5.3	Schéma de commande	94
5.4	Environnement virtuel	99
5.5	Conclusion	100
6	Preuve de concept à 6 degrés de liberté en environnement immersif	101
6.1	Cahier des charges	102
6.2	Conception générale	102
6.3	Conception de l'architecture du robot à câbles	104
6.4	Conception de l'organe effecteur terminal	109
6.5	Prototype	113
6.6	Caractérisation des performances	114
6.7	Intégration du système à retour visuel	127
6.8	Conclusion	129
7	Mécanisme 6 ddl à grand débattement selon un axe de rotation	130
7.1	Cahier des charges	130
7.2	Revue de littérature	131
7.3	Concepts initiaux	131
7.4	Conclusion	137
8	Mécanismes à câbles en haptique pour la réadaptation	138
8.1	Cahier des charges	138
8.2	Développement de la tâche	139
8.3	Ajustement de l'architecture	139
8.4	Système complet	141
8.5	Étalonnage entre le mécanisme à câbles, l'environnement virtuel et le suivi	143
8.6	Essais préliminaires	145
8.7	Conclusion	149
	Conclusion	150
	A Code de vérification des simplifications	153
	B Calibration mécanisme CIRRIIS	155
	C Plan de l'organe effecteur terminal	157
	D Plan du mécanisme à grand débattement	159

Liste des tableaux

1.1	Manipulateurs sériels entraînés par câbles.	5
1.2	Manipulateurs suspendus entraînés par câbles.	5
1.3	Manipulateurs pleinement contraints entraînés par câbles.	7
1.4	Mécanisme à câbles en haptique.	8
1.5	Mécanisme à câbles en réadaptation.	9
2.1	Paramètres à identifier pour le modèle géométrique.	23
2.2	Vecteur des positions des points d’ancrage fixes A_i en mètre.	33
2.3	Vecteur des positions des points d’ancrage sur l’organe effecteur R_i en mètre.	34
3.1	Erreurs observées entre le système de vision et les différentes méthodes d’esti- mation de la pose	72
3.2	Erreurs observées entre le système de vision et les différentes méthodes d’esti- mation de la pose suite au post-traitement.	73
4.1	Comparatif des différents algorithmes existants	78
6.1	Un extrait du livre <i>Performance Metrics for Haptic Interfaces</i> (131) présen- tant les données des manufacturiers concernant les spécifications des interfaces haptiques commerciales	115
6.2	Caractéristiques de l’interface haptique présentée dans ce chapitre	127

Liste des figures

1.1	Mécanisme parallèle de type Gough-Stewart. ©User :Pantoine/Wikimedia-Commons/CC-BY-SA-3.0	4
1.2	Exemple de réalité augmentée. Traduction en temps réel de vidéo capturé par un téléphone.	12
1.3	Interfaces à retour haptique commerciales.	12
1.4	Chaîne cinématique simple montrant l'architecture d'un robot à câbles.	13
1.5	Schéma d'un câble suspendu sous l'effet de son propre poids.	14
1.6	Modèle géométrique d'un mécanisme à câbles générique.	16
1.7	Représentation géométrique du concept de l'espace de travail faisable (WFW).	20
2.1	Modèle géométrique d'un mécanisme sur actionné. Les arcs de cercle marquent la longueur commandée pour chacun des câbles. Les arcs en rouge présentent une sous-évaluation de la longueur du câble alors que les bleus représentent une surévaluation de la longueur des câbles.	25
2.2	Exemple d'intersection pour trouver la position d'un point d'ancrage, comme présenté par Sandretto et coll. (35).	26
2.3	Schéma pour l'étalonnage des points d'ancrage A_i	29
2.4	Schéma du mécanisme à câble simulé.	34
2.5	Exemple d'une trajectoire simulée. Les points bleus représentent les points d'ancrage à la structure fixe.	35
2.6	Erreur quadratique moyenne sur la position de l'organe effecteur terminal en fonction du nombre de mesures prises n	36
2.7	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction du nombre de mesures prises n	36
2.8	Temps de calcul en fonction du nombre de mesures prises m	37
2.9	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimé initial.	38
2.10	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale. La qualité de l'estimation initiale est mesurée en fonction de la différence d'angle entre l'estimation et la valeur vraie.	38
2.11	Trajectoire effectuée pour l'étalonnage du mécanisme réel. Les points d'ancrage fixes du mécanisme sont également tracés comme des cercles bleus. Ils forment une géométrie qui s'apparente à un prisme rectangulaire.	39

2.12	Longueur initiale trouvée pour chacun des six câbles. Chaque point correspond aux longueurs trouvées avec chacune des 6 combinaisons de points de mesures utilisés. La longueur mesurée a été prise à l'aide d'un ruban à mesurer directement sur le montage. Les longueurs initiales correspondent à l'estimation disponible avant le calcul.	40
2.13	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la combinaison de points choisie.	40
2.14	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale.	41
2.15	Progression des estimations des longueurs initiales des câbles en fonction du nombre de points acquis. Les lignes pointillées représentent les estimations initiales et la ligne pleine, la longueur réelle.	49
2.16	Progression de l'estimation de la pose en fonction du nombre de points acquis .	49
2.17	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale.	50
2.18	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale. Cette qualité est dégradée progressivement en décalant l'orientation par rapport à l'axe des x de l'angle indiqué sur l'abscisse.	51
2.19	Progression de l'estimation de la longueur initiale des câbles en fonction du nombre de points acquis. Les lignes pointillées représentent l'estimation initiale et la ligne pleine, la longueur réelle mesurée au ruban.	52
2.20	Erreur quadratique moyenne sur la position de l'organe effecteur terminal en fonction du nombre de mesures prises n	54
2.21	Erreur quadratique moyenne sur la position des points d'ancrage en fonction du nombre de mesures prises n	54
2.22	Erreur quadratique moyenne sur la position des points d'ancrage en fonction de la qualité de l'estimation initiale de la pose.	55
2.23	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimé initial de la pose.	56
2.24	Erreur quadratique moyenne sur les positions des points d'ancrage en fonction de la qualité de l'estimation initiale des positions des points d'ancrage.	56
2.25	Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale des positions des points d'ancrage.	57
3.1	Capteur d'angle à deux ddl.	62
3.2	Modèle géométrique d'un mécanisme à câbles générique augmenté des référentiels des capteurs d'angles.	63
3.3	Modèle géométrique du mécanisme simulé.	67
3.4	Régions contenant la pose de l'organe effecteur terminal pour de multiples mesures dans l'espace de travail. Les incertitudes sur les longueurs de câbles sont de ± 0.02 m et sur les angles des câbles sont de $\pm 1.8^\circ$. Les positions des ancrages des câbles se situent à $[0, 0]$ et $[1, 0]$	69
3.5	Agrandissement de la figure 3.4 à la pose $x = 0.5$ m et $y = -0.3$ m.	69
3.6	Photos du mécanisme à câble utilisé.	71
3.7	Photo de l'assemblage de l'enrouleur et du capteur d'angle.	71
3.8	Position de l'organe effecteur terminal où le poids du câble a le plus d'impact .	72
3.9	Trajectoire de la pose de l'organe terminal effecteur telle que vue par le VICON et les estimations de la pose par les différentes méthodes proposées.	73

3.10	Trajectoire de la pose de l'organe terminal effecteur telle que vue par le VICON et les estimations de la pose par les différentes méthodes proposés après un post-traitement servant à réduire le biais.	74
4.1	Trajectoire et rendu du robot simulé. Les points d'ancrage des câbles du robot sont dénotés par des cercles et sont situés aux points $\{0,0\}$, $\{1,0\}$, $\{0,1\}$ et $\{1,1\}$. La trajectoire débute au centre. Les flèches représentent la différence entre l'effort voulu et l'effort réellement obtenu.	83
4.2	Efforts résultants pendant la trajectoire. L'effort cible est un effort de $f_x = 1$ N.	83
4.3	Tension dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à $[0.25, 2]$ N.	84
4.4	La trajectoire effectuée est la même que celle de la figure 4.1b, mais un câble a été enlevée, celui du point d'ancrage $\{0,1\}$. La trajectoire va du centre vers l'extérieur. Les flèches représentent l'effort réellement obtenu lorsque l'effort voulu est nul.	85
4.5	Efforts résultants pendant la trajectoire. L'effort cible est un effort nul.	85
4.6	Tensions dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à $[0.25, 2]$ N	86
4.7	Trajectoire imposée par l'utilisateur. Les flèches représentent la différence entre l'effort voulu et l'effort réellement obtenu.	87
4.8	Efforts résultants pendant la trajectoire. L'effort cible est un effort de -10 N suivant l'axe des z de façon à simuler un poids de 10 N.	87
4.9	Tensions dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à l'intervalle $[2.6, 19.8]$ N	88
5.1	Diagramme en bloc du schéma de contrôle. Les lignes pointillées représentent des interactions physiques, contrairement aux lignes pleines qui sont numériques.	96
5.2	Diagramme en bloc du schéma de contrôle linéarisé et simplifié.	97
6.1	Mécanisme de retour haptique à trois degrés de liberté.	101
6.2	Environnement virtuel de type CAVE, acronyme pour « Cave automatic virtual environment ».	103
6.3	Vue du dessus de l'espace approximatif libre de câbles dans lequel l'utilisateur peut évoluer avec une position des points d'ancrage au sommet du cube.	105
6.4	Logiciel de comparaison des architectures.	106
6.5	Espace de travail et architecture du mécanisme similaire à RealAx8.	107
6.6	Espace de travail et architecture du mécanisme à organe effecteur terminal pyramidal.	107
6.7	Espace de travail et architecture du mécanisme inspiré de l'article de Chen (26).	108
6.8	Espace de travail et architecture du mécanisme modifié. Les zones encadrées montrent les endroits où l'espace de travail est augmenté par rapport à l'architecture de Chen.	109
6.9	Comparaison de l'espace de travail à orientation constante des deux architectures lorsque l'orientation de l'organe effecteur terminal est modifiée de 10° par rapport à son orientation de référence.	110
6.10	Axes de rotation du mécanisme.	111
6.11	Taille de l'espace de travail à orientation constante pour différente taille d'organe effecteur terminal.	112

6.12	Organe effecteur terminal.	113
6.13	Prototype de mécanisme à six ddl.	114
6.14	Espace de travail statique pour l'orientation de référence de l'interface haptique.	116
6.15	Vue en coupe de l'espace de travail (WFW) à une hauteur de 1 selon l'axe des Z. ES signifie l'espace de travail statique, DS signifie direction simple et TD signifie toutes directions.	117
6.16	Raideur et force maximale pour l'interface haptique, prises selon les trois axes principaux, soit X , Y et Z . La pente de la raideur prescrite est également affichée.	118
6.17	Graphique raideur-amortissement de l'interface haptique pour une masse virtuelle de 0.5 kg lors du rendu d'un mur virtuel. L'aire sous la courbe présente les configurations stables. Les lignes pointillées représentent les seuils d'incertitudes.	120
6.18	Sensibilité cinématique à orientation constante et pour une valeur constante sur l'axe Z	122
6.19	Réponse en fréquence obtenue selon la méthode « open-end ».	123
6.20	Relation entre la mesure des paramètres m_x , c_x et f_{fx} de la masse prescrite \mathbf{M} . L'amortissement prescrit (\mathbf{C}_t) demeure constant.	125
6.21	Relation entre la mesure des paramètres m_x , c_x et f_{fx} et l'amortissement prescrit \mathbf{C}_t . La masse prescrite (\mathbf{M}) demeure constante.	126
6.22	Le résiduel des forces, soit la différence entre la force modélisée et la force mesurée, en fonction du temps. Les forces mesurées directement sont également présentes pour mettre les valeurs en perspective.	126
6.23	Système de réalité immersif avec retour haptique	127
6.24	Schéma de l'installation du prototype servant au jeu de tennis de table.	128
7.1	Concept avec actionneur en série de mécanismes à câbles à grande capacité de réorientation dans l'axe vertical.	132
7.2	Schéma de l'architecture du prototype.	133
7.3	Deux configurations pour la plateforme mobile (tige).	133
7.4	Disposition des guides sur la plateforme et sur l'organe effecteur terminal.	134
7.5	Illustration du joint rotoïde et des guides pour les câbles.	135
7.6	Vue du dessus du mécanisme dans sa position de référence auquel seulement la paire de câbles d'intérêts est tracée dans trois configurations d'angle, soit celle à un angle de 0° en rouge, à 180° en bleu et à 270° en vert.	136
8.1	Tâche de déplacement de charge dans un environnement virtuel. Image tirée de (72)	139
8.2	Visualisation de l'utilisateur et du mécanisme à câbles à une position médiane.	140
8.3	Visualisation de l'espace de travail avec l'utilisateur et l'étagère.	141
8.4	Schéma du système complet et description des signaux de transmission d'informations entre les composants.	142
8.5	Interface de la console d'interface utilisateur utilisée par le thérapeute	143
8.6	Relation d'étalonnage entre les différents repères. Les lignes pointillées présentent une relation d'étalonnage indirecte.	144
8.7	Étapes de déplacement de la boîte pour effectuer la tâche.	145
8.8	Trajectoire de la caisse durant la tâche selon l'axe des Z en réalité virtuelle et dans le monde réel. Les chiffres présentent la section du mouvement correspondante.	146

8.9	Trajectoire de la caisse durant le mouvement 1 selon les axes principaux en réalité virtuelle (ligne pointillée) et dans le monde réel (ligne pleine) pour quatre sujets. La ligne verte représente la personne ayant une familiarité avec le mécanisme haptique. Le graphique de la vitesse représente la magnitude du vecteur de la vitesse cartésienne, elle est filtrée à l'aide d'une fenêtre gaussienne de 0.2 s.	147
8.10	Trajectoire de la caisse durant le mouvement 2 présentée comme à la figure 8.9	148
8.11	Trajectoire de la caisse durant le mouvement 3 présentée comme à la figure 8.9	149

Liste des vidéos

1	prototype_CAVE.mp4	128
2	2ddl_a_6ddl.mp4	137
3	essai_preliminaire.mp4	145

Abréviations

Abréviation	Description
CAO	Conception assistée par ordinateur
CIRRIS	Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale
ddl	degrés de liberté
IR	infrarouge
$\mathbf{pcm}(\cdot)$	produit croisé matriciel du vecteur \cdot
PGD	Problème géométrique direct
PGI	Problème Géométrique Inverse
WCW	Wrench Closure Workspace
$\mathbf{0}_a$	Vecteur nul de taille a
$\mathbf{0}_{a \times b}$	Matrice nulle de taille a par b
$\mathbf{1}_{a \times a}$	Matrice identité de taille a

À ma famille

I think that's the single best piece
of advice : constantly think about
how you could be doing things
better and questioning yourself.

Elon Musk

Remerciements

Bien que mon nom figure en haut de cette thèse, les travaux de recherche effectués au cours de ma maîtrise et de mon doctorat n'auraient pu s'accomplir sans l'aide précieuse de nombreuses personnes. En premier plan, mes directeurs de thèse, les professeurs Philippe Cardou et Clément Gosselin. Merci au professeur Philippe Cardou, qui par sa disponibilité, ses projets, ses idées, son temps et la confiance qu'il m'a accordée m'a permis d'atteindre des objectifs toujours plus ambitieux et d'étendre mes connaissances. Merci également au professeur Clément Gosselin, codirecteur, qui par son temps, sa passion, sa grande disponibilité et ses connaissances a pu éclairer le chemin à suivre. Je m'estime chanceux d'avoir pu évoluer dans un environnement où mes directeurs de recherche étaient disponibles pour des rencontres hebdomadaires, ce qui, je crois, est plutôt exceptionnel. L'environnement de recherche qu'est le Laboratoire de Robotique de l'Université Laval est lui aussi exceptionnel, avec les outils nécessaires aux avancements des projets accessibles et à portée de mains, mais je crois que ce qui en fait un environnement aussi exceptionnel sont les gens qui le constituent. Les professionnels de recherche, Simon Foucault et Thierry Laliberté, toujours présents et prêts à résoudre nos problèmes. Thierry avec ses connaissances et son intuition sans faille en design mécanique. Simon avec ses connaissances techniques et son aide pour toutes sortes de tâches associées au bon fonctionnement du laboratoire et de nos projets. En plus de fournir ces aides, ils constituent d'excellents collègues en alimentant nos discussions le midi et en participant aux activités sociales. Activités sociales qui seraient impossibles sans collègues et étudiants devenus amis, comme Dinh, principal instigateur de tout événement social, Julien, André, Pascal(s), Vincent, David, Bruno, François(s), Jean-Philippe, Alexandre et Xiaoling. Merci également à Laurent Bouyer, qui m'a permis d'entrevoir le domaine de la santé, lors de rencontres de projet et d'avoir pris le temps d'être juge lors de mes examens échelons. Merci également aux étudiants membres du projet de réadaptation Michaël et Céline avec qui nous avons construit une machine exceptionnelle. Je veux finalement remercier tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et cru en moi, à commencer par ma compagne devenue épouse Sabrina qui, à mes côtés, m'a soutenu et gardé les pieds sur terre, mon père et ma mère qui m'ont toujours encouragé dans mes projets et qui ont semé la graine de la curiosité, de la science et de la culture en moi et finalement mon frère avec lequel je partage de si nombreux points communs qui nous permettent d'interagir comme personne d'autre. Merci à ma belle famille Michel,

Chantal, Sarah-Michèle et Louis-Alexandre pour leurs encouragements et leurs compagnies.
Merci à toutes ces personnes, à celles que j'aurais pu oublier et celles qui travaillent dans
l'ombre.

Chapitre 1

Introduction

Un robot à câbles est un type de robot dont l'actionnement se fait grâce à des câbles ou tendons. L'actionnement de mécanismes à l'aide de câbles n'est pas une invention récente. Dans sa définition la plus large, l'arc à flèche est probablement un des exemples les plus anciens. Les câbles ont été utilisés pour actionner des mécanismes comme des catapultes et bateaux à voile par exemple. L'utilisation de câbles avec des poulies a fait grandement évoluer les capacités de construction de l'homme. L'ajout du mot robot dans la définition ajoute un aspect d'automatisation à ces mécanismes. Les avancés en électronique ont permis l'automatisation de tâches et le développement des robots à câbles modernes.

1.1 Problématique

Grâce aux développements modernes de ces mécanismes, de nouvelles applications ont émergé. L'une d'entre elles consiste en l'utilisation de ces mécanismes dans le domaine de l'haptique. Ces mécanismes proposent plusieurs avantages dont leur légèreté et leur grand espace de travail qui les rend adaptés à cet usage. L'haptique, quant à elle, permet aux humains d'interagir par le toucher avec les environnements virtuels. Une des innovations intéressantes en haptique et en réalité virtuelle est leur application dans le domaine de la réadaptation physique. En permettant à un patient d'interagir physiquement avec un environnement virtuel, il devient possible d'adapter facilement la tâche virtuelle à ses besoins spécifiques sans avoir à physiquement modifier l'environnement réel. L'ambition étant la création d'une seule machine permettant de faire une multitude de tâches de réadaptation adaptées à différents patients. On imagine par exemple un premier patient ayant des problèmes lombaires, la machine de réadaptation permet d'évaluer son état en lui faisant faire une tâche de déplacement de poids. Pour le second patient, qui a subi un accident cérébral vasculaire et doit réapprendre à utiliser son bras, d'un seul clic du thérapeute, la machine peut simuler un environnement où le patient interagit avec de plus petits poids en étant assisté par la machine qui l'aide en soutenant son bras. Cette réalité est encore distante, mais les travaux présentés dans cette thèse ont pour objectif

la création d'un prototype d'interface haptique grandeur humaine permettant la réalisation d'une tâche de réadaptation. Cette tâche doit permettre aux chercheurs du *Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale* (CIRRIS) d'étudier les effets de sa réalisation en environnement immersif. En effet, ces chercheurs désirent pouvoir reproduire une tâche de réadaptation comportant de grands déplacements dans le monde virtuel et dans le monde réel, pour pouvoir en établir les parallèles et les différences. La tâche proposée par ces chercheurs est une tâche de transport de boîtes, tâche qui nécessite une grande amplitude de mouvement et de rotation de la part de l'interface haptique, ce qui ajoute un défi supplémentaire, car les grandes rotations de l'organe effecteur terminal sont normalement difficiles à effectuer par les robots parallèles.

1.2 Méthodologie

Cette thèse a pour fondation les travaux présentés dans la thèse de Martin Otis (112) sur la plateforme de marche NELI, un prototype de simulateur de marche intégrant l'haptique et les mécanismes parallèles à câbles, et les travaux présentés dans le mémoire de Régis Poulin (124) sur une interface haptique permettant à un individu de toucher un environnement virtuel. Cette interface comportait un espace de travail à deux degrés de liberté d'une superficie approximative d'un mètre carré. L'objectif principal de la recherche présentée dans cette thèse est donc d'étendre les capacités de cette interface haptique pour la rendre plus immersive en augmentant le nombre de degrés de liberté et la taille de l'espace de travail pour que cette dernière puisse être utilisée par les chercheurs du CIRRIS pour effectuer des tâches de réadaptation incorporant de grands déplacements. Les améliorations à apporter consistent donc à passer d'un mécanisme plan à un mécanisme à trois dimensions et trois degrés de liberté, puis à six degrés de liberté ayant un espace de travail de taille humaine. De plus, des avancées plus générales dans le domaine des robots parallèles entraînées par câbles seront nécessaires. En effet, une méthode facilitant l'identification des paramètres géométriques du robot doit être développée pour accélérer et améliorer l'étalonnage initial de ce type de robot, ce qui permettra de l'installer aisément selon diverses architectures adaptées aux locaux et aux tâches. La précision de positionnement étant également importante pour ce type d'application, où le monde virtuel doit concorder avec le monde réel, l'utilisation de capteur d'angle comme moyen d'améliorer la mesure de la pose sera analysée. Ensuite, une méthode d'asservissement de ce type d'interface est nécessaire pour être en mesure de reproduire une tâche dans un environnement à six degrés de liberté. Ces avancées permettent donc la création d'interfaces haptique qui améliorent substantiellement l'immersion en permettant des interactions grandeur nature. Finalement, toujours pour améliorer l'immersion, l'intégration à un système de réalité virtuelle permet d'atteindre l'immersion totale, ce qui permet à un utilisateur d'être complètement immergé dans une réalité virtuelle avec laquelle il peut interagir avec le toucher par l'interface haptique. Un prototype d'appareil de réadaptation physique est donc réalisé

permettant l’immersion totale d’un patient dans un monde virtuel pour lui faire exécuter des tâches prescrites par un thérapeute dans un environnement pleinement contrôlé. Pour ce faire, les développements plus fondamentaux sur les mécanismes à câbles sont présentés dans les premiers chapitres de cette thèse. En effet, les chapitres 2 et 3 explorent les méthodes facilitant l’étalonnage et améliorant la précision des mécanismes à câbles, sujet qui demeure problématique pour ce type de mécanismes. Les chapitres 4 et 5 sont consacrés à l’adaptations de méthodes traditionnelles de contrôle de mécanismes à câbles pour en faire des interfaces haptiques et permettre la création d’un prototype d’appareil de réadaptation. On y aborde ainsi la gestion de la tension dans les câbles puis les méthodes de contrôle. Les chapitres suivants présentent le développement et l’implantation de deux interfaces haptiques entraînées par câbles différentes qui font usage des notions développés dans les chapitres précédents. Le chapitre 6 est donc consacré à la conception et à l’évaluation d’un prototype d’interface haptique qui permettra d’établir les caractéristiques et capacités spécifiques à ce type d’interface. Le chapitre 7 présente quant à lui une architecture novatrice de mécanisme parallèle à câbles permettant de grandes rotations selon l’axe vertical, ce qui sera nécessaire étant donnée la tâche de transport de boîtes qui requière des grands mouvements dont une rotation du tronc. Le dernier chapitre (8) présente le prototype final ainsi que les résultats d’une étude préliminaire faite avec des utilisateurs ne connaissant pas le système.

La suite de ce chapitre d’introduction est consacrée à une revue globale des mécanismes à câbles, suivie par une revue des mécanismes à câbles utilisés en haptique et de ceux qui sont utilisés en réadaptation. Une brève section introduit les concepts de réalité virtuelle et d’haptique. Finalement, quelques concepts mathématiques importants utilisés dans le cadre de cette thèse sont présentés.

1.3 Revue de la littérature disponible sur les robots à câbles, leurs utilisations en haptique et en réadaptation physique

Les robots à câbles modernes ont été développés dans les années quatre-vingt en partie grâce aux développements des mécanismes parallèles. Les mécanismes parallèles sont des mécanismes qui comportent des boucles dans leurs chaînes cinématiques, par opposition aux mécanismes sériels qui sont composés d’une chaîne cinématique ouverte. Ces mécanismes sont souvent utilisés avec des liens ne pouvant que résister à des charges de compression et de tension. Les mécanismes parallèles se sont grandement développés dans les années quatre-vingt-dix, dont l’exemple le plus commun est la plateforme de Gough-Stewart. La figure 1.1 présente l’architecture de cette dernière. Les principaux avantages des mécanismes parallèles sont leur grande rigidité, leur capacité à générer des trajectoires hautement dynamiques et leur faible taille par rapport aux efforts pouvant être soutenus. Ils ont par contre comme défaut d’avoir un espace de travail réduit, surtout en orientation. Ces avantages sont également valables

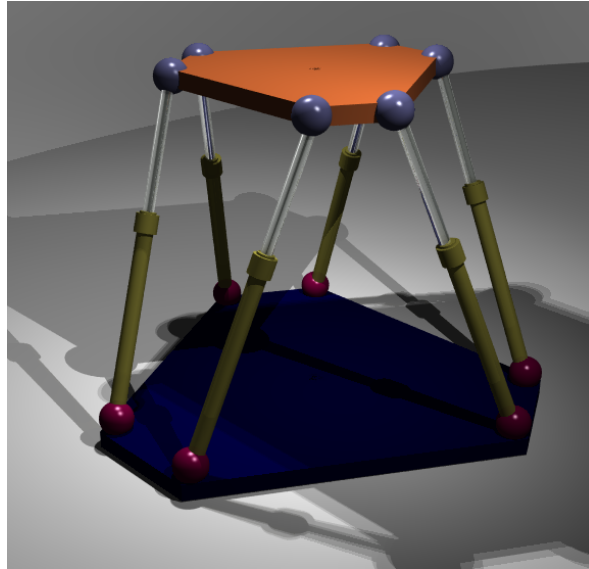
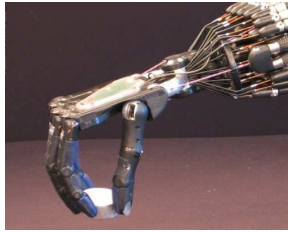



FIGURE 1.1 – Mécanisme parallèle de type Gough-Stewart. ©User :Pantoine/Wikimedia-Commons/CC-BY-SA-3.0

pour les mécanismes parallèles à câbles. L'utilisation de câbles dans la chaîne cinématique a comme avantage de réduire grandement l'inertie des membrures, ainsi que de permettre d'avoir une importante plage de débattement de l'actionneur. Ces caractéristiques permettent de créer de grands espaces de travail à moindre coût tout en maintenant une grande rigidité. L'inconvénient principal des mécanismes à câbles vient du fait que les câbles ne peuvent soutenir que des efforts en tension. Pour pallier cet inconvénient, certains mécanismes utilisent des efforts externes, souvent la gravité, pour maintenir la tension dans les câbles, faute de quoi une redondance d'actionneurs est nécessaire pour maintenir une tension positive dans tous les câbles.

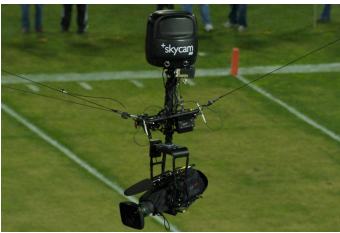
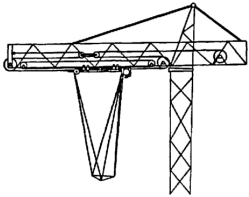
Il est possible de classer les mécanismes à câbles en plusieurs catégories. La première catégorie présentée est celle où les câbles sont utilisés comme des tendons qui actionnent des mécanismes à liens rigides. Certaines formes de mains robotiques en sont un parfait exemple. Deux exemples de robots à tendons sont présentés dans le tableau 1.1.

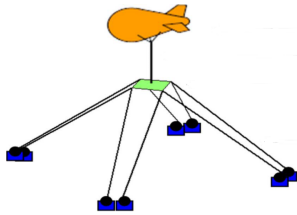
Tableau 1.1 – Manipulateurs sériels entraînés par câbles.

	<p>La main « Shadow Hand » est une main actionnée par 20 câbles qui permettent une grande dextérité et une grande force (129).</p>
	<p>Des cathéters orientables sont une forme de robot sériel à tendons (17). Les câbles permettent de contrôler la forme du cathéter.</p>

Les robots à câbles plus conventionnels sont en majorité des robots à câbles de type parallèle. Parmi ces derniers, il est possible de les séparer en deux groupes, les robots sous-contraints et les robots pleinement contraints. Les robots sous-contraints ont normalement un nombre de câbles actifs égaux ou inférieurs à leur nombre de degrés de liberté (ddl). On appelle souvent ces robots de type « suspendus », parce que la gravité permet de maintenir les câbles sous tension. Le tableau 1.2 présente une liste non exhaustive de ce type de manipulateur. Ce type de robot a comme faiblesse de ne pas pouvoir générer de grands efforts dans certaines directions, car ceux-ci peuvent être limités par le poids de l'organe effecteur terminal qui doit maintenir certains câbles sous tension, ils ne sont donc pas très adaptés à l'haptique à plusieurs ddl.

Tableau 1.2 – Manipulateurs suspendus entraînés par câbles.

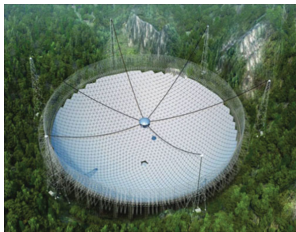
	<p>La « SKYCAM » est un robot à câbles suspendu supportant une caméra permettant de prendre les vues en plongée lors de matchs sportifs (29).</p>
	<p>« NIST SPIDER » est utilisé comme grue robotique et permet de contrôler la charge utile en 6 ddl (2).</p>



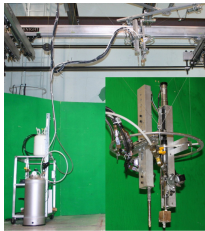
Ce mécanisme à câbles pour un radiotélescope a la particularité d'être « suspendu » non pas par la gravité, mais par un aérostat. Il est maintenu également par plus de câbles qu'il ne possède de ddl, mais demeure sous-contraint par la configuration de ceux-ci (103).



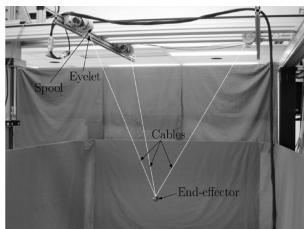
De la famille de robots MARIONET, cette version à grande échelle sert à la manutention des objets (102).



Le capteur central du télescope « FAST » est mu par un mécanisme à câbles suspendu d'un diamètre de 600 m (91).



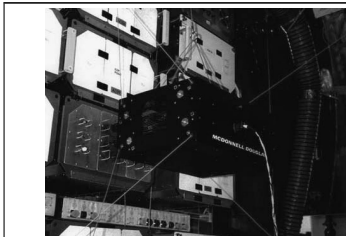
Un mécanisme à câbles suspendus est utilisé au laboratoire de robotique de l'Université Laval pour faire de l'impression 3D à grande échelle (6).



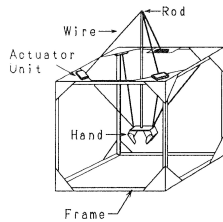
Une particularité des mécanismes à câbles suspendus est leur capacité à sortir dynamiquement de leur espace de travail statique. Les travaux de Jiang (75) en sont un exemple.

La prochaine catégorie de robots à câbles présentée, celle des mécanismes pleinement contraints, est la plus applicable aux travaux rapportés dans cette thèse. Ces mécanismes possèdent au minimum un câble de plus que le nombre de ddl à contraindre. Les câbles travaillent en partie de façon antagoniste de sorte qu'une tension positive soit présente en tout temps dans tous les câbles. Des exemples de ce type de mécanismes sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 – Manipulateurs pleinement contraints entraînés par câbles.



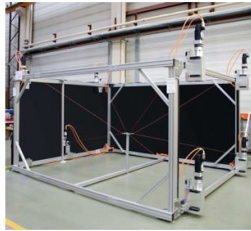
Le robot Charlotte est utilisé comme manipulateur spatial testé dans l'espace et sur le sol par la NASA (18).



Le Falcon est l'un des premiers robots à câbles pleinement contraints ce qui lui permet d'effectuer des tâches à très haute vitesse (79). Son architecture est intéressante, car elle libère l'espace de travail des câbles inférieurs.



Le « ReelAx8 » ou « CoGiRo » est un mécanisme expérimental de LIRMM pleinement contraint à 6 ddl servant à la manutention (71; 39).

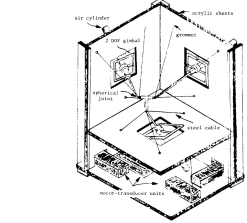
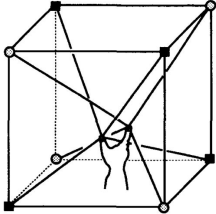
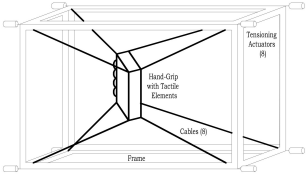
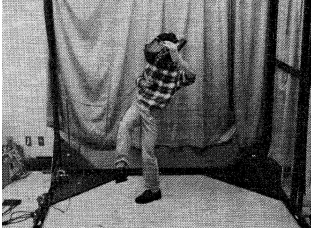
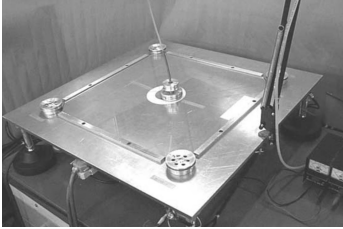

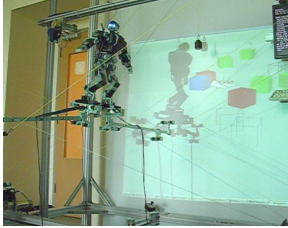


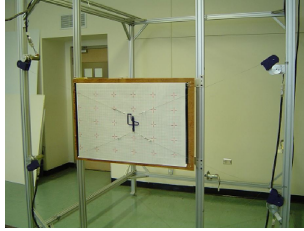
La famille de robot IPAnema est une plateforme de recherche et comporte des robots pleinement contraints (123).

Les mécanismes à câbles présentent de nombreux avantages pour une utilisation comme interface haptique. Les principaux avantages sont la possibilité d'obtenir un grand espace de travail à orientation constante, une faible inertie grâce aux membrures formées de câbles légers et ont peu de jeux nuisibles¹ grâce aux tensions antagonistes entre les câbles. Ils sont donc des candidats intéressants pour la création d'interfaces haptiques. Leur utilisation dans ce domaine a commencé dès la fin des années 80, mais les développements se sont accélérés au tournant de l'année 2000. Le tableau 1.4 présente les principales interfaces développées dans la littérature et celles qui servent de base aux interfaces développées dans cette thèse.

1. an anglais : backlash

Tableau 1.4 – Mécanisme à câbles en haptique.

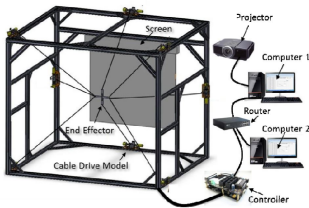
	<p>La NASA a développé un manche à balai à retour haptique pour faire de la télé présence à la fin des années 80 (92).</p>
	<p>Ishii et Sato sont reconnus comme pionnier dans l'interface haptique à câbles avec le SPIDAR (69).</p>
	<p>Le CSHI est l'une des premières interfaces haptiques entraînées par câbles (86).</p>
	<p>Kawamura a développé des interfaces pour simuler du sport virtuel tel que le baseball et le tennis (80; 106).</p>
	<p>Le Feriba-3 est un robot à câbles plan placé sur une table à coussin d'air de façon à limiter au minimum la friction pour maximiser la transparence du rendu haptique (46).</p>
	<p>Le Piroga5 reprend l'architecture du Falcon pour en faire une interface haptique reproduisant l'écriture avec un crayon (128).</p>
	<p>La plateforme de marche du projet NELLI est composée de robots à câbles pleinement contraints dont les composantes sont réutilisées pour les travaux rapportés dans cette thèse (112).</p>



Le mécanisme plan construit par Régis Poulin au laboratoire de Robotique de l'Université Laval constitue la base des mécanismes présentés dans cette thèse (49).



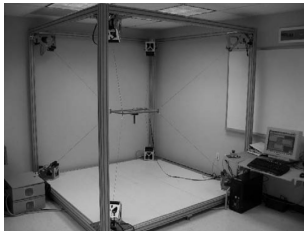
INCA 6D est un robot commercial à six ddl servant à faire un retour haptique pour des logiciels de CAO ou de simulation (118). www.haption.com



Le iFeel6 est une interface à retour haptique à six ddl qui dispose également d'un retour visuel semblable à celle présentée dans le chapitre 6 (26).

Finalement, une dernière catégorie est présentée : les mécanismes à câbles spécifiquement utilisés pour la réadaptation. Cette catégorie inclut de nombreux exemples ; les principaux d'entre eux et ceux qui sont proches des développements de cette thèse sont présentés dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 – Mécanisme à câbles en réadaptation.



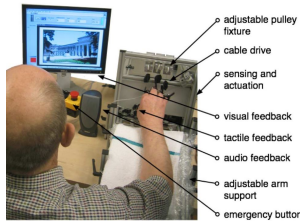
Le Macarm est un prototype de robot à câbles pour la réadaptation des membres supérieurs. Il utilise des moteurs puissants et des boîtes d'engrenage harmonique lui permettant de générer des efforts importants à l'organe effecteur terminal au détriment de la vitesse de déplacement (0.5 m/s). Un capteur forces/moments est utilisé, ce qui permet de faire un contrôle en force zéro et de simuler un environnement virtuel (7; 99).



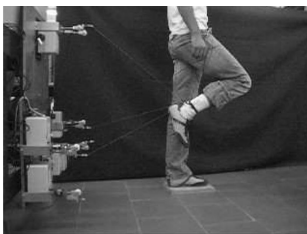
Le Stringman est un robot à câbles utilisé pour la réadaptation de la marche. Il permet de supporter une partie du poids et de maintenir la posture d'un patient (148).



Le NeReBot est un robot suspendu à 3 ddl permettant de soutenir un membre supérieur d'un patient lors de tâche de réadaptation (127).



Le HandCARE travaille à plus petite échelle et sert à la réadaptation de la main en permettant un retour en force au bout des doigts (36).



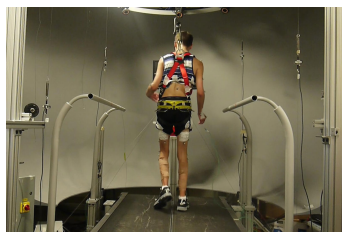
Le CaTraSys est utilisé pour la mesure et la caractérisation de la démarche (114).



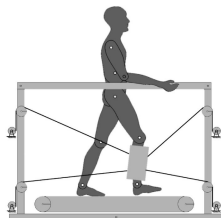
Cette version de la famille MARIONET est utilisée pour mesurer la pose des membres d'un patient (102).



Le CAREX est un exosquelette pour le bras entraîné par câbles pour la réadaptation des membres supérieurs (95; 96). Des mécanismes plans à 2 ddl peuvent également servir à la réadaptation des membres supérieurs, comme (138), qui est inspiré par la thérapie des miroirs.



Les mécanismes à câbles en réadaptation ne sont pas uniquement utilisés pour soutenir le poids des patients, mais aussi appliquer des efforts supplémentaires pour renforcer les muscles (78).



De récents développements ont analysé le contrôle et l'utilisation des robots à câbles pour supporter les membres inférieurs lors de la marche (41; 1; 87).

1.4 Réalité virtuelle, augmentée et retour haptique

La réalité virtuelle et augmentée est en plein essor depuis la sortie de solution commerciale comme l'Oculus Rift en 2012. En effet, des appareils de réalité virtuelle tels que l'Oculus Rift, le HTC Vive et le Playstation VR sont apparus, visant le domaine du jeu vidéo. Ces appareils permettent l'interaction avec un environnement virtuel immersif par l'entremise de manettes suivies en six ddl. L'immersion est définie ici comme l'impression ressentie par l'utilisateur d'être dans l'environnement virtuel sans percevoir le milieu réel. Le joueur est donc en mesure de déplacer ses mains intuitivement et celles-ci seront reproduites dans l'environnement virtuel. Un certain retour haptique est introduit par des vibrations des manettes, mais reste rudimentaire. Le rendu, qui représente le réalisme des efforts ressentis par rapport à ce qui est anticipé, est donc ici plus limité. En effet, les efforts entre les mains du joueur et l'environnement virtuel ne peuvent être reproduits. Le retour visuel quant à lui est particulièrement immersif en comparaison avec les solutions d'il y a quelques années. Ces casques disposent d'une résolution d'écran importante et d'un champ de vision grandement élargie par rapport à leurs prédécesseurs. Ces casques sont commercialisés au grand public et sont relativement peu chers. Il reste que ces solutions nécessitent de porter un casque qui est relié par des fils à un ordinateur ou une console de jeu, ce qui peut être encombrant. Ils représentent les dernières avancées disponibles dans le commerce.

La réalité augmentée quant à elle s'apparente à la réalité virtuelle, à la différence que l'utilisateur n'est pas coupé du monde réel dans lequel il évolue. Des objets virtuels peuvent par exemple être surimposés au monde réel. La réalité augmentée, aujourd'hui, apparaît principalement sur les téléphones mobiles, comme jeu ou comme utilitaire. Par exemple, une application de traduction peut remplacer directement une phrase d'une autre langue sur un flux vidéo en temps réel comme montré à la figure 1.2. Le casque de réalité augmentée Hololens de Microsoft est en plein développement et constitue une des interfaces de réalité augmentée les plus complètes et prometteuses.

Le retour haptique quant à lui consiste en un retour physique des forces provenant d'un environnement virtuel ou de la télé opération. Les interfaces commerciales les plus connues sont de petites dimensions comme le PHANTOM et le Falcon (Novint inc) présenté à la figure 1.3. Ces interfaces utilisent des liens rigides soit dans une configuration sériele ou parallèle pour transmettre les forces. Le Maglev 200 (Butterfly Haptics, LLC), comme son nom le suggère, utilise les forces magnétiques pour transmettre des efforts à l'usagé. Une de ses caractéristiques les plus importantes est la transparence. On la définit comme le caractère d'un système dont le mode de fonctionnement peut demeurer ignoré des utilisateurs. Un système haptique parfaitement transparent reproduit donc seulement les efforts exigés par l'environnement virtuel et aucun des efforts provenant de l'environnement réel et de l'interface.

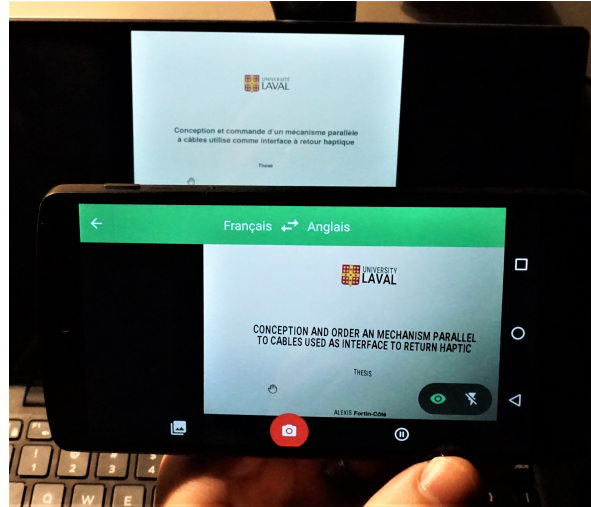
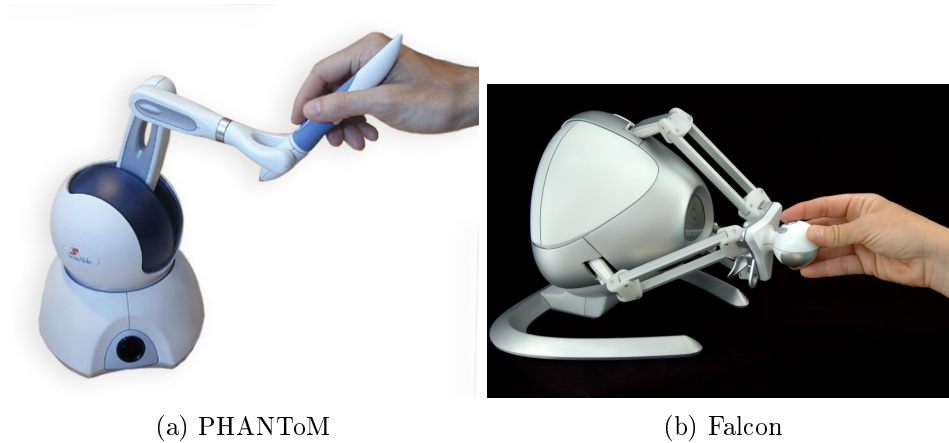


FIGURE 1.2 – Exemple de réalité augmentée. Traduction en temps réel de vidéo capturé par un téléphone.



(a) PHANToM

(b) Falcon

FIGURE 1.3 – Interfaces à retour haptique commerciales.

1.5 Considération de bases pour les mécanismes à câbles

Les équations mathématiques gouvernant les mécanismes parallèles à câbles sont principalement les mêmes que celles régissant les mécanismes parallèles conventionnels. Certaines simplifications doivent être employées pour qu'elles demeurent valides. Cette section présente un condensé de ces équations qui seront utiles pour comprendre certains éléments de cette thèse.

1.5.1 Chaînes Cinématiques

Le modèle utilisé pour représenter le robot à câbles repose sur des chaînes cinématiques simples. Un exemple est présenté dans la figure 1.4. Elle est constituée de rotules aux points d'attache des câbles sur la structure fixe. Ces points sont généralement des œillets par lesquels passent les câbles. Le diamètre de l'œillet étant proche de celui du câble, il est assez petit pour être

considéré comme un point. Le câble est aussi considéré comme parfaitement flexible dans les directions perpendiculaires au câble, ce qui permet d'utiliser un modèle de rotule. Pour modéliser l'extension des câbles, une articulation prismatique est ajoutée dans chaque membrure principale. Des rotules sont aussi utilisées pour modéliser les points d'ancrage à l'organe effecteur terminal. Ce dernier est lié aux câbles, et aucun moment ne peut être transmis d'un à l'autre, ce qui fait qu'un joint de type rotule est approprié.

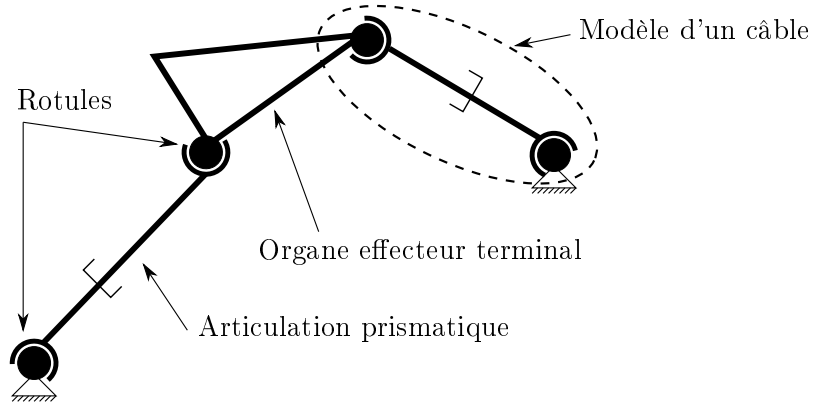


FIGURE 1.4 – Chaîne cinématique simple montrant l'architecture d'un robot à câbles.

1.5.2 Masse et élasticité des câbles

La simplification la plus commune pour les mécanismes parallèles à câbles est celle des câbles non élastiques et sans poids. Cette simplification permet de modéliser les câbles comme des segments de droites, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de fléchissement du câble entre les deux points d'attache dû au poids propre du câble. Cette simplification est courante dans le domaine des mécanismes à câbles, bien que dans certaines applications, où les câbles font plusieurs mètres, elle ne puisse être utilisée. Un câble léger de courte longueur, maintenu à une tension évitant le fléchissement du câble est un bon candidat pour cette simplification. Les câbles utilisés couramment possèdent un grand module de Young et sont utilisés à faible chargement, c'est-à-dire que la tension à laquelle ils sont utilisés est faible par rapport à leur tension de rupture, ce qui permet de les considérer comme étant rigides. La thèse de Samuel Bouchard (13) présente une section sur l'étude du fléchissement et développe les conditions permettant l'utilisation de cette approximation, ce qui est résumé ici. Les équations mathématiques des câbles suspendus sont développées dans (68; 67) et repris dans (85) qui présente les équations de la statique pour les robots à très longs câbles comme le radiotélescope FAST. Les hypothèses principales sont un câble homogène linéairement élastique, c'est-à-dire qu'il se modélise par la loi de Hooke, fixé aux extrémités et ayant une raideur négligeable en flexion. La figure 1.5 présente le schéma d'un câble suspendu par ses deux extrémités. On obtient grâce au développement mathématique présenté dans les articles précédents une expression de la flèche

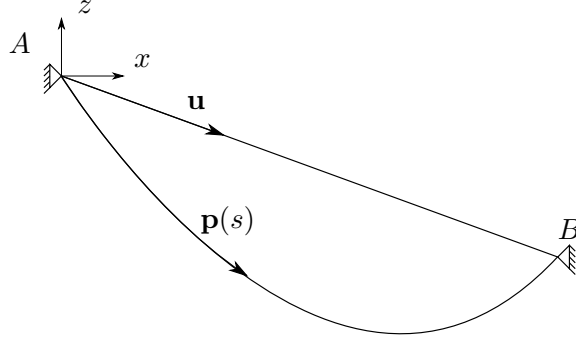


FIGURE 1.5 – Schéma d'un câble suspendu sous l'effet de son propre poids.

du câble

$$x(s) = \frac{f_x s}{EA_0} + \frac{|f_x|}{m'g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{f_z + m'g(s - l_0)}{f_x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{f_z - m'gl_0}{f_x} \right) \right] \quad (1.1)$$

et

$$z(s) = \frac{f_z s}{EA_0} + \frac{m'g}{EA_0} \left(\frac{s^2}{2} - l_0 s \right) + \frac{1}{m'g} \left[\sqrt{f_x^2 + (f_z + m'g(s - l_0))^2} - \sqrt{f_x^2 + (f_z - m'gl_0)^2} \right]. \quad (1.2)$$

s est une coordonnée généralisée qui suit le long du câble. E , A_0 et m' sont le module de Young, l'aire de section et la densité linéaire du câble non chargé. l_0 est la longueur du câble non chargé d'un point d'ancrage à l'autre. g est l'accélération gravitationnelle. Il est possible de simplifier encore l'équation en modélisant le câble comme étant parfaitement rigide. On peut donc réécrire les équations 1.1 et 1.2 avec $E \rightarrow \infty$:

$$x(s) = \frac{|f_x|}{m'g} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{f_z + m'g(s - l_0)}{f_x} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{f_z - m'gl_0}{f_x} \right) \right] \quad (1.3)$$

et

$$z(s) = \frac{1}{m'g} \left[\sqrt{f_x^2 + (f_z + m'g(s - l_0))^2} - \sqrt{f_x^2 + (f_z - m'gl_0)^2} \right]. \quad (1.4)$$

Il est aussi possible d'exprimer la tension dans le câble :

$$\tau(s) = \sqrt{f_x^2 + (f_z + m'g(s - l_0))^2}. \quad (1.5)$$

Pour pouvoir considérer un câble comme non fléchi, Bouchard (13) propose dans sa thèse de s'assurer que la raideur dans la direction du câble \mathbf{u} s'approche de la raideur du câble considéré sans poids. En effet, cet indice permet de facilement comprendre l'impact de la simplification au plan physique. Lorsque la raideur perçue à l'organe effecteur terminal est beaucoup plus petite que celle du câble, il est possible de constater que l'effort des enrouleurs n'est pas directement transmis à l'organe effecteur terminal. Grâce aux équations 1.3, 1.4, 1.5 et des 6 étapes de la méthode proposée par Bouchard, il est possible de conclure sur la pertinence de la simplification. En utilisant les données des câbles qui seront utilisés dans cette thèse et une situation typique d'un câble attaché horizontalement à deux points distancés de 1 m et

tendu à 2 N, le rapport entre la raideur fléchie et la raideur d'origine est de 90%. Pour une longueur de deux mètres dans la même situation on obtient une raideur équivalente à 69% de la raideur du câble. Il y a effectivement un impact assez important. L'erreur sur l'angle de départ quant à elle n'est pas très significative, elle varie entre 0.2 et 0.4 °. Le code Matlab utilisé pour obtenir ces valeurs est disponible à l'annexe A. Des discussions plus complètes sur ces simplifications sont disponibles dans (34; 32).

1.5.3 Problème géométrique inverse

Le problème géométrique inverse (PGI) est un élément crucial en robotique. Ce problème est celui de calculer les composantes articulaires du manipulateur en fonction de sa pose. Pour un robot parallèle, comme les mécanismes à câbles présentés dans cette thèse, le PGI est simple et se calcule en utilisant les équations de fermetures de boucle. La figure 1.6 présente un modèle générique de mécanisme à câble. La position du $i^{\text{ème}}$ point d'ancrage sur la base fixe est définie par le vecteur \mathbf{a}_i exprimé dans le système de référence fixe \mathcal{F} qui a son origine au point O . Le point d'attache correspondant situé sur l'organe effecteur terminal est défini par le vecteur \mathbf{r}_i exprimé dans le système de référence mobile \mathcal{P} qui a son origine au point P . Ce dernier point, qui correspond à la position de l'organe effecteur terminal qui est donnée par le vecteur \mathbf{p} . L'orientation du système de référence mobile par rapport au système de référence fixe est définie par la matrice orthogonale de rotation \mathbf{Q} . Les points d'attache A_i et B_i sont modélisés comme des joints sphériques. On peut écrire la boucle vectorielle fermée pour chaque câble i

$$\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \rho_i\mathbf{u}_i - \mathbf{a}_i = 0, \quad (1.6)$$

où \mathbf{u}_i est un vecteur unitaire. Il est possible de trouver la norme (ρ_i) de $\rho_i\mathbf{u}_i$ exprimant $(\rho_i\mathbf{u}_i)^T(\rho_i\mathbf{u}_i)$ et en prenant sa racine positive. On obtient alors

$$\rho_i = \sqrt{(\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)^T(\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)}, \quad (1.7)$$

pour chacun des câbles. Ces équations sont nécessaires à la résolution du PGI et sont communes aux mécanismes parallèles.

1.5.4 Cinématique

En utilisant les simplifications précédentes, il est possible de définir un modèle mathématique simple pouvant représenter la cinématique des robots parallèles à câbles. Ce modèle a été développé dans les premiers articles sur les robots à câbles tels que (2; 106). On considère un organe effecteur terminal se mouvant dans l'espace à trois dimensions. Cet organe effecteur terminal est contraint par m câbles qui sont attachés par des enrouleurs à une structure fixe. Cet arrangement est présenté par la figure 1.6. Les équations de vitesse reliant les coordonnées cartésiennes aux coordonnées articulaires peuvent être obtenues avec les équations de fermeture

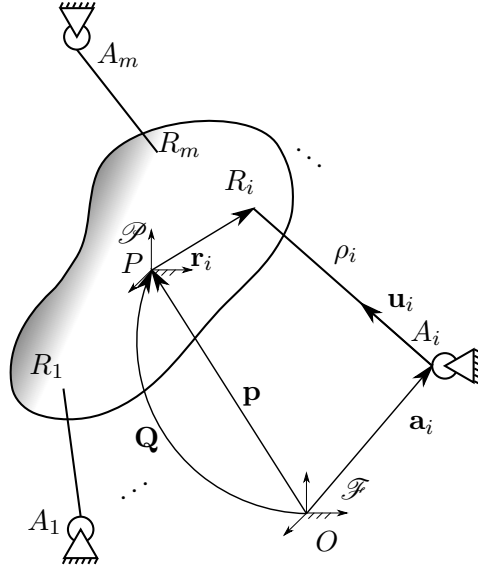


FIGURE 1.6 – Modèle géométrique d'un mécanisme à câbles générique.

de boucles donnant la longueur des câbles au carré. La longueur ρ_i au carré du $i^{\text{ème}}$ câble peut être écrite comme

$$\rho_i^2 = \| \mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i \|_2^2, \quad (1.8)$$

où $\| \cdot \|_2$ signifie la norme euclidienne. En dérivant et réarrangeant l'équation 1.8, les équations de vitesses correspondantes peuvent être obtenues.

$$\rho_i \dot{\rho}_i = (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)^T \dot{\mathbf{p}} + [(\mathbf{Q}\mathbf{r}_i) \times (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)]^T \boldsymbol{\omega}, \quad (1.9)$$

où $\boldsymbol{\omega}$ représente la vitesse angulaire de l'organe effecteur terminal. Pour m câbles, on obtient donc les relations cinématiques de premier ordre

$$\mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{J}\mathbf{t}, \quad (1.10)$$

où

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = [\dot{\rho}_1, \dots, \dot{\rho}_m]^T, \quad \mathbf{t} = [\dot{\mathbf{p}}^T, \boldsymbol{\omega}^T]^T,$$

et

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{c}_m^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \text{diag}[\rho_1, \dots, \rho_m], \quad (1.11)$$

dans lequel \mathbf{c}_i est un vecteur de six dimensions défini par

$$\mathbf{c}_i = \begin{bmatrix} (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i) \\ (\mathbf{Q}\mathbf{r}_i) \times (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i) \end{bmatrix}. \quad (1.12)$$

Il est aussi pratique de définir une matrice de structure

$$\mathbf{A} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{J}, \quad (1.13)$$

où $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, qui est défini pour toutes les poses sauf pour celles où une ou plusieurs des longueurs de câbles sont nulles. Cette situation est peu fréquente dans le domaine des mécanismes parallèles à câbles et ne se produit pas dans les mécanismes présentés dans cette thèse. Des équations 1.10 et 1.13, on obtient

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{A}\mathbf{t}. \quad (1.14)$$

Comme les enrouleurs sont des tambours actionnés par des moteurs rotatifs dont la position angulaire est utilisée pour la mesure de la longueur des câbles, il est utile de lier les vitesses articulaires $\dot{\rho}_i$ aux vitesses angulaires des moteurs rotatifs. On a alors

$$\dot{\theta}_{ai} = \frac{\eta_a \dot{\rho}_i}{R_a}, \quad (1.15)$$

qui donne la vitesse angulaire des poulies, où R_a représente le rayon de ces dernières et η_a le rapport de réduction de la boîte d'engrenage du moteur.

1.5.5 Problème géométrique direct

Le problème géométrique direct se pose comme étant celui de trouver la pose du mécanisme en fonction de ses coordonnées articulaires. Ce problème est simple pour des robots sériels, comme des bras robotiques, il est par contre plus complexe pour les mécanismes parallèles où les solutions explicites sont inexistantes où très complexes. De plus, le nombre de solutions est souvent multiple. Par exemple, pour la plateforme de Gough-Stewart, le problème géométrique direct peut être exprimé par un polynôme de degré 40 ce qui peut conduire à 40 modes d'assemblage différents pour certaines architectures. Dans le cas des mécanismes à câbles complètement contraints, on a de plus une redondance d'actionnement, ce qui conduit à un problème sur contraint. La méthode généralement employée est l'utilisation d'algorithmes numériques. L'algorithme 1 présente le pseudo-code de la méthode de résolution de type Newton-Gauss pour un mécanisme à câbles. Cette dernière utilise l'inverse généralisé de Moore-Penrose de la matrice de structure (\mathbf{A}^I). La méthode nécessite une estimation initiale, qui sera la plupart du temps la pose au temps précédent de calcul. La fonction Jacobienne est calculée selon l'équation 1.11 et la fonction PGI est calculée grâce aux équations 1.7. Comme l'écart entre la pose précédente et la pose actuelle est très faible lors d'un pas de temps, ce qui est le cas des robots présentés dans cette thèse qui ont une fréquence d'asservissement de 500 Hz, l'algorithme converge rapidement. Pour des situations, qui ne sont pas couvertes dans cette thèse, où l'écart entre la pose précédente et la pose actuelle est élevé, un autre type d'algorithme devrait être employé lorsque la convergence n'est pas atteinte après un nombre prédéterminé d'itérations, comme ce dernier algorithme n'est pas particulièrement robuste.

intrant : Les longueurs mesurées des câbles $\boldsymbol{\rho}_m$ et la pose précédente \mathbf{p}, θ_{XYZ} , où θ_{XYZ} représente les angles d'Euler avec la convention XYZ. Un critère de convergence ϵ est aussi nécessaire.

extrant : La pose présente \mathbf{p}, θ_{XYZ} .

$crit \leftarrow \infty$;

tant que $crit > \epsilon$ **faire**

$\mathbf{A} \leftarrow \text{Jacobiennes}(\mathbf{p}, \theta_{XYZ})$
 $\boldsymbol{\rho} \leftarrow \text{PGI}(\mathbf{p}, \theta_{XYZ})$
 $[\mathbf{p}^T \quad \theta_{XYZ}^T]^T \leftarrow [\mathbf{p}^T \quad \theta_{XYZ}^T]^T + \mathbf{A}^T [\boldsymbol{\rho}_m - \boldsymbol{\rho}]$
 $crit \leftarrow \|\boldsymbol{\rho}_m - \boldsymbol{\rho}\|$

fin

Algorithme 1 : Exemple d'algorithme pour résoudre le PGD basé sur la méthode de Newton-Gauss

1.5.6 Statique

Le modèle cinématique n'est qu'une représentation géométrique du système. Pour garantir que les câbles demeurent en tension et pour contrôler le rendu haptique fourni, il est nécessaire de modéliser les efforts que le mécanisme peut soutenir et exercer. Les forces exercées par les câbles sur l'organe effecteur terminal sont modélisées comme des forces pures appliquées à leurs points d'ancrage R_i dans la direction de

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i}{\rho_i}. \quad (1.16)$$

La magnitude de chacune de ces forces est la tension τ_i pour le câble i . On calcule aussi le couple généré par la force par rapport au point P par $\mathbf{r}_i \times \tau_i(-\mathbf{u}_i)$. Il est donc possible d'exprimer la relation entre la combinaison des forces et des moments avec la tension dans le câble par un torseur

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} -\mathbf{u}_i \\ \mathbf{r}_i \times -\mathbf{u}_i \end{bmatrix}. \quad (1.17)$$

Sous forme matricielle et pour tous les câbles, on obtient le torseur de forces \mathbf{w} pour les câbles

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{w}, \quad (1.18)$$

où

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2 \quad \dots \quad \mathbf{w}_m] \quad (1.19)$$

et

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \dots \quad \tau_m]^T. \quad (1.20)$$

Un lien existe entre la matrice des torseurs \mathbf{W} et la matrice de structure \mathbf{A} . La relation de dualité cinématique/statique se développe en passant par les équations de puissance. En supposant un régime quasi statique sans effort externe et donc sans perte de puissance entre l'organe effecteur terminal et les actionneurs, on a

$$\boldsymbol{\tau}^T \dot{\boldsymbol{\rho}} = -\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{t}}. \quad (1.21)$$

En remplaçant $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ par son expression dans l'équation 1.14, on obtient

$$\boldsymbol{\tau}^T \mathbf{A} \mathbf{t} = -\mathbf{w}^T \mathbf{t}. \quad (1.22)$$

Cette équation étant valide pour toutes vitesses tant qu'aucune longueur des câbles n'est nulle, on peut la réécrire sous la forme

$$-\mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{w}, \quad (1.23)$$

qui est la même expression que l'équation 1.18. On a donc

$$-\mathbf{A}^T = \mathbf{W}. \quad (1.24)$$

1.5.7 Espace de travail

L'espace de travail d'un robot à câbles peut être défini de plusieurs façons. L'équation de base dans la détermination des espaces de travail est l'équation 1.18 qui relie les efforts articulaires au tenseur de force à l'organe effecteur terminal. Un point important à noter est que les tensions $\boldsymbol{\tau}$ dans les câbles doivent demeurer positives en tout temps pour que l'équation soit valide. Le premier espace de travail présenté en est un qui tient principalement cette contrainte en compte. Le « Wrench Closure Workspace » (WCW) est défini comme l'ensemble des poses que peut prendre l'organe effecteur terminal pour laquelle un quelconque torseur de force \mathbf{w} peut être compensé par au moins un ensemble de tensions positives $\boldsymbol{\tau}$. Mathématiquement, pour que la pose soit considérée comme étant incluse dans le WCW, il faut que les conditions

$$\mathbf{W} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{w} \text{ et } \boldsymbol{\tau} \succeq \mathbf{0}, \quad (1.25)$$

soient respectés, où \succeq représente l'inégalité par composantes. Une seconde définition est donnée dans (56) et s'exprime comme suit : une pose donnée appartient au WCW si et seulement si

$$\text{rang}(\mathbf{W}) = n \text{ et} \quad (1.26)$$

$$\exists \{\mathbf{z} \in \mathcal{N}(\mathbf{W}) \mid \mathbf{z} \succ \mathbf{0}\}, \quad (1.27)$$

où $\mathcal{N}(\mathbf{W})$ est le noyau de \mathbf{W} et n le nombre de degrés de liberté de la plateforme. La première condition s'assure que le torseur est faisable, car si le rang de \mathbf{W} est plus petit, le torseur est infaisable même si les câbles pouvaient travailler en compression. La deuxième condition s'assure qu'il est possible de générer un torseur \mathbf{w} nul avec des tensions positives. Une autre définition utile de l'espace de travail est l'espace de travail faisable, le « Wrench Feasible Workspace » (12; 57). Ce dernier est général et permet d'obtenir d'autres espaces de travail spéciaux comme le « Static Workspace ». Le WCW est lui-même un cas spécial du WFW. Le WFW se définit comme l'ensemble des poses de l'organe effecteur terminal pour lesquelles les câbles peuvent contrebalancer tous les torseurs de forces d'un ensemble de torseurs spécifié tout en gardant les tensions dans les câbles entre un minimum et un maximum alloués. Les

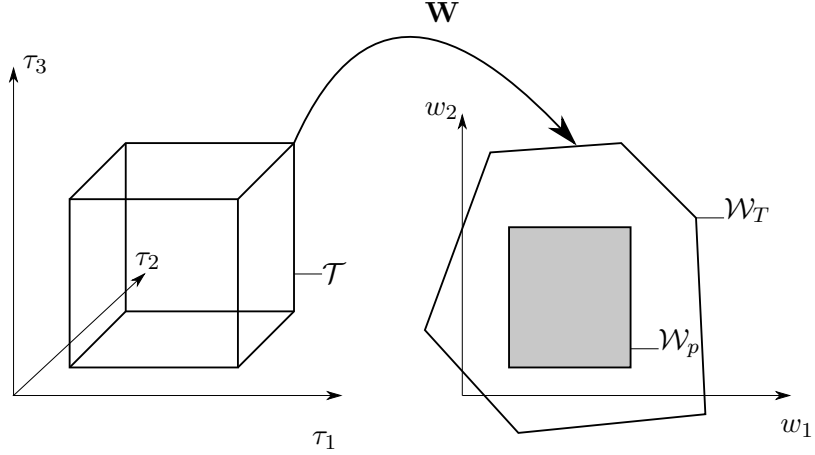


FIGURE 1.7 – Représentation géométrique du concept de l'espace de travail faisable (WFW).

conditions pour qu'une pose soit dans le WFW sont telles qu'il existe au moins un ensemble \mathcal{T} de tensions τ qui respectent

$$\mathbf{W}\tau = \mathbf{w} \quad (1.28)$$

pour tout \mathbf{w} contenu dans un ensemble \mathcal{W}_p des torseurs requis et qui respecte

$$\underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}. \quad (1.29)$$

$\underline{\tau}$ et $\bar{\tau}$ sont des vecteurs de tensions minimums et maximums respectivement dont leurs composantes sont les limites respectives de chacun des câbles. Une interprétation géométrique de ce concept est présentée dans (60) et est résumé ici à l'aide de la figure 1.7. Pour un nombre $m = 3$ câble, on trace la boîte de l'ensemble à dimension trois \mathcal{T} des tensions réalisable. On utilise ici un ensemble de torseurs requis à deux dimensions \mathcal{W}_p . Ces deux ensembles sont reliés par la transformation linéaire \mathbf{W} de l'équation 1.28. Le cube \mathcal{T} devient alors un zonotope \mathcal{W}_t dans l'espace des torseurs. La pose fait alors partie de l'espace de travail faisable si l'ensemble \mathcal{W}_p est inclus dans l'ensemble \mathcal{W}_t . Le logiciel ARACHNIS (130), qui est utilisé dans cette thèse pour tracer les espaces de travail de plusieurs mécanismes, utilise cette définition.

1.5.8 Dynamique

Le modèle dynamique d'un robot parallèle à câbles peut être très complexe si l'on considère les effets élastiques des câbles, leurs masses, la friction statique et cinématique. Pour les besoins de cette thèse, un modèle plus simple et souvent utilisé (25) est présenté. On considère seulement deux systèmes comme ayant un impact significatif sur la dynamique du mécanisme, l'organe effecteur terminal et les actionneurs (enrouleurs). Les simplifications de câbles rigides et sans masse sont conservées. La dynamique de l'effecteur peut être modélisée selon la formulation de Newton-Euler d'un corps rigide selon son centre de masse,

$$\mathbf{f}_o = \begin{bmatrix} m_o \mathbf{1}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_o \end{bmatrix} \dot{\mathbf{t}} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_o \boldsymbol{\omega}) \end{bmatrix} = \mathbf{M}\dot{\mathbf{t}} + \mathbf{C}, \quad (1.30)$$

où \mathbf{f}_o est un torseur de dimension six, et m_o et \mathbf{I}_o sont la masse et le moment d'inertie selon le centre de masse de l'organe effecteur terminal respectivement. Les matrices $\mathbf{1}_{3 \times 3}$ et $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ représente respectivement les matrices identités et nulle de dimension 3. La dynamique d'un actionneur i peut également être modélisée comme

$$J_{ai}\ddot{\theta}_{ai} + f_{vi}\dot{\theta}_{ai} + f_{si}\text{sgn}(\dot{\theta}_{ai}) = t_{ai} - R_a\tau_{ai}, \quad (1.31)$$

où J_{ai} est le moment d'inertie équivalent au niveau du tambour, t_{ai} le couple du moteur applicable au tambour, τ_{ai} la tension dans le câble à l'enrouleur, f_{vi} et f_{si} les coefficients de frictions visqueuses et sèches. La fonction signum $\text{sgn}(x)$ est définie comme

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}. \quad (1.32)$$

On peut expliciter

$$J_{ai} = J_{tambour} + \eta_a^2 J_{rotor}, \quad (1.33)$$

où $J_{tambour}$ et J_{rotor} sont les moments d'inertie du tambour et du rotor respectivement et η_a est le rapport d'engrenage. En combinant la dynamique de chacun des actionneurs 1 à m , on peut écrire le modèle sous la forme

$$\mathbf{J}_a\ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{F}_v\dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{F}_s\text{sgn}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_a) = \mathbf{t}_a - R_a\boldsymbol{\tau}_a, \quad (1.34)$$

avec

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_a &= \text{diag}([J_{a1}, \dots, J_{am}]), \\ \mathbf{F}_v &= \text{diag}([f_{v1}, \dots, f_{vm}]), \\ \mathbf{F}_s &= \text{diag}([f_{s1}, \dots, f_{sm}]), \\ \mathbf{t}_a &= [t_{a1}, \dots, t_{am}]^T, \\ \boldsymbol{\tau}_a &= [\tau_{a1}, \dots, \tau_{am}]^T. \end{aligned}$$

Pour obtenir la dynamique du système combiné, on fait l'hypothèse que la tension dans les câbles aux enrouleurs est la même que celle à l'organe effecteur terminal, ce que permet la simplification des câbles sans poids et rigide. On a donc

$$\boldsymbol{\tau}_a = \boldsymbol{\tau}. \quad (1.35)$$

Avec les équations 1.18, 1.30 et 1.34, si on considère le point de référence à l'organe effecteur terminal au centre de masse on obtient le modèle dynamique direct,

$$\mathbf{W}(\mathbf{t}_a) = R_a\mathbf{M}\dot{\mathbf{t}} + R_a\mathbf{C} + \mathbf{W}\left(\mathbf{J}_a\ddot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{F}_v\dot{\boldsymbol{\theta}}_a + \mathbf{F}_s\text{sgn}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_a)\right). \quad (1.36)$$

Chapitre 2

Étalonnage de mécanismes à câbles

Un des principaux avantages des robots à câbles est leur capacité à être reconfigurée facilement et rapidement en déplaçant leurs points d’ancrage. Il en découle donc la nécessité d’un étalonnage rapide pour pouvoir bénéficier de cet avantage. Ce chapitre est donc consacré à l’identification du modèle du robot à câbles. Modèle qui est nécessaire pour la commande du robot. Pour faire le contrôle des robots à câbles, on doit s’assurer d’avoir un modèle du robot qui représente bien le mécanisme physique que l’on désire contrôler. L’identification du modèle du robot à câbles est donc cruciale pour obtenir de bonnes performances. Dans tout système d’asservissement plus la qualité du modèle est grande, plus il est possible d’atteindre de bonnes performances. Le principal compromis étant celui qu’oppose la robustesse et la performance. En effet, en ayant un modèle de bonne qualité, il est possible de régler les contrôleurs spécialement pour le système en question et ainsi de sacrifier de la versatilité et pour obtenir de meilleures performances pour ce système. Les grandes distances à mesurer s’avèrent être l’une des difficultés principales rencontrées lors de l’identification des paramètres d’un robot à câbles. Ces distances découlent de l’un des principaux avantages des mécanismes à câbles : leur capacité à évoluer dans un grand espace de travail. Les méthodes de mesure conventionnelles précises comme les pieds à coulisse et les micromètres sont donc inutiles. Le ruban à mesurer peut être un outil d’étalonnage intéressant, mais sa précision sur de grandes distances peut laisser à désirer. Il peut tout de même fournir des estimations initiales pour plusieurs des méthodes d’optimisation qui en requièrent. Il existe deux grandes familles de méthodes permettant l’identification des paramètres du robot. La première famille utilise une instrumentation externe pour l’étalonnage des paramètres. Ces méthodes utilisant de l’instrumentation externe, comme un théodolite (151) ou des caméras (125; 31), peuvent identifier les paramètres de façon directe ou indirecte en mesurant la pose de l’organe terminal effecteur, par exemple. Ces méthodes peuvent être très précises, mais peuvent nécessiter du matériel dispendieux comme un théodolite. Elles peuvent aussi nécessiter un grand espace autour du mécanisme. L’espace nécessaire peut largement dépasser l’empreinte du mécanisme à câbles qui peut, elle aussi, être de grande dimension, ce qui peut compliquer l’installation dans certaines

conditions. Des méthodes utilisant des caméras de type VICON peuvent souffrir de cet inconvénient, par exemple. La deuxième famille de méthodes consiste à n'utiliser que les instruments de mesure intrinsèque au robot. Les encodeurs aux enrouleurs, un capteur d'efforts à l'organe effecteur terminal et des capteurs de tension dans les câbles sont des exemples d'instruments de mesure qui peuvent être déjà présents et ne nécessitent donc pas l'ajout de capteurs supplémentaires. Il n'est cependant pas toujours possible d'étalonner tous les paramètres grâce aux mesures intrinsèques. La précision de l'étalonnage dépend aussi nécessairement de la précision des appareils installés. Ce chapitre aborde initialement les paramètres du modèle que l'on cherche à identifier, soit la longueur initiale des câbles lors de la mise sous tension et la position des points d'ancrage fixes. Par la suite, une revue de littérature des principales méthodes existantes permettant l'identification de ces paramètres est présentée. Par la suite, la présentation de différentes méthodes d'auto étalonnage qui permettent l'étalonnage des différents prototypes développés pendant les travaux de cette thèse est effectuée. En effet, une méthode simple d'identification de la position des points d'ancrage est présentée, suivit d'une méthode d'identification de la longueur initiale des câbles et, finalement, une méthode permettant l'identification simultanée de la position des points d'ancrage et de la longueur initiale des câbles. Les deux dernières méthodes d'identification, celle des longueurs initiales des câbles et celle de l'identification simultanée, comportent chacune deux sections. Une présentant une méthode hors ligne et, une autre, une méthode en ligne.

2.1 Paramètres du modèle à identifier

Le modèle géométrique du robot à câbles présenté dans la section 1.5.4 possède plusieurs paramètres qui doivent être identifiés. Les paramètres principaux à identifier sont présentés dans le tableau 2.1. En plus des autres paramètres à identifier, l'utilisation d'encodeurs relatifs

Tableau 2.1 – Paramètres à identifier pour le modèle géométrique.

Paramètre	description
\mathbf{a}_i	La position du point d'ancrage du câble i sur son enrouleur.
\mathbf{r}_i	La position du point d'ancrage du câble i sur l'organe terminal effecteur dans le référentiel mobile.
$\rho_{i 0}$	La longueur initiale du câble i lorsque les encodeurs utilisés sont de type relatif.

nécessite l'identification de paramètres supplémentaires : les longueurs initiales des câbles lors de la mise en route du système. On définit la longueur initiale ρ_{i0} du $i^{\text{ème}}$ câble par l'équation

$$\rho_{i|0} = \rho_i - \Delta\rho_i. \quad (2.1)$$

La valeur lue par l'encodeur est représentée par $\Delta\rho_i$ alors que ρ_i est la longueur du câble telle que définie dans la figure 1.6. Le modèle géométrique étant relativement simple, il ne prend pas en compte plusieurs facteurs qui peuvent influencer sa qualité. Mises à part les incertitudes

d'identification des paramètres du modèle présentés dans le tableau 2.1, une liste de différentes sources d'erreurs est présentée.

- L'incertitude du diamètre des poulies sur lesquelles s'enroulent les câbles.
- La méthode d'enroulement du câble, guidée ou non guidée.
- Le chevauchement du câble dans l'enroulement.
- L'élasticité des câbles.
- La compliance des pièces mécaniques lorsque les efforts changent.
- L'interférence entre les câbles.

Une mauvaise identification des paramètres ajoutés de sources d'erreurs supplémentaires peut causer des erreurs sur la mesure de la pose. Il y aura donc un impact sur la qualité de la matrice de structure \mathbf{A} qui est utilisée dans la détermination des efforts effectués par l'organe effecteur terminal, par exemple. Ces erreurs peuvent également se répercuter sur la mesure de la longueur des câbles, ce qui peut poser problème notamment lors du contrôle en position du robot. En effet, une mauvaise mesure des longueurs des câbles peut causer un excès de tensions antagonistes ou, à l'inverse, une perte de rigidité à l'organe terminal. L'impact des erreurs de positions de ces points se fait ressentir surtout lors du contrôle en position de l'effecteur, en effet ces erreurs se reportent directement sur le calcul de longueur des câbles de l'équation 1.7. Pour les mécanismes pleinement contraints et sur actionnés, il y a toujours un conflit résiduel sur la longueur des câbles. En effet, il est possible de créer plusieurs boucles cinématiques qui seront en conflit sur les longueurs des câbles à cause d'inévitables erreurs de modèle et de mesure. La figure 2.1 présente l'effet d'une erreur sur la longueur des câbles. Les arcs de couleur rouge présentent le cas où la commande impose une longueur de câble trop grande pour la pose voulue due aux erreurs de modèle ou de mesure. On remarque dans la zone rouge qu'aucun des câbles n'atteint la longueur voulue et que sur les frontières de cette espace, il y a au moins un câble qui n'atteint pas sa longueur voulue. Le mécanisme n'est donc pas pleinement contraint dans cet espace et certains des câbles seront détendus. Les arcs de couleur bleue présentent le cas contraire où les câbles sont trop courts pour atteindre la pose voulue. Cette situation crée une zone où les câbles travaillent de façon antagoniste. L'organe effecteur terminal n'est donc pas non plus contraint dans cette zone et les tensions sont élevées. On remarque qu'il n'y a pas d'intersection entre les câbles 2 et 3, il n'existe donc pas de pose qui peut réconcilier la mesure des deux câbles. Le même phénomène existe en trois dimensions en faisant l'intersection de sphères. L'identification du modèle permet de réduire ces aires ou volumes.

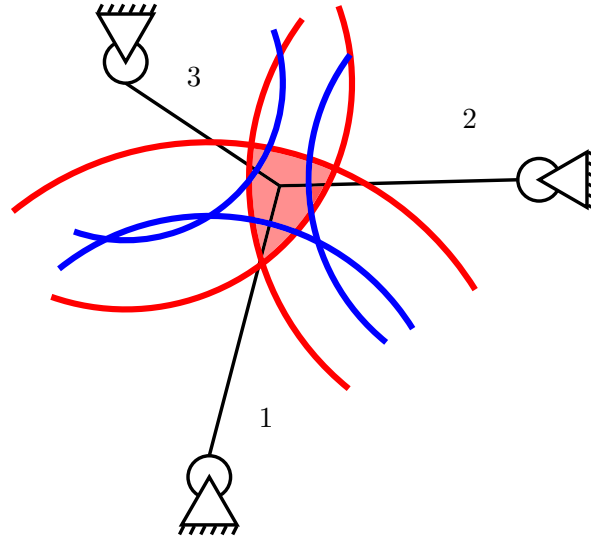


FIGURE 2.1 – Modèle géométrique d’un mécanisme sur actionné. Les arcs de cercle marquent la longueur commandée pour chacun des câbles. Les arcs en rouge présentent une sous-évaluation de la longueur du câble alors que les bleus représentent une surévaluation de la longueur des câbles.

2.2 Revue de littérature

L’identification de ces paramètres a été abordée par plusieurs auteurs. Comme l’architecture des robots à câbles est similaire à celle des mécanismes à membrures rigides comme la plateforme de Gough-Stewart, certaines méthodes d’identification peuvent être réutilisées. La méthode d’identification la plus commune est celle utilisant des mesures externes. La méthode présentée par Zhuang et coll. (151; 149) utilise une mesure de la pose de l’organe effecteur pour effectuer l’étalonnage. Avec la mesure de la pose, il est possible d’obtenir des longueurs des câbles ρ_{PGI} par le PGI avec l’équation 1.7 et de les comparer avec les longueurs de câbles $\Delta\rho$ mesurées par les encodeurs. En créant un vecteur des paramètres à identifier ξ , il est possible d’optimiser une fonction non linéaire qui minimise l’écart entre les deux mesures des longueurs de câbles prises à plusieurs poses ($1 \dots n$) différentes. Mathématiquement, on peut écrire

$$\underset{\xi}{\text{minimiser}} \quad \sum_{j=1}^n [\rho_{enc,j} - \rho_{PGI,j}(\xi)]^T [\rho_{enc,j} - \rho_{PGI,j}(\xi)]. \quad (2.2)$$

Il est possible de modéliser différemment les sources d’erreurs pour améliorer la précision en pondérant les différentes mesures à l’aide de la matrice jacobienne et faire varier l’erreur de mesure en fonction de l’élongation de l’actionneur par exemple. Cette méthode est préconisée par Jáuregui et coll. (73). Chellal et coll. (25) ont appliqué la méthode avec mesure externe de la pose prise par un appareil de type VICON[®] sur le robot INCA 6D, un mécanisme à câbles à 6 ddl. Ils ont également présenté une méthode pour identifier les paramètres dynamiques de leur modèle. Sandretto et coll. (35) proposent dans un autre article une méthode utilisant les

mathématiques des intervalles pour augmenter la précision de l'étalonnage. Chaque nouvelle pose contracte l'intervalle de confiance sur les paramètres estimés. En faisant une intersection des intervalles de confiance, les paramètres deviennent de plus en plus précis. La figure 2.2 en montre un exemple. Bien qu'efficace, la méthode utilisant des mesures externes implique des

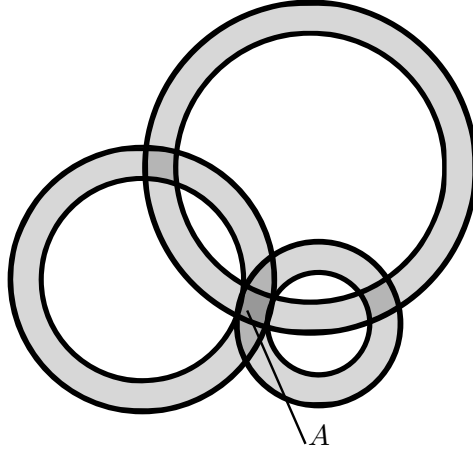


FIGURE 2.2 – Exemple d'intersection pour trouver la position d'un point d'ancrage, comme présenté par Sandretto et coll. (35).

coûts et du matériel supplémentaires. Une méthode d'auto étalonnage permettant l'identification en n'utilisant que les mesures des capteurs déjà présents est plus avantageuse dans certains cas, car celle-ci permet de briser la dépendance aux capteurs externes, elle peut produire des mesures rapides et de hautes précisions sur tout l'espace de travail, elle peut être automatisée et même servir en temps réel comme présenté dans l'article de Zhuang et coll. (150). Ici aussi, les mécanismes de type Gough-Stewart sont à la base de la méthode (81). Par contre, comme ceux-ci ne sont pas redondants, des capteurs additionnels sont souvent nécessaires pour faire un étalonnage. Pour ce faire, il est possible d'ajouter des pattes passives (116), le résiduel dans ce cas est formé des erreurs sur la longueur mesurée de chacune des pattes en choisissant une combinaison des différentes pattes restantes pour une pose par le PGD. Certains utilisent une mesure d'angle des vérins pour ajouter la redondance (150; 100), ces méthodes pourraient être appliquées grâce aux capteurs d'angles présentés dans le chapitre 3. Wampler et coll. (143) utilisent une méthode statistique pour faire l'étalonnage des paramètres. Grâce aux équations de fermeture de boucle redondantes et en exprimant les paramètres de façon explicite, ils étalonnent différents mécanismes parallèles à l'aide d'une minimisation des moindres carrés. Pour le cas spécifique des robots à câbles et principalement ceux qui sont pleinement contraints, la redondance de mesures est présente d'office. Il est donc possible de faire un auto étalonnage sans l'ajout de capteurs. Les méthodes d'auto étalonnage présentées ont comme objectif de trouver la longueur initiale des câbles et donc de déterminer la pose du robot dans son espace de travail lors de son initialisation. Borgstrom et coll. (10) présentent deux techniques d'auto étalonnage de la position initiale de l'organe effecteur terminal pour un robot à câbles plan avec effecteur ponctuel. La première repose sur des capteurs de tension dans les câbles. Diffé-

rentes distributions de tensions sont appliquées au mécanisme et permettent d'identifier une matrice de structure par l'équation 1.18. Celle-ci permet ensuite de trouver la pose initiale en trouvant celle qui correspond à la matrice de structure. La deuxième méthode repose sur des petits déplacements de l'organe terminal effecteur pour trouver la matrice de structure. Breault et coll. (14) utilisent une mesure de tension dans les câbles pour être en mesure de détecter le moment où le câble est à sa longueur minimale, c.-à-d. que le câble ne peut plus s'enrouler. Connaissant cette longueur pour chacun des câbles, il est donc possible de déterminer leurs longueurs initiales. Les capteurs de tension font donc office d'interrupteurs de fin de course. Miermeister et Pott (104) utilisent, eux, un capteur de force présent sur l'organe effecteur terminal pour faire l'étalonnage. Ils l'utilisent entre autres pour prendre en considération l'élasticité des câbles. De plus, une attention particulière est portée aux choix des poses servant à faire l'étalonnage, en effet, la sensibilité cinématique est prise en compte pour optimiser la qualité de ces choix. Sandretto (33) présente deux méthodes n'utilisant que la mesure des longueurs de câbles. Les deux méthodes basent le résiduel de la fonction d'optimisation sur le désaccord entre deux différentes mesures des longueurs de câbles, celle mesurée directement et celle obtenue par le PGI connaissant la pose. Les deux méthodes se différencient dans l'obtention de la pose : la première utilise le PGD numérique, tandis que l'autre inclut directement les poses dans le vecteur d'optimisation. La méthode incluant les poses dans le vecteur d'optimisation y est privilégiée, car elle évite certains problèmes de convergence du PGD.

2.3 Identification des positions des points d'ancrage

Les points d'ancrage A_i sont les points où les câbles sont reliés aux enrouleurs sur la structure fixe. Ces points sont souvent des œillets que l'on considère comme des joints de type rotule. Plusieurs méthodes sont disponibles pour identifier les positions de ces points d'ancrage. La première, la plus simple, est de mesurer ces positions par rapport à un point fixe dans l'espace à l'aide d'instruments de mesure tels qu'un ruban à mesurer. Ces mesures peuvent être grossières, mais seront souvent le point initial pour les algorithmes d'optimisation présentés plus loin. Des caméras deux ou trois dimensions peuvent aussi être utilisées. Pour un mécanisme plan, l'utilisation de caméras à deux dimensions peut être suffisante. Par exemple, pour un appareil photo de 12 Mégapixels, une empreinte de mécanisme de 1 m^2 , la définition permet d'obtenir une précision de l'ordre de 0.35 mm . Une précision de 1 mm est donc une précision atteignable pour un mécanisme plan d'une taille de 1 m avec un appareil photo. Avec une caméra à trois dimensions de style Kinect, une précision de l'ordre du centimètre peut-être atteinte pour un volume d'un mètre cube. Des systèmes plus dispendieux sont également disponibles pour donner une mesure directe.

2.3.1 Identification par organe terminal effecteur point

Les méthodes d'auto étalonnage sont les plus intéressantes pour les mécanismes à câbles, car elles ne nécessitent pas de matériel supplémentaire. La première méthode présentée est adaptée des travaux de Tadokoro et coll. (137) qui sont également repris dans (13). La méthode consiste à prendre les mesures des câbles à différents points d'une géométrie connue dans l'espace. Dans le cas de Tadokoro, la géométrie connue est celle d'un cube. Les auteurs reconnaissent que prendre des points les plus éloignés possible et hors d'un même plan est bénéfique pour l'étalonnage. Le nombre de conditionnement de la matrice d'étalonnage est plus proche de 1 dans ces cas, ainsi que le niveau du signal sur bruit. La base de la méthode est de poser l'extrémité d'un câble à plusieurs positions connues dans l'espace de travail et d'utiliser ensuite la longueur lue par les encodeurs pour déterminer la position des points d'ancrage. L'organe terminal effecteur est donc retiré pour permettre aux câbles d'atteindre les points définis dans l'espace sans encombre. Il est possible d'accélérer la prise de données en prenant les mesures de tous les câbles à la fois. Pour un mécanisme à câbles, il est simple d'obtenir un effecteur très proche d'un effecteur point en attachant les câbles ensemble. Cette méthode permet donc d'identifier tous les points d'ancrage en une seule acquisition.

Identification à l'aide des longueurs absolues

La première méthode revient à trouver l'intersection de sphères pour déterminer la position des points d'ancrage. Cette méthode nécessite la connaissance de la longueur absolue ρ_i du câble. Il faut donc pouvoir mesurer la longueur initiale ρ_{i0} du câble. Pour se faire, on enroule le câble jusqu'à ce que son extrémité soit à l'œillet dont la position est au point A_i . La mesure faite à cet endroit permet de déterminer la longueur initiale du câble. La mesure de la longueur absolue du câble est donc simple à obtenir pour un câble seul ou plusieurs câbles avec un organe terminal effecteur point. La figure 2.3 montre schématiquement la prise de mesure à des positions connues dans l'espace. Les sommets du prisme représentent des positions connues où l'on vient placer l'extrémité des câbles pour la mesure de leurs longueurs. Dans cet exemple, l'extrémité du câble i est placée au point C_1 pour une prise de mesure de la longueur ρ_{ij} . Les vecteurs \mathbf{a}_i définissent la position des points d'ancrage A_i . Les positions connues dans l'espace sont C_j , $j = 1 \dots p$. Ces points sont mesurés à partir du référentiel fixe O et sont représentés par les vecteurs \mathbf{c}_i . Les points C_j doivent être choisis de façon espacée pour que la matrice jacobienne de l'optimisation ait un bon conditionnement. De plus, les points ne devraient pas être coplanaires pour obtenir une solution unique. Pour des points coplanaires, il y aurait deux solutions possibles, une de chaque côté du plan. En utilisant les équations de fermeture de boucle pour représenter ρ_{ij}^2 et pour chacune des poses C_j , on obtient le système d'équations

$$\rho_{ij}^2 = (\mathbf{c}_j - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{c}_j - \mathbf{a}_i), \quad (2.3)$$

$$\rho_{ij}^2 = \mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j - 2\mathbf{c}_j^T \mathbf{a}_i + \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i. \quad (2.4)$$

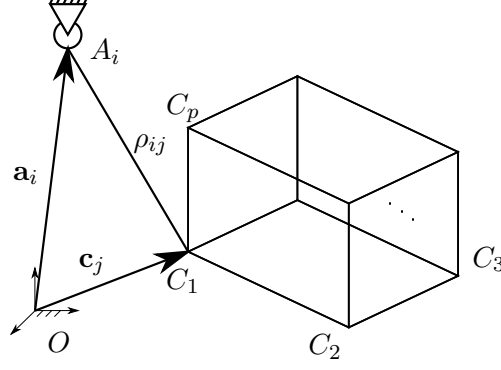


FIGURE 2.3 – Schéma pour l'étalonnage des points d'ancrage A_i .

En isolant $\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i$, on obtient :

$$\mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i = -\mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j + 2\mathbf{c}_j^T \mathbf{a}_i + \rho_{ij}^2. \quad (2.5)$$

En remplaçant l'équation 2.5 dans l'équation 2.4 en utilisant une pose différente $j \neq k$, on peut obtenir l'expression

$$\rho_{ij}^2 = \mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j - 2\mathbf{c}_j^T \mathbf{a}_i + \rho_{ik}^2 - \mathbf{c}_k^T \mathbf{c}_k + 2\mathbf{c}_k^T \mathbf{a}_i, \quad (2.6)$$

où \mathbf{a}_i apparaît linéairement. En réorganisant, on obtient l'expression linéaire

$$\rho_{ij}^2 - \rho_{ik}^2 + \mathbf{c}_k^T \mathbf{c}_k - \mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j = (2\mathbf{c}_k - 2\mathbf{c}_j)^T \mathbf{a}_i. \quad (2.7)$$

En regroupant les équations sous forme matricielle, pour $j = 1 \dots p$ avec k choisi par paire de câbles ($j = 1, k = 2$) ($j = 3, k = 4$) par exemple, on obtient le système d'équations linéaires

$$\begin{bmatrix} \rho_{i1}^2 - \rho_{i2}^2 + \mathbf{c}_2^T \mathbf{c}_2 - \mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_1 \\ \vdots \\ \rho_{ip}^2 - \rho_{ik}^2 + \mathbf{c}_k^T \mathbf{c}_k - \mathbf{c}_p^T \mathbf{c}_p \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} (\mathbf{c}_k - \mathbf{c}_1)^T \\ \vdots \\ (\mathbf{c}_k - \mathbf{c}_p)^T \end{bmatrix} \mathbf{a}_i, \quad (2.8)$$

$$\check{\rho}_i = \check{\mathbf{C}} \mathbf{a}_i. \quad (2.9)$$

Pour faire l'étalonnage, on a donc besoin de $p \geq 4$, car on utilise au moins une mesure pour briser la symétrie causée par les trois points, car ils sont, par définition, coplanaires. Bien entendu, la matrice $\check{\mathbf{C}}$ doit être inversible. Pour $p \geq 4$, on doit utiliser l'inverse généralisée tel que

$$\mathbf{a}_i = \left(\check{\mathbf{C}}^T \check{\mathbf{C}} \right)^{-1} \check{\mathbf{C}} \check{\rho}_i \quad (2.10)$$

Cette solution revient à trouver le résultat des moindres carrés. Dans ce cas, il faut que la matrice $\check{\mathbf{C}}$ soit de plein rang. Son conditionnement influencera d'autant plus la précision des points d'ancrage trouvés. Cette méthode est utilisée dans l'étalonnage pour un mécanisme implémenté au CIRRIIS, des détails sont présentés dans l'annexe B. Cette annexe est présentée comme un exemple de marche à suivre permettant de reproduire un étalonnage de ce type.

Identification à l'aide des longueurs relatives

Si les longueurs absolues des câbles ne peuvent être obtenues, il est possible d'adapter la méthode pour ne prendre que les longueurs relatives. On écrit donc dans ce cas

$$\rho_{ij} = \rho_{i|0} + \Delta\rho_{ij}. \quad (2.11)$$

En remplaçant l'équation 2.11 dans l'équation 2.6, on obtient

$$(\rho_{i|0} + \Delta\rho_{ij})^2 = \mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j - 2\mathbf{c}_j^T \mathbf{a}_i + (\rho_{i|0} + \Delta\rho_{i1})^2 - \mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_1 + 2\mathbf{c}_1^T \mathbf{a}_i. \quad (2.12)$$

En développant les expressions au carré, on peut éliminer $\rho_{i|0}^2$ des deux côtés de l'équation. En regroupant ensuite les constantes à gauche, on obtient

$$\Delta\rho_{i2}^2 - \Delta\rho_{i1}^2 + \mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j = 2 \begin{bmatrix} \Delta\rho_{i1} - \Delta\rho_{ij} & \mathbf{c}_1^T - \mathbf{c}_j^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{i|0} \\ \mathbf{a}_i \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Finalement, comme pour la section précédente, en regroupant les équations pour $j = 2 \dots p$ sous forme matricielle, on obtient le système d'équations linéaires

$$\begin{bmatrix} \Delta\rho_{i2}^2 - \Delta\rho_{i1}^2 + \mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_2^T \mathbf{c}_2 \\ \vdots \\ \Delta\rho_{ip}^2 - \Delta\rho_{i1}^2 + \mathbf{c}_1^T \mathbf{c}_1 - \mathbf{c}_p^T \mathbf{c}_p \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \Delta\rho_{i1} - \Delta\rho_{i2} & \mathbf{c}_1^T - \mathbf{c}_2^T \\ \vdots \\ \Delta\rho_{i1} - \Delta\rho_{ip} & \mathbf{c}_1^T - \mathbf{c}_p^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{i|0} \\ \mathbf{a}_i \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Pour ce cas, on doit avoir une mesure supplémentaire, $p = 5$, pour pleinement contraindre le système.

2.4 Identification de la longueur initiale des câbles

L'identification de la longueur initiale des câbles n'est nécessaire que si les encodeurs utilisés sont de type relatif, c.-à-d. qu'ils ne mesurent que la différence de longueur entre leur point de mise sous tension et le point actuel. En effet, plusieurs systèmes, comme celui dans (70), utilisent des encodeurs absolus sur les poulies ce qui permet d'éviter ce problème. Pour le cas avec des encodeurs relatifs, cette identification doit se faire à chaque mise sous tension de l'appareil. Bien qu'ils comportent des inconvénients, ces encodeurs sont souvent utilisés pour leur faible coût et leur haute résolution. Quelques solutions existent pour remédier à ces inconvénients. La première nécessite l'ajout d'interrupteurs de fin de course. Cette solution exige que les câbles soient enroulés chacun à leur tour jusqu'à l'atteinte de ces interrupteurs. Cette méthode couramment utilisée pour les mécanismes à membrures rigides s'applique moins bien aux mécanismes à câbles. Pour un grand espace de travail, il peut être long d'enrouler chacun des câbles un à un pour atteindre l'interrupteur d'autant plus si le mécanisme possède de nombreux enrouleurs. Il est aussi plus difficile de mettre un élément détectable sur les câbles. Pour ces raisons, il est rare de voir rapportée dans la littérature l'utilisation de cette méthode. Une implantation de cette méthode existe et est utilisée dans le mécanisme présenté dans (6).

Elle consiste à mettre des éléments bloqueurs sur les câbles à une distance prédéterminée de l'organe terminal effecteur. Ces bloqueurs peuvent être des billes, par exemple, et servent à coincer le câble lorsqu'il s'enroule jusqu'au point où le bloqueur est installé. Il est donc possible de détecter ce coincement et ainsi de trouver les longueurs initiales des câbles. Pour effectuer cette identification, il faut enrouler chacun des câbles tour à tour. L'ajout de bloqueurs peut avoir comme effet de réduire l'espace de travail du mécanisme. Cette méthode est donc surtout utilisée avec les mécanismes suspendus, car ceux-ci ont souvent la capacité de rétracter chacun des câbles indépendamment. Une deuxième solution est l'initialisation du mécanisme à une pose connue dans l'espace de travail. Grâce au PGI, il est possible de déterminer les longueurs initiales des câbles. Cette solution est simple et couramment utilisée. Elle a comme désavantage de contraindre la position de départ du mécanisme et sa précision est dépendante de la qualité du positionnement initiale. Cette méthode a souvent été utilisée dans le cadre du mécanisme développé dans cette thèse dans sa version à deux, trois et six dds.

2.4.1 Méthode des moindres carrés non linéaires

Lorsque les méthodes précédentes ne peuvent être utilisées, une autre approche doit être privilégiée. Une méthode d'auto étalonnage est présentée ici. La méthode est basée sur les travaux de Sandretto (33) et n'utilise donc que les mesures des longueurs fournies par les encodeurs relatifs. Cette méthode nécessite d'avoir préalablement identifié les paramètres A_i et R_i du mécanisme. Ces paramètres étant constants d'une mise sous tension à l'autre, il est justifié de les considérer comme connus. L'idée derrière la méthode consiste à recueillir les mesures des longueurs de câbles à différents points dans l'espace de travail et d'utiliser un algorithme d'optimisation pour trouver la combinaison des longueurs des câbles initiales qui réconcilie les équations de fermeture de boucle. En introduisant le concept de longueur initiale de l'équation 2.1 dans l'équation de contrainte 1.8, on obtient pour une pose (\mathbf{p}, \mathbf{Q}) pour chacun des câbles $i = 1 \dots m$

$$(\rho_{i|0} + \Delta\rho_i)^2 = \|\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i\|_2^2. \quad (2.15)$$

En prenant plusieurs poses différentes de l'espace de travail, il est possible d'obtenir la série d'équations de contrainte suivante

$$(\rho_{i|0} + \Delta\rho_{ij}) - \|\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i\|_2 = 0, \quad (2.16)$$

pour $i = 1 \dots m$ et $j = 1 \dots n$ où n est le nombre de poses prises dans l'espace de travail. On crée donc $m \times n$ équations de contraintes où \mathbf{p}_j et \mathbf{Q}_j correspondent à la pose de l'organe effecteur terminal pour chaque prise de donnée j . Les inconnues présentes dans ce système d'équations sont au nombre de $m + 3n + 9n$. Les m inconnues représentent les longueurs initiales, ce que l'on cherche à identifier. Le vecteur de position \mathbf{p}_j ajoute trois inconnues par prise de mesure et la matrice d'orientation \mathbf{Q}_j ajoute neuf inconnues par prise de mesure. Il serait possible de déterminer la pose $(\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j)$ à l'aide d'un PGD numérique qui utiliserait

l'estimé $\hat{\rho}_{ij}$, mais cette méthode s'est avérée moins robuste dans (33). L'orientation de l'organe effecteur terminal pourrait être exprimée par des angles d'Euler ou par les invariants naturels de la rotation, cependant, ces méthodes se sont avérées moins efficaces dans les simulations, même si elles réduisent les nombres de contraintes et de variables. Les inconnues ($\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j$) sont donc incluses dans le vecteur d'optimisation. Des équations de contraintes supplémentaires doivent aussi être ajoutées pour contraindre la matrice \mathbf{Q} à former une matrice orthogonale. Pour se faire, la matrice doit respecter les conditions suivantes :

$$\det(\mathbf{Q}_j) = 1, \quad (2.17a)$$

$$\mathbf{Q}_j^T \mathbf{Q}_j - \mathbf{1}_{3 \times 3} = \mathbf{0}_{3 \times 3}, \quad (2.17b)$$

où $\mathbf{1}_{3 \times 3}$ et $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ sont les matrices identité et nulle $\in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ respectivement. Il est possible d'écrire la contrainte de l'équation 2.17b sous la forme

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T \mathbf{q}_1 - 1 \\ \mathbf{q}_2^T \mathbf{q}_2 - 1 \\ \mathbf{q}_3^T \mathbf{q}_3 - 1 \\ \mathbf{q}_2^T \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_3^T \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_1^T \mathbf{q}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_6, \quad (2.18)$$

ou de façon compacte,

$$\check{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_6, \quad (2.19)$$

où les vecteurs \mathbf{q}_1 , \mathbf{q}_2 et \mathbf{q}_3 sont les rangées de la matrice \mathbf{Q} , c'est-à-dire,

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 & \mathbf{q}_2 & \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}^T. \quad (2.20)$$

Seule l'équation 2.18 sera incluse dans l'optimisation pour déterminer l'orientation de la pose. Il faut par contre s'assurer de vérifier la validité de l'équation 2.17a, car la solution trouvée pourrait être une matrice orthogonale correspondant à une réflexion. Le déterminant serait alors négatif. Comme les algorithmes utilisés se basent sur la descente de gradient et que les estimations initiales fournies ne sont pas trop éloignées de la solution, cette solution est rarement celle qui est trouvée en pratique. En effet, pour les expérimentations effectuées dans cette thèse, le déterminant calculé s'est toujours avéré être positif. Avec l'inclusion des contraintes de l'équation 2.18, on obtient un nombre d'équations de contraintes égales à $mn + 6n$. Pour obtenir un système d'équations pleinement contraint, il faut un nombre d'inconnus égaux ou inférieur au nombre d'équations de contraintes indépendantes. On a donc

$$\underbrace{m}_{\rho_{i|0}} + \underbrace{3n}_{\mathbf{p}_j} + \underbrace{9n}_{\mathbf{Q}_j} \leq \underbrace{mn}_{(2.16)} + \underbrace{6n}_{(2.18)}. \quad (2.21)$$

En isolant n on obtient

$$n \geq \frac{m}{m - 6}. \quad (2.22)$$

Pour $m = 8$ câbles, il est donc nécessaire de faire la prise de mesure au minimum à quatre endroits. Pour limiter les effets du bruit de mesure, il est bénéfique de faire plusieurs prises de mesure. Formellement, il est possible d'écrire le problème d'optimisation sous la forme

$$\underset{\rho_{i|0}, \mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j}{\text{minimiser}} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m (\rho_{i|0} + \Delta\rho_{ij} - \|\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i\|_2)^2 + \|\check{\mathbf{q}}\|_2^2 \right). \quad (2.23)$$

Ce problème non linéaire peut se résoudre numériquement à l'aide d'algorithmes comme celui de Levenberg-Marquardt, qui est une combinaison des algorithmes de descente de gradient et de Newton-Gauss (93). Un défaut de cette méthode est que le minimum atteint par l'algorithme est un minimum local, qui n'est pas nécessairement un minimum global. Il faut donc une estimation initiale de bonne qualité pour s'assurer d'avoir un bon résultat. De plus, le coût en calcul de l'algorithme progresse de façon exponentielle avec le nombre de prises de mesure. Il y a donc un compromis entre la diminution de l'influence du bruit en prenant plusieurs mesures et le temps de calcul.

Simulation

Une simulation est effectuée pour déterminer l'influence du nombre de prises de mesure sur la précision et sur le temps de calcul. Les capteurs de longueurs sont modélisés comme étant des capteurs probabilistes ayant une erreur de mesure à moyenne nulle d'une variance σ_ρ^2 . Le vecteur d'optimisation est

$$\hat{\mathbf{x}} = \left[\hat{\rho}_{|0}^T \quad \hat{\mathbf{p}}_1^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{11}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{21}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{31}^T \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{p}}_n^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{1n}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{2n}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{3n}^T \right]^T, \quad (2.24)$$

où $\hat{\rho}_{|0}$ est l'estimation du vecteur des longueurs initiales des câbles, $\hat{\mathbf{p}}_j$ est l'estimation de la pose à la j^{e} mesure, $\hat{\mathbf{q}}_{1j}$, $\hat{\mathbf{q}}_{2j}$ et $\hat{\mathbf{q}}_{3j}$ sont les vecteurs estimés des lignes de la matrice \mathbf{Q} pour la j^{e} mesure. L'initialisation de ce vecteur de mesure se fait grâce à une estimation de la pose de départ. Les longueurs initiales des câbles sont calculées à l'aide du PGI à partir de cette pose. La première pose estimée ainsi que toutes les poses subséquentes sont initialisées à l'estimation de la pose de départ. Le mécanisme simulé dispose de huit câbles et six ddl et est présenté à la figure 2.4. Le mécanisme est donc pleinement contraint, avec un niveau de redondance de $r = 2$. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent les caractéristiques géométriques du mécanisme à câbles simulé. La géométrie des points d'ancrage est un arrangement cubique dont les sommets sont les points d'ancrage. L'effecteur est plan de forme trapézoïdale. Cet arrangement est utilisé pour le mécanisme haptique à six ddl présenté dans le chapitre 6. La

Tableau 2.2 – Vecteur des positions des points d'ancrage fixes \mathbf{A}_i en mètre.

\mathbf{a}_1	\mathbf{a}_2	\mathbf{a}_3	\mathbf{a}_4	\mathbf{a}_5	\mathbf{a}_6	\mathbf{a}_7	\mathbf{a}_8
0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	1

Tableau 2.3 – Vecteur des positions des points d’ancrage sur l’organe effecteur R_i en mètre.

\mathbf{r}_1	\mathbf{r}_2	\mathbf{r}_3	\mathbf{r}_4	\mathbf{r}_5	\mathbf{r}_6	\mathbf{r}_7	\mathbf{r}_8
0	0	0	0	0	0	0	0
0.03	-0.03	-0.03	0.03	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.03	-0.03	0.03	0.03

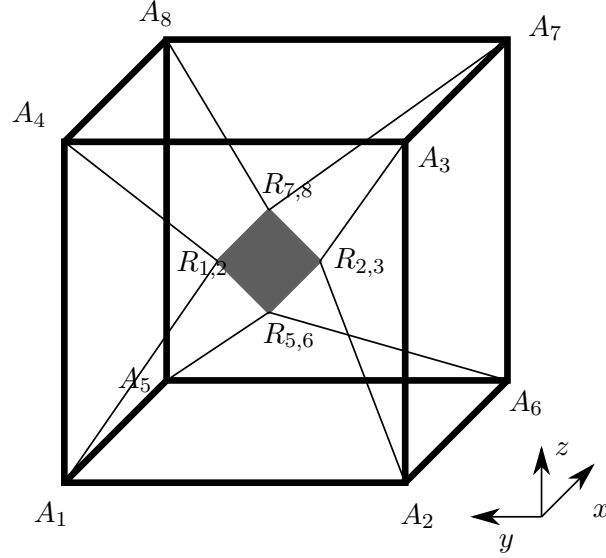


FIGURE 2.4 – Schéma du mécanisme à câble simulé.

simulation est effectuée avec un nombre grandissant n de prises de mesure. L'écart type des capteurs stochastiques est $\sigma_\rho = 0.01$ m. L'erreur sur la position de départ est de 0.1 m. Cette erreur est représentée comme la distance entre la position réelle et l'estimation initiale donnée à l'algorithme. Une trajectoire est générée à l'aide d'un modèle discret de déplacement de type bruit blanc en accélération « White noise acceleration (WNA) » (5) additionnée de bruit blanc en vitesse. Ce type de modèle a été choisi pour imiter le mouvement qu'un utilisateur serait en mesure de faire lors d'une phase d'étalonnage. Les pôles du système discret servant à générer la trajectoire sont gardés à l'intérieur du cercle unitaire pour garder la pose stable et proche de son point d'origine que l'on définit au centre de l'espace de travail. Un exemple de la trajectoire générée est présenté à la figure 2.5. Les différents points de mesure sélectionnés sont pris sur la totalité de la trajectoire espacée de façon linéaire. L'algorithme *lsqnonlin* de Matlab[®] est utilisé pour résoudre le problème décrit par l'équation 2.23. La figure 2.6 montre la valeur moyenne quadratique (RMS) de la distance entre l'effecteur réel et la pose trouvée. Elle est exprimée comme

$$e_{\mathbf{P}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \|\mathbf{p}_j - \hat{\mathbf{p}}_j\|_2^2}. \quad (2.25)$$

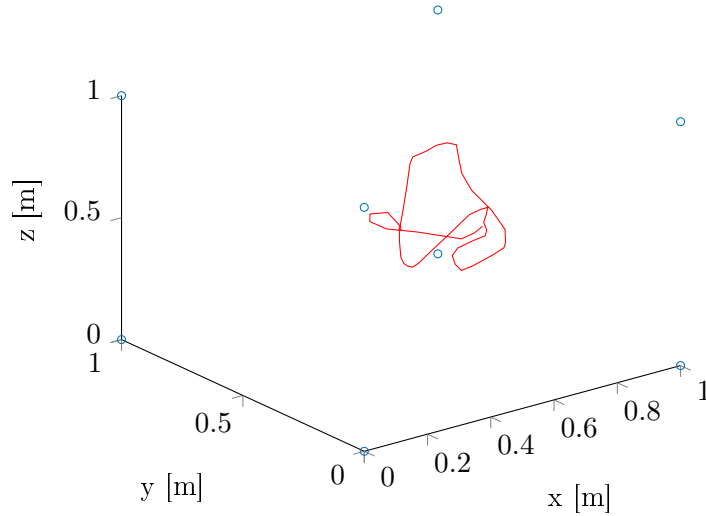


FIGURE 2.5 – Exemple d’une trajectoire simulée. Les points bleus représentent les points d’ancrage à la structure fixe.

La figure 2.7 montre la valeur quadratique moyenne de la différence entre les longueurs initiales réelles et celles trouvées. Elle est exprimée comme

$$e_{\rho_{|0}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \|\rho_{|0} - \hat{\rho}_{|0}\|_2^2}. \quad (2.26)$$

Il est possible d’observer, sur la figure 2.6, une amélioration significative de la précision de la pose face à l’estimée initiale dont l’erreur initiale était d’une distance de 0.06 m et passe sous la barre de 0.025 m sur un mécanisme d’un volume d’un mètre cube. Dès l’utilisation de 13 points de mesure, une amélioration de 60% est observable et augmente avec l’ajout de nouveaux points. La variance observée lorsque le nombre de points de mesure utilisée est faible $n < 25$ est 3 fois plus grande que celle à $n > 25$. Cette variance provient certainement des bruits de mesure dont l’effet est important lorsque peu de mesures sont prises. On observe également dans cette figure que l’erreur chute subitement à partir de $n \geq 9$. Ce phénomène est observé lors d’essais de la même simulation avec une source de bruits différente, mais la valeur où l’erreur chute subitement n’est pas nécessairement $n = 9$. L’hypothèse principale qui pourrait expliquer ce phénomène est que lors de l’amorce de l’optimisation, l’estimation initiale peut déjà se trouver dans un minimum local lorsque n est faible. En effet, avec plus de points de mesure n , la probabilité d’amorcer l’optimisation dans un minimum local est plus faible. La figure 2.7 montre un comportement similaire de l’erreur associée à l’estimation des longueurs initiales $\rho_{|0}$. L’erreur sur les longueurs initiales des câbles est donc également un bon indice de la précision de la trajectoire que l’on peut obtenir. On continuera donc à utiliser ces valeurs comme indice de la qualité pour pouvoir évaluer les mécanismes dont la trajectoire réelle n’est pas disponible. On doit noter également le coût en temps de calcul de la méthode présentée à la figure 2.8. Pour un nombre faible de points de mesure, le temps de calcul se situe aux

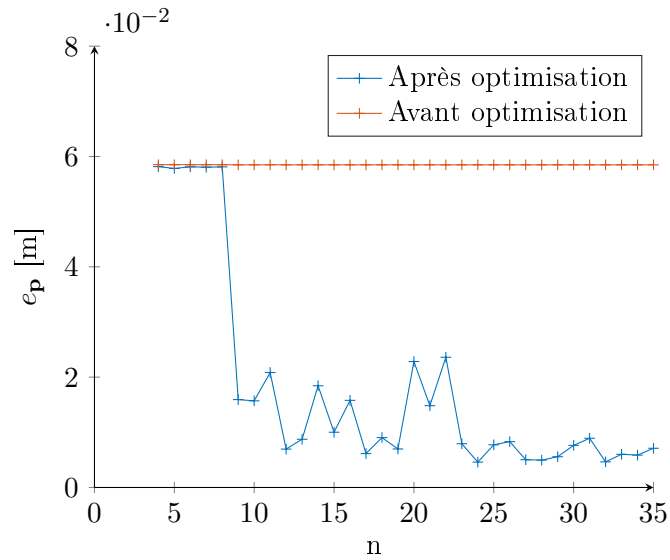


FIGURE 2.6 – Erreur quadratique moyenne sur la position de l’organe effecteur terminal en fonction du nombre de mesures prises n .

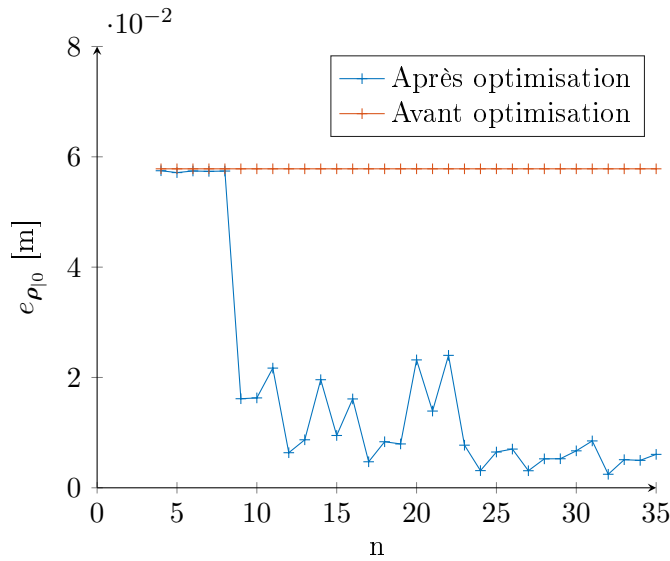


FIGURE 2.7 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction du nombre de mesures prises n .

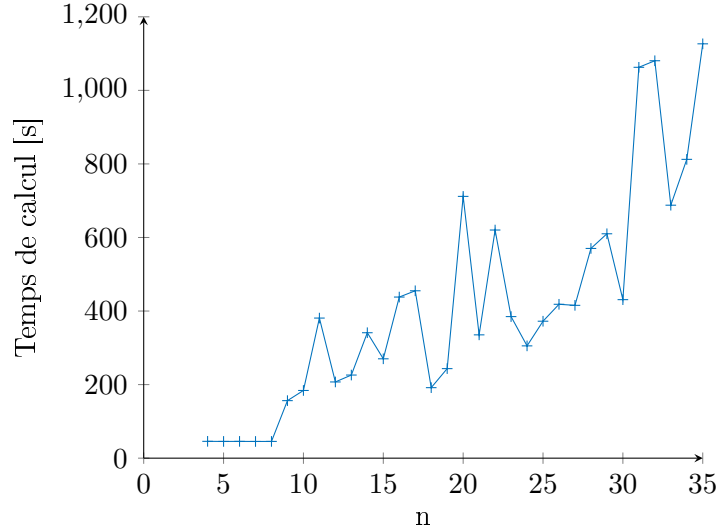


FIGURE 2.8 – Temps de calcul en fonction du nombre de mesures prises m .

alentours de 30 s, mais augmente rapidement avec le nombre de points pour atteindre plus de 20 minutes pour 35 points. Pour évaluer le rayon de convergence de l'algorithme, une évaluation a été effectuée en variant la qualité de l'estimation initiale. L'estimation initiale varie d'une estimation initiale parfaite, c.-à-d. que le l'estimé initial et la pose réelle concordent, jusqu'à une estimation initiale dont la distance avec la position réelle est de 2 m. Un bruit gaussien d'un écart type $\sigma_\rho = 0.01$ m est encore utilisé ici sur les mesures de la longueur des câbles. Le nombre de points de mesure utilisés est $n = 15$, un nombre de points qui semble suffisant pour atteindre un bon résultat comme observé sur les figures précédentes. La figure 2.9 présente les résultats observés en simulation. L'algorithme converge vers une erreur nulle jusqu'à une distance de 0.5 m entre l'estimation initiale et la valeur vraie de la pose initiale, sur un mécanisme dont la boîte capable fait 1 m³. On peut observer sur la figure que l'algorithme permet de converger vers une solution avec erreur non nulle lorsque la distance initiale est de plus de 0.5 m, mais l'erreur est tout de même inférieure à l'erreur pré optimisation. Le test de convergence précédent a été effectué en gardant l'estimation de l'orientation de l'organe effecteur terminal à sa valeur vraie. Une deuxième évaluation du rayon de convergence est effectuée en gardant, cette fois-ci, l'estimation de la position cartésienne vraie, mais en faisant varier l'estimation initiale de l'orientation pour pouvoir observer son impact. L'estimation initiale est donc variée de l'orientation sans erreur à une orientation comportant une erreur de 180°. La figure 2.10 présente les résultats. On peut remarquer qu'avec une erreur d'orientation faible l'optimisation n'a que peu d'impact, en effet le bruit gaussien simulé d'écart type de 0.005 m limite l'efficacité de l'optimisation. Par contre, dès que l'erreur initiale est de plus de 15°, l'optimisation est efficace jusqu'au point où l'on observe une baisse significative de la précision. Cette baisse correspond à un changement de solution du problème géométrique direct. L'orientation initiale ne peut donc pas être arbitraire et doit être relativement proche

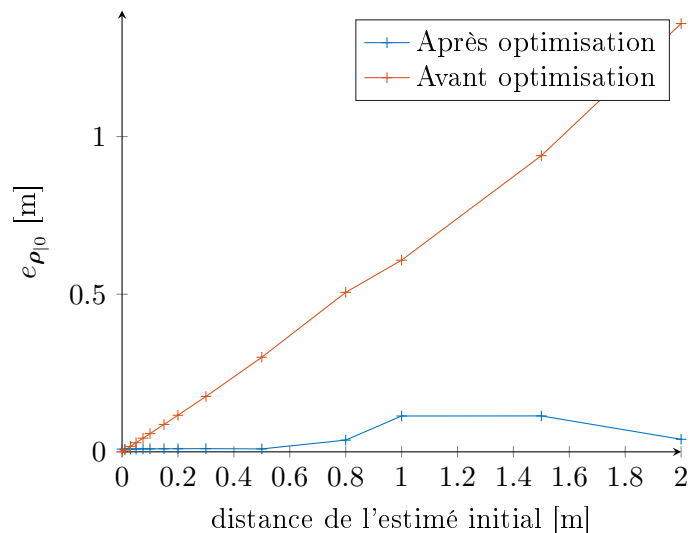


FIGURE 2.9 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimé initial.

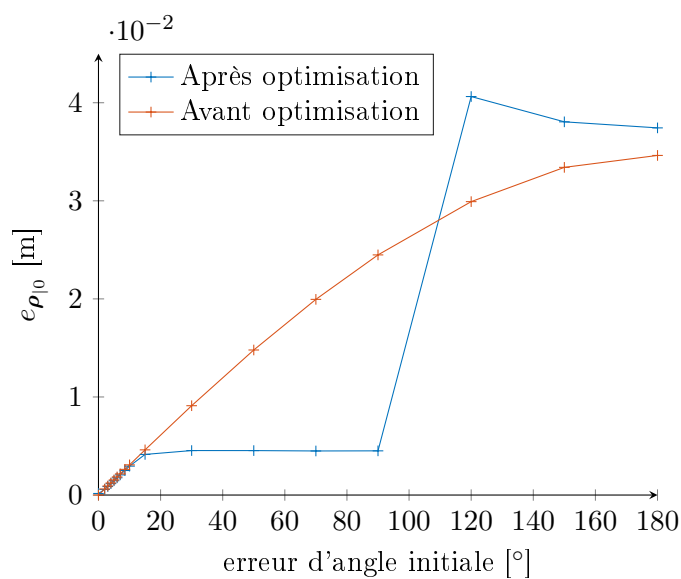


FIGURE 2.10 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale. La qualité de l'estimation initiale est mesurée en fonction de la différence d'angle entre l'estimation et la valeur vraie.

de l'estimation initiale. Il est à noter que l'architecture de l'organe effecteur terminal a un impact important sur la précision de l'estimation de son orientation, plus il est petit, plus l'orientation est sensible aux erreurs sur les longueurs initiales des câbles.

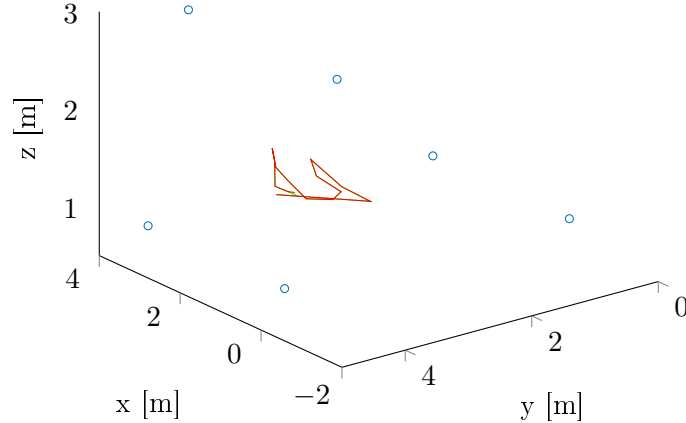


FIGURE 2.11 – Trajectoire effectuée pour l'étalonnage du mécanisme réel. Les points d'ancrage fixes du mécanisme sont également tracés comme des cercles bleus. Ils forment une géométrie qui s'apparente à un prisme rectangulaire.

Validation sur un mécanisme réel

Pour confirmer le fonctionnement de la méthode, cette dernière est implantée sur un mécanisme réel de grande taille à 6 câbles et trois ddl. Ce mécanisme possède une empreinte d'environ 6 m^3 . Des encodeurs relatifs sont utilisés pour mesurer les longueurs des câbles. Comme ce mécanisme n'est pas équipé d'instrument de mesure externe, une validation n'utilisant que des mesures intrinsèques et des longueurs prises au ruban à mesurer est effectuée. Le mécanisme est mis sous tension à une pose fixe relativement imprécise, sa position initiale étant à une distance de $\pm 0.2 \text{ m}$ de la vraie pose. Une trajectoire est ensuite effectuée manuellement dans l'espace de travail. Celle-ci est tracée dans la figure 2.11. Les longueurs de chacun des câbles sont enregistrées à une fréquence de 500 Hz. On utilise ici le résiduel du PGD numérique comme indice de la qualité de l'estimation de la longueur initiale des câbles. En effet pour chaque point de la trajectoire, le PGD numérique, comme décrit dans la section 1.5.5, peut fournir un résiduel qui peut être utilisé comme indice de cette qualité. En comparant ce résiduel entre la trajectoire calculée avec l'estimé original des longueurs initiales et la trajectoire calculée avec l'estimation après optimisation des longueurs initiales, on peut quantifier l'amélioration. En prenant la valeur quadratique moyenne du vecteur correspondant au critère pour chaque point de la trajectoire, un indice scalaire e_{rms} peut donc être obtenu. Le premier test consiste donc à vérifier s'il y a bel et bien une amélioration de cet indice. Le nombre de points de mesure n utilisés pour cette optimisation est de $n = 15$. La valeur de l'indice e_{rms} de la trajectoire originale est de 0.1533. La valeur de l'indice obtenu après l'optimisation est de 0.0033. On obtient donc une erreur 46 fois plus faible. Un second test consiste à vérifier que la convergence se fait à une solution vraisemblable et converge vers cette solution même en choisissant différentes combinaisons de points de mesure sur la trajectoire.

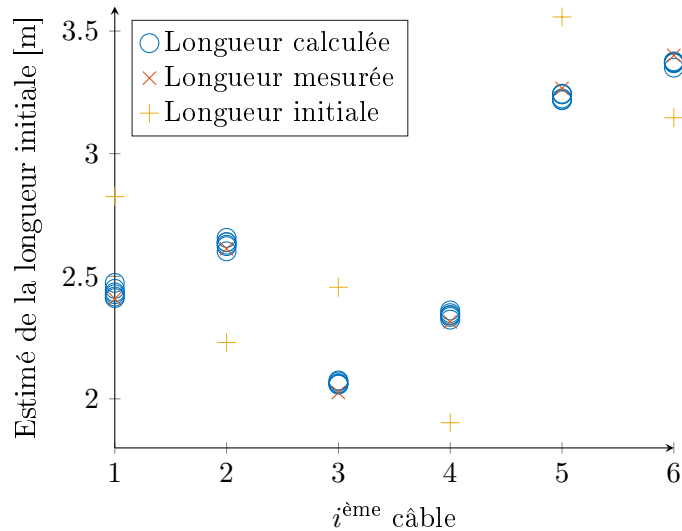


FIGURE 2.12 – Longueur initiale trouvée pour chacun des six câbles. Chaque point correspond aux longueurs trouvées avec chacune des 6 combinaisons de points de mesures utilisés. La longueur mesurée a été prise à l’aide d’un ruban à mesurer directement sur le montage. Les longueurs initiales correspondent à l’estimation disponible avant le calcul.

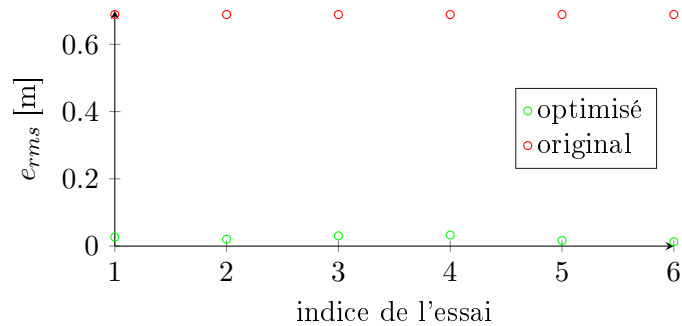


FIGURE 2.13 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la combinaison de points choisie.

Il est en effet désirable d’observer une faible variance de la solution pour différents choix de points de mesures. Pour évaluer l’impact du choix des points de prise de mesure, on utilise différentes combinaisons de points provenant de la même trajectoire. Il sera ainsi possible d’évaluer la variance sur les différentes longueurs initiales de câbles obtenues. La figure 2.12 présente les résultats de cette analyse. On peut observer une faible variance des longueurs initiales des câbles trouvées avec six différentes combinaisons de points pris sur la trajectoire. On voit aussi que la solution à laquelle l’algorithme converge est beaucoup plus près de la valeur mesurée grâce à un ruban à mesurer que de l’estimé initial utilisé par l’algorithme. Ce qui indique une convergence vers une solution vraisemblable. Une autre façon de vérifier que la convergence se fait même lors de l’utilisation de points de mesures différents, on réutilise l’indice e_{rms} dont la valeur est tracée pour chaque combinaison dans la figure 2.13. Ici aussi, l’amélioration est notable face à l’estimé original pour toutes les combinaisons de points. Pour

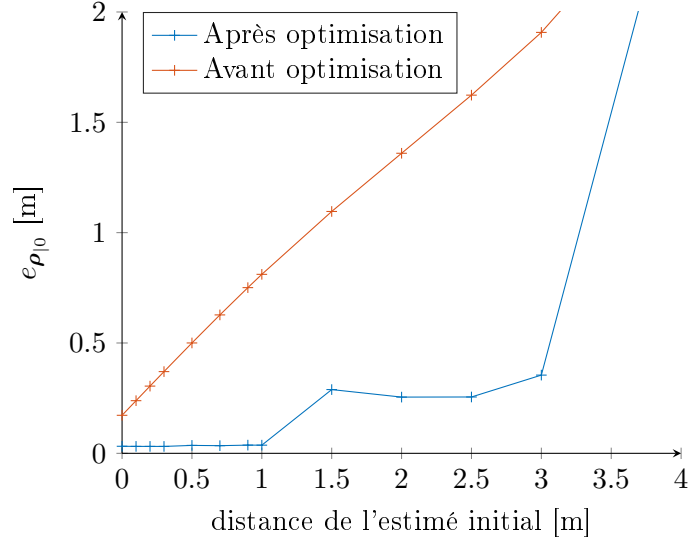


FIGURE 2.14 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l’estimation initiale.

le troisième test, on reprend le concept utilisé dans les simulations pour évaluer le rayon de convergence. Celui de la convergence en fonction de la qualité de l’estimation initiale de la pose. La qualité de l’estimation initiale de la pose est donc graduellement dégradée en éloignant celle-ci de la pose réelle. Il sera donc possible d’évaluer la robustesse de l’algorithme face aux conditions initiales. Comme la pose réelle est indisponible pour le mécanisme, l’erreur quadratique moyenne de l’équation 2.26 est utilisée. Cet indice caractérise l’erreur entre les longueurs initiales trouvées et les longueurs initiales réelles. Les longueurs initiales réelles sont prises ici aussi à l’aide d’un ruban à mesurer. La figure 2.26 présente les résultats de ce test. La dégradation de l’estimation de la pose initiale s’effectuant en l’éloignant de sa pose d’origine. On peut observer que l’algorithme converge vers la même solution sans problèmes jusqu’à près d’un mètre d’erreur sur la position initiale. Il continue à converger jusqu’à 2.5 mètres sans trop d’erreurs, mais se dégrade complètement passé ce stade.

Conclusion

On peut finalement conclure que l’optimisation améliore l’estimation initiale de façon substantielle. Grâce aux tests avec le mécanisme réel, on a pu observer une certaine robustesse face aux choix des points de mesures et face à l’estimation initiale. La robustesse observée est plus grande pour le mécanisme réel à 3 ddl que pour les simulations à 6 ddl, une conclusion attendue. Il s’agit donc d’une méthode efficace pour trouver les longueurs initiales des câbles, d’autant plus, si le nombre de ddl est faible, mais reste utilisable au moins jusqu’à 6 ddl et 8 câbles. Le nombre de points de mesure utilisés n’a plus beaucoup d’impact dépassé un seuil d’une quinzaine de points pour un mécanisme à huit câbles. La qualité de l’estimation initiale peut être faible en position, mais doit être assez précise en orientation pour que la résolution

du problème géométrique direct demeure sur la même branche de solution. Il faut donc porter une attention spéciale lors de la phase d'étalonnage à garder une orientation relativement constante et connue. Comme le temps de calcul nécessaire à la méthode est conséquent, la phase dédiée à l'étalonnage peut prendre plusieurs minutes en plus de devoir être effectuée à chaque mise sous tension du robot. La section suivante présente une méthode qui permet de faire l'identification plus rapidement et même, dans certains cas, d'éviter une phase dédiée à l'étalonnage.

2.4.2 Méthode du filtre de Kalman étendu

La méthode du filtre de Kalman se base sur les mêmes équations que la méthode des moindres carrés non linéaires, soit les équations 2.15. L'intérêt de cette méthode est sa rapidité et la possibilité de l'implanter en temps réel, ce qui permet de rendre la phase d'étalonnage transparente, ou presque, pour l'utilisateur. En effet, un déplacement de l'organe effecteur terminal par l'utilisateur au début de l'expérimentation serait suffisant pour obtenir un étalonnage. Pour ce faire, on doit adapter le filtre de Kalman étendu à l'utilisation pour un mécanisme à câbles. Étant donnée la nature du filtre de Kalman étendu, la qualité du résultat sera moindre que celle qui est obtenue par la méthode des moindres carrés non linéaires qui utiliserait le même nombre de points. Son avantage, par contre, est sa capacité à traiter un grand nombre de points rapidement. De plus, un modèle de déplacement peut y être ajouté pour améliorer la fusion. Le filtre de Kalman étendu a comme inconvénient qu'il n'y a pas de garantie de convergence. Un algorithme de surveillance devrait être employé pour assurer une qualité minimum des estimations obtenues. Les équations générales d'un système non linéaire à variables d'états sous forme discrète sont

$$\mathbf{x}_{|k+1} = f(\mathbf{x}_{|k}, \mathbf{u}_{|k}) + \mathbf{v}_{|k} \quad (2.27a)$$

$$\mathbf{y}_{|k} = h(\mathbf{x}_{|k}) + \mathbf{w}_{|k} \quad (2.27b)$$

où $\mathbf{x}_{|k}$ représente le vecteur des états au pas de temps k , $\mathbf{y}_{|k}$, les mesures, $\mathbf{u}_{|k}$, les entrées de commandes, qui sont nulles dans le cas présent, et $f(\cdot)$ et $h(\cdot)$ sont les fonctions de progression des états et d'observation, respectivement. Les vecteurs $\mathbf{v}_{|k}$ et $\mathbf{w}_{|k}$ représentent les bruits de procédés et de mesures respectivement. Dans le cas du mécanisme à câbles auto étalonné, l'équation d'observation relie les états aux longueurs de câbles et provient donc de l'équation 2.15. Il est aussi possible d'ajouter de nouvelles équations d'observation à mesure qu'on ajoute des capteurs au robot comme il en est question au chapitre 3. Les états du système sont définis comme étant

$$\mathbf{x}_{|k} = \left[\ddot{\mathbf{p}}_{|k}^T \quad \dot{\mathbf{p}}_{|k}^T \quad \mathbf{p}_{|k}^T \quad \boldsymbol{\alpha}_{x|k}^T \quad \boldsymbol{\omega}_{x|k}^T \quad \mathbf{q}_{|k} \quad \boldsymbol{\rho}_{|0}^T \right]^T, \quad (2.28)$$

avec

$$\mathbf{p}_{|k} = \begin{bmatrix} p_x & p_y & p_z \end{bmatrix}_k^T, \quad \dot{\mathbf{p}}_{|k} = \begin{bmatrix} \dot{p}_x & \dot{p}_y & \dot{p}_z \end{bmatrix}_k^T, \quad \ddot{\mathbf{p}}_{|k} = \begin{bmatrix} \ddot{p}_x & \ddot{p}_y & \ddot{p}_z \end{bmatrix}_k^T, \quad (2.29)$$

$$\mathbf{q}_{|k} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T & \mathbf{q}_2^T & \mathbf{q}_3^T \end{bmatrix}_k^T, \quad (2.30)$$

$\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\omega}$ étant les vecteurs d'accélération angulaire et de vitesse angulaire respectivement, \mathbf{q} étant un vecteur colonne représentant les rangées de la matrice de rotation \mathbf{Q} comme définie dans l'équation 2.20 et $\boldsymbol{\rho}_{|0}$ étant le vecteur des longueurs initiales des câbles.

Modèle du procédé

La fonction de progression des états, elle, doit décrire la cinématique du mouvement. Un modèle discret d'accélération « Discrete Wiener Process Acceleration Model » (5) peut être utilisé pour décrire le déplacement de l'organe terminal effecteur lorsqu'il est manipulé par l'utilisateur. Ce modèle considère un bruit blanc sur la dérivée de l'accélération ce qui en fait un modèle de troisième ordre. Cette information est utile pour augmenter la qualité du filtre. On modélise, avec la méthode décrite dans (5), l'évolution des états liés aux déplacements cartésiens

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_{|k+1} \\ \dot{\mathbf{p}}_{|k+1} \\ \ddot{\mathbf{p}}_{|k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{|k} \\ \dot{\mathbf{p}}_{|k} \\ \ddot{\mathbf{p}}_{|k} \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma}_1 v_{p|k}, \quad (2.31)$$

où

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{3 \times 3} & \Delta t \mathbf{1}_{3 \times 3} & \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{1}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{1}_{3 \times 3} & \Delta t \mathbf{1}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{1}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{1}_3^T \\ \Delta t \mathbf{1}_3^T \\ \mathbf{1}_3^T \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

et $v_{|k}$ est le bruit de procédé sur un pas de temps, $\mathbf{1}_{3 \times 3}$ est la matrice identité 3×3 , $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ est la matrice zéro 3×3 et $\mathbf{1}_3 = [1 \ 1 \ 1]^T$. Dans ce cas-ci, le bruit est modélisé comme une accélération constante sur la période de temps et non corrélé d'un pas de temps à l'autre. Le bruit $v_{p|k}$ est un bruit blanc gaussien à moyenne nulle d'une variance σ_{vp}^2 . Il est ainsi possible de définir la matrice de covariance du bruit de procédé par

$$\mathbf{C}_{vp} = E(v_p v_p^T) = \mathbf{\Gamma}_1 \sigma_{vp}^2 \mathbf{\Gamma}_1^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \Delta t^4 \mathbf{1} & \frac{1}{2} \Delta t^3 \mathbf{1} & \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{1} \\ \frac{1}{2} \Delta t^3 \mathbf{1} & \Delta t^2 \mathbf{1} & \Delta t \mathbf{1} \\ \frac{1}{2} \Delta t^2 \mathbf{1} & \Delta t \mathbf{1} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \sigma_{vp}^2. \quad (2.33)$$

Le modèle présenté jusqu'ici tient compte des déplacements cartésiens de l'effecteur. Pour un système à six ddl on doit aussi prendre en compte les déplacements en orientation du mécanisme. Pour ce faire, on modélise les déplacements en orientation d'une façon similaire à celle qui est présentée dans la thèse de He (64). On présume ici que l'utilisateur impose le même type de mouvement en orientation qu'en position. On peut donc modéliser le système avec du bruit d'une distribution normale à la dérivée de l'accélération, méthode qui semble appropriée et fonctionnelle dans (64). En reprenant ce développement, on exprime l'accélération angulaire de l'organe terminal effecteur comme

$$\boldsymbol{\alpha} = \dot{\boldsymbol{\omega}}. \quad (2.34)$$

Comme le modèle de déplacement consiste en un modèle où l'accélération angulaire est constante pendant un pas de temps et qu'un bruit blanc gaussien y est ajouté à chaque pas de temps,

on peut écrire

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{x|k+1} \\ \boldsymbol{\omega}_{x|k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_2 \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{x|k} \\ \boldsymbol{\omega}_{x|k} \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma}_2 v_{o|k} \quad (2.35)$$

où

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1}\Delta t & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

L'expression de la matrice de covariance devient

$$\mathbf{C}_{v_o} = E(v_o v_o^T) = \mathbf{\Gamma}_2 \sigma_{v_o}^2 \mathbf{\Gamma}_2^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}\Delta t^4 \mathbf{1} & \frac{1}{2}\Delta t^3 \mathbf{1} \\ \frac{1}{2}\Delta t^3 \mathbf{1} & \Delta t^2 \mathbf{1} \end{bmatrix} \sigma_{v_o}^2. \quad (2.37)$$

En faisant le choix d'exprimer l'orientation de l'organe terminal effecteur par la matrice de rotation \mathbf{Q} , on doit lier les vitesses angulaires à cette dernière par

$$\boldsymbol{\Omega} \equiv \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{Q}^T, \quad (2.38)$$

où $\boldsymbol{\Omega}$ est la matrice de produit vectoriel de $\boldsymbol{\omega}$. On définit également les lignes de la matrice \mathbf{Q} comme dans l'équation 2.20. On isole $\dot{\mathbf{Q}}$ en exploitant l'orthogonalité des matrices de rotation pour obtenir

$$\dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\Omega} \mathbf{Q}. \quad (2.39)$$

En exprimant la matrice de vitesse angulaire dans le référentiel mobile on obtient

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{Q} [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}} \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{Q} [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}, \quad (2.40)$$

et

$$\dot{\mathbf{Q}}^T = [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \mathbf{Q}^T, \quad (2.41)$$

alors

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 & \dot{\mathbf{q}}_2 & \dot{\mathbf{q}}_3 \end{bmatrix} = [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 & \mathbf{q}_2 & \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Pour mettre sous la forme d'un système à variables d'états on met sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{q}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

Il est ensuite possible de transformer l'équation pour un système à variables d'état discret

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1|k+1} \\ \mathbf{q}_{2|k+1} \\ \mathbf{q}_{3|k+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_3 \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1|k} \\ \mathbf{q}_{2|k} \\ \mathbf{q}_{3|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \Delta t & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \Delta t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}^T \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1|k} \\ \mathbf{q}_{2|k} \\ \mathbf{q}_{3|k} \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

Bien que l'équation 2.44 apparaisse linéaire, elle ne l'est pas dans l'expression globale du système d'état, car $[\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}}$ dépend de $\boldsymbol{\omega}$. Pour utiliser le filtre de Kalman étendu, il est donc

nécessaire de calculer sa dérivée partielle

$$\frac{\partial f_3}{\partial \mathbf{x}_{2,3}}(\mathbf{x}_{2,3}) = \mathbf{F}'_3 = \begin{bmatrix} -\Delta t \mathbf{pcm}(\mathbf{q}_{1|k}) & \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}|k}^T \Delta t & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\Delta t \mathbf{pcm}(\mathbf{q}_{2|k}) & \mathbf{0} & \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}|k}^T \Delta t & \mathbf{0} \\ -\Delta t \mathbf{pcm}(\mathbf{q}_{3|k}) & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} + [\boldsymbol{\Omega}]_{\mathcal{D}|k}^T \Delta t \end{bmatrix}, \quad (2.45)$$

avec

$$\mathbf{x}_{2,3} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{x|k}^T & \boldsymbol{\omega}_{x|k}^T & \mathbf{q}_{|k}^T & \boldsymbol{\rho}_{|0}^T \end{bmatrix}^T, \quad (2.46)$$

où \mathbf{pcm} est le produit croisé matriciel du vecteur. Comme ce système est linéarisé, il se peut que la matrice de rotation qui est définie par ses colonnes \mathbf{q}_1 , \mathbf{q}_2 et \mathbf{q}_3 perde son orthogonalité. Un mécanisme pour contraindre cette dernière doit donc être implanté. Les équations d'observation se chargeront de cette tâche plus loin. Le modèle du procédé maintenant développé sera donc utilisé dans le filtre de Kalman étendu. Un dernier point à ajouter au procédé est celui des longueurs initiales des câbles ; l'état que l'on désire observer. On considérera ces longueurs constantes entre chaque pas, car celles-ci ne changent pas pendant toute la durée de la mise sous tension du mécanisme. On peut maintenant écrire les équations complètes du procédé du système à variable d'états,

$$\mathbf{x}_{|k+1} = f(\mathbf{x}_{|k}) + \mathbf{v}_{|k} = \mathbf{F}\mathbf{x}_{|k} + \boldsymbol{\Gamma} \begin{bmatrix} v_{p|k} & v_{o|k} \end{bmatrix}^T, \quad (2.47)$$

avec

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Gamma}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Gamma}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

La dérivée partielle suivante est également nécessaire pour le filtre :

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}'_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

Fonction d'observation

La deuxième partie du système à variables d'état est constituée des équations d'observation. Dans le cas du mécanisme à étalonner, ces équations correspondent aux équations de fermeture de boucles 2.16 et à des mesures virtuelles qui servent à contraindre la matrice de rotation à une matrice orthogonale comme dans la section 2.4.1. On définit ainsi pour chacun des câbles i une mesure

$$\Delta \rho_{i|k} = y_{\rho_{i|k}} = \left((\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i) \right)^{\frac{1}{2}} - \rho_{i|0} + w_{\rho_{i|k}}, \quad (2.50)$$

avec $w_{\rho_i|k}$ le bruit de mesure pour le i^e câble au pas de temps k . Pour contraindre les vecteurs représentant la matrice de rotation \mathbf{Q} à être orthogonaux, on ajoute l'équation 2.18 aux équations d'observation en créant une mesure virtuelle nulle

$$\mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k} = \mathbf{0}_6 = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1|k}^T \mathbf{q}_{1|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{2|k}^T \mathbf{q}_{2|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{3|k}^T \mathbf{q}_{3|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{2|k}^T \mathbf{q}_{3|k} \\ \mathbf{q}_{3|k}^T \mathbf{q}_{1|k} \\ \mathbf{q}_{1|k}^T \mathbf{q}_{2|k} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_{\mathbf{Q}|k}, \quad (2.51)$$

avec $\mathbf{w}_{\mathbf{Q}|k}$ le vecteur de bruit de mesure qui est virtuel et permet de légers écarts face à la mesure virtuelle nulle. Ceci empêche les singularités dans les calculs. On obtient finalement l'expression de la fonction d'observation

$$\mathbf{y}_{|k} = h(\mathbf{x}_{|k}) + \mathbf{w}_{|k} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} y_{\rho_1|k} \\ \vdots \\ y_{\rho_m|k} \\ \mathbf{0}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left((\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_1 - \mathbf{a}_1)^T (\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i) \right)^{\frac{1}{2}} - \rho_{1|0} \\ \vdots \\ \left((\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_m - \mathbf{a}_m) \right)^{\frac{1}{2}} - \rho_{i|0} \\ \mathbf{q}_{1|k}^T \mathbf{q}_{1|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{2|k}^T \mathbf{q}_{2|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{3|k}^T \mathbf{q}_{3|k} - 1 \\ \mathbf{q}_{2|k}^T \mathbf{q}_{3|k} \\ \mathbf{q}_{3|k}^T \mathbf{q}_{1|k} \\ \mathbf{q}_{1|k}^T \mathbf{q}_{2|k} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_{|k}. \quad (2.53)$$

Comme pour l'équation du procédé, l'équation d'observation n'est pas linéaire. On doit donc définir la dérivée partielle $\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}}$. Comme cette dérivée est complexe, on la subdivise. On a ainsi pour les dérivées partielles de la mesure de la longueur des câbles,

$$\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} = \frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} = \mathbf{0}_3^T, \quad (2.54)$$

et si on considère $\dot{\rho}_i \equiv \partial \rho_i$ et $\dot{\mathbf{p}} \equiv \partial \mathbf{p}$, on a de l'équation 1.10

$$\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \mathbf{p}} = \rho_{i|k}^{-1} (\mathbf{p}_{|k} + \mathbf{Q}_{|k} \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i)^T, \quad (2.55)$$

On a aussi

$$\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \boldsymbol{\alpha}} = \frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \boldsymbol{\omega}} = \mathbf{0}_3^T. \quad (2.56)$$

Pour obtenir $\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \mathbf{q}}$, on utilise l'équation de fermeture de boucle écrite sous la forme

$$\rho_i^2 = (\mathbf{p} + \mathbf{R}_i \mathbf{q} - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{R}_i \mathbf{q} - \mathbf{a}_i), \quad (2.57)$$

où

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_i^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{r}_i^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{r}_i^T \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

De cette équation il est donc simple d'obtenir

$$\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \mathbf{q}} = \rho_{i|k}^{-1} (\mathbf{p} + \mathbf{R}_i \mathbf{q} - \mathbf{a}_i)^T \mathbf{R}_i. \quad (2.59)$$

Finalement les dernières dérivées partielles de la mesure de la longueur des câbles sont

$$\frac{\partial \rho_{i|k}}{\partial \rho_{j|0}} = \begin{cases} -1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}. \quad (2.60)$$

On obtient également pour les dérivées partielles correspondant aux mesures virtuelles de l'orthogonalité de la matrice \mathbf{Q} ,

$$\frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \mathbf{q}_{|k}} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{q}_{1|k} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{q}_{3|k} & \mathbf{q}_{2|k} \\ \mathbf{0}_3 & 2\mathbf{q}_{2|k} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{q}_{3|k} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{q}_{1|k} \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & 2\mathbf{q}_{3|k} & \mathbf{q}_{2|k} & \mathbf{q}_{1|k} & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}^T, \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \ddot{\mathbf{p}}} = \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} = \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \alpha} = \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \omega} = \mathbf{0}_{6 \times 3} \quad (2.62)$$

et

$$\frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \rho_{|0}} = \mathbf{0}_{6 \times m} \quad (2.63)$$

La totalité des dérivées partielles étant calculée, on peut générer la matrice suivante

$$\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \ddot{\mathbf{p}}} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \alpha} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \omega} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial \rho_{|k}}{\partial \rho_{|0}} \\ \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \ddot{\mathbf{p}}} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \dot{\mathbf{p}}} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \mathbf{p}} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \alpha} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \omega} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \mathbf{q}} & \frac{\partial \mathbf{y}_{\mathbf{Q}|k}}{\partial \rho_{|0}} \end{bmatrix}. \quad (2.64)$$

La matrice de covariance du bruit de mesure doit aussi être décrite pour l'utiliser dans le filtre. On considère, dans ce cas-ci, les bruits sur les mesures comme indépendants. La matrice de covariance est donc diagonale. On peut l'exprimer comme

$$\mathbf{C}_w = E(\mathbf{w}\mathbf{w}^T) = \text{diag}(\boldsymbol{\sigma}_w^2), \quad (2.65)$$

où $\boldsymbol{\sigma}_w^2$ est le vecteur des variances du bruit de chaque mesure. Bien que les bruits sur la mesure des longueurs de câbles ne soient pas réellement gaussiens, dû à l'utilisation d'encodeurs rotatifs, cette approximation permet de les utiliser facilement dans le filtre de Kalman étendu. Comme expliqué plus haut, un bruit de mesure gaussien est ajouté à la mesure virtuelle de l'orthogonalité de la matrice de rotation pour permettre au filtre de fonctionner. Les équations définissant le filtre sont maintenant toutes connues, incluant les matrices de covariance des bruits de procédé et d'observation. Une implantation standard du filtre de Kalman étendu

peut donc être utilisée pour faire l’observation des longueurs initiales des câbles. Le seul choix restant est celui des estimations initiales pour les états $\hat{\mathbf{x}}_0$ et la matrice de confiance initiale sur ces états \mathbf{P}_0 . Cette matrice peut être ajustée pour modifier le comportement initial du filtre. Plus les valeurs sur sa diagonale seront grandes plus le filtre ajustera les états observés rapidement. Une convergence plus rapide est alors possible, mais la possibilité de divergence s’en trouve augmentée. L’utilisation des meilleures données disponibles de longueurs initiales des câbles et de la pose permettra d’améliorer les probabilités de converger vers la solution réelle.

Simulation

Pour valider la méthode, on effectue la simulation d’un mécanisme pleinement contraint à huit câbles et six ddl, le même que celui qui est utilisé avec la méthode des moindres carrés non linéaires de la section 2.4.1. Les points d’ancrage des câbles sur l’effecteur et sur l’organe terminal effecteur sont donc les mêmes. L’avantage de la méthode est qu’elle peut utiliser tous les points acquis. Il n’est donc pas nécessaire de trouver un nombre de points de mesure optimal qui ferait un compromis entre la rapidité du calcul et la qualité de l’estimation. En utilisant la même trajectoire que celle qui est utilisée dans la simulation de la méthode des moindres carrés non linéaire (figure 2.5), il sera possible de comparer les résultats des deux méthodes. Un bruit gaussien d’un écart type $\sigma_\rho = 0.005$ m est utilisé ici sur les mesures des longueurs des câbles. Du fait que la méthode fait son calcul en ligne, il est possible de tracer l’évolution des états dans le temps. La figure 2.15 montre l’évolution de l’estimation des longueurs initiales des câbles. Il est possible d’y voir que les états convergent tous vers leurs vraies valeurs, bien que la progression ne soit pas toujours monotone. On peut y voir des améliorations de 80% sur certaines mesures. Un résiduel demeure toujours après 5000 points que l’on peut attribuer au bruit de mesure, qui est tout de même important. Un avantage de la méthode est que certains des états observés représentent la pose de l’organe terminal effecteur. On obtient donc « gratuitement » la solution d’un PGD numérique lors de l’utilisation en temps réel, contrairement à la méthode des moindres carrés qui donne la solution au PGD seulement lors de la phase d’étalonnage. On peut également tracer la progression de la pose et la comparer à la pose réelle, ce qui est présenté à la figure 2.16. On aperçoit l’erreur initiale sur la position au temps zéro et une convergence vers la vraie pose à mesure que les points de mesures sont pris. Les données sont ainsi filtrées par le modèle de progression des états qui a été défini précédemment. Il serait également possible de lire les états de vitesse et d’accélération qui sont observés et de les intégrer au système de contrôle. En ce qui concerne la convergence de l’algorithme, la même méthode est appliquée que dans la section précédente. Une évaluation est effectuée en variant la qualité de l’estimation initiale. Cette estimation initiale varie d’une valeur initiale parfaite, c.-à-d. que l’estimation initiale et la pose réelle concordent, jusqu’à une estimation initiale dont la distance avec la position réelle est de 0.6 m. La figure 2.17 présente les résultats observés en simulation. Il est possible d’observer qu’en présence de faibles erreurs

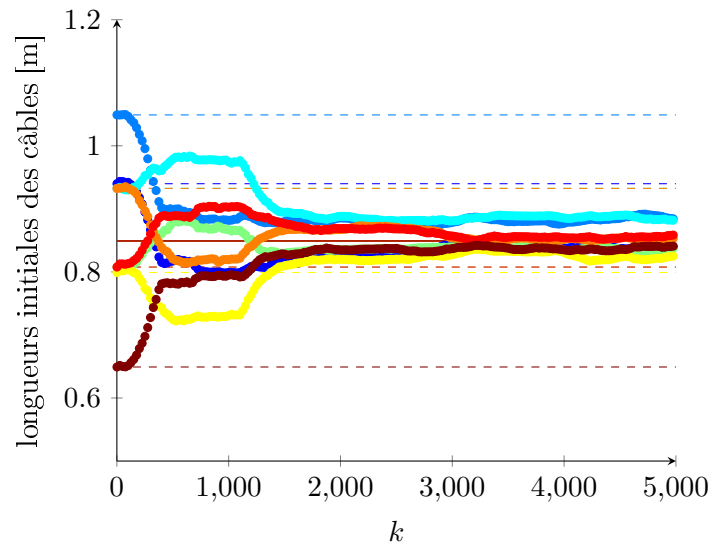


FIGURE 2.15 – Progression des estimations des longueurs initiales des câbles en fonction du nombre de points acquis. Les lignes pointillées représentent les estimations initiales et la ligne pleine, la longueur réelle.

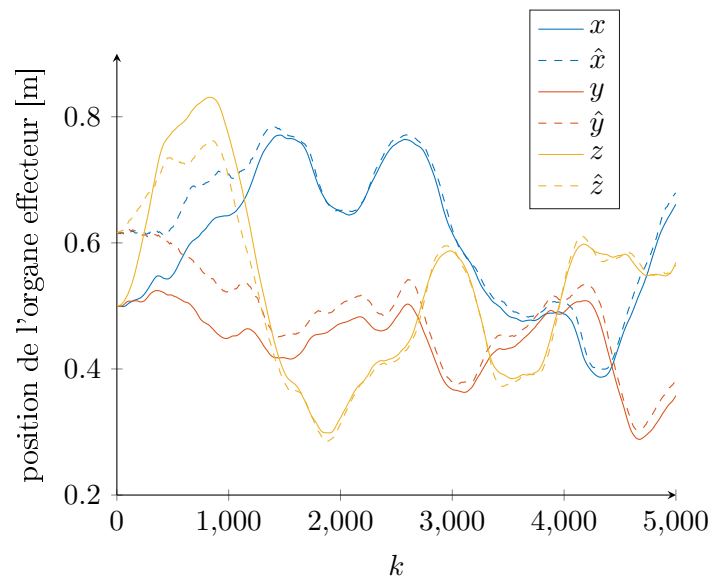


FIGURE 2.16 – Progression de l'estimation de la pose en fonction du nombre de points acquis

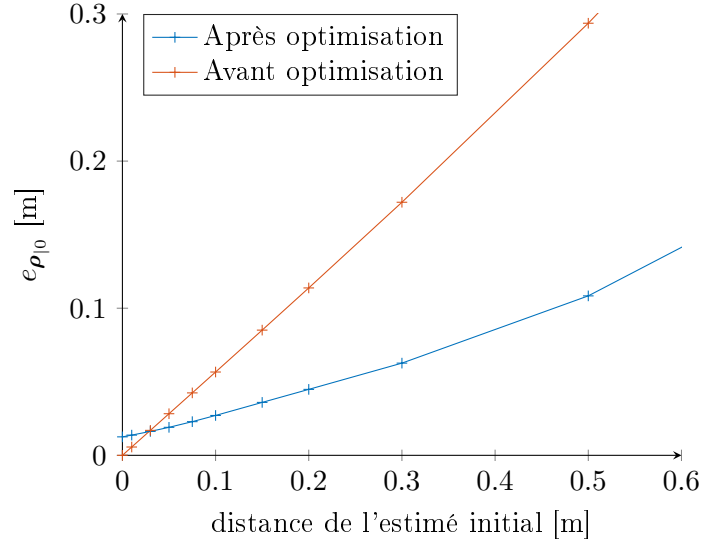


FIGURE 2.17 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimation initiale.

d'initialisation, l'algorithme converge vers une solution moins bonne que l'estimation initiale, dû au bruit de mesure. Dès que l'erreur sur l'estimation initiale dépasse quelques centimètres, l'algorithme devient bénéfique. L'algorithme converge bien au moins jusqu'à une distance de 0.6 m entre l'estimé initial et la valeur vraie de la pose initiale, sur un mécanisme dont la boîte capable fait 1 m³. La performance observée est également moins bonne qu'avec la méthode des moindres carrés non linéaires. Le test de convergence précédent a été effectué en gardant l'estimation de l'orientation de l'organe effecteur terminal à sa valeur vraie. Le prochain test est effectué en gardant l'estimation de la position à sa valeur vraie, mais en faisant varier celui de l'orientation pour observer son impact. L'estimé initial est donc écarté de l'orientation vraie par des rotations allant jusqu'à 180°. La figure 2.18 présente les résultats. Le filtre n'est pas très robuste face au changement d'orientation de la plateforme. En effet, comme pour l'erreur cartésienne, le filtre donne un moins bon estimé que l'estimé initial. Par contre, lorsque l'erreur d'orientation devient plus grande le filtre garde la même erreur initiale. On peut donc en conclure que le filtre n'est pas en mesure de corriger les erreurs sur l'estimation en orientation. Pour utiliser cette méthode, les changements d'orientation de l'organe effecteur terminal doivent être limités ou bien mesurés d'une façon tierce pour obtenir de bons résultats.

Validation sur un mécanisme réel

Comme lors de la validation de la méthode des moindres carrés, la méthode utilisant le filtre de Kalman étendu est validée à l'aide d'un mécanisme réel. Les données utilisées sont les mêmes que celles de la validation sur un mécanisme réel de la section 2.4.1. Les longueurs de câbles du mécanisme à trois ddl translationnel sont donc acquises à une fréquence de 500

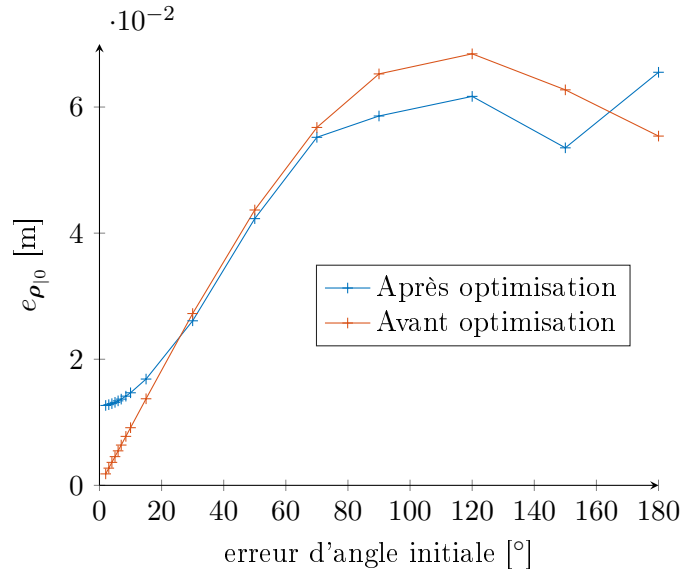


FIGURE 2.18 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l’estimation initiale. Cette qualité est dégradée progressivement en décalant l’orientation par rapport à l’axe des x de l’angle indiqué sur l’abscisse.

Hz et sont directement traitées par le filtre de Kalman étendu. On retrace donc l’équivalent de la figure 2.15, mais pour le mécanisme réel. La figure 2.19 présente donc l’évolution des longueurs initiales des câbles en fonction du pas de temps. L’estimé de la position initiale se trouvant à une distance d’environ 30 cm de la position réelle, on observe que les longueurs initiales convergent vers celles qui ont été mesurées au ruban, un bon indice de la convergence vers la solution à erreur nulle. On observe en moyenne une amélioration d’environ 80% sur les longueurs initiales après un déplacement d’une vingtaine de secondes ($k = 2 \cdot 10^4$).

Conclusion

On conclut donc avec les simulations que le filtre de Kalman est capable d’observer les états correspondant aux longueurs initiales d’un mécanisme disposant de quatre câbles et de trois degrés de liberté translationnels. Les performances observées pour ce mécanisme sont meilleures que celles qui sont observées pour le mécanisme à 6 ddl. On privilégiera donc cette méthode d’étalonnage pour les mécanismes possédant moins de degrés de liberté.

2.5 Identification complète

Finalement, une dernière méthode d’identification est proposée. Celle-ci permet d’étalonner à la fois les longueurs initiales des câbles et les points d’ancrage. Cette méthode est dérivée de celle de l’optimisation non linéaire de la section 2.4.1. La différence est que l’on inclut les positions des points d’ancrage dans le vecteur d’estimation. La complexité de l’optimisation s’en trouve grandement augmentée. Le rayon de convergence est donc plus faible. Pour cette

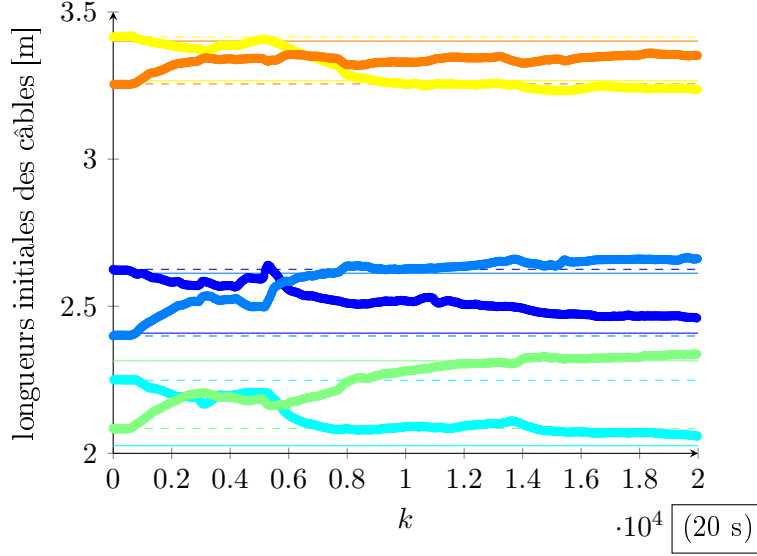


FIGURE 2.19 – Progression de l’estimation de la longueur initiale des câbles en fonction du nombre de points acquis. Les lignes pointillées représentent l’estimation initiale et la ligne pleine, la longueur réelle mesurée au ruban.

raison, on utilise cette méthode lorsqu’une estimation de qualité est disponible et qu’on désire la raffiner. Le développement est le même que celui de la section 2.4.1 jusqu’à l’équation 2.21 exclusivement. On doit à cet endroit prendre en considération l’ajout d’inconnus supplémentaires. En effet, on doit ajouter les positions cartésiennes des points d’ancrage. On ajoute donc trois inconnues par câble. À partir de ces inconnues, il est possible d’en fixer six pour contraindre le mécanisme dans l’espace. On contraint, par exemple, les trois coordonnées du premier ancrage, deux coordonnées du deuxième ancrage et une coordonnée du troisième ancrage. De cette façon, le mécanisme est contraint dans l’espace, et ce, sans perte de généralité. Comme précédemment, le nombre d’inconnues doit toujours être égal ou inférieur au nombre d’équations de contraintes, l’équation 2.21 devient donc

$$\underbrace{m}_{\rho_{i|0}} + \underbrace{3n}_{\mathbf{p}_j} + \underbrace{9n}_{\mathbf{Q}_j} + \underbrace{3m - 6}_{\mathbf{a}_i} \leq \underbrace{mn}_{(2.16)} + \underbrace{6n}_{(2.18)}. \quad (2.66)$$

En isolant n , on obtient

$$n \geq \frac{4m - 6}{m - 6}. \quad (2.67)$$

Pour un mécanisme à huit câbles, $n = 8$, le nombre de points de mesure doit donc être supérieur ou égal à 13, et doit idéalement y être supérieur pour limiter les impacts du bruit de mesure. On reprend donc l’équation 2.23 en y ajoutant les inconnues correspondant à la position des points d’ancrage A_i

$$\underset{\rho_{i|0}, \mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j, \mathbf{a}_i}{\text{minimiser}} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m (\rho_{i|0} + \Delta\rho_{ij} - \|\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i\|_2)^2 + \|\check{\mathbf{q}}\|_2^2 \right). \quad (2.68)$$

On résout ce problème d’optimisation avec l’algorithme de Levenberg-Marquardt utilisé précédemment. Comme cette optimisation est complexe, il est pensable d’inclure des contraintes

sur le vecteur d'optimisation. Pour ce faire, on utilise l'algorithme « trust-region-reflective » qui permet l'ajout de contraintes. Ces contraintes peuvent être utilisées pour borner les éléments de la matrice de rotation dans l'intervalle $[-1, 1]$ par exemple, ou établir une variation maximale sur la position des points d'ancrage. Ces méthodes sont explorées dans la section qui suit.

2.5.1 Simulation

Une simulation est effectuée pour évaluer les performances et le rayon de convergence de l'algorithme. La simulation utilise les mêmes paramètres que les simulations précédentes de ce chapitre. Ainsi, le mécanisme simulé possède toujours huit câbles, 6 ddl et donc un niveau de redondance de $r = 2$. Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent les valeurs des positions d'ancrage fixes et sur l'organe effecteur terminal. Les capteurs de longueurs des câbles sont modélisés également comme des capteurs probabilistes ayant une erreur de mesure à moyenne nulle et de variance σ_ρ^2 . Le vecteur d'optimisation est similaire à celui de l'équation 2.24, mais augmenté des positions des points d'ancrage fixes à optimiser. On peut donc l'écrire comme

$$\hat{\mathbf{x}} = \left[\hat{\boldsymbol{\rho}}_{|0}^T \quad \hat{\mathbf{x}}_{\text{traj}}^T \quad \hat{a}_{2z} \quad \hat{a}_{3y} \quad \hat{a}_{3z} \quad \hat{\mathbf{a}}_4^T \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{a}}_m^T \right]^T, \quad (2.69)$$

où

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{traj}} = \left[\hat{\mathbf{p}}_1^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{11}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{21}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{31}^T \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{p}}_m^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{1m}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{2m}^T \quad \hat{\mathbf{q}}_{3m}^T \right]. \quad (2.70)$$

Il est bon de rappeler ici que les composantes a_{1x} , a_{1y} , a_{1z} , a_{2x} , a_{2y} et a_{3x} sont considérées connues, de façon à contraindre les points d'ancrage dans l'espace. La trajectoire simulée est celle qui est présentée à la figure 2.5. L'algorithme *lsqnonlin* de Matlab[®] est utilisé ici pour résoudre le problème d'optimisation. La première simulation consiste à faire varier le nombre de points de mesure n . L'écart type des capteurs stochastiques est également $\sigma_p = 0.01$ m. L'erreur sur la position de départ est de 0.05 m et l'erreur sur les positions des points d'ancrage est en moyenne de 0.02 m de distance sur les estimés initiaux des positions des points d'attache. La figure 2.20 montre la valeur moyenne quadratique (RMS) de la distance entre l'effecteur réel et la pose trouvée, exprimée dans l'équation 2.25. La figure 2.21 montre la valeur quadratique moyenne de la différence entre la position des ancrages réelle et celle trouvée, qui est exprimée comme

$$e_{\mathbf{a}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|\mathbf{a}_i - \hat{\mathbf{a}}_i\|_2^2}. \quad (2.71)$$

On peut constater à l'aide de ces figures que le nombre de points de mesure a une faible influence sur la qualité de la trajectoire obtenue. La qualité de la position des points d'ancrage diffère également peu avec le nombre de points de mesure n essayé. Un nombre plus important pourrait être bénéfique, mais les temps de calcul observés deviennent énormes. En effet, les temps de calcul dépassent une heure pour les valeurs de $n > 30$. Les prochaines simulations ont comme objectif d'évaluer le rayon de convergence de l'algorithme. En premier lieu, on fait

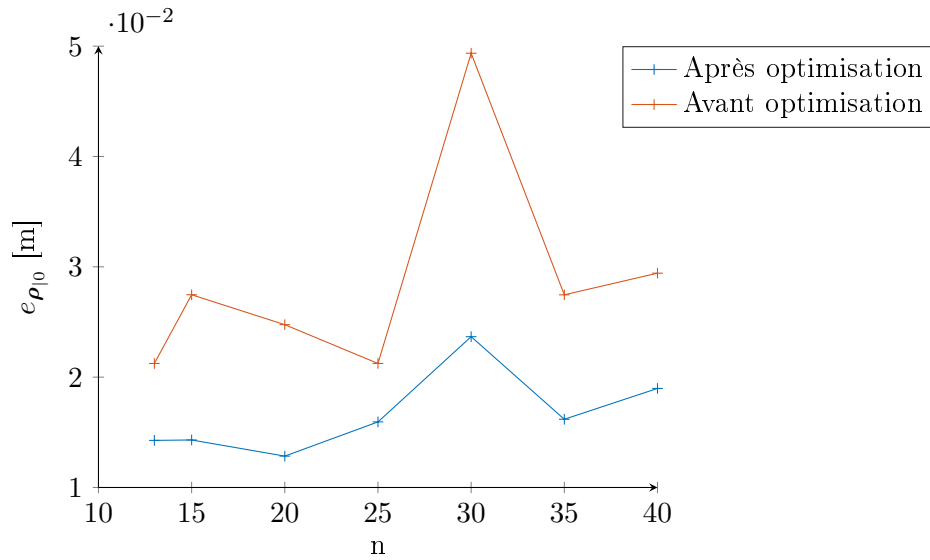


FIGURE 2.20 – Erreur quadratique moyenne sur la position de l’organe effecteur terminal en fonction du nombre de mesures prises n .

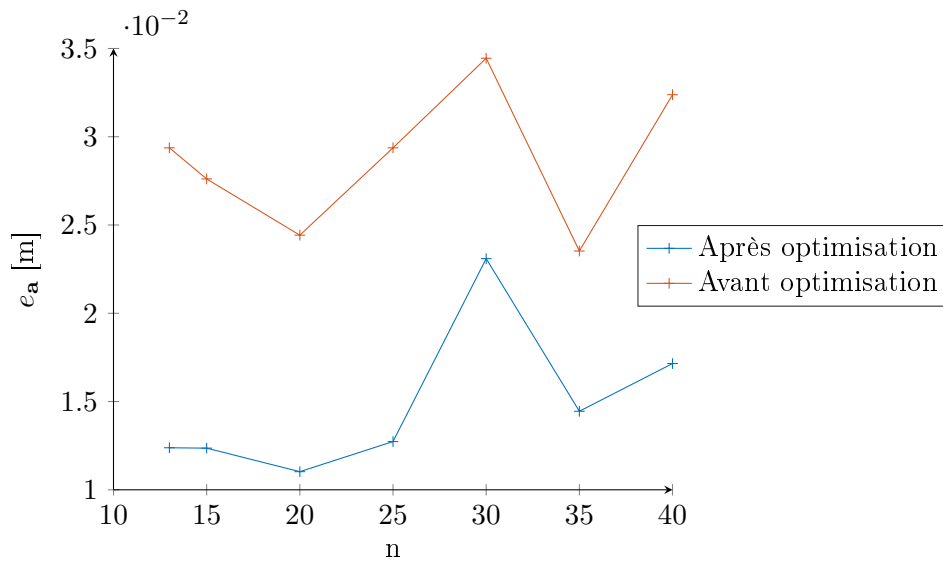


FIGURE 2.21 – Erreur quadratique moyenne sur la position des points d’ancrage en fonction du nombre de mesures prises n .

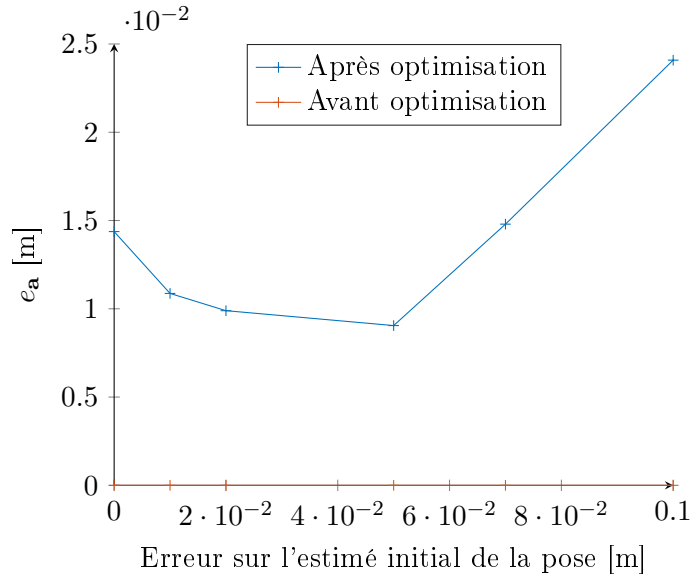


FIGURE 2.22 – Erreur quadratique moyenne sur la position des points d’ancrage en fonction de la qualité de l’estimation initiale de la pose.

varier la qualité de l’estimation de la position initiale de l’organe effecteur terminal pour étudier son impact sur la qualité du résultat sur la position des points d’ancrage. L’estimation initiale de la position des ancrages est parfaite, afin de n’étudier que l’impact de l’estimation de la pose. Les figures 2.22 et 2.23 présentent ces résultats. Comme attendu, les positions des points d’ancrage trouvés après l’optimisation diffèrent de la position initiale qui était dans ce cas la position réelle. On observe que pour des erreurs de plusieurs centimètres sur l’estimation de la pose initiale, l’erreur quadratique sur la position des points d’ancrage reste limitée à 2 cm. Pour ce qui est des longueurs initiales des câbles, l’algorithme devient avantageux à partir d’une erreur initiale de 2 cm sur la pose de l’effecteur. Par la suite, un bénéfice de 20% à 40% est observable sur la qualité de l’estimation des longueurs initiales des câbles.

En deuxième lieu, on fait varier la qualité de l’estimation initiale des positions des points d’ancrage, pendant que l’estimation de la pose initiale est parfaite. Les figures 2.24 et 2.25 présentent ces résultats. On peut y remarquer que pour profiter d’une précision accrue sur la position des points d’ancrage et des longueurs de câbles initiales, l’erreur quadratique sur l’erreur d’estimation des points d’ancrage doit être supérieure à 1 cm. La méthode du filtre de Kalman est donc intéressante par le fait qu’elle s’effectue en ligne. La phase d’étalonnage peut plus facilement être intégrée à la mise en route de l’appareil. Lors des premiers déplacements, la qualité du positionnement sera inexacte, mais s’améliorera au fil des déplacements. Il faut par contre porter une attention particulière et surveiller la convergence du filtre. Une attention particulière doit également être portée à l’orientation initiale de l’effecteur, car le filtre n’est pas en mesure de compenser efficacement cette erreur.

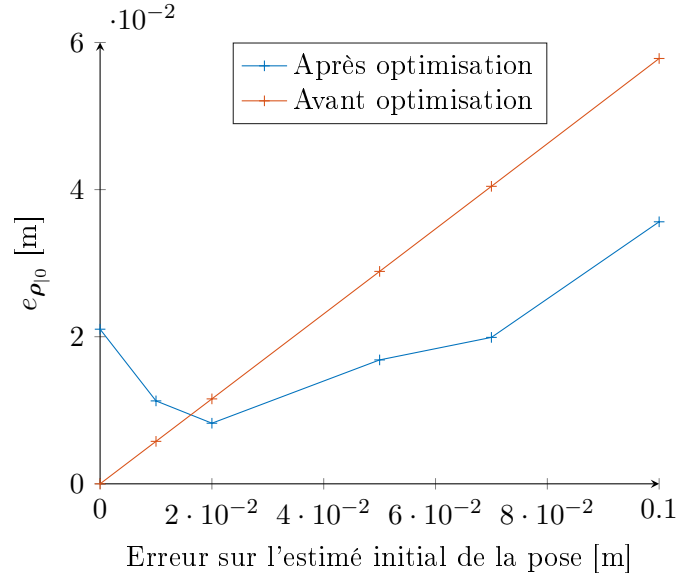


FIGURE 2.23 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l'estimé initial de la pose.

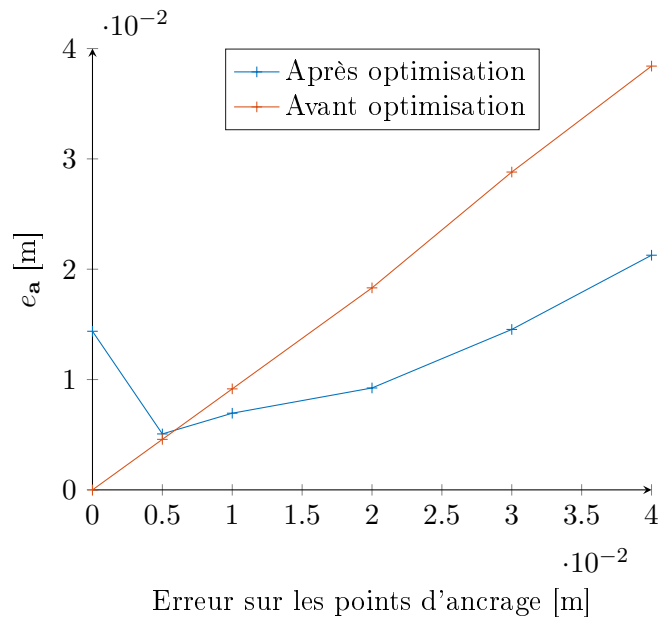


FIGURE 2.24 – Erreur quadratique moyenne sur les positions des points d'ancrage en fonction de la qualité de l'estimation initiale des positions des points d'ancrage.

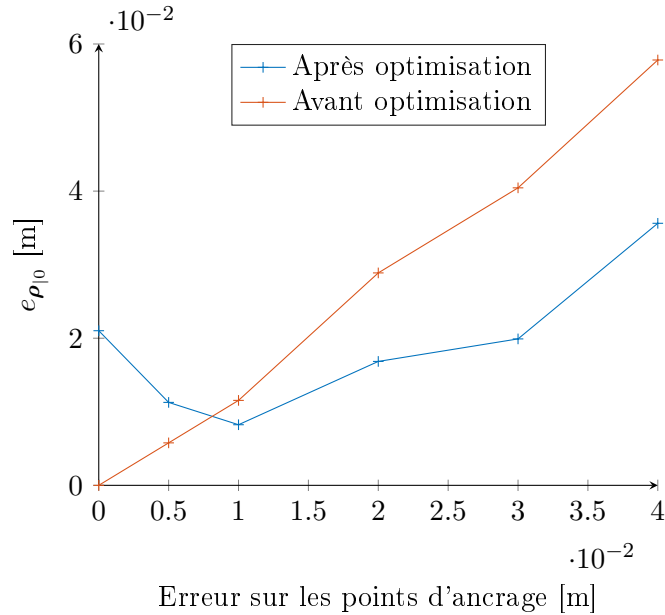


FIGURE 2.25 – Erreur quadratique moyenne sur les longueurs initiales des câbles en fonction de la qualité de l’estimation initiale des positions des points d’ancrage.

2.6 Conclusion : choix de la méthode d’étalonnage

Le choix de la méthode d’étalonnage à utiliser dépend de plusieurs facteurs, dont l’usage prévu du mécanisme. Les méthodes utilisant les capteurs de fin de course sont à privilégier lorsqu’il est possible d’enrouler les câbles un à un au début de chaque mise sous tension du mécanisme. Les mécanismes suspendus sont les principaux candidats pour ces méthodes. La méthode consistant à poser l’organe effecteur terminal à une pose connue peut aussi être utilisée lorsque le mécanisme est mû à la main¹. Cette méthode peut être très précise si la pose initiale peut être estimée avec précision. Un socle spécial est souvent utilisé pour contraindre l’orientation du mécanisme. Les méthodes précédentes peuvent ensuite être bonifiées par la méthode des moindres carrés non linéaires ou par le filtre de Kalman. L’avantage de la méthode des moindres carrés non linéaires est qu’avec des mesures précises en présence d’un bruit de mesure limité, elle donne de bons résultats. Son inconvénient est qu’elle nécessite une phase d’étalonnage spécifique et que son temps de calcul peut être long. L’avantage de la méthode du filtre de Kalman est qu’elle s’effectue en ligne et ne nécessite pas de phase d’étalonnage spécifique. Cette phase d’étalonnage ne peut être omise qu’à la condition que la qualité du positionnement initial ne soit pas importante, celle-ci progressant à mesure que le mécanisme se déplace. Son inconvénient est que le filtre peut diverger. Il faut intégrer des mesures de surveillance du filtre et un mode sécuritaire du robot pour en limiter l’impact. La méthode d’identification complète, elle, peut être utilisée sur des mécanismes plus simples à faible ddl où ses performances sont les meilleures. Les bruits de mesures doivent également être faibles pour

1. En anglais : back-drivable

obtenir une bonne précision. Les méthodes utilisant des capteurs externes peuvent atteindre les plus hautes précisions, en dessous du millimètre, mais sont beaucoup plus encombrantes et coûteuses.

Chapitre 3

Précision des mécanismes à câbles augmentés d'un capteur d'angle

Ce chapitre est basé sur l'article publié à l' « IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems » (IROS 2016) portant sur la précision des mécanismes à câbles augmentés d'un capteur d'angle (43). Ce chapitre présente donc l'impact de l'utilisation de capteurs d'angle aux points d'ancrage des câbles et explore leur pertinence pour l'interface haptique développée dans cette thèse. L'intérêt principal d'utiliser ce type de capteur est l'augmentation de la précision de la pose du mécanisme, ce qui pourrait bénéficier aux interfaces haptiques pour lesquelles la correspondance entre le réel et le virtuel est cruciale, ce qui passe par une bonne précision de la pose de l'organe effecteur terminal. Les capteurs utilisés ont été développés au laboratoire de robotique de l'Université Laval et sont présentés dans la thèse d'Alexandre Lecours (19). L'objectif de ce chapitre est de quantifier les bénéfices de l'utilisation de ces capteurs d'angles sur la précision de la pose et d'évaluer s'il justifie l'installation de ce type de capteur sur l'interface haptique. La plupart des mécanismes parallèles à câbles utilisent les encodeurs lisant la longueur des câbles pour déterminer la pose de l'effecteur. L'hypothèse est qu'en ajoutant les capteurs d'angles, ces derniers seront en mesure de mieux couvrir les zones de l'espace de travail où la sensibilité cinématique (21) des mesures de longueur est faible, c.-à-d., où un grand mouvement de l'organe terminal effecteur résulte en un petit déplacement au niveau de l'encodeur. Une fusion des données provenant des capteurs d'angles et d'encodeurs permettra donc d'obtenir une meilleure précision sur la pose. Un autre avantage de l'utilisation de capteurs d'angle serait leurs utilisations pour éliminer les solutions multiples au problème géométrique direct d'un robot parallèle. En effet, leurs ajouts pourraient être utilisés pour différencier les différentes branches de solutions et donc de pouvoir trouver celle qui est juste. Cet avantage n'est pas couvert dans cette thèse, mais se retrouve dans (47). Ce chapitre contient premièrement une revue de la littérature présentant différents types de capteurs d'angle et les méthodes plus traditionnelles d'inférence de la pose à partir des longueurs des câbles. Le capteur utilisé dans ce chapitre est ensuite décrit suivi

de la présentation des équations cinématiques reliant les mesures à la pose. Deux méthodes de fusion de données sont ensuite présentées, ainsi que les simulations associées. Finalement, des résultats expérimentaux sont présentés, ce qui permettra d'évaluer les bénéfices apportés sur la précision pour un mécanisme plan d'une superficie de 1 m^2 .

3.1 Revue de littérature

Traditionnellement, les mécanismes à câbles utilisent des encodeurs au niveau de leurs enrouleurs. Ces encodeurs sont souvent connectés à l'arbre moteur ou à l'arbre de la poulie. Des exemples d'utilisation sont le mécanisme FALCON (79) dont les moteurs sont munis d'encodeurs, le mécanisme commercial INCA6D (118) dont les poulies sont munies d'encodeurs et le mécanisme ReelAx (71) qui utilise des encodeurs relatifs sur des moteurs à entraînement direct. Ces mesures sont simples à prendre et très communes dans le domaine. Par contre, mesurer l'angle de départ d'un câble est d'une plus grande complexité. Le capteur ne doit pas modifier le comportement du câble ou changer sa tension ou sa direction. Quelques solutions ont été présentées dans la littérature.

3.1.1 Type de capteur d'angles existants

Les capteurs d'angles sont surtout présentés dans la littérature dans les montages de type grue. Souvent utilisé pour réduire le balancement de la charge de celle-ci. Il existe deux grandes catégories de capteur d'angles : les capteurs sans contact avec le câble et ceux avec contact.

La première catégorie de capteur d'angles est celle des capteurs sans contact. Ceux-ci ont l'avantage d'être sans effets pour le câble lui-même, ils n'appliquent aucune force sur ce dernier. De ceux-ci, on note les capteurs utilisant des capteurs magnétiques (119). Le principe de ce dernier repose sur la mesure du champ électrique du câble qui est soumis à un courant alternatif. Ce capteur nécessite donc des câbles conducteurs et une installation pouvant faire passer du courant alternatif dans les câbles. Un autre type de capteurs sont ceux qui utilisent des inclinomètres ayant des accéléromètres comme éléments sensibles (83). Mesurant à la fois l'accélération gravitationnelle et les accélérations inertielles, il est nécessaire de corriger ces effets inertiels pour obtenir une estimation de l'angle du câble. L'inclinomètre étant placé sur l'organe effecteur terminal dans (83), la mesure des angles des câbles n'est pas directe. Un autre type de capteur d'angles sans contact est basé sur la vision numérique (65; 133). Ces capteurs mesurent la position de l'organe effecteur terminal pour déterminer l'angle du câble de la grue, qui est ainsi utilisé comme rétroaction pour réduire l'effet de balancier. Le dernier type n'est pas un capteur en tant que tel, mais repose sur le concept d'observation de la dynamique du système (110). En mesurant les forces appliquées par l'enrouleur et les déplacements du pont roulant, il est possible d'estimer l'angle de balancement de la charge. Cette dernière méthode paraît difficilement applicable aux mécanismes à plusieurs câbles. Une

deuxième catégorie de capteurs est celle dont l'élément sensible fait contact avec le câble. Le capteur présenté dans cette thèse en fait partie. Un premier exemple est celui qui est basé sur des joints de cardan (135). Un deuxième, lui, repose sur une mesure linéaire du câble près de sa base (77). Un avantage de ce type de capteurs est que la mesure est directe et donc moins sujette aux erreurs de mesures. Ils sont également plus simples, ne comportant que peu de systèmes actifs. Leur désavantage est qu'ils influencent légèrement la dynamique du câble en imposant des forces parasites. Ces dernières sont par contre souvent négligeables.

3.1.2 Méthodes existantes de mesure de la pose de mécanismes parallèles à câbles

De la recherche a déjà été effectuée sur la précision des mécanismes parallèles entraînés par câbles, comme dans (126) où Riehl et coll. se concentrent sur les impacts de la masse des câbles sur la précision du modèle. Les recherches se sont principalement concentrées sur les impacts des simplifications utilisées, celles des câbles rigides et sans masse, comme décrites dans la section 1.5.2. Peu d'articles traitent de la redondance de mesures pour améliorer la précision de la pose des mécanismes parallèles à câbles et ceux qui sont disponibles ne proposent pas de méthode avec des capteurs d'angles. Les quelques articles qui traitent de ce problème utilisent plutôt des capteurs basés sur la vision pour améliorer la précision (24; 30). Bien qu'utiles et précises, ces méthodes nécessitent l'ajout de caméras à un ou plusieurs endroits, lesquelles peuvent être dispendieuses et encombrantes. De plus, cette solution est moins robuste, car les systèmes de vision sont souvent influencés par l'éclairage, les réflexions et les occlusions dans l'environnement. La redondance de mesure est couverte pour certains mécanismes parallèles (101) comme dans (116), où Patel et coll. utilisent des mesures de longueur supplémentaires en ajoutant des pattes passives redondantes. La redondance a également été utilisée comme outil d'étalonnage (143; 62), tel que mentionné au chapitre 2. Des capteurs d'angles ont été utilisés sur des mécanismes parallèles conçus par Merlet (100) pour permettre une solution symbolique au problème géométrique direct.

3.2 Présentation du capteur d'angles utilisé

Le capteur utilisé est présenté dans la figure 3.1 et permet de déterminer la direction de départ du câble, c'est-à-dire, ses angles selon deux axes de rotation. Ce capteur a été initialement présenté par Lecours (89; 20). Le capteur a été développé pour être robuste, précis, simple et peu coûteux. Un capteur de la catégorie dont l'élément sensible fait contact avec le câble a été préféré, car des capteurs de ce type ont fait leurs preuves dans l'industrie comme étant des solutions robustes. La mise en œuvre des designs préexistants de la catégorie avec contact a été jugée inadéquate à cause de leur manque de précision ou de leur espace de travail restreint. Le capteur utilisé dispose de deux ddl. Il est constitué de deux guides concentriques ayant une rainure en leur centre par lequel passe le câble qui les entraîne. Les deux axes de rotation du

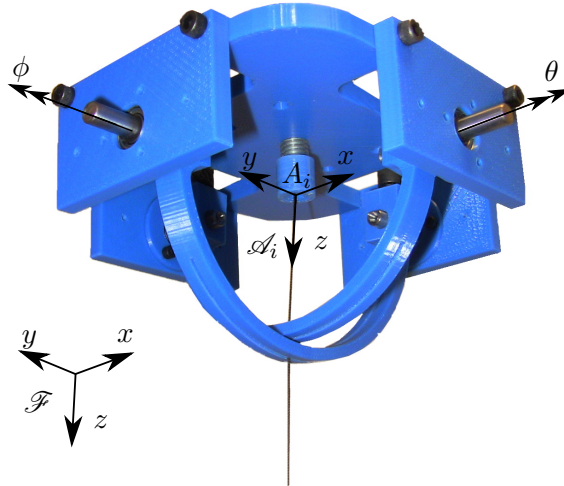


FIGURE 3.1 – Capteur d’angle à deux ddl.

câble se croisent au point d’origine du capteur. La figure 3.1 présente les deux angles θ et ϕ , qui sont mesurés selon les deux axes de rotation du capteur. Comme les deux guides sont indépendants l’un de l’autre, il est possible de mesurer les deux angles indépendamment. Des encodeurs relatifs sont fixés à chaque guide pour faire la lecture de l’angle. Ce type d’encodeur a été privilégié pour son faible coût. Des encodeurs absolus pourraient également être envisagés et seraient un excellent ajout qui permettrait d’éviter une phase d’étalonnage lors de la mise sous tension du capteur. La construction légère et l’utilisation de roulements à billes limitent les forces d’interaction entre les guides et le câble, limitant ainsi sa déflexion et donc l’altération de l’angle à mesurer. Un espace fonctionnel doit être laissé dans la largeur des fentes de façon à permettre au câble de glisser sans friction. Les deux côtés de la fente ne sont donc pas en contact avec le câble en même temps, ce qui cause un effet de jeu nuisible¹ lors de changement de direction. Bien que ce jeu puisse être faible, c’est un facteur à considérer lors de l’évaluation de la précision de la lecture de l’angle.

3.3 Cinématique reliant les mesures à la pose

Comme dans la section précédente, on fait ici l’hypothèse que chaque câble est rigide et sans masse. Des câbles légers et peu élastiques sont donc de mise. La validité de ces simplifications est vérifiée sur un montage expérimental à la section 3.6. Grâce à ces simplifications, il est possible d’utiliser la cinématique des mécanismes à câbles telle qu’introduite à la section 1.5.4. Cette cinématique relie les longueurs de câbles et la pose de l’organe effecteur terminal. On doit aussi, pour cette section, définir la cinématique reliant les mesures d’angle et la pose de l’organe terminal effecteur. Pour ce faire, on introduit de nouveaux référentiels qui permettront d’exprimer plus facilement les mesures d’angle. Ainsi, pour chaque enrouleur, on définit un

1. En anglais : backlash

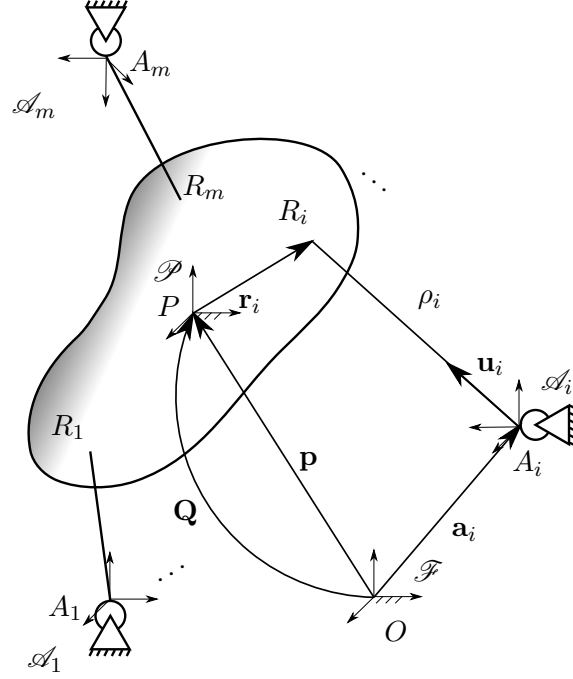


FIGURE 3.2 – Modèle géométrique d'un mécanisme à câbles générique augmenté des référentiels des capteurs d'angles.

référentiel dont l'axe des x correspond à l'axe de rotation de l'angle θ et dont l'axe des y correspond à l'axe de rotation de l'angle ϕ . L'origine du référentiel \mathcal{A}_i est donc au point A_i et l'axe z correspond à un câble dont l'angle de départ est nul pour les deux axes de rotation tels que montrés dans la figure 3.2. Aussi, l'orientation du référentiel \mathcal{A}_i par rapport au référentiel fixe \mathcal{F} est définie par la matrice de rotation \mathbf{Q}_{A_i} . Un développement similaire à celui de la section 1.5.4 peut donc maintenant être appliqué. Posons

$$\mathbf{v}_i = \rho_i \mathbf{u}_i. \quad (3.1)$$

Les angles de départ du câble peuvent s'écrire

$$\begin{bmatrix} \tan(\theta_i) \\ \tan(\phi_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{yi}}{v_{zi}} \\ \frac{v_{xi}}{v_{zi}} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

où $[v_{xi} \ v_{yi} \ v_{zi}]^T = [\mathbf{v}_i]_{\mathcal{A}_i}$ exprimé dans leur référentiel correspondant \mathcal{A}_i . En dérivant et reformulant l'équation 3.2, les équations de vitesse s'écrivent

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ \dot{\phi}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{v_{iz}}{v_{iy}^2 + v_{iz}^2} & -\frac{v_{iy}}{v_{iy}^2 + v_{iz}^2} \\ \frac{v_{iz}}{v_{ix}^2 + v_{iz}^2} & 0 & -\frac{v_{ix}}{v_{ix}^2 + v_{iz}^2} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_i, \quad (3.3)$$

toujours exprimées dans leur référentiel \mathcal{A}_i . On doit maintenant exprimer $\dot{\mathbf{v}}_i$ en fonction de la dérivée temporelle de la pose. Pour se faire, on utilise l'équation de fermeture de boucle

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{r}_i - \mathbf{a}_i, \quad (3.4)$$

que l'on dérive par rapport au temps pour obtenir

$$\dot{\mathbf{v}}_i = \dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\Omega} \mathbf{Q} \mathbf{r}_i, \quad (3.5)$$

où $\boldsymbol{\Omega}$ est une matrice anti-symétrique telle que

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

matrice anti-symétrique que l'on peut noter également $[\boldsymbol{\omega}]_{\times}$. En réarrangeant l'équation 3.5, on obtient

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & [\mathbf{Q} \mathbf{r}_i]_{\times}^T \end{bmatrix} \mathbf{t}. \quad (3.7)$$

En insérant l'équation 3.7 dans l'équation 3.3 exprimée dans le référentiel \mathcal{A}_i , on obtient

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ \dot{\phi}_i \end{bmatrix} = \mathbf{D}_i \mathbf{t}, \quad (3.8)$$

avec

$$\mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_{iz}}{u_{iy}^2 + u_{iz}^2} & -\frac{u_{iy}}{u_{iy}^2 + u_{iz}^2} \\ \frac{u_{iz}}{u_{ix}^2 + u_{iz}^2} & 0 & -\frac{u_{ix}}{u_{ix}^2 + u_{iz}^2} \end{bmatrix} \mathbf{Q}_{Ai}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & [\mathbf{Q} \mathbf{r}_i]_{\times}^T \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Pour m câbles, la relation cinématique devient donc

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{J}_2 \mathbf{t} \quad (3.10)$$

où

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = [\dot{\theta}_1, \dot{\phi}_1, \dots, \dot{\theta}_m, \dot{\phi}_m]^T \quad (3.11)$$

et

$$\mathbf{J}_2 = [\mathbf{D}_1^T, \dots, \mathbf{D}_m^T]^T. \quad (3.12)$$

3.3.1 Cinématique combinée des mesures d'angles et de longueurs des câbles

La relation cinématique de premier ordre peut maintenant être construite grâce aux équations 1.10 et 3.10. Elle devient donc

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\rho}} \\ \dot{\boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \mathbf{t}. \quad (3.13)$$

Lorsque le mécanisme est capable de varier son orientation, il peut être utile d'exprimer les dérivées temporelles des angles d'Euler ($\dot{\mathbf{e}}$). Ces dernières peuvent être liées linéairement aux vitesses angulaires par une matrice \mathbf{S} définie comme $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{S} \dot{\mathbf{e}}$. Pour de petits déplacements, on peut donc écrire la relation linéaire suivante :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\rho} \\ \Delta \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{p} \\ \mathbf{S} \Delta \mathbf{e} \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Pour un trio d'angles d'Euler dont les matrices de rotations sont notées \mathbf{Q}_1 , \mathbf{Q}_2 et \mathbf{Q}_3 , cette matrice s'exprime comme

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{Q}_1\mathbf{e}_2 & \mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_2\mathbf{e}_3 \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

où le vecteur \mathbf{e}_i est le vecteur unitaire élémentaire correspondant à la rotation \mathbf{Q}_i (50).

3.4 Fusion de données

La fusion de données est un domaine assez large et grandement étudié. Deux méthodes relativement connues sont présentées ici dans le but de combiner les mesures des capteurs d'angles et de longueurs pour obtenir une estimation de la pose de l'effecteur robuste et précis. La première méthode permet de trouver la solution qui réconcilie les mesures de façon optimale dans le sens des moindres carrés. La seconde, le filtre de Kalman étendu, est une méthode classique d'observation d'état lorsque les systèmes sont non linéaires.

3.4.1 Fusion par optimisation non linéaire des moindres carrés

Pour les architectures de robot parallèle à câbles classique, il est possible d'obtenir la pose par les mesures des longueurs des câbles ou par les mesures des directions des câbles indépendamment. Il y a donc une occasion de faire une fusion de ces deux ensembles de données pour aller chercher une mesure plus précise de la pose. Pour une pose inconnue \mathbf{x} , la meilleure estimation de la pose $\hat{\mathbf{x}}$ est celle qui minimise $\Delta\mathbf{x}^2 = (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^2$. Le problème à résoudre est commun dans le domaine de la fusion de données et peut s'écrire comme

$$\underset{\hat{\mathbf{x}}}{\text{minimiser}} \quad \left\| \mathbf{W} \left(\begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\rho}}^T & \hat{\boldsymbol{\psi}}^T \end{bmatrix}^T - h(\hat{\mathbf{x}}) \right) \right\|_2^2, \quad (3.16)$$

où $\hat{\boldsymbol{\rho}}$ et $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ sont les mesures prises par les capteurs, $h(\hat{\mathbf{x}})$ est la cinématique inverse du mécanisme et \mathbf{W} est une matrice de poids. Pour la plupart des mécanismes parallèles, $h(\hat{\mathbf{x}})$ est obtenue des équations (1.8) et (3.2). Dans la plupart des cas, le problème présenté dans l'équation (3.16) est résolu numériquement en utilisant une estimation initiale de la pose provenant de la pose précédente. Le choix de la matrice de poids \mathbf{W} est d'une importance cruciale. Dans la théorie des capteurs stochastiques (134), cette matrice est choisie comme l'inverse de la matrice de covariance. On l'exprime ici comme

$$\mathbf{W} = \text{diag} \left([\alpha_\rho \sigma_{\rho 1}^2, \dots, \alpha_\rho \sigma_{\rho m}^2, \alpha_\psi \sigma_{\psi 1}^2, \dots, \alpha_\psi \sigma_{\psi m}^2] \right)^{-1}, \quad (3.17)$$

où α_ρ et α_ψ sont des poids ajoutés comme paramètres de réglages. Une expression analytique de la solution à ce problème est présentée dans (47). Bien que le bruit sur les capteurs ne suive pas nécessairement une distribution normale à moyenne nulle, cette hypothèse permet de simplifier les mathématiques et est donc souvent utilisée.

3.4.2 Fusion par un filtre de Kalman étendu

Une implémentation du filtre Kalman étendu peut également être employée pour faire la fusion des données. Il est possible d'y inclure un modèle du procédé pour améliorer le filtrage. En modélisant le procédé comme

$$\mathbf{x}_{|k+1} = \mathbf{x}_{|k} + \mathbf{v}_{|k}, \quad (3.18)$$

où la variable d'état \mathbf{x} représente la pose et où l'indice k indique le pas de temps et $\mathbf{v}_{|k}$ le bruit de procédé. Le procédé peut être fonction des vitesses et accélérations comme dans la section 2.4.2 et dans (8). L'équation d'observation incluant tous les capteurs peut s'écrire

$$\mathbf{y}_{|k} = h(\mathbf{x}_{|k}) + \mathbf{w}_{|k}, \quad (3.19)$$

avec $\mathbf{y}_{|k}$ étant le vecteur de mesure pour le pas temps k , $h(\mathbf{x}_{|k})$ étant le PGI et $\mathbf{w}_{|k}$ le bruit de mesure. L'équation du procédé est souvent exprimée linéairement, mais celle d'observation ne l'est pas. Le filtre a donc besoin de linéariser l'équation 3.19 grâce à la matrice jacobienne \mathbf{H} qui peut être obtenue de l'équation 3.14.

$$\mathbf{H} = \frac{\partial h(\mathbf{x}_{|k})}{\partial \mathbf{x}_{|k}} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Une application standard du filtre peut donc être utilisée pour faire la fusion des capteurs et obtenir une estimation plus précise de la pose. Grâce au modèle du procédé, un filtre supplémentaire du bruit sur la pose est inclus. Ses paramètres peuvent ainsi être utilisés comme ajustements pour augmenter ou diminuer le bruit.

3.5 Simulation

Comme détaillé précédemment, la pose du mécanisme peut être obtenue 1) avec la longueur des câbles comme entrée, 2) avec l'angle de départ des câbles comme entrée et 3) grâce à une fusion des lectures des capteurs. Dans cette section, la précision théorique de ces méthodes est évaluée. À cette fin, il est possible de borner l'erreur sur l'estimation de la pose $\hat{\mathbf{x}}$ en projetant les erreurs articulaires des capteurs dans l'espace cartésien de l'organe effecteur terminal. En linéarisant à $\hat{\mathbf{x}}$, l'équation 3.14 est utilisée pour calculer la région contenant $\Delta \mathbf{x}$ comme

$$\Delta \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} \leq \Delta \bar{\boldsymbol{\tau}} \quad (3.21)$$

où \mathbf{H} est la matrice jacobienne présentée dans l'équation 3.20, et où $\Delta \bar{\boldsymbol{\tau}}$ et $\Delta \underline{\boldsymbol{\tau}}$ représentent les bornes d'erreurs supérieures et inférieures dans l'espace articulaire des capteurs. Mathématiquement, on les exprime comme

$$\Delta \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \\ \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\rho}} \\ \hat{\boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix} \leq \Delta \bar{\boldsymbol{\tau}}. \quad (3.22)$$

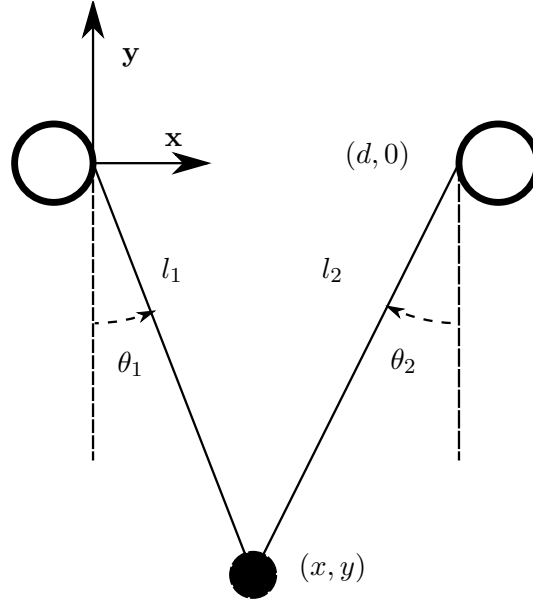


FIGURE 3.3 – Modèle géométrique du mécanisme simulé.

Un mécanisme plan à deux ddl est utilisé pour illustrer le problème, ce qui permettra de visualiser facilement les erreurs dans un graphique à deux dimensions. Le schéma de ce système est présenté dans la figure 3.3. La cinématique inverse s'écrit comme

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = h(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \sqrt{(d-x)^2 + y^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{x}{-y}\right) \\ \tan^{-1}\left(\frac{d-x}{-y}\right) \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

dont la pose est $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$. L'expression de la matrice Jacobienne représentant la relation cinématique de premier ordre s'écrit

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \frac{-d+x}{\sqrt{(d-x)^2 + y^2}} & \frac{y}{\sqrt{(d-x)^2 + y^2}} \\ \frac{y(1 + \frac{x^2}{y^2})}{1} & \frac{y^2(1 + \frac{x^2}{y^2})}{d-x} \\ \frac{y(1 + \frac{(d-x)^2}{y^2})}{1} & \frac{y^2(1 + \frac{(d-x)^2}{y^2})}{1} \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Les bornes des erreurs d'estimation sont ainsi tracées dans la figure 3.4 en utilisant les mesures des longueurs des câbles et les mesures d'angle des câbles comme entrées. Ces bornes proviennent directement de l'équation 3.21. L'intersection des deux régions représente donc l'ensemble des poses où l'organe effecteur terminal respecte les contraintes sur les incertitudes

de mesure. Ces régions sont tracées pour plusieurs points de l'espace de travail du robot de façon à percevoir les zones où chacun des capteurs est le plus performant et où la fusion de données devient pertinente. Pour bien voir les régions valides, les incertitudes sur les longueurs et les angles des câbles sont de ± 0.02 m et $\pm 1.8^\circ$, respectivement. En effet, pour un mécanisme de cette taille, il est plus facile d'avoir une bonne précision sur la mesure de l'angle de départ d'un câble que sur sa longueur. Pour les mesures de longueur, dû à l'utilisation d'encodeurs incrémentaux, les longueurs initiales des câbles sont inconnues et peuvent être difficiles à mesurer. En plaçant l'effecteur à une pose connue dans l'espace de travail, il est possible d'obtenir une estimation de la longueur initiale grâce au problème géométrique inverse, mais cette méthode peut être imprécise, car la pose de référence choisie peut facilement être erronée de quelques centimètres. Les capteurs d'angles disposent également d'encodeurs incrémentaux, mais la mesure de l'angle initial est plus aisée grâce à l'utilisation de butées mécaniques ou de la gravité. Par contre, un petit jeu existe entre le câble et le guide, qui est évalué à 0.5° pour les capteurs d'angles utilisés dans l'expérimentation. Une incertitude de $\pm 1.8^\circ$ est donc vraisemblable. La figure 3.5 présente une vue rapprochée de la figure 3.4 pour le cas où la pose est $\mathbf{x} = [0.5 \quad -0.3]^T$ m. On peut y voir plus clairement l'intersection des deux régions pour une pose relativement centrée de l'espace de travail. À plusieurs endroits dans l'espace de travail, on remarque que l'intersection des deux régions est significativement plus petite que chacune des deux régions prises séparément, ce qui signifie que l'erreur de mesure de la pose peut être réduite en utilisant les données des deux capteurs. On remarque également que les avantages offerts par l'utilisation des deux capteurs sont les plus importants aux limites de l'espace de travail, notamment celles du haut et des côtés. Ces zones sont effectivement associées à de l'imprécision lors de l'utilisation de la mesure des longueurs seule, car la sensibilité des capteurs est moindre à ces endroits, c.-à-d. qu'un grand mouvement de l'organe effecteur terminal entraîne un petit déplacement aux enrouleurs. Ce phénomène se produit lorsque la matrice jacobienne \mathbf{J}_1 approche une singularité, dans cet exemple lorsque y tend vers 0.

3.6 Expérimentation

Une expérience est effectuée pour pouvoir observer les bénéfiques potentiels de l'utilisation de capteurs d'angle sur un mécanisme réel. Le mécanisme utilisé pour les tests est présenté dans la figure 3.6. Ce dernier dispose de la même architecture que le mécanisme simulé dans la section précédente (figure 3.3), mais dont la distance entre les points d'ancrage (d) est de 1.8 m. L'expérimentation consiste à parcourir une trajectoire quasi statique à l'organe terminal dans le plan normal au sol passant par les deux points d'ancrage et à comparer les poses obtenues grâce aux mesures des longueurs et des angles des câbles à une valeur de référence obtenue par le système de caméra. Trois jeux de données sont utilisés : les mesures des longueurs de câbles seules, les mesures des angles seules et la combinaison des deux en utilisant l'algorithme de fusion de données basée sur l'optimisation non linéaire des moindres carrées de la section 3.4.1.

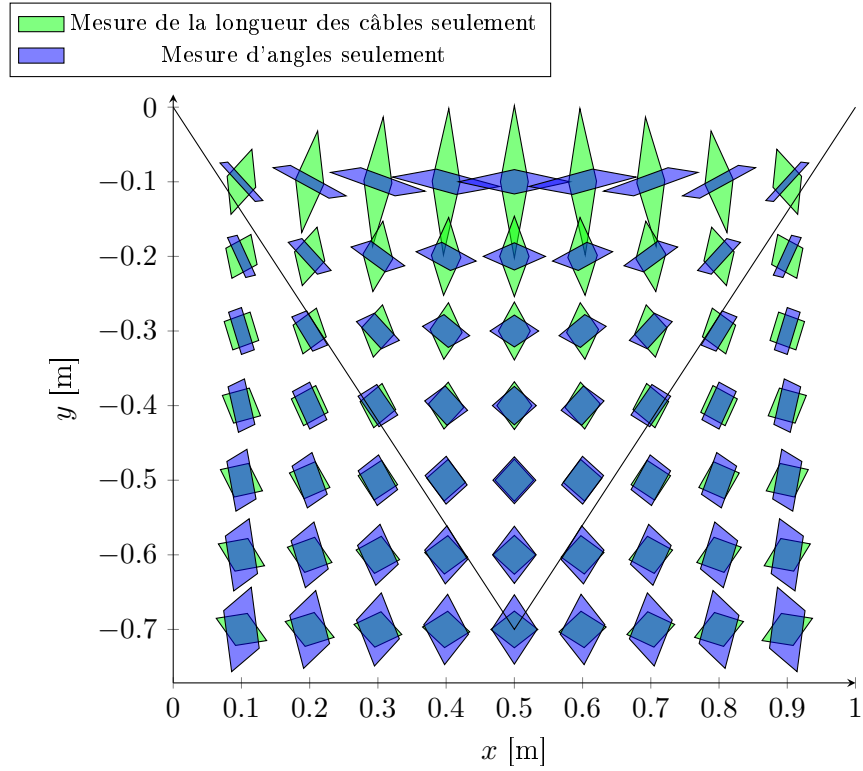


FIGURE 3.4 – Régions contenant la pose de l'organe effecteur terminal pour de multiples mesures dans l'espace de travail. Les incertitudes sur les longueurs de câbles sont de ± 0.02 m et sur les angles des câbles sont de $\pm 1.8^\circ$. Les positions des ancrages des câbles se situent à $[0,0]$ et $[1,0]$.

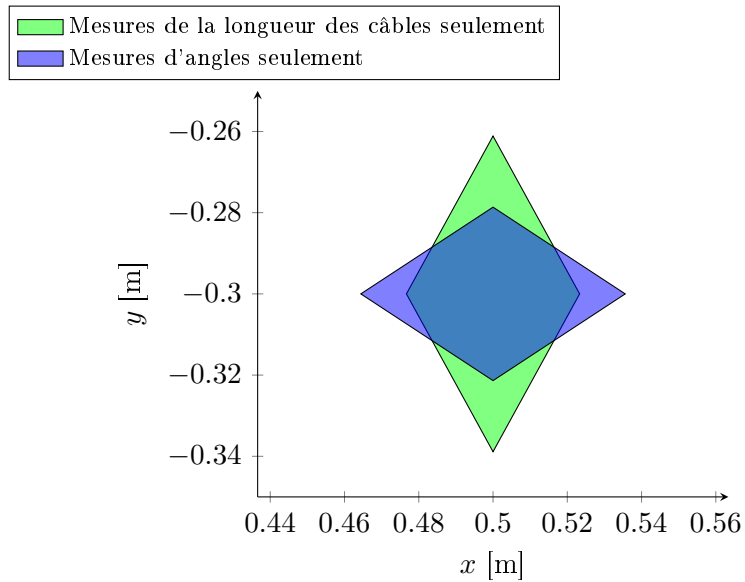


FIGURE 3.5 – Agrandissement de la figure 3.4 à la pose $x = 0.5$ m et $y = -0.3$ m.

Pour les deux premiers jeux de données, le problème géométrique direct est résolu pour trouver l'estimation de la pose. Le problème géométrique direct pour ce mécanisme avec les longueurs de câbles se résume en l'intersection de deux cercles. Il existe deux solutions à ce problème, mais la sélection de la bonne est triviale dans ce cas-ci. La solution du problème géométrique direct pour les mesures d'angle se résume à calculer l'intersection de deux droites, ce qui est trivial. Pour le dernier jeu de données, la méthode de fusion de donnée présentée à la section 3.4 est utilisée. La trajectoire de référence est mesurée grâce à un système de vision numérique de type VICON. Le banc d'essai est présenté à la figure 3.6. Deux enrouleurs utilisant des encodeurs incrémentaux sont utilisés en conjonction avec deux capteurs d'angles. Les capteurs d'angles et les enrouleurs sont positionnés en haut à gauche et en haut à droite du cadre. L'assemblage enrouleur et capteur d'angle est présenté à la figure 3.7. L'organe terminal effecteur est constitué d'une masse de 115 g et d'un crochet où les câbles y sont attachés en un point. Les câbles ont une faible densité linéaire à 1.5 g/m. Ils ont une grande raideur, particulièrement pour ce banc d'essai où les forces impliquées demeurent faibles. En effet, la raideur linéaire du câble est plus grande que 50 Nm/mm et que le niveau de tension estimé dans les câbles ne devrait pas dépasser 10 N. Il y aurait donc une extension maximale des câbles de 0.5 mm par mètre de câble. Le système de vision externe est un système de la compagnie VICON. On peut l'apercevoir dans la figure 3.6. Ce système est capable de suivre des marqueurs dans l'espace tridimensionnel avec une précision de l'ordre du millimètre selon son étalonnage et son installation dans ce banc d'essai. Les encodeurs incrémentaux utilisés par les enrouleurs pour déterminer les longueurs des câbles disposent d'une résolution de 2048 points par tour et sont couplés à une boîte d'engrenage d'un ratio de 5.9 donnant une résolution en sortie de 0.03° sur la position angulaire. Avec un tambour d'un diamètre de 25.4 mm, la résolution sur la longueur du câble est donc de 0.013 mm. Étant donné le jeu dans la boîte d'engrenage, de la compliance du système d'entraînement et de l'incertitude dans la phase d'étalonnage due aux encodeurs incrémentaux, l'incertitude sur la mesure de la longueur est évaluée à ± 1 cm. Pour ce qui est des capteurs d'angle, la résolution de leurs encodeurs est de 2000 points par tour et ceux-ci sont directement attachés aux guides. On obtient donc une résolution de 0.18° par point. Étant donné les incertitudes dans la phase d'étalonnage et un jeu de $\pm 0.5^\circ$ entre le câble et le guide, une incertitude de l'ordre de $\pm 2^\circ$ est envisagée. On utilise ici aussi l'hypothèse de câbles sans masse et parfaitement rigides. Pour vérifier la validité de cette hypothèse, on utilise la méthode présentée dans la section 1.5.2. En utilisant l'équation de la chaînette présentée dans (32), il est possible de calculer la forme d'un câble extensible ayant un poids linéaire ayant les caractéristiques du câble utilisé dans le banc d'essai. Dans la pose la plus sensible aux effets de poids, c.-à-d. lorsque l'organe terminal effecteur se trouve à l'un des deux points d'attache, comme sur la figure 3.8, avec une faible tension de 2 N au point d'ancrage, on observe une erreur de l'angle de départ du câble au point d'attache de 0.21° entre le modèle incluant le poids et l'élasticité et le modèle sans poids et sans masse. Pour ce qui est de l'élasticité du câble, avec une tension maximale attendue de 10 N, une

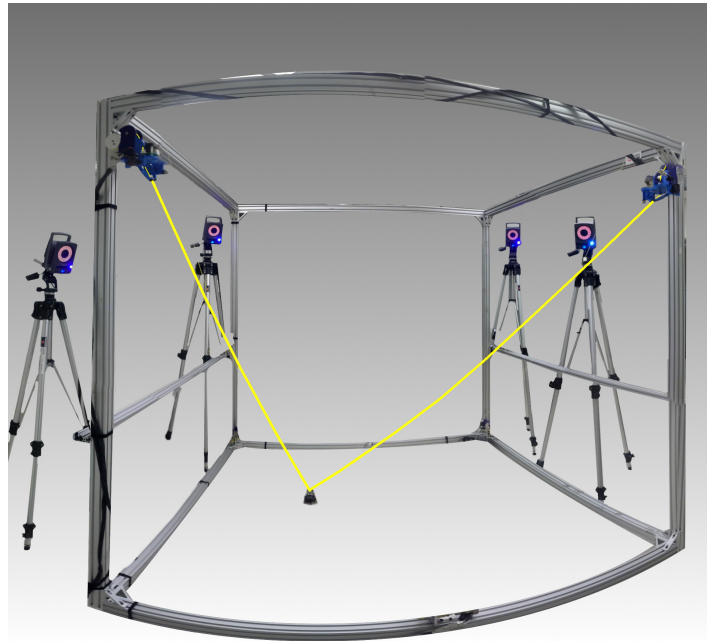


FIGURE 3.6 – Photos du mécanisme à câble utilisé.

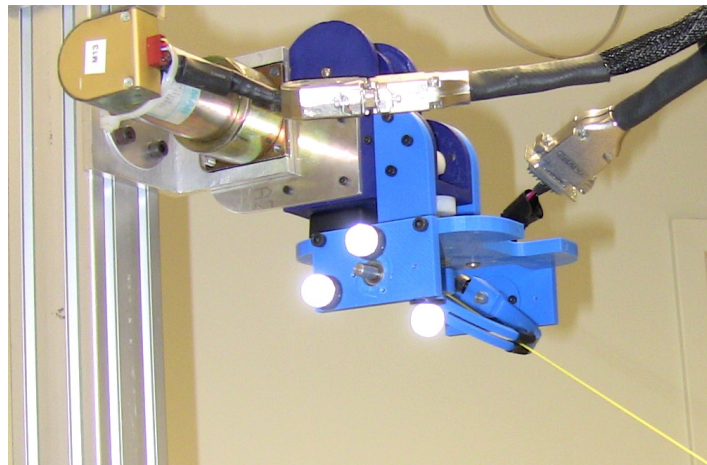


FIGURE 3.7 – Photo de l'assemblage de l'enrouleur et du capteur d'angle.

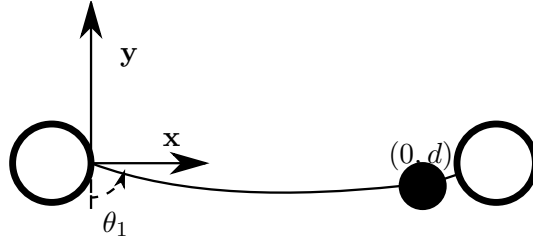


FIGURE 3.8 – Position de l’organe effecteur terminal où le poids du câble a le plus d’impact

Tableau 3.1 – Erreurs observées entre le système de vision et les différentes méthodes d’estimation de la pose

	e_{rms} [cm]	e_{max} [cm]
Mesure des longueurs seulement	3.92	5.01
Mesure d’angles seulement	4.18	10.52
Fusion	3.19	4.16

erreur de moins de 1 mm peut être attendue. Ces deux erreurs sont donc à l’intérieur des incertitudes attendues. Une trajectoire traversant la majeure partie de l’espace de travail est donc effectuée. La figure 3.9 présente les estimations de la pose pour chaque jeu de données. La trajectoire de référence, en bleu, est celle qui est fournie par le VICON. L’estimation de la pose donnée par les mesures de la longueur des câbles est tracée en vert, celui qui est obtenu par les mesures d’angle est tracé en jaune et celui qui est obtenu par la fusion des données est tracé en noir. Pendant la phase d’étalonnage, chacun des capteurs (de longueurs, d’angles et de vision) est aligné sur un référentiel commun par des mesures en boucle ouverte de façon à pouvoir comparer les mesures des poses. Bien que cette méthode soit représentative d’une utilisation sans système de mesure externe, elle engendre un biais face à la mesure de référence donnée par le VICON. Ce phénomène est observé dans la figure 3.9 où l’on peut voir qu’un biais constant existe entre les estimations de la pose par les mesures intrinsèques et celles du VICON. Les résultats quantitatifs sont présentés dans le tableau 3.1. La moyenne quadratique de l’erreur de l’estimation de la pose par rapport à la pose de référence donnée par le système de vision est utilisée comme indice de la précision des différentes méthodes d’estimation de la pose. Elle est calculée pour chaque jeu de donnée comme

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \|\hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}_k\|}, \quad (3.25)$$

où n est le nombre de points de mesure dans la trajectoire, $\hat{\mathbf{x}}_k$ et \mathbf{x}_k sont l’estimation de la pose et la pose de référence respectivement au pas de temps k . L’erreur maximale

$$e_{max} = \max(\|\hat{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_1\|, \dots, \|\hat{\mathbf{x}}_n - \mathbf{x}_n\|), \quad (3.26)$$

est aussi présentée dans le tableau. On peut y observer que l’erreur engendrée par l’estimation de la pose par les capteurs d’angle est plus importante que celle qui est engendrée par

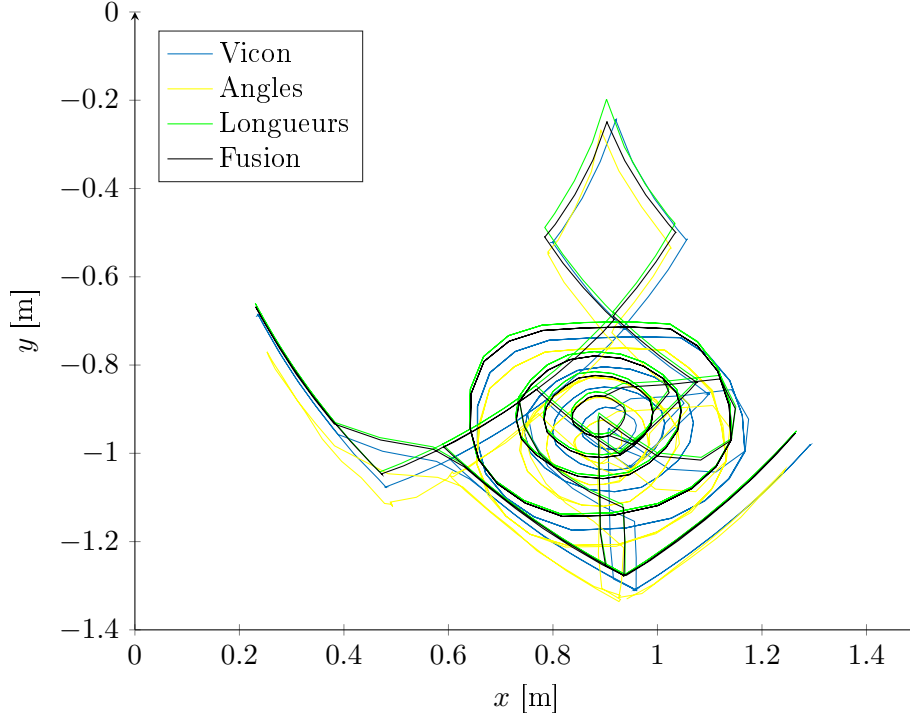


FIGURE 3.9 – Trajectoire de la pose de l’organe terminal effecteur telle que vue par le VICON et les estimations de la pose par les différentes méthodes proposées.

Tableau 3.2 – Erreurs observées entre le système de vision et les différentes méthodes d’estimation de la pose suite au post-traitement.

	e_{rms} [cm]	erreur max [cm]
Mesures des longueurs seulement	1.52	6.32
Mesures d’angles seulement	3.90	12.3
Fusion	1.25	3.48

l’estimation par les mesures des longueurs. Par contre, l’estimation obtenue par la fusion des deux mesures est de meilleure qualité que chacune des deux mesures prises séparément. Une diminution de l’erreur quadratique moyenne de 19% est observée entre l’estimé obtenu avec les longueurs de câbles et celui obtenu par la fusion. L’erreur maximale a quant à elle diminué de 17%. Du même jeu de données, il est possible de faire un réalignement de l’estimation des poses en post-traitement pour réduire le biais introduit par les incertitudes de la méthode d’étalonnage en boucle ouverte. On fait en sorte que la pose du premier point de mesure concorde avec la pose de référence pour chacune des méthodes d’estimation de la pose. De cette façon, on réplique un scénario réaliste où la pose initiale de l’organe terminal est connue. La figure 3.10 présente donc la même trajectoire dont le biais est enlevé. Les mesures quantitatives de l’erreur quadratique moyenne et de l’erreur maximale dans ce cas sont présentées dans le tableau 3.2. Les avantages observés deviennent alors une réduction de 18% de l’erreur quadratique et une réduction de l’erreur maximale de 45%. Des figures, il est possible de

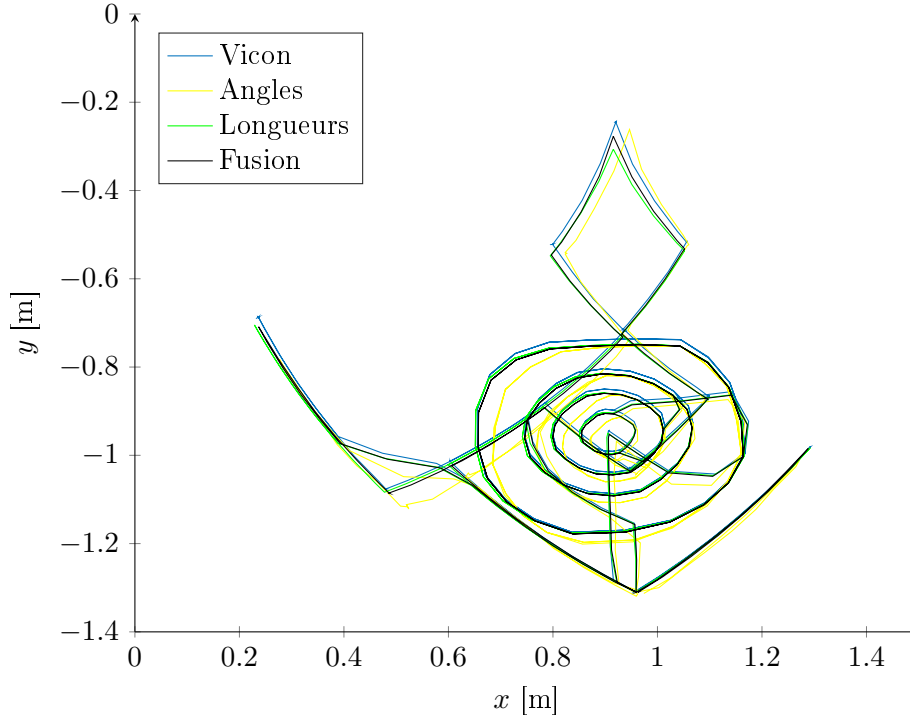


FIGURE 3.10 – Trajectoire de la pose de l’organe terminal effecteur telle que vue par le VICON et les estimations de la pose par les différentes méthodes proposés après un post-traitement servant à réduire le biais.

tirer d’autres informations. On y voit que les capteurs d’angles apportent le plus de bénéfices dans la section haute de l’espace de travail. En effet, on peut voir qu’à la pointe supérieure de la trajectoire, l’estimation d’angle permet à l’algorithme de fusion de tendre vers la pose de référence, alors que l’estimation fournie par les mesures de longueur perd de la qualité. Ce phénomène confirme les observations faites en simulation qui suggèrent que la zone supérieure de l’espace de travail bénéficierait le plus de la fusion des deux mesures. On aperçoit également sur les figures que la qualité de l’estimation fournie par les mesures des angles est faible lorsque les câbles sont longs, ce qui était également attendu. On voit par contre que l’algorithme de fusion n’utilise que très peu les informations apportées par ces mesures dans ce cas. En effet, l’estimation provenant des longueurs des câbles se superpose avec celui de la fusion. À la vue de ces résultats, bien qu’appréciable, l’utilisation de capteurs d’angles pour l’interface haptique n’apportera pas un avantage significatif sur la précision de la mesure de la pose, car la longueur des câbles sera en moyenne plus longue qu’un mètre et à ce point les bénéfices seront moindres. L’ajout de ces capteurs complexifie l’installation et diminue la fiabilité du mécanisme par l’ajout de capteurs électroniques et de pièces mobiles, ce qui induit des points de défaillances supplémentaires.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'utilisation de capteurs d'angles dans les mécanismes parallèles à câbles a été investiguée dans le but d'augmenter leur précision. Une présentation du capteur d'angle y est faite. Les équations cinématiques liant la pose et les mesures articulaires qui sont les mesures de longueurs des câbles et des angles de départ des câbles y sont également présentées. Deux méthodes de fusion des données sont présentées, l'une basée sur une résolution des moindres carrés et l'autre basée sur un observateur de type filtre de Kalman étendu. Une simulation a permis de voir les zones où la fusion des mesures serait le plus utile et d'anticiper les gains en précision. Finalement, une expérimentation sur un mécanisme à câbles simple a permis de constater des gains en précision dus à l'utilisation de capteurs d'angles, mais ceux-ci se limitent à certaines zones de l'espace de travail où la longueur des câbles est faible. Dans la simulation et l'expérience, lorsque les câbles ont moins d'un mètre. Les résultats montrent une amélioration de la précision de l'ordre de 20% sur l'erreur quadratique moyenne et sur l'erreur maximale lors de l'expérimentation. Les gains les plus significatifs sont, comme anticipés, aux zones de l'espace de travail où les câbles y sont courts et où la sensibilité de la mesure de la longueur des câbles est faible. Ces zones, pour l'architecture du robot présenté dans ce chapitre, se situent proches de l'axe des x . En effet, dans cette zone les deux mesures se complètent bien et permettent un gain appréciable. Ces résultats font en sorte que ces capteurs d'angles ne seront pas utilisés par l'interface haptique développée dans cette thèse. Les travaux futurs sur ce sujet devraient approfondir les bénéfices pour les mécanismes à câbles plus complexes, notamment ceux qui ont des capacités en orientation. De récents développements, (47), ont permis de trouver une méthode pour déterminer la pose de façon algébrique prenant en compte la sensibilité cinématique et le niveau d'incertitude des mesures dans les capteurs pour un mécanisme d'une architecture semblable à celle présentée dans ce chapitre. D'autres avenues possibles de recherche seraient d'utiliser des capteurs d'angles pour discriminer entre plusieurs solutions du problème géométrique direct. En effet, un placement stratégique de ce type de capteurs a permis de trouver des solutions algébriques au problème géométrique direct de mécanismes parallèles complexes comme les plateformes de type Gough-Stewart (100).

Chapitre 4

Gestion des tensions dans les câbles hors de l'espace de travail

Ce chapitre présente une nouvelle méthode de gestion de la tension dans les câbles spécifique aux problématiques de l'haptique. Ce chapitre est basé sur l'article présenté à l'« International Conference on Control, Automation and Systems 2016 (ICCAS) » (45). Contrairement aux robots conventionnels, les robots utilisés en haptique peuvent être forcés hors de leur espace de travail par les forces externes causées par l'utilisateur. Hors de l'espace de travail, le mécanisme n'est plus en mesure de générer les efforts requis pour maintenir une bonne qualité de rendu haptique. Par contre, le système doit tout de même fonctionner et gérer les tensions dans les câbles, sous peine de perte de tension dans ces derniers ou d'arrêt du mécanisme. Une gestion des tensions adéquate lors de ces situations permet de maintenir une qualité de rendu haptique acceptable, même sans être parfaite. Ce chapitre propose donc une méthode basée sur la programmation quadratique pour trouver une solution au problème de gestion des tensions dans les câbles en trouvant une solution alternative lorsque le robot est à l'extérieur de son espace de travail et ne peut donc plus générer l'effort désiré. Comme le domaine d'application est l'haptique, l'algorithme doit être capable de travailler en temps réel, un sujet qui sera abordé plus loin dans le chapitre. Une revue des algorithmes existants est premièrement présentée qui permet d'appuyer le choix de la programmation quadratique comme algorithme de base. L'ajout de variables d'écarts est ensuite proposé comme adaptation à l'algorithme de gestion des tensions par programmation quadratique standard. Des simulations sont ensuite présentées afin de valider l'algorithme proposé. Finalement, une démonstration en temps réel est faite sur un mécanisme à huit câbles et six ddl permettant de valider son utilisation en temps réel.

4.1 Revue de littérature

Une des préoccupations principales des mécanismes parallèles entraînés par câbles est la gestion des tensions dans les câbles. Principalement pour les systèmes pleinement contraints, où il existe une redondance d'actionnement. La gestion de ces tensions dicte le comportement du mécanisme, elle influence la raideur du mécanisme, la consommation d'énergie et l'usure des pièces, par exemple. Cette gestion des tensions a été abordée dans plusieurs publications, mais ces dernières n'abordent que peu cette gestion lorsque le robot est hors de son espace de travail, une situation particulière au domaine de l'haptique. Les algorithmes existants sont soit en mesure de conclure à l'inexistence de la solution, soit ne convergent tout simplement pas. Ces réponses ne conviennent pas à une utilisation en haptique, car elle engendre une perte du contrôle de la tension dans les câbles et donc une forte dégradation du rendu haptique. On cherche donc une solution alternative permettant de conserver un rendu haptique aussi fidèle que possible. On définit ici l'espace de travail comme l'espace de travail des efforts faisables « WFW ». Sa définition formelle est présentée dans la section 1.5.7, mais se résume en l'ensemble des poses où le robot est en mesure d'appliquer un ensemble d'efforts prescrits. Le suractionnement nécessaire pour pleinement contraindre un mécanisme à câbles engendre des complexités lors du calcul des tensions nécessaire pour exercer un certain effort. Dans les dernières décennies, plusieurs chercheurs ont abordé ce problème. Bruckmann et coll. (15) ont analysé deux algorithmes, l'un basé sur l'analyse des intervalles et l'autre basé sur l'optimisation par descente de gradient. Les conclusions de ces recherches montrent que pour les mécanismes disposant d'un niveau de redondance $r > 1$, la méthode basée sur l'analyse d'intervalles garantit une solution, mais demande un temps de calcul important, alors que la solution par descente de gradient atteint la plupart du temps la même solution, mais que sa convergence n'est pas garantie. Les deux algorithmes présentés ne sont pas encore adaptés au contrôle en temps réel. Plusieurs chercheurs, (105; 11; 115), ont ensuite concentré leurs recherches pour trouver des algorithmes qui pourraient être utilisés en temps réel avec assurance. Une des méthodes explorées demande de trouver une solution analytique au problème (121), ce qui simplifie grandement les calculs. La solution analytique trouvée peut être solutionnée en un temps de calcul rapide et prédéterminé. L'inconvénient principal est qu'il existe des poses où une solution existe, mais que l'algorithme ne peut trouver. Andreas Pott (120) a également fait une comparaison des algorithmes les plus étudiés permettant de trouver la distribution des tensions. Un résumé des comparaisons faites dans cet article est présenté dans le tableau comparatif 4.1. Gouttefarde et coll. (59) ont proposé un algorithme spécifique au cas $r = 2$. Cette méthode profite du fait que l'espace des solutions est à deux dimensions pour géométriquement créer le polygone convexe de la solution et ensuite trouver une solution géométrique comme le centroïde ou la somme pondérée des sommets. Une caractéristique désirable de l'algorithme de gestion des tensions est sa capacité à trouver des solutions continues lorsque la trajectoire et la demande en effort sont elles aussi continues. Gosselin et Grenier (52) ont proposé la minimisation d'une norme p du vecteur des tensions dans les câbles dans la déter-

Tableau 4.1 – Comparatif des différents algorithmes existants

Méthode	Capacité temps réel	Niveau de tension	Couverture de l'espace de travail	Continuité	Redondance d'actionnement	Vitesse de calcul
Programmation linéaire	non	variable	totale	non	toutes	rapide
Programmation quadratique	oui	Max, min	nd	oui	toutes	moyenne
Descente de gradient	non	param.	partielle	oui	toutes	moyenne
Dijkstra	non	variable	totale	non	toutes	lente
Analytique	oui	variable	partielle	oui	toutes	rapide
Centre géométrique	oui	moyenne	totale	oui	$r = 2$	rapide
Somme pondérée	oui	moyenne	totale	souvent	toutes	moyenne
Méthode du noyau	oui	variable	totale	oui	$r = 1$	rapide
« Available wrench set »	non	variable	totale	non	toutes	lente

Information tirée de l'article d'Andreas Pott (120).

mination de la distribution des tensions. De cette façon, la continuité est gardée et l'on trouve un niveau de tension médian faisant le compromis entre rigidité et puissance nécessaire. Oh (109) a utilisé avec succès la programmation linéaire et quadratique pour résoudre en temps réel le problème de la gestion de la tension dans les câbles pour un mécanisme plan à trois câbles. Ces différents algorithmes proposent une base de solutions utiles, mais aucun n'est en mesure de trouver une solution alternative lorsque le robot ne peut produire l'effort demandé. La solution présentée dans ce chapitre propose alors de réduire l'amplitude du vecteur d'effort demandé ou de changer sa direction de sorte qu'une solution puisse être trouvée. Pour se faire, l'algorithme utilise les variables d'écart et la programmation quadratique ce qui permet de relaxer les contraintes et de trouver une solution alternative satisfaisante. Borgstrom et coll. (11) ont proposé l'utilisation de variable d'écart dans le contexte de gestion de la tension dans les câbles comme façon d'améliorer les temps de calcul. Dans la méthode de Borgstrom, les variables d'écart servent à relaxer les contraintes de tension minimale et maximale dans les câbles. L'algorithme permet donc de trouver des solutions inexistantes à l'origine, mais génère une solution qui est impossible à réaliser par le robot. Les tensions dépassant les limites seront donc saturées et l'effort à l'organe effecteur terminal est différent de celui qui est demandé. De plus, aucune solution n'est alors trouvée si l'effecteur se trouve en singularité et que le robot n'est pas en mesure de générer des efforts dans la direction demandée. L'algorithme proposé ici est plus spécifique au travail hors de l'espace de travail, mais repose sur les mêmes principes que celui de Borgstrom.

4.2 Problème de la distribution des tensions

Pour présenter formellement le problème de la distribution des tensions, il est nécessaire d'utiliser le concept de matrice de structure tel que présenté à l'équation 1.13 du chapitre d'introduction. Cette matrice permet de faire le lien entre les tensions dans les câbles et l'effort effectué par l'organe effecteur terminal. On peut exprimer la relation en fonction des forces exercées par les câbles au point P comme

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{w}_p, \quad (4.1)$$

où $\mathbf{w}_p = [\mathbf{f}^T \boldsymbol{\eta}^T]^T$ l'effort résultant appliqué par les câbles au point P . \mathbf{f} est le vecteur de force et $\boldsymbol{\eta}$ vecteur des moments appliqués par l'organe effecteur terminal sur son environnement. Il est possible de relier la matrice de structure aux équations cinématiques de premier ordre présentées dans la section 1.5.4 par le concept de dualité cinématique-statique. \mathbf{A} est définie pour toutes les poses sauf dans le cas où les câbles seraient de longueur nulle. À la connaissance de l'auteur, ce cas qui n'est jamais rencontré dans un usage standard, et ne sera donc pas couvert dans ce chapitre. Le problème de la distribution des tensions dans les câbles consiste à trouver le vecteur des tensions $\tau_i, i = 1 \dots m$, pour les câbles qui permettent de générer un effort prescrit à l'organe effecteur terminal. Comme les câbles ne peuvent qu'appliquer une tension, le vecteur des tensions $\boldsymbol{\tau}$ doit être non négatif. Cette définition du problème est commune à toutes les méthodes de gestion des tensions présentées dans la revue de littérature. Dans la plupart des configurations du robot, il existe une infinité de solutions à l'équation 4.1, même en y ajoutant la contrainte de non-négativité. Par contre, il y a des configurations où la matrice \mathbf{A}^T n'est pas de plein rang et où il n'y a pas de solutions. Dans ces situations, l'organe effecteur terminal se situe hors de son « Wrench-Closure Workspace (WCW) (136) ». De plus, dans la plupart des cas, une trop faible tension dans les câbles est à éviter, car cela peut causer un mou dans le câble correspondant, même avec une tension positive. De même, une trop grande tension est infaisable par les actionneurs. Pour prendre en compte ces phénomènes, les tensions dans les câbles sont souvent bornées par un minimum $\underline{\tau}$ et par un maximum $\overline{\tau}$. On peut donc exprimer mathématiquement les contraintes du problème de la gestion de la tension sous la forme

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{w}_p, \quad \mathbf{0}_m \leq \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \overline{\boldsymbol{\tau}}, \quad (4.2)$$

où $\mathbf{0}_m$ est de vecteur de zéro de dimension m . On retrouve ces contraintes dans la définition du WFW (57). Les différentes approches qui ont été proposées dans la littérature pour trouver une distribution de tensions adéquate se distinguent principalement par la fonction objectif de leur problème d'optimisation. Des indices de performance rencontrés, on trouve la minimisation de la norme p du vecteur $\boldsymbol{\tau}$ des tensions. La norme $p = 1$ peut être choisie de façon à exprimer le problème sous forme de programme linéaire. La norme euclidienne est aussi commune, car elle est liée à la puissance du système et peut être exprimée sous la forme d'un programme quadratique. Un des désavantages de l'approche des normes p est qu'elle tend à trouver des

solutions à faibles tensions dans les câbles, ce qui a comme effet de réduire la rigidité de l'organe effecteur terminal. Pour contrer ce phénomène, d'autres approches sont conçues avec un niveau de tension intermédiaire. Une des idées présentées consiste à extraire géométriquement une solution du polytope de solutions représenté par l'équation (4.2) dans l'espace des tensions (59). Prendre le centroïde ou une moyenne pondérée des sommets du polytope en sont des exemples. Certaines de ces approches sont spécifiques à un niveau de redondance d'actionnement. Les plus communs sont les cas où r égale à 0, 1 ou 2.

4.3 Solution proposée

Le problème à résoudre consiste à trouver une solution au problème des tensions lorsque les contraintes exprimées par les équations 4.2 n'admettent pas de solution. Cette situation peut se produire en haptique lorsque l'effort demandé, \mathbf{w}_p , est trop important, près des zones de l'espace de travail où la matrice \mathbf{A} n'est pas de plein rang. Ces situations peuvent se produire plus fréquemment en haptique, car l'utilisateur exerce des efforts externes sur l'organe effecteur terminal et peut plus facilement emmener ce dernier dans des poses non polyvalentes. Il est possible de limiter ces occurrences en imposant des limites strictes sur les poses possibles de l'organe effecteur terminal par le biais de murs virtuels par exemple. Par contre, cette méthode est plus difficile à appliquer avec un mécanisme à six degrés de liberté pour lequel le « WFW » est complexe. Imposer des murs virtuels restreint souvent inutilement l'espace de travail si des murs simples sont positionnés de façon conservatrice. À l'inverse, avec un placement complexe de murs virtuels longeant le « WFW », il serait contre-intuitif pour l'utilisateur de rencontrer des murs à des endroits inattendus, car les frontières du « WFW » ne sont, elles-mêmes, pas nécessairement intuitives. Un algorithme de gestion des tensions est donc nécessaire pour faire face à ce problème lorsqu'il survient. La solution proposée repose sur l'utilisation de variables d'écart pour assouplir les contraintes. Les tensions minimales et maximales sont considérées ici comme inviolables. Cette hypothèse est différente de celles de l'article de Borgstrom (11), où l'on privilégie l'assouplissement de ces contraintes. Assouplir ces contraintes donne une solution qui ne peut pas être appliquée telle quelle et la résultante à l'organe effecteur terminal est donc inconnue. La solution est donc d'assouplir la contrainte sur l'effort désiré. L'introduction de variables d'écart dans l'équation de contraintes 4.2 donne donc

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{s}_1 = \mathbf{w}_p, \quad (4.3)$$

où $\mathbf{s}_1 \in \mathbb{R}^n$ est la nouvelle variable d'écart. Pour maintenir un effort résultant égal ou près de celui qui est demandé, on ajoute un terme au problème d'optimisation qui entraînera la minimisation de l'amplitude de cette variable d'écart. Parmi les algorithmes de gestion de tension dans les câbles existants, ceux qui semblent les plus propices à l'ajout de variables d'écart sont ceux qui sont basés sur la programmation linéaire et quadratique. En effet, ils sont rapides et gèrent tous les niveaux de redondance d'actionnement. Bien qu'ils soient classés

comme n'ayant pas de capacité en temps réel dans le tableau de Pott (120), une implantation temps réel a tout de même été réalisé et a donné des résultats satisfaisants.

4.3.1 Programme linéaire

En définissant une fonction de coût linéaire, on obtient le programme linéaire suivant :

$$\begin{aligned}
& \underset{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1^*}{\text{minimiser}} && \mathbf{d}_1^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}_2^T (\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_1^*), \\
& \text{assujetti à} && \mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_1^* = \mathbf{w}_p, \\
& && \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \bar{\boldsymbol{\tau}}, \\
& && \mathbf{s}_1 \geq \mathbf{0}_n, \\
& && \mathbf{s}_1^* \geq \mathbf{0}_n,
\end{aligned} \tag{4.4}$$

où \mathbf{d}_1 et \mathbf{d}_2 sont des vecteurs de poids qui peuvent à la fois servir d'ajustement et à normaliser les forces et moments. Le vecteur \mathbf{s}_1^* est ajouté pour permettre des écarts négatifs face au vecteur d'effort \mathbf{w}_p . La résolution de ce problème n'est pas difficile à calculer et est simple à implanter grâce à des méthodes bien connues telles que la méthode du simplex.

4.3.2 Programme quadratique

Les bases de cette solution sont présentées dans (91), où un programme quadratique est utilisé pour trouver la distribution des tensions pour un mécanisme à câbles sans redondance d'actionnement ($r = 0$). La fonction de coût utilisée dans ce cas est la variance du vecteur de tension dans les câbles. Cette fonction d'optimisation favorise la continuité de la solution, ce qui permet de limiter les saccades et les vibrations dans le mécanisme. L'implantation du problème d'optimisation du programme linéaire augmenté des variables d'écart prend la forme suivante

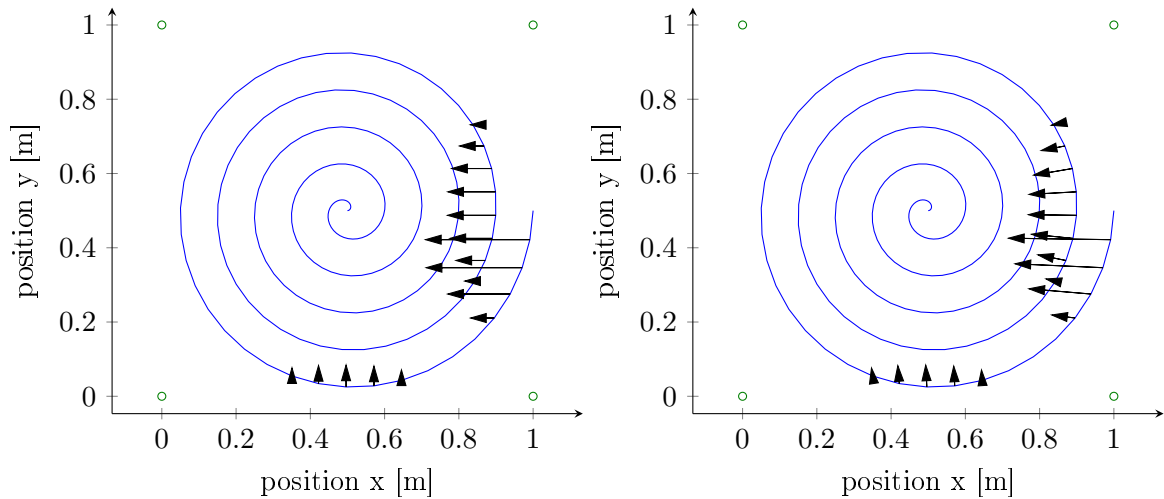
$$\begin{aligned}
& \underset{\boldsymbol{\tau}, \mathbf{s}_1}{\text{minimiser}} && \mathbf{s}_1^T \mathbf{D}_1 \mathbf{s}_1 + (\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^*)^T \mathbf{D}_2 (\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^*) \\
& \text{assujetti à} && \mathbf{A}^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{s}_1 = \mathbf{w}_p \\
& && \underline{\boldsymbol{\tau}} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \bar{\boldsymbol{\tau}},
\end{aligned} \tag{4.5}$$

où \mathbf{D}_1 et \mathbf{D}_2 sont des matrices de poids, qui sont choisies comme étant diagonales positives, $\boldsymbol{\tau}^*$ est un vecteur de tension cible qui permet d'ajuster la solution selon un besoin de tension faible ou élevée dans les câbles. En choisissant $\boldsymbol{\tau}^* \leq \underline{\boldsymbol{\tau}}$, la solution aux plus faibles tensions est obtenue, donc celle avec la plus faible puissance nécessaire. En choisissant $\boldsymbol{\tau}^* = \frac{1}{2}(\underline{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\boldsymbol{\tau}})$, on obtient un compromis entre raideur et puissance. Cette option est celle qui est privilégiée dans les simulations et expérimentations des sections suivantes. Finalement, choisir $\boldsymbol{\tau}^* \geq \bar{\boldsymbol{\tau}}$ mène à la solution qui donne le plus de raideur à l'organe effecteur terminal. Pour s'assurer d'obtenir une solution qui suit l'effort prescrit, l'ordre de grandeur des termes de la matrice \mathbf{D}_1 devrait être plus grand que ceux de la matrice \mathbf{D}_2 . Un résiduel demeure toujours dans la variable d'écart \mathbf{s}_1 , mais en pratique, il est négligeable lorsque les coefficients des matrices de poids sont choisis correctement.

4.4 Simulations hors-ligne

Des simulations sont effectuées pour observer le comportement des deux différents algorithmes. Pour le programme linéaire, une mise en œuvre utilisant la méthode du simplex a été conçue afin d'évaluer ses performances et son comportement. Cette mise en œuvre est écrite en C pour minimiser son temps d'exécution, permettant d'évaluer les temps de calcul pouvant être obtenus. La compilation se fait avec les outils de l'environnement Matlab, ce qui permet de tracer aisément les résultats. Pour le programme quadratique, la mise en œuvre est aussi programmée en C à l'aide de CVXGEN (98), un générateur de code permettant de résoudre des problèmes de programmation quadratique convexe. Cette mise en œuvre permet d'obtenir des temps de calcul faibles qui pourront par la suite être utilisés en temps réel. Une compilation avec les outils Matlab est également utilisée pour les simulations hors ligne. La simulation hors ligne simule un mécanisme à câbles plan à deux degrés de liberté disposant de quatre câbles ($r = 2$). Une trajectoire forcée, en forme de spirale, est imposée à l'organe effecteur terminal point. Cette trajectoire pourrait représenter une trajectoire faite par un humain par exemple. On demande à l'algorithme de calculer les tensions nécessaires pour créer une force de 1 N dans la direction positive de l'axe des x. La trajectoire imposée passe près des limites de l'espace de travail (WCW). De ce fait, le robot n'est pas en mesure d'exercer l'effort de 1 N sur toute la trajectoire. L'algorithme trouve donc un effort cartésien qui demeure possible à faire. On peut voir dans la figure 4.1 la trajectoire imposée à l'effecteur ainsi que les points d'ancrage des câbles (points verts). Les flèches représentent la différence entre l'effort voulu et l'effort réellement obtenu. On peut observer que la résultante est très similaire pour les deux algorithmes. On voit dans la figure 4.2, qui trace les efforts rendus par le robot, que le programme quadratique dégrade légèrement le rendu dans les deux axes, alors que l'algorithme linéaire dégrade le rendu principalement pour un seul axe à la fois. Les résultats sont tout de même très similaires. On observe le plus de différences sur les graphiques des tensions de la figure 4.3, où chaque courbe représente la tension dans un des câbles. On peut apercevoir le désavantage de la solution à programme linéaire qui ne fournit pas nécessairement une solution continue durant la trajectoire. Le programme quadratique quant à lui fournit des tensions plus continues particulièrement lorsque le robot est en mesure de fournir l'effort demandé, ce qui correspond à la première moitié de la trajectoire. De ce fait, on limite les vibrations et les saccades dans le mécanisme. On favorise donc l'utilisation du programme quadratique pour la suite des expériences. La continuité des tensions n'est pourtant pas garantie, puisque lors du franchissement de poses singulières, on observe des discontinuités. Ce phénomène est apparent dans la simulation suivante.

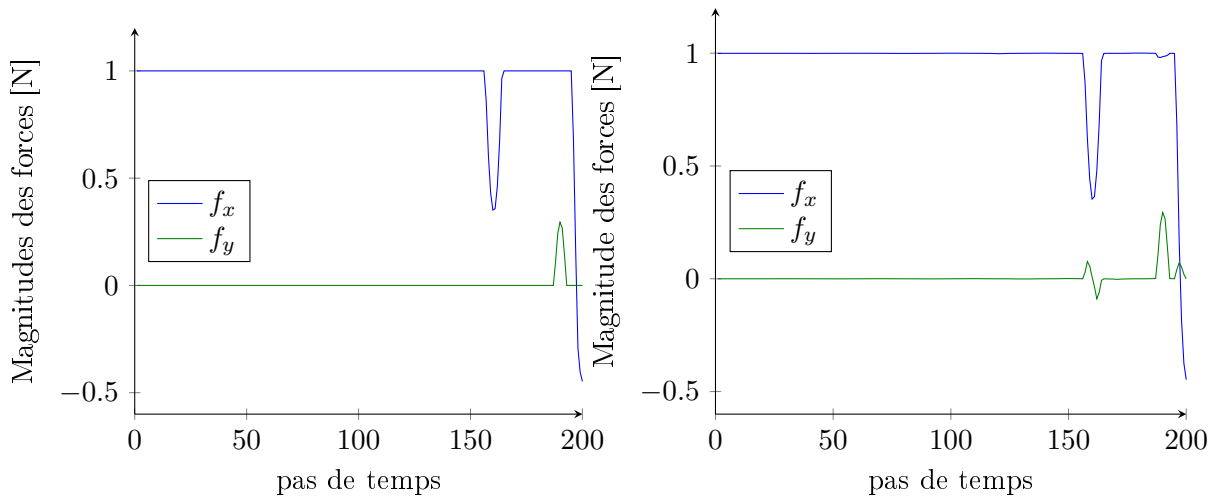
La deuxième simulation est similaire à la première, mais la longueur de la section de la trajectoire située hors de l'espace de travail est amplifiée. La trajectoire suivie est la même, mais un câble est retiré, celui qui est positionné à $\{0, 1\}$. De ce fait, le mécanisme est complètement à l'extérieur de son espace de travail statique sur plus de la moitié de la trajectoire, ce qui



(a) Programme linéaire.

(b) Programme quadratique.

FIGURE 4.1 – Trajectoire et rendu du robot simulé. Les points d’ancrage des câbles du robot sont dénotés par des cercles et sont situés aux points $\{0,0\}$, $\{1,0\}$, $\{0,1\}$ et $\{1,1\}$. La trajectoire débute au centre. Les flèches représentent la différence entre l’effort voulu et l’effort réellement obtenu.



(a) Programme linéaire.

(b) Programme quadratique.

FIGURE 4.2 – Efforts résultants pendant la trajectoire. L’effort cible est un effort de $f_x = 1$ N.

correspond au triangle supérieur gauche de la figure 4.4. Le mécanisme a donc maintenant un niveau de redondance de $r = 1$. Le rendu demandé est aussi changé : on demande un effort nul à l’organe effecteur terminal. Cet effort ne peut bien entendu pas être respecté sur toute la trajectoire. La figure 4.4 présente donc cette trajectoire. Les flèches représentent les efforts réels rendus par le robot. La grandeur de la force résultante est également tracée à la figure 4.5. On remarque qu’à peu d’endroits sur la trajectoire le rendu est tel que commandé (effort nul). Par contre, on voit que l’effort est continu et tend à se coller le plus possible au rendu voulu

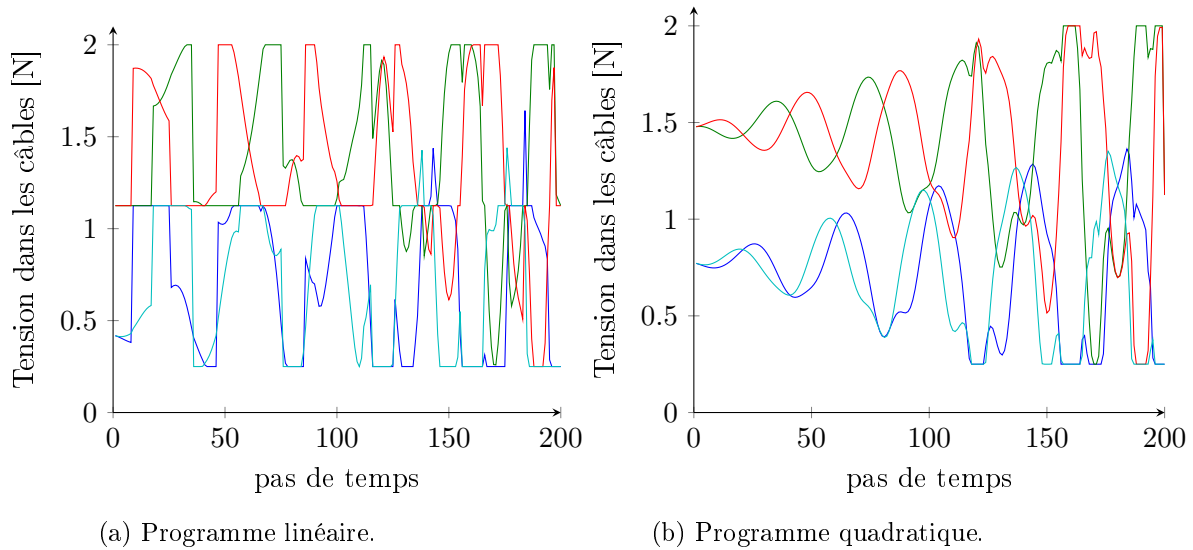


FIGURE 4.3 – Tension dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à $[0.25, 2]$ N.

compte tenu des circonstances. La figure 4.6 montre les tensions pendant la trajectoire. On peut y observer des discontinuités. Ces discontinuités interviennent lorsque l'organe effecteur terminal traverse la frontière correspondant à l'hypoténuse du triangle formé par les points d'ancrage des câbles. En effet, le robot se retrouve en singularité à ces points. Ces discontinuités sont donc inévitables si l'on désire garder un rendu aussi fidèle que possible. Ces cas devraient normalement être assez rares en pratique et ne devraient pas gêner l'utilisateur. Finalement, dans une analyse non présentée dans cette thèse ayant pour but d'évaluer l'impact du niveau de redondance d'actionnement r sur le temps de calcul, une simulation est effectuée, mais cette fois en y ajoutant jusqu'à 100 câbles pour un niveau de redondance de $r = 98$. On observe dans ce cas des temps de calcul croissant linéairement avec le nombre de câbles. Par contre, pour un nombre de câbles encore plus élevé (4000), une croissance exponentielle est observée. Comme la grande majorité des robots à câbles utilisent un nombre de câbles largement inférieurs à 100, l'impacte de cette exponentielle est négligeable.

4.5 Mise en œuvre temps réel

Une des critiques dirigées contre les algorithmes basés sur la programmation quadratique est que leur résolution est itérative et que le temps de calcul dans le pire cas est grand. Ici, ce problème est mitigé par le relativement faible nombre de variables décisionnelles. En effet, dans le cas d'un mécanisme à six degrés de liberté composé de huit câbles, il y a 14 ($m+n$) variables décisionnelles. De plus, le problème est convexe et donc sa solution peut être calculée en temps polynomial (147). Pour valider l'utilisation de cet algorithme en temps réel, une expérience est effectuée sur un mécanisme réel à six degrés de liberté et huit câbles. Ce mécanisme est un

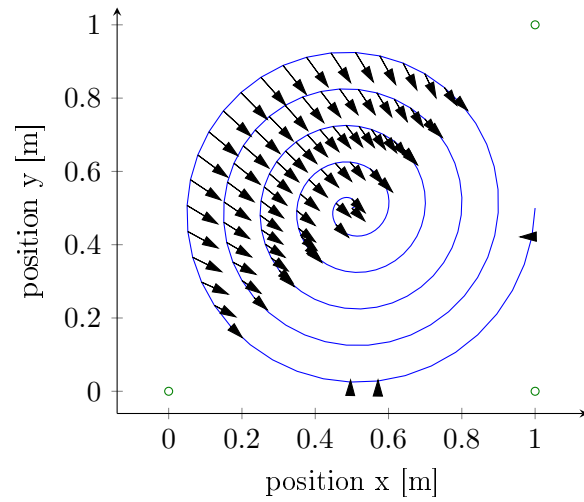


FIGURE 4.4 – La trajectoire effectuée est la même que celle de la figure 4.1b, mais un câble a été enlevée, celui du point d’ancrage $\{0,1\}$. La trajectoire va du centre vers l’extérieur. Les flèches représentent l’effort réellement obtenu lorsque l’effort voulu est nul.

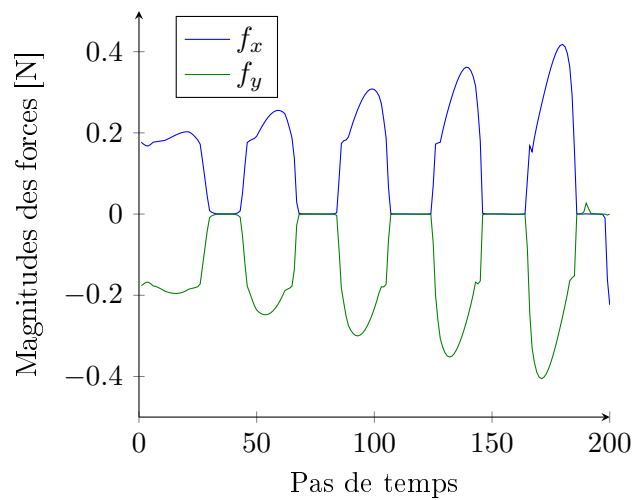


FIGURE 4.5 – Efforts résultants pendant la trajectoire. L’effort cible est un effort nul.

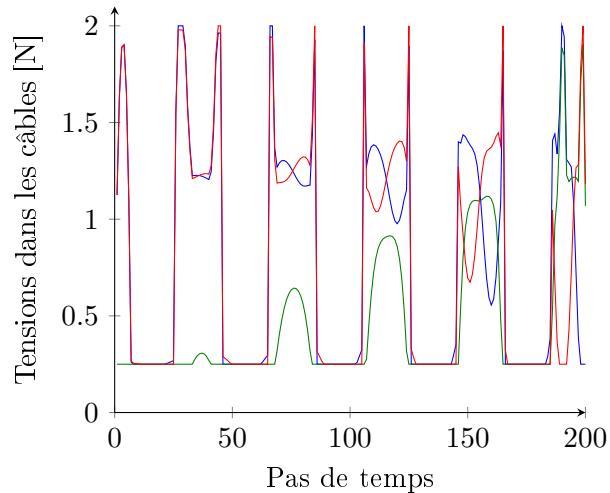


FIGURE 4.6 – Tensions dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à $[0.25, 2]$ N

mécanisme à 8 câbles et 6 ddl qui est présenté plus en détail dans le chapitre 8. Le code est donc compilé pour fonctionner sur un noeud de calcul en temps réel opérant sur le système d’exploitation QNX Neutrino RTOS, qui se charge également de tous les calculs permettant le fonctionnement du robot. L’environnement de simulation utilisé est RT-Lab, logiciel développé par OPAL-RT, qui permet à des schémas Simulink de tourner sur le système en temps réel. Le noeud de calcul est équipé d’un processeur Pentium IV cadencé à 1.8 GHz. La boucle de contrôle tournant à une fréquence de 500Hz, le temps de calcul utilisé par l’algorithme est de 12% du temps alloué aux calculs qui est de 2 ms. Il en résulte un temps de calcul approximatif de $200 \mu s$. L’algorithme n’est donc pas trop complexe pour un système dédié moderne. Par contre, il pourrait être trop demandant pour certains systèmes embarqués. Le mécanisme utilisé dans les tests a été développé en tant qu’interface haptique et dispose de six degrés de liberté et de huit câbles, une configuration typique dans le monde des mécanismes parallèles à câbles. Son empreinte physique s’apparente à un cube de deux mètres de côté. Chacun des enrouleurs est en mesure de générer des tensions de 19.8 N. La tension minimale dans chaque câble, déterminée expérimentalement, est de 2.6 N. Ces limites seront utilisées comme bornes supérieures et inférieures pour l’algorithme. Pendant l’expérience, l’organe effecteur terminal est déplacé à la main dans l’ensemble de son espace de travail et à l’extérieur. Pendant ce temps, l’algorithme calcule une distribution de tensions adéquate simulant une force constante de 10 N vers le sol (z négatif), ce qui imite les efforts causés par la gravité. La figure 4.7 présente la trajectoire effectuée par l’organe effecteur terminal alors qu’il se déplace à l’intérieur et à l’extérieur de l’espace de travail. Comme dans les figures précédentes, les flèches représentent la différence entre l’effort demandé et l’effort réellement produit à l’organe effecteur terminal. Sur la figure 4.8, qui présente l’effort rendu à l’organe effecteur terminal, il est possible de voir le temps où le mécanisme sort de son espace de travail. En effet, aux temps 23 s, 40 s,

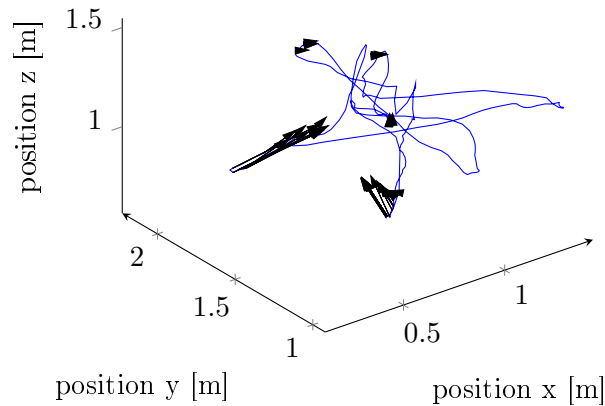


FIGURE 4.7 – Trajectoire imposée par l'utilisateur. Les flèches représentent la différence entre l'effort voulu et l'effort réellement obtenu.

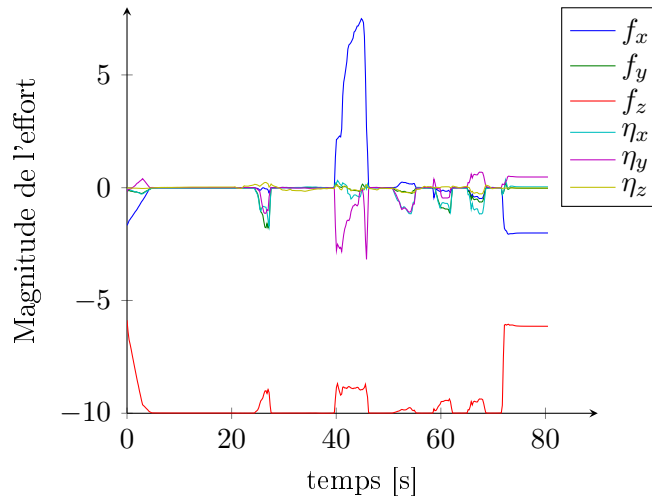


FIGURE 4.8 – Efforts résultants pendant la trajectoire. L'effort cible est un effort de -10 N suivant l'axe des z de façon à simuler un poids de 10 N.

50 s, 60 s et 65 s, on aperçoit que les efforts divergent de l'effort prescrit de -10 N dans l'axe des z , spécialement au temps 40 s, où l'effecteur a même été forcé hors de son espace (WCW). Les tensions restent tout de même bien gérées, tel que présenté à la figure 4.9, où certaines des tensions atteignent leurs valeurs minimales ou maximales durant ces sections de la trajectoire. Bien qu'il soit difficile d'en juger graphiquement, aucune vibration n'a été perçue par l'utilisateur pendant la manipulation. Qualitativement, les forces ressenties lorsque le mécanisme n'est plus en mesure d'effectuer l'effort prescrit demeurent intuitives et ne causent pas de changements brusques et discordants du rendu haptique. La résolution du programme quadratique à l'aide de l'outil de génération de code CXVGEN est donc pleinement capable de faire la gestion de la tension dans les câbles en temps réel. Il est pensable de l'utiliser pour

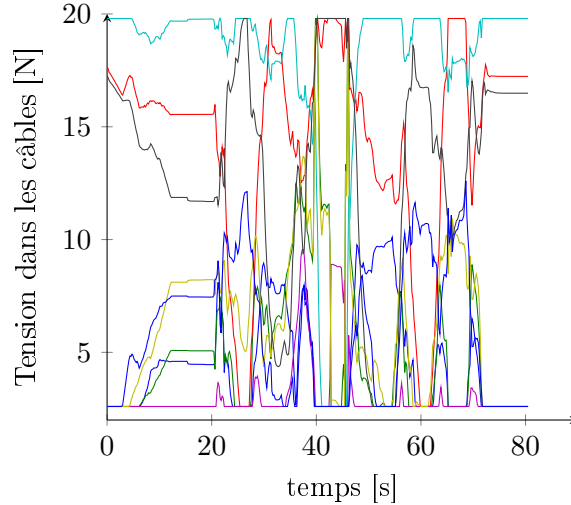


FIGURE 4.9 – Tensions dans les câbles pendant la trajectoire. Les tensions sont limitées à l'intervalle $[2.6, 19.8]$ N

des boucles de contrôle encore plus rapides.

4.6 Conclusion

L'ajout de variables d'écart au problème d'optimisation quadratique de la gestion de la tension des câbles est donc un bon outil pour l'haptique, permettant d'atténuer les problèmes qui apparaissent lorsque l'on demande des efforts à l'organe terminal qui dépassent ses capacités. Elle permet de trouver une solution alternative lorsque le mécanisme se trouve hors de son espace de travail. L'assouplissement des contraintes permet au mécanisme de maintenir un rendu haptique adéquat sans interruption et sans déranger l'utilisateur en dégradant graduellement le rendu. Les simulations sur des architectures de robots simples permettent de bien visualiser le comportement de l'algorithme lors d'excursion hors de l'espace de travail et permettent d'apprécier la continuité de la solution en situation normale. Son utilisation par la suite sur le mécanisme haptique à six degrés de liberté a permis d'établir sa capacité à travailler en temps réel, une nécessité pour les interfaces haptiques. Cet algorithme est donc utilisé dans le contrôle du mécanisme, notamment pour compenser le poids de l'organe effecteur terminal du mécanisme utilisé pour la réadaptation, évalué dans le chapitre 8. Les travaux futurs sur ce type d'algorithmes et plus spécifiquement lors d'une utilisation en haptique pourraient porter sur l'amélioration de la solution alternative trouvée. La solution alternative trouvée pourrait entre autres tendre à faire revenir l'organe effecteur terminal à une pose plus polyvalente, c'est-à-dire le faire revenir dans son espace de travail utile. La solution trouvée actuellement le fait naturellement dans bien des cas, comme ceux des simulations simples, mais ne garantit pas de le faire pour les cas plus complexes, lorsque les mécanismes ont des capacités d'orientation par exemple. Une investigation plus profonde de cet aspect serait intéressante.

Chapitre 5

Contrôle de l'interface haptique

Ce chapitre présente la méthode de contrôle pour une interface haptique basée sur un mécanisme parallèle à câbles, pleinement contraint, utilisé dans les travaux de la thèse. Des particularités de contrôle sont inhérentes à ce type de mécanismes. Quatre différences notables sont présentes : la différence dans les intrants et les extrants, la redondance d'actionnement, l'impact des délais de contrôle et l'utilisation de câbles. Premièrement, la commande en haptique se différencie du contrôle en robotique industriel par ses intrants, comme les trajectoires d'une interface haptique ne sont pas prédéfinies, elles ne peuvent donc pas être utilisées dans un calcul anticipé. La commande en haptique diffère du contrôle en force industriel par l'interaction de l'organe effecteur terminal avec son environnement. Typiquement, la surface entrant en contact avec l'organe effecteur terminal est très rigide pour le contrôle en force, alors que dans une interface haptique la poigne de l'humain a plus de compliance. L'objectif est différent, dans le contrôle en force, le maintien d'une force de contact précise est la priorité, le comportement dynamique du robot est ajusté en conséquence, tandis qu'en haptique la reproduction d'efforts dynamiques est la priorité. Une seconde spécificité du contrôle de l'interface haptique est la redondance d'actionnement qui est nécessaire à l'obtention d'un mécanisme pleinement contraint. Il faut donc porter une attention particulière aux efforts internes pouvant se créer. Ces efforts ont comme effet sur les robots à câbles des tensions élevées ou, au contraire, du fléchissement dans les câbles. Une troisième spécificité est celle des délais de contrôle. D'une façon analogue à la télé opération, ils ont une importance cruciale dans le rendu haptique. La fréquence de contrôle doit donc être élevée, il est souvent question d'un minimum de 100 Hz, ce qui nécessite des algorithmes de contrôle rapides. La fréquence de contrôle étant directement liée à l'impédance maximale pouvant être reproduite. Finalement, l'utilisation de câbles comme moyen de transmission des forces présente également ses défis. En effet, ces derniers ne peuvent travailler qu'en tension, ce qui doit être pris en compte dans les algorithmes de contrôles pour éviter le fléchissement des câbles.

Le chapitre présente donc initialement une revue de la littérature de la commande des robots à câbles, ce qui permettra de faire le choix du type de contrôle. On y présente ensuite les

éléments mécaniques, électroniques et informatiques nécessaires au contrôle de l'interface et qui peuvent influencer la méthode de contrôle. Ensuite, le schéma et la loi de commande de l'interface sont présentés. Finalement, une discussion sur l'implantation de l'environnement virtuel utilisé dans le schéma de commande est présentée.

5.1 Revue de littérature et choix du type de commande

Plusieurs types de contrôle existent pour le contrôle d'interactions entre un robot et un environnement, principalement la commande en force zéro, la commande par impédance, la commande par admittance et la commande hybride. Une revue des méthodes de contrôle est disponible dans (27). Les algorithmes de contrôle des interfaces haptiques à mécanismes parallèles entraînés par câbles ont été développés au début des années 90 avec notamment le Spidar (69), mécanisme à trois ddl permettant un rendu haptique au bout des doigts. Williams (86) présente un robot à 6 ddl et Gallina (46) un à 3 ddl qui sont tous les deux basés sur le contrôle en impédance. Un type de contrôle qui capte un déplacement et produit un effort. Pour ce type de contrôle, les efforts parasites, comme la friction, doivent être grandement minimisés pour obtenir une bonne transparence, une des considérations importantes dans l'article de Gallina. Une des méthodes rencontrées dans la littérature consiste à utiliser une table à coussin d'air pour les mécanismes plans de façon à limiter la friction parasite. Certains articles (145; 26) portant sur des mécanismes haptiques à câbles ayant un grand espace de travail ont été publiés, mais les méthodes de contrôle utilisées n'y sont pas clairement rapportées. On présume ici qu'ils utilisent également une méthode de contrôle par impédance, car ils n'utilisent pas de capteur de force et qu'ils portent une attention particulière à la friction dans le mécanisme. Une méthode de contrôle en force qui utilise des jauges de contraintes sur les câbles est présentée dans (80; 106). L'interface haptique rapportée sert à simuler un jeu de tennis. Les auteurs effectuent alors principalement un contrôle en force zéro et appliquent des impulsions lorsqu'il y a des contacts, ce qui ne se généralise pas à toutes les tâches. Si l'on interprète le système formé par l'humain et l'interface haptique comme deux manipulateurs placés en série tel que présenté dans (141), on peut généralement classer les méthodes de contrôle en haptique en deux catégories : le contrôle par impédance et le contrôle par admittance. La nomenclature de classification se réfère au comportement du robot, qui agit soit comme une impédance, soit comme une admittance. Le contrôle par impédance, qui est le plus souvent rencontré, consiste à générer des forces à l'organe effecteur terminal en fonction des déplacements qui lui sont imposés par l'utilisateur, qui lui, agit comme une admittance. Ce type de contrôle est souvent utilisé, car il ne nécessite pas de capteur d'effort à l'organe effecteur terminal. Le deuxième type de contrôle est la commande par admittance. Ce dernier inverse l'entrée et la sortie du contrôleur par rapport à l'impédance. Son entrée est une force, souvent mesurée à l'organe effecteur terminal par un capteur d'effort, et produit un déplacement correspondant à l'organe effecteur terminal. Une comparaison des deux méthodes est présentée dans l'article de Otis (111). Les

deux méthodes sont propices aux instabilités de façons différentes. La commande par impédance peut devenir instable lorsque l'interface est laissée libre, lorsque l'impédance de la main de l'utilisateur est faible. Le contrôle par admittance lui est sensible aux instabilités lorsque l'impédance de l'utilisateur est élevée. Il faut donc, dans les deux cas, s'assurer d'éviter ces phénomènes ou de prévoir le contrôle en conséquence. L'introduction d'un humain dans un système a un impact sur la stabilité de celui-ci. Selon le cas, l'humain a la capacité de stabiliser un système instable ou, à l'inverse, de déstabiliser un système stable. L'humain peut en effet ajouter de la raideur et de l'amortissement au système. Quelques méthodes sont présentées dans la littérature pour éviter l'instabilité d'un système haptique tel que présenté dans (111). L'une de ces méthodes consiste à modéliser la raideur de l'utilisateur et d'ensuite ajuster la loi de commande pour éviter l'instabilité (140). L'analyse de la stabilité peut alors être effectuée avec les outils communs comme le critère de Liapunov (37) ou avec la méthode des pôles et zéros. Une autre méthode analyse le transfert d'énergie dans le système pour s'assurer que le système soit passif, c.-à-d. qu'il dissipe plus d'énergie qu'il n'en injecte dans le système (61). Par contre, comme rapporté par plusieurs auteurs (38; 16), le modèle de l'humain est difficile à obtenir et varie grandement, ce qui rend la prédiction de la stabilité à partir d'un modèle difficile. La stabilité est donc souvent observée expérimentalement lorsqu'il y a une interface humain-robot (42). Certaines approches présentées dans la littérature proposent la modification en temps réel des paramètres du contrôle de façon à optimiser la stabilité selon certains états du système (66; 42; 113). Ces solutions modifient le rendu de façon non isotrope, c.-à-d. que le comportement de l'interface change en fonction de l'état du robot, en fonction de sa vitesse par exemple. Pour cette raison, ces méthodes ne sont utilisées que si des problèmes de stabilité se présentent, ce qui peut se produire lorsqu'une faible inertie ressentie est nécessaire. Une interface haptique avec une bonne transparence offre un bon rendu parce que la dynamique du mécanisme lui-même n'est pas perceptible par l'utilisateur. La transparence dans un système haptique est définie comme une absence de friction, d'inertie, de gravité ou d'effort parasite provenant de l'interface haptique lors de l'utilisation du mécanisme (142).

L'objectif du contrôle en haptique est de pouvoir rendre une large gamme de surfaces et d'objets virtuels ce qui exige de pouvoir rendre une large plage d'impédances. L'interface doit pouvoir rendre une faible impédance, de façon à reproduire les mouvements libres de contraintes. Elle doit également pouvoir reproduire de grandes impédances de façon à rendre les surfaces dures et les contacts entre différents objets virtuels rigides. Les deux extrêmes sont les impédances les plus difficiles à rendre et sont limités par la stabilité du système. En reproduisant une impédance faible, l'utilisateur peut engendrer l'instabilité par la raideur de sa prise. En reproduisant une impédance élevée, un mur par exemple, la raideur de ce dernier peut également engendrer l'instabilité. Ces deux sources d'instabilité provoquent une augmentation de la raideur équivalente du système et donc peuvent le déstabiliser. La commande par impédance est une méthode commune en haptique comme relevée dans la revue de littérature parce qu'elle ne requiert pas de capteur d'effort et permet une grande bande

passante. L'absence de capteur d'effort est son principal avantage, car ce dernier présente plusieurs défauts comme sa sensibilité à l'électricité statique, sa fragilité face aux surcharges, son coût et sa propension aux dérives de mesure. Par contre, le désavantage de la commande par impédance est qu'elle est grandement influencée par la dynamique de l'interface elle-même. Il est difficile d'obtenir une bonne transparence lorsque l'interface a une grande inertie ou de la friction par exemple. Le système doit également pouvoir être rétro commandable.¹ (141). Des mesures de la vitesse et de l'accélération de l'organe effecteur terminal doivent également être disponibles. La mesure de la vitesse n'est pas particulièrement difficile à obtenir à partir des encodeurs aux articulations, mais l'accélération, elle, est très bruitée. Cette mesure peut être substituée par une mesure de force ou prise à l'aide d'accéléromètres (50), mais ceci demande l'utilisation de capteurs supplémentaires, neutralisant un des avantages principaux du contrôle par impédance. La commande hybride utilisée par Otis et coll. (113) pourrait être une méthode intéressante de commande du système, mais est difficilement reproductible, car elle nécessite une commande par impédance. En effet, la commande par impédance nécessite une rétroaction sur l'effort imposé à la plateforme par les câbles. Comme les enrouleurs utilisés dans le mécanisme à câbles possèdent des réducteurs et que les câbles induisent de la friction aux œillets, la commande en impédance pourrait souffrir d'un manque de transparence. Les réducteurs permettent d'avoir des moteurs de plus faible puissance pour la même capacité en tension dans les câbles. En limitant la puissance des moteurs, on diminue les risques de blessure et on augmente donc la sécurité de l'interface, ce qui est crucial. La friction quant à elle est difficilement évitable à moins de changer complètement de concept d'enrouleurs. Même avec une modélisation de la friction, la commande d'impédance ne permet pas de compenser les effets de la friction statique. Les enrouleurs existants possèdent des capteurs permettant l'acquisition des tensions dans les câbles, mais étant donné leur faible robustesse et le bruit important dans leurs signaux, ces derniers ont été écartés. Une méthode de contrôle en force zéro peut également être utilisée en haptique. Une telle méthode est souvent utilisée pour le mouvement libre à impédance minimale. Par contre, elle est peu adaptée pour reproduire une inertie virtuelle, ce qui demande également une lecture de l'accélération de l'organe effecteur terminal. Cette approche n'est donc pas privilégiée. La commande par admittance est donc privilégiée. En effet, comme la commande a recours à un capteur d'effort, les effets d'inertie et de friction peuvent être réduits pour permettre une bonne transparence. Comme sa sortie est un déplacement cartésien, les commandes articulaires sont automatiquement définies par le problème géométrique du robot. Ce n'est pas le cas de la commande par impédance dont la sortie est une commande en force qui ne définit pas singulièrement les tensions à générer dans les câbles. De plus, la commande par admittance est bien adaptée aux mécanismes comportant des non-linéarités et ayant une dynamique d'effecteur importante en comparaison avec les éléments à virtuel à rendre, ce qui correspond bien aux mécanismes à câbles. En général, il est possible d'obtenir un rendu isotrope, ce qui est plus intuitif (141).

1. en anglais : backdrivable

Pour les mécanismes présentés dans cette thèse, une approche de contrôle par admittance est privilégiée. Ce type de contrôle a été utilisé avec succès par plusieurs auteurs. Carignan et Cleary (23) l'ont utilisé pour une interface haptique, mais pas pour un mécanisme à câbles. Gosselin et coll. (49) l'ont appliquée à une interface haptique entraînée par un mécanisme plan à trois ddl à câbles. Yang Ho (146) l'a appliquée à un mécanisme à câbles, comprenant six ddl et huit câbles dont la sortie du contrôleur est une consigne en position. Cette implantation diffère de celle présentée au chapitre 6, par la sortie du contrôleur qui sera une vitesse et non une position.

5.2 Composantes de l'interface haptique

Les interfaces haptiques développées dans cette thèse sont toutes basées sur la même plateforme de travail. Cette dernière a été développée précédemment lors du projet NELI (112), qui consistait à créer une plateforme de marche virtuelle à l'aide de mécanismes à câbles. Les coûts d'acquisition de matériel sont donc minimes, car les composants du système sont, pour la majorité, récupérés.

5.2.1 Matériel

Les enrouleurs sont composés de 8 moteurs à faible coût d'une puissance de 28 W. Ceux-ci sont reliés à un tambour de 2.54 cm de rayon permettant l'enroulement du câble par un réducteur de rapport 5.9 :1. Un système de guidage permet au câble de s'enrouler proprement sur le tambour de sorte que le rayon d'enroulement demeure constant. Les câbles utilisés sont des fils de pêche en Spectra non extensibles caractérisés à 100 lb. Ces derniers ont un diamètre d'environ 1 mm. Les enrouleurs sont alimentés par une boîte d'amplification permettant le contrôle d'un maximum de quatre moteurs. Cette boîte utilise des amplificateurs de puissance intelligents comportant une boucle de contrôle sur le courant. Une consigne de courant peut donc être envoyée et la boucle de contrôle haute fréquence de l'amplificateur permet de considérer la constante de couple du moteur. Les amplificateurs reçoivent les commandes sous forme de tensions analogiques provenant d'un nœud de calcul en temps réel muni d'une carte d'entrée-sortie analogique. Les nœuds de calcul utilisés sont des PC x86 avec le système d'exploitation en temps réel QNX neutrino.

5.2.2 Signaux d'acquisition

Les signaux d'acquisitions sont principalement reçus par les cartes d'entrée-sortie analogique dont sont munis les nœuds de calcul. Les signaux du capteur d'effort proviennent également d'un protocole Ethernet et sont acquis par les nœuds de calcul également. Les signaux d'acquisition principaux sont les signaux de quadrature des encodeurs pour chaque moteur et les efforts lus par le capteur de forces/moments. Les signaux du capteur de forces/moments sont

de type analogique, ils sont donc échantillonnés à la fréquence de simulation. Ils peuvent également être transmis sans fil par un module d'acquisition spécial qui peut faire l'échantillonnage à 4000 Hz.

5.2.3 Logiciel

Le logiciel de simulation en temps réel RT-Lab est utilisé pour faire rouler la simulation et le code de contrôle. La fréquence de contrôle a donc la garantie d'être fixe et peut être sélectionnée dans une plage allant jusqu'à 1000 Hz et plus. Par contre, les temps de calcul doivent demeurer à l'intérieur de la période de temps allouée sous peine d'interruption de la simulation. La fréquence de contrôle utilisée est de 500 Hz pour tous les mécanismes présentés dans cette thèse. Cette fréquence s'avère être un bon compromis entre la vitesse d'exécution et le temps de calcul disponible pour le contrôle. Le logiciel RT-lab permet de convertir le code Matlab et Simulink en code C, pour ensuite le compiler et l'exécuter sur les nœuds de calcul. Le contrôle est donc développé à l'aide de schémas-blocs Simulink et de code Matlab. Une console tournant sur un ordinateur Windows permet la surveillance et le contrôle de l'exécution de la simulation par l'interface de programmation de RT-Lab.

5.3 Schéma de commande

Plusieurs schémas de commande utilisent comme sortie du modèle d'admittance une position cartésienne et utilisent donc pour la boucle interne de contrôle aux actionneurs une commande en position (117). Dans cette thèse, on propose l'utilisation de la commande en vitesse pour la boucle interne des actionneurs. Comme le mécanisme est de grande taille et comporte des incertitudes dues à l'étalonnage, il n'est pas possible de faire l'hypothèse que la précision de la longueur des câbles sera inférieure au jeu dans le mécanisme, qui lui, est faible. Des efforts internes très importants ou, au contraire, une détente des câbles peuvent survenir lors de l'utilisation d'une commande en position qui prescrit les longueurs des câbles, comme abordée dans le chapitre 2 sur l'étalonnage. La boucle de commande en vitesse permet également une plus grande bande passante en boucle fermée permise par un intégrateur de moins dans la boucle (141). Ceci se fait par contre aux dépens de la précision du suivi de la trajectoire, ce qui est moins crucial pour l'interface haptique. Une commande en vitesse peut introduire une dérive de l'effecteur, même si la vitesse commandée est nulle. Ce phénomène est limité dans le mécanisme par une compensation des efforts externes constants (gravité) et par la friction présente dans le mécanisme. Un problème également observé lors de l'utilisation d'une boucle de contrôle en position, également causé par l'intégrateur supplémentaire, est une manifestation de comportements erratiques lorsque la position désirée \mathbf{p}_d est loin de la position réelle \mathbf{p} de l'organe effecteur terminal. En effet, l'intégrateur génère un comportement oscillatoire à basse fréquence non intuitif à l'organe effecteur terminal. Ces effets se manifestent le plus lorsque les capacités des actionneurs sont dépassées ou lors de la sortie de l'espace de travail. En effet,

un enroulement d'intégrateur² peut se produire et dégrader le rendu. Certaines techniques peuvent être utilisées pour mitiger cet effet, mais il faut pouvoir détecter la saturation des actionneurs. Le contrôleur en vitesse est moins sensible à ces perturbations, car il ne peut engendrer des oscillations à basse fréquence due à un écart entre \mathbf{p}_d et \mathbf{p} . Le schéma général du contrôle est présenté à la figure 5.1. Le vecteur d'efforts appliqués par l'utilisateur sur l'organe effecteur terminal \mathbf{f}_h est mesuré par le capteur d'effort, ce qui donne l'estimation \mathbf{f}_s . Un filtre passe-bas de premier ordre d'une fréquence de coupure de 15 Hz est appliqué à cette mesure pour réduire le bruit. Cette fréquence de coupure a été choisie en considérant que les mouvements volontaires d'un humain se limitent à des fréquences inférieures à 10 Hz (131). Une fréquence de coupure légèrement supérieure permet donc de laisser passer ces fréquences importantes tout en limitant le bruit de mesure particulièrement présent sur un capteur d'effort. Il est à noter que ce filtre a également un effet stabilisant, mais réduit la transparence de l'interface. Cet effort est additionné aux efforts \mathbf{f}_c provenant de l'environnement virtuel qui agit comme une impédance. Ces efforts servent d'entrée au modèle d'admittance, la fonction de transfert Z^{-1} ³ qui, lui, reproduit le comportement de l'objet déplacé. Lors de contacts avec des surfaces rigides, des contraintes sont appliquées dans les directions contraintes par le contact, par exemple une composante de la vitesse provoquant une pénétration de la surface sera annulée. La matrice jacobienne \mathbf{A} transforme linéairement la sortie du modèle d'admittance, une vitesse cartésienne, en vitesse articulaire. Ces vitesses articulaires deviennent les consignes de vitesse du contrôleur de bas niveau. Le contrôleur de bas niveau G_c est un contrôleur de type PID. Ce dernier est donc un contrôleur en boucle fermée sur les vitesses articulaires de chacun des moteurs. Ces vitesses articulaires $\dot{\mathbf{p}}$ proviennent d'une différentiation des encodeurs incrémentaux. Un filtre passe-bas de premier ordre ayant une fréquence de coupure de 25 Hz est utilisé lors de la différentiation ce qui permet de réduire le bruit et d'avoir un effet amortissant, éliminant le besoin d'ajouter un gain dérivatif au PID. Le contrôleur à action directe G_{ad} est un contrôleur non linéaire servant à compenser la friction dans les œillets et la dynamique de l'enrouleur. La dynamique de l'enrouleur est modélisée simplement comme une inertie, un modèle plus complexe peut par ailleurs être utilisé comme dans (112). Une compensation de la dynamique de l'organe effecteur terminal et de la gravité $h(\mathbf{p})$ est possible. Finalement, une saturation de la commande en couple est effectuée pour limiter les tensions entre $\underline{\tau}$ et $\overline{\tau}$. La valeur minimale de couple est déterminée expérimentalement et la valeur maximale est limitée par les capacités des moteurs. Une résolution numérique du problème géométrique direct est utilisée pour obtenir la pose de l'organe effecteur terminal permettant de mettre à jour la matrice jacobienne et l'environnement virtuel. Pour permettre de bien visualiser le comportement du contrôle du système, ce dernier est simplifié et une linéarisation est effectuée pour en faire un système à 1 ddl. La figure 5.2 présente cette simplification. On peut constater que la boucle interne de contrôle a comme objectif de limiter les impacts de la dynamique du robot

2. En anglais : windup

3. La convention utilisée dans cette thèse est que Z^{-1} représente une admittance alors que Z représente une impédance

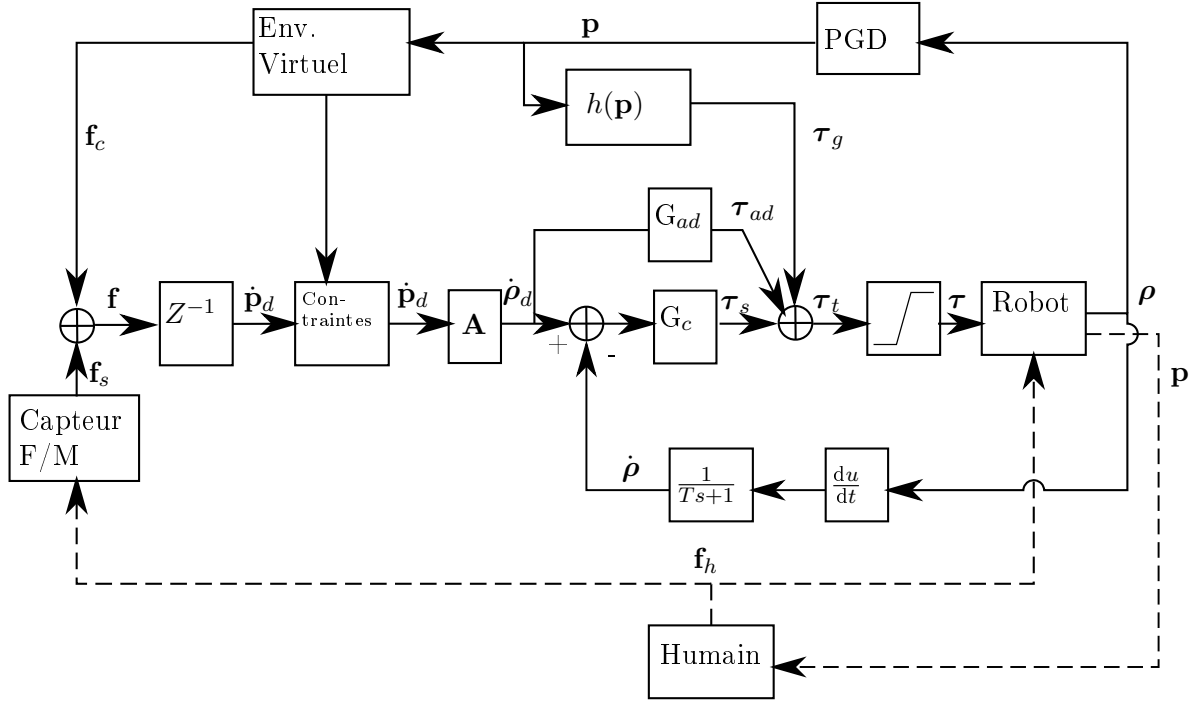


FIGURE 5.1 – Diagramme en bloc du schéma de contrôle. Les lignes pointillées représentent des interactions physiques, contrairement aux lignes pleines qui sont numériques.

(G_{rob}) et de la force que l'humain applique sur ce dernier en tentant de maintenir la vitesse prescrite par le modèle d'admittance (Z^{-1}). L'utilisateur est modélisé comme une impédance dans le système transformant le déplacement de l'organe effecteur en une force, ainsi que par une force de perturbation (f_{per}). Du schéma simplifié de la figure 5.2, Il est ainsi possible déduire la fonction de transfert reliant les forces exercées par l'utilisateur au déplacement de l'interface. Pour trouver la fonction de transfert équivalente (G_{eq}) entre la position de l'organe effecteur terminal et la force appliquée par l'humain, on utilise la figure 5.2 pour obtenir

$$p = G_{rob}f, \quad (5.1)$$

où

$$f = f_{ad} + f_c + f_h, \quad (5.2)$$

$$f_{ad} = G_{ad}\dot{p}_d \quad (5.3)$$

$$f_c = G_c(\dot{p}_d - \dot{p}), \quad (5.4)$$

$$\dot{p}_d = Z^{-1}f_t, \quad (5.5)$$

$$\dot{p} = \frac{1}{Ts+1}p, \quad (5.6)$$

$$G_f = \frac{s}{1+Ts} \quad (5.7)$$

$$f_t = f_{virt} + f_h \text{ et} \quad (5.8)$$

$$f_{virt} = Z_{virt}^{-1}p. \quad (5.9)$$

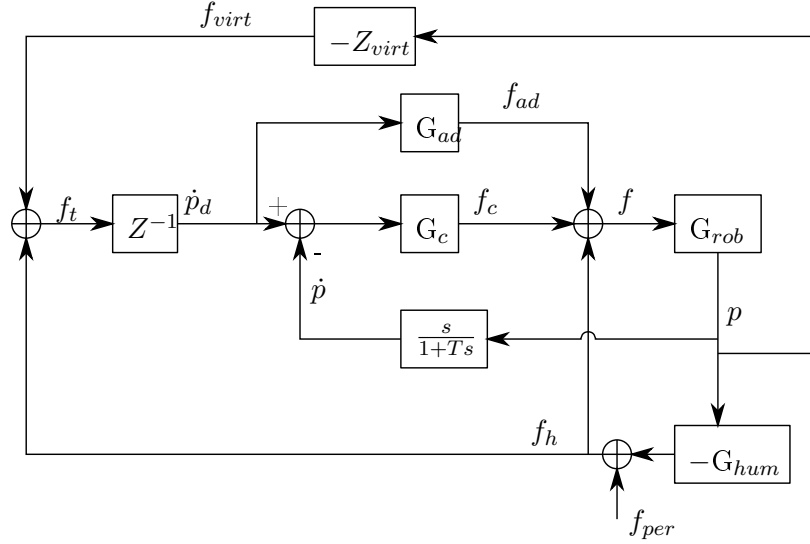


FIGURE 5.2 – Diagramme en bloc du schéma de contrôle linéarisé et simplifié.

En remplaçant dans l'équation 5.1 les termes correspondants des équations 5.2 à 5.9 de façon à obtenir que des termes en p et en f_h , on obtient

$$p = G_{rob}(G_{ad}Z^{-1}(Z_{virt}^{-1} + f_h) + G_c(Z^{-1}(Z_{virt}^{-1}p + f_h) - \frac{1}{Ts + 1}p) + f_h). \quad (5.10)$$

En isolant p et f_h de chaque côtés de l'équation on obtient

$$\begin{aligned} p(1 + G_{rob}G_cG_f + G_{rob}G_{ad}Z^{-1}Z_{virt} + G_{rob}G_cZ^{-1}Z_{virt}) \\ = (G_{rob}G_{ad}Z^{-1} + G_{rob}G_cZ^{-1} + G_{rob})f_h. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Finalement on peut isoler $\frac{p}{f_h}$ pour obtenir

$$G_{eq} = \frac{p}{f_h} = \frac{(G_{rob}G_{ad}Z^{-1} + G_{rob}G_cZ^{-1} + G_{rob})}{1 + G_{rob}G_cG_f + G_{rob}G_{ad}Z^{-1}Z_{virt} + G_{rob}G_cZ^{-1}Z_{virt}}, \quad (5.12)$$

soit la fonction de transfert représentant la relation entre la force appliqué par l'humain et le mouvement de l'interface haptique. En simulant ce système avec des modèles linéaires continus dans le temps, on observe que le rendu haptique s'améliore avec l'accroissement du gain de contrôle (G_c). Théoriquement, ce gain peut être indéfiniment augmenté sans affecter la stabilité telle que reporté dans (3; 40; 97; 141). En réalité, plusieurs sources d'instabilité bornent la valeur du gain comme la discrétisation temporelle, les frictions statique et dynamique, le bruit, la flexibilité des joints, la dynamique des actionneurs et des capteurs, la dynamique de l'utilisateur et de l'environnement virtuel (141). Ce dernier est donc déterminé expérimentalement en l'augmentant jusqu'à ce que de l'instabilité survienne lors d'une tâche typique et de contact avec des surfaces virtuelles rigides.

5.3.1 Loi de commande

Le modèle d'admittance prend la forme d'un système masse-amortisseur, tel que

$$\mathbf{f} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}}_d + \mathbf{C}\dot{\mathbf{p}}_d \quad (5.13)$$

où $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^6$ est l'effort appliqué sur l'objet virtuel, $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ contient les termes inertiels, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ les termes d'amortissement, $\ddot{\mathbf{p}}_d \in \mathbb{R}^6$ est l'accélération de la masse virtuelle et $\dot{\mathbf{p}}_d \in \mathbb{R}^6$ sa vitesse. Le modèle d'admittance Z^{-1} prend la force comme entrée et retourne la vitesse en sortie. Cette dernière se calcule comme

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = \dot{\mathbf{p}}_d(t - \Delta t) + \ddot{\mathbf{p}}_d(t - \Delta t)\Delta t, \quad (5.14)$$

en considérant l'accélération comme constante lors d'un pas de temps Δt . En substituant $\ddot{\mathbf{p}}_d$ de l'équation 5.14 avec l'équation 5.13, on obtient

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = (\mathbf{1}_{6 \times 6} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\Delta t) \dot{\mathbf{p}}_d(t - \Delta t) + \mathbf{M}^{-1}\Delta t\mathbf{f}. \quad (5.15)$$

La vitesse cartésienne obtenue du modèle d'admittance sert ensuite au contrôle du mécanisme. La matrice jacobienne du robot \mathbf{A} obtenue pour la position \mathbf{p} de l'organe effecteur terminal est utilisée pour calculer les vitesses articulaires correspondantes

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}_d(t) = \mathbf{A}\dot{\mathbf{p}}_d(t). \quad (5.16)$$

Le contrôleur de bas niveau G_c utilisé pour asservir les enrouleurs est de type PID dont les gains d'intégration et dérivatifs sont nuls. Les filtres utilisés sur les mesures ont déjà l'effet stabilisant apporté par le gain dérivatif. Comme les mouvements sont principalement de type transitoire, le gain intégral a un impact limité en plus d'être déstabilisant et a donc été mis à zéro. On a donc

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{K}_p(\dot{\boldsymbol{\rho}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{\rho}}(t)), \quad (5.17)$$

où $\dot{\boldsymbol{\rho}}_d$ est le vecteur des vitesses articulaires désirées, $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ est le vecteur des vitesses articulaires filtrées et \mathbf{K}_p est une matrice diagonale contenant les gains de chaque enrouleur. Le contrôleur à action directe G_{ad} sert à compenser l'effet de la friction sèche et de la dynamique de l'enrouleur. Son équation de contrôle est

$$\boldsymbol{\tau}_{ad} = g_f \cdot \text{sgn}_2(\dot{\boldsymbol{\rho}}_d(t)) + I_{enr} \frac{\dot{\boldsymbol{\rho}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{\rho}}_d(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (5.18)$$

où g_f est une estimation de la friction sèche et I_{enr} est l'inertie reportée de l'enrouleur. La fonction $\text{sgn}_2(x)$ est exprimée comme

$$\text{sgn}_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & x > 0 \end{cases}. \quad (5.19)$$

$\boldsymbol{\tau}_g$ est également un terme d'action directe qui sert à compenser le poids de l'organe effecteur terminal et sa dynamique. Ce dernier est calculé à l'aide de la programmation quadratique

telle que présentée au chapitre 4, où \mathbf{w}_p devient l'inverse de l'effort causé par le poids de l'organe effecteur terminal au point P . Il est également nécessaire de contraindre les tensions entre un minimum et un maximum pour éviter le relâchement des câbles. Une saturation de la consigne est alors incluse et s'exprime comme

$$\tau = \begin{cases} \tau_t & \text{if } \underline{\tau} < \tau_t < \bar{\tau} \\ \underline{\tau} & \text{if } \underline{\tau} > \tau_t \\ \bar{\tau} & \text{if } \bar{\tau} < \tau_t \end{cases}, \quad (5.20)$$

où $\tau_t = \tau_s + \tau_g + \tau_{ad}$.

5.4 Environnement virtuel

L'environnement agit principalement comme une impédance. Il prend en entrée le déplacement de l'organe effecteur terminal et génère une force. Cet environnement gère également les forces externes ne provenant pas des contacts, principalement la gravité virtuelle. Cet environnement virtuel peut être implanté de plusieurs façons. Un engin physique où l'environnement virtuel et l'avatar sont définis permettant de calculer des forces de contact en fonction de la pose est privilégié. Comme dans (112), l'engin devrait également reporter le nombre de points de contact de façon à pouvoir contraindre les déplacements selon certains axes. Dans (112), l'engin Newton Game DynamicsTM est utilisé pour exécuter ce rôle. Un désavantage de cet engin est qu'il s'exécute sur une plateforme différente de celle de la boucle de contrôle en temps réel. Un délai est nécessairement induit, ce qui amplifie les délais de transmission de l'information, diminue la bande passante et peut éventuellement mener à de l'instabilité. Son principal avantage est la flexibilité de la création de l'environnement en utilisant des outils généraux permettant d'ajouter des corps rigides définis dans des logiciels de dessin 3D. Pour les besoins des différentes interfaces haptiques présentées dans cette thèse ainsi que de leurs tâches associées, un engin physique simple et embarqué dans la boucle de contrôle s'exécutant sur un nœud de calcul en temps réel est utilisé. De cette façon, il est assuré qu'il s'exécute à la même fréquence que la boucle de contrôle et limite donc l'introduction de délais. Il est par contre moins flexible dans la définition des corps rigides et dans la gestion de différents types de contacts, l'intégration d'un engin plus performant et plus flexible serait un atout important pour l'amélioration de l'interface haptique, ce point est soulevé dans la section des travaux futurs. Cet engin spécialement développé pour ces interfaces gère les collisions entre des points et des polygones : soit l'environnement est représenté par des plans et l'effecteur virtuel par des points de contact discrets, soit l'effecteur virtuel est représenté par des plans et l'environnement par des points de contact discrets. Dans le chapitre 6, la raquette de tennis de table, l'effecteur virtuel, est un plan alors que la balle est un point. Dans la tâche de réadaptation du chapitre 8, on a opté pour la première des deux représentations, alors que la caisse transportée est constituée de plusieurs points de contact et que l'environnement, table

et étagère, est constitué de plans. Les contacts sont simulés par cet engin physique comme l'impédance d'un système ressort-amortisseur. Lorsqu'un des points de contact pénètre un plan, sa distance de pénétration est proportionnelle à la force qui est générée dans la direction normale au plan. L'amortissement est nécessaire pour maintenir la stabilité du contact. Par contre un amortissement trop grand dégrade le rendu haptique avec une impression de surfaces « collantes ». La région de stabilité de ces contacts est évaluée expérimentalement dans le chapitre 6. De plus, lorsqu'il y a un contact entre un point et un plan, une contrainte en vitesse dans la direction de pénétration du plan est envoyée à la boucle de commande, qui limite le déplacement de l'effecteur dans cette direction, de façon analogue à l'engin physique dans (112). Lorsque l'effecteur virtuel dispose de plusieurs points de contact, les moments, par rapport à son centre de masse, qui sont générés par les forces de contact sont également rendus. Lorsque plusieurs points de contact sont en collision, leurs efforts sont additionnés.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les particularités de contrôle des mécanismes à câbles utilisés en haptique. Une revue de littérature a permis d'évaluer différentes techniques utilisées. La commande en admittance a été privilégiée par sa capacité à maintenir une bonne transparence du mécanisme même lorsque la dynamique et les non-linéarités de l'interface sont importantes. Les composantes matérielles et logicielles des interfaces haptiques proposées dans cette thèse ont également été présentées. Le schéma de contrôle général et la loi de commande ont ensuite pu être développés. Les considérations de stabilité du contrôle ont également été abordées. Finalement, un engin physique simple a été mis en place pour permettre de reproduire les tâches qui seront proposées dans les prochains chapitres.

Chapitre 6

Preuve de concept à 6 degrés de liberté en environnement immersif

Ce chapitre présente l'implantation à six degrés de liberté du mécanisme parallèle à câbles comme interface haptique avec retour visuel. Cette mise en œuvre représente un pas important vers une utilisation en réadaptation par rapport aux mécanismes 2 et 3 ddl translationnel conçus au début du projet. Elle permet d'évaluer les performances du robot de façon qualitative et quantitative, ce qui permettra de connaître les capacités atteignables et donc de développer des exemples de tâches de réadaptation en tenant compte de ces capacités. Pour la première fois dans le projet, le mécanisme développé est utilisé en conjonction avec un retour visuel pour permettre des interactions dans un environnement virtuel immersif. Ce chapitre porte sur la suite de la recherche présentée à l'ICRA 2014 (44) sur le mécanisme spatial à 3 ddl présenté à la figure 6.1, prototype développé en début de projet. Ce chapitre présente donc la conception d'une interface haptique à huit câbles permettant un contrôle de l'orientation en plus des translations à l'organe effecteur terminal. Le cahier des charges est ensuite présenté suivi de la conception générale de l'interface, de l'architecture du robot à câbles et de l'organe effecteur terminal. Par la suite, les performances du mécanisme sont évaluées et

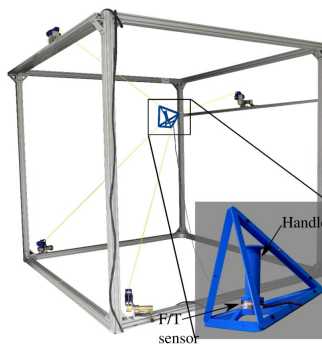


FIGURE 6.1 – Mécanisme de retour haptique à trois degrés de liberté.

comparées quantitativement à d'autres interfaces haptiques rapportées dans la littérature. Les caractéristiques évaluées sont les efforts maximaux, les différents espaces de travail, les temps de réponse, la capacité à reproduire des surfaces rigides, la bande passante, la précision et l'exactitude du positionnement. La connaissance de ces dernières permettra la création d'une tâche de réadaptation adaptée aux capacités de l'interface haptique.

Finalement, la preuve de concept de jeu immersif utilisant un environnement virtuel et un retour haptique est testée. Celle-ci s'apparente au tennis de table et est implantée en réalité virtuelle, ce qui permet d'évaluer qualitativement les performances, avantages et limitations du mécanisme pour une utilisation en réadaptation.

6.1 Cahier des charges

L'objectif de la réalisation d'un mécanisme parallèle à câbles à six degrés de liberté est de faire la preuve de concept d'une interface à retour à haptique entraînée par câbles utilisés conjointement avec la réalité virtuelle immersive. Cette dernière permettra d'évaluer les avantages et les inconvénients des mécanismes à câbles à exécuter cette tâche. En comparant ce prototype avec les différents mécanismes à retour haptique présentés dans la revue de littérature, il sera possible de comparer et de déterminer dans quelle sorte d'environnement de simulation les robots à câbles peuvent être bénéfiques. Comme l'un des principaux avantages des mécanismes à câbles est leur capacité à travailler dans un grand espace de travail tout en limitant l'inertie des pièces mobiles, on vise une interface à retour haptique de taille humaine. Ce que l'on entend par taille humaine est que les interactions se fassent à l'échelle de grand mouvement de bras et même de déplacement du corps, à l'opposé des interfaces plus conventionnelles qui permettent des mouvements principalement de la main et de l'avant-bras. Un retour visuel est également nécessaire, car le retour haptique est utilisé principalement comme un ajout de réalisme à un monde virtuel immersif. La base de la réalité virtuelle immersive est le retour visuel, soit par des environnements de type CAVE ou de casque de réalité virtuelle ou augmentée. Le robot conçu doit donc pouvoir être intégré à un environnement virtuel existant. En résumé, la preuve de concept doit permettre à un utilisateur d'être immergé dans un environnement virtuel d'une taille à échelle humaine, lui permettant de voir un environnement généré par ordinateur. L'utilisateur doit également être en mesure d'interagir avec cet environnement par l'entremise du robot à câbles qui lui servira de retour haptique à six degrés de liberté. L'utilisateur pourra donc ressentir des efforts comprenant des forces et des moments qui viendront confirmer l'interaction avec l'environnement et améliorant ainsi son immersion.

6.2 Conception générale

Pour la conception du montage à 6 ddl, les mêmes équipements (enrouleurs, cadres, etc.) que ceux utilisés pour les montages antérieurs aux travaux présentés dans la thèse sont utilisés.



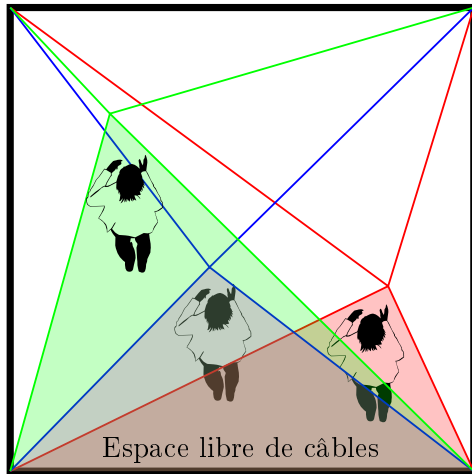
FIGURE 6.2 – Environnement virtuel de type CAVE, acronyme pour « Cave automatic virtual environment ».

L'équipement existant provenant du projet NELI et des essais préliminaires à deux et trois ddl. Les enrouleurs sont réutilisés ainsi que tout le système de contrôle, ce qui inclut le matériel et les logiciels. Le capteur d'efforts à six axes pourra également être utilisé, lequel n'avait servi qu'à la capture des trois axes de forces jusqu'à présent. Ce système est présenté dans la section 5.2. Comme le système à trois ddl utilisé précédemment n'avait besoin que de quatre actionneurs, il ne requérait qu'une boîte d'amplification et un nœud de calcul. Pour atteindre six degrés de liberté, il est nécessaire d'augmenter le nombre de boîtes d'amplification et de nœuds de calculs pour être en mesure de gérer les axes additionnels. L'armature d'aluminium ayant servi précédemment est également réutilisée. Celle-ci est flexible, dans la mesure où chacune des barres peut être déplacée indépendamment et que les enrouleurs peuvent y être fixés partout. Pour ce qui est du monde virtuel et du retour visuel, une solution existante est privilégiée. Un simple écran, même stéréoscopique, ne s'adapte pas bien pour un mécanisme à taille humaine, vu sa petite taille. Un tel appareil n'est pas suffisamment immersif pour l'application visée. Une solution plus avancée est donc nécessaire. Les casques de réalité virtuelle sont de plus en plus disponibles et permettent une grande immersion. Un casque de ce type sera entre autres utilisé dans la dernière phase du projet présentée au chapitre 8. Par contre, comme ce type de casque substitue complètement la vue de l'utilisateur par une vue du monde virtuel, il est difficile d'y intégrer une interface haptique sans travail supplémentaire. L'utilisateur ne voit plus ses mains par exemple, ce qui constitue une limitation dans ce type de système si l'utilisateur n'est pas suivi par des caméras, méthode qui sera également utilisée dans l'implémentation du dernier chapitre. Pour la preuve de concept présentée dans ce chapitre, ces casques ne sont donc pas bien adaptés. La solution privilégiée est l'utilisation d'un environnement de type CAVE qui provient de l'acronyme récursif anglais « Cave automatic virtual environment ». Un exemple de ce type d'environnement est présenté dans la figure 6.2. Un environnement de

ce type est disponible à l'Université Laval et est facile d'accès, ce qui simplifie grandement le développement. Le CAVE disponible à l'Université dispose de quatre écrans, un frontal, deux latéraux et un au sol, permettant une grande immersion. Le volume du CAVE s'apparente à un cube de deux mètres de côtés. De plus, il est muni d'un système pour suivre les lunettes de l'utilisateur, ce qui permet au système de projeter l'image correspondant au point de vue de l'utilisateur. Les lunettes permettent également une vision stéréoscopique. L'utilisateur est donc libre de ses déplacements dans l'espace du CAVE et perçoit l'environnement comme s'il y était. Ce type d'environnement a ses désavantages. Il est en effet très dispendieux et ne peut être déplacé. Il est également relativement fragile, car l'utilisateur marche directement sur les écrans où sont projetées les images. Par contre, ces inconvénients n'affectent pas la réalisation de la preuve de concept. C'est donc cet environnement virtuel qui est choisi et qui servira à faire le retour visuel. Il est également aisé de contrôler l'affichage d'objets par protocole IP, ce qui permettra de contrôler facilement les objets de la scène à partir des nœuds de calculs. Avec ces éléments déjà en place, il reste à déterminer l'architecture du robot à câbles, sujet de la prochaine section. Par contre, avant de concevoir l'architecture du mécanisme, un concept de tâche doit être déterminé. L'interface entre l'humain et le robot utilisé comme prototype, c'est-à-dire une poignée de forme cylindrique, peut être réutilisée dans cette preuve de concept. C'est à partir de cette interface que le concept de jeu de tennis de table est ressorti. Ce concept est également utilisé par Kawamura (80). En effet, ce type de jeu nécessite une interface de type poignée, car l'humain doit tenir sa raquette à l'aide d'une poignée. De plus, le jeu nécessite une bonne dynamique, ce qui permettra d'observer le comportement du robot lors d'importante accélération. Finalement, comme la raquette est libre dans l'espace, elle se déplace en trois dimensions et selon les trois axes de rotation. Comme les contacts avec une balle de tennis de table sont assez faibles, la force des impacts devra être augmentée pour être en mesure d'évaluer la reproduction des efforts du mécanisme. Les capacités en moments permettront également à l'utilisateur de situer l'impact de la balle sur la raquette en sentant le couple à son poignet. Un défaut de cette tâche est qu'elle nécessite de plus grands débattements en orientation que ce qu'il est pensable de faire avec un mécanisme parallèle à câbles conventionnel. Il faudra donc que l'utilisateur en soit conscient et que le jeu soit adapté en conséquence.

6.3 Conception de l'architecture du robot à câbles

Avec la tâche définie et le cadre de travail précédemment défini, une architecture de robot doit être conçue. En effet, le nombre de câbles à utiliser, les positions des points d'ancrage sur la structure fixe ainsi que sur l'organe effecteur terminal doivent être déterminés. Certaines méthodes existent pour optimiser le positionnement des points d'ancrage (58), mais celles-ci demandent la création d'un indice de performance à optimiser. Cet indice peut prendre la forme d'une distance caractéristique, d'une aire ou d'un volume, par exemple. Dans le cas présent, le volume de l'espace de travail sera maximisé en gardant ce dernier au centre de



Entrée du cube

FIGURE 6.3 – Vue du dessus de l’espace approximatif libre de câbles dans lequel l’utilisateur peut évoluer avec une position des points d’ancrage au sommet du cube.

l’empreinte du mécanisme, mais un indice formel de performance n’est pas développé. Pour ce qui est du nombre de câbles à utiliser, deux options sont réalisables. Premièrement, comme un mécanisme pleinement contraint à six degrés de liberté est désiré, un minimum de sept câbles est nécessaire. Deuxièmement, l’installation permet un maximum de huit actionneurs. L’option à huit câbles est préférée ici, car elle permet de maximiser l’espace de travail dans l’empreinte du mécanisme. Cette configuration est, d’autant plus, la plus commune pour les mécanismes à câbles à six degrés de liberté (120; 51). Le désavantage encouru est un plus grand encombrement dû à la présence du câble supplémentaire. Par contre, cela engendre plus de flexibilité dans le placement des câbles et permet donc un placement libérant l’espace autour de l’utilisateur. La position des points d’ancrage des câbles sur la structure fixe doit ensuite être déterminée. En règle générale, plus les câbles sont éloignés les uns des autres, plus l’espace de travail est grand. Comme la structure fixe est de forme cubique, les positions d’ancrage les plus éloignées les unes des autres se trouvent en chacun des coins du cube. On rencontre également beaucoup cette architecture dans la littérature (120; 51). Cette configuration sera donc celle utilisée initialement. Des variantes de cette architecture seront également évaluées. Une attention particulière doit être portée au placement des câbles de façon à éviter les interférences entre l’utilisateur et les câbles. En considérant que l’utilisateur vient interagir avec l’organe effecteur terminal en entrant par une face du cube, positionner les ancrages sur les sommets du cube laisse un espace triangulaire libre dans lequel l’utilisateur peut évoluer. La figure 6.3 montre un schéma élémentaire de l’espace dans lequel l’utilisateur peut évoluer à différentes positions de l’organe effecteur terminal. Dans cette figure, on peut constater que cette configuration, du moins pour la face par laquelle l’utilisateur entre (celle du bas dans la figure), optimise l’espace libre pour l’utilisateur. En effet, en prenant la largeur maximale du cube, l’aire du triangle est maximisée. Des câbles placés au centre des arêtes du cube entreraient

FIGURE 6.4 – Logiciel de comparaison des architectures.

facilement en interférence avec l'utilisateur. Pour la face opposée par contre (celle du haut dans la figure), il pourrait être envisagé de changer la disposition des points d'ancrage. Pour évaluer l'espace de travail disponible et pouvoir comparer différentes solutions, une architecture pour l'organe effecteur terminal doit également être déterminée. Différentes solutions ont donc été évaluées. Quelques-unes d'entre elles sont présentées ici. Une des contraintes est que les câbles ne peuvent se croiser devant l'utilisateur pour éviter les interférences. Pour comparer les différentes architectures, on utilise l'espace de travail faisable (WFW). On spécifie d'abord un ensemble des efforts à la poignée. Ici, cet ensemble est composé des forces comprises entre -5 N et 5 N dans les trois directions et des moments compris entre -0.1 Nm et 0.1 Nm dans les trois directions également, sauf si spécifié autrement. On peut ainsi tracer le WFW à orientation constante en trois dimensions. Une interface simplifiée du logiciel ARACHNIS (130) a été développée de façon à pouvoir rapidement comparer l'espace de travail faisable (WFW) de différentes architectures. Le logiciel ARACHNIS affiche l'espace de travail faisable en calculant en grille sur un volume donné si la pose considérée se situe à l'intérieur ou l'extérieur de l'espace de travail. L'interface simplifiée permet de changer rapidement d'une architecture à l'autre pour une enveloppe de travail donnée. Il est donc aisé de comparer différentes architectures. L'interface est présentée dans la figure 6.4. La première architecture envisagée est celle d'un organe effecteur terminal de forme cubique, comme celles qui furent utilisées par le RealAx8 à l'INRIA (35) ou par Williams (86). La figure 6.5 présente l'espace de travail de cette architecture et l'architecture elle-même. Cette architecture est problématique sur plusieurs points. Premièrement, on voit sur la figure que l'espace de travail est petit. L'enveloppe de travail utilisé pour ce graphique consiste en des efforts axiaux de 5 N et des efforts en couple nuls, l'architecture n'étant pas capable de résister à des efforts en couple dans toutes les directions. De

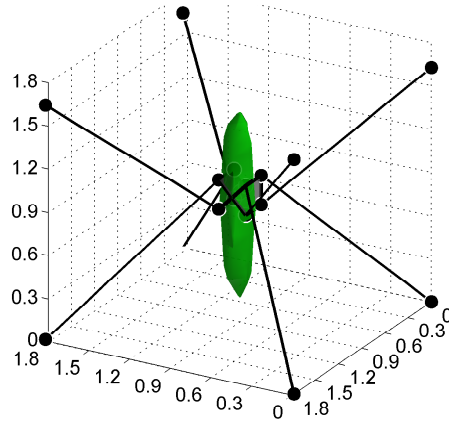


FIGURE 6.5 – Espace de travail et architecture du mécanisme similaire à RealAx8.

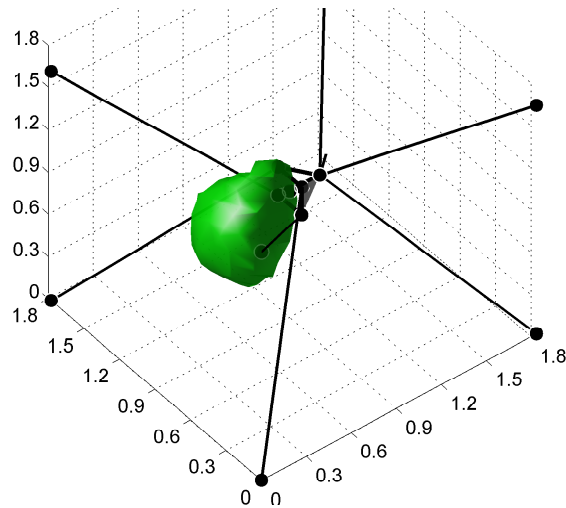


FIGURE 6.6 – Espace de travail et architecture du mécanisme à organe effecteur terminal pyramidal.

plus, les capacités en orientation sont limitées par les interférences entre des câbles. Plusieurs autres architectures de type cubique ont été évaluées et présentaient des problèmes similaires, soit une incapacité à résister à un couple ou une capacité en orientation fortement limitée par les interférences entre des câbles. Une seconde architecture est considérée, qui prend la forme d'une pyramide à base carrée. L'idée étant de libérer l'accès à la poignée en permettant à l'utilisateur l'accès par la base carrée de la pyramide qui lui fait face. Son espace de travail est tracé à la figure 6.6. On remarque que l'espace de travail est relativement petit, mais que sa forme est utile. Par la suite, l'architecture utilisée dans l'article de Chen (26), présentée dans la figure 6.7, est évaluée. Comme l'application présentée dans cet article est également une interface à retour haptique, elle pourrait s'avérer un bon choix. Celle-ci consiste en un organe effecteur terminal plan de la forme d'un losange, dont deux des sommets sont connectés

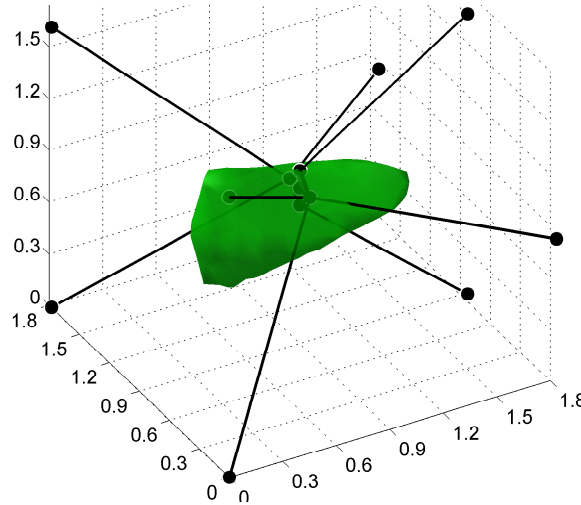


FIGURE 6.7 – Espace de travail et architecture du mécanisme inspiré de l'article de Chen (26).

par trois câbles et les deux autres par un seul câble chaque. Par contre, les points d'attache sur la base fixe ne sont pas tous positionnés au sommet du cube. En effets, ceux qui sont positionnés sur la face éloignée du cube sont ancrés au centre des arêtes du cube. La figure 6.7 présente l'architecture et l'espace de travail. L'espace de travail est relativement volumineux et les câbles sont bien dégagés vers l'avant. Pour utiliser au maximum l'empreinte cubique de la base fixe cubique, l'architecture précédente est modifiée de façon à positionner les ancrages sur les sommets du cube dans l'espérance d'augmenter le volume de l'espace de travail. Pour ce faire, deux câbles sont attachés sur chacun des sommets. La face d'accès reste similaire, donc les interférences entre l'utilisateur et les câbles sont limitées. La figure 6.8 présente l'espace de travail qui en résulte. On remarque que l'espace de travail est similaire à l'architecture de Chen. Un léger ajout est observable au fond de l'espace permettant d'aller plus à gauche et plus à droite lorsque l'organe effecteur terminal est poussé plus loin, ces zones sont entourées dans la figure. Par contre, il est possible d'observer une légère perte à l'entrée. Comme ces deux architectures sont les plus prometteuses, on les comparera plus en profondeur. Comme l'espace de travail tracé précédemment ne correspond qu'à une seule orientation, il est intéressant de regarder son comportement pour d'autres orientations. On trace donc l'espace de travail à orientation constante, mais avec l'organe effecteur terminal orienté différemment de son orientation de référence. L'orientation est donc modifiée selon les trois axes principaux, un à la fois. Les figures 6.9a et 6.9b présentent l'espace de travail à orientation constante pour une variation de l'orientation de 10 degrés selon l'axe le moins favorable. On s'aperçoit ainsi que le mécanisme basé sur l'architecture de Chen se dégrade beaucoup plus rapidement. Selon les deux autres axes, la dégradation est similaire pour les deux architectures. À la vue de ces résultats, l'architecture modifiée apparaît comme la meilleure solution. On notera que selon les axes de rotation définis à la figure 6.10, l'amplitude des rotations pouvant être effectuées sont de l'ordre de $\pm 30^\circ$ selon les axes Y et Z , et de $\pm 10^\circ$ selon l'axe X . Ces valeurs ont été

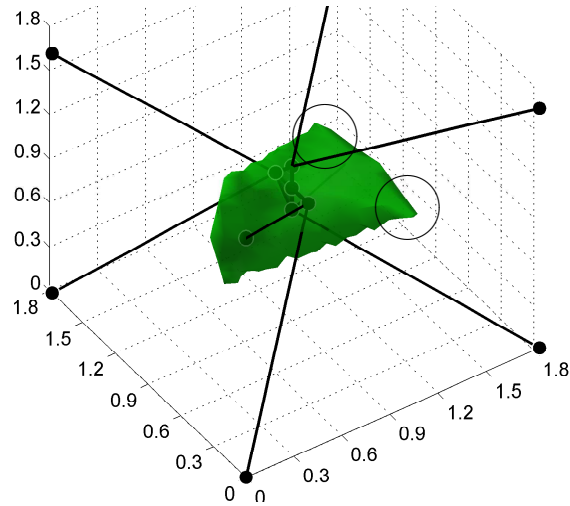
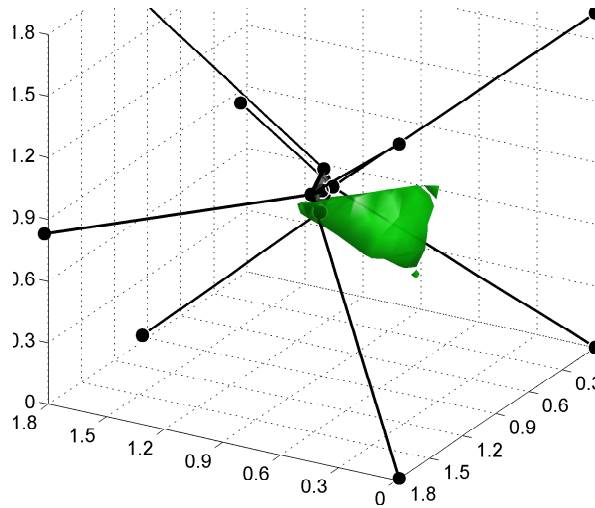


FIGURE 6.8 – Espace de travail et architecture du mécanisme modifié. Les zones encadrées montrent les endroits où l’espace de travail est augmenté par rapport à l’architecture de Chen.

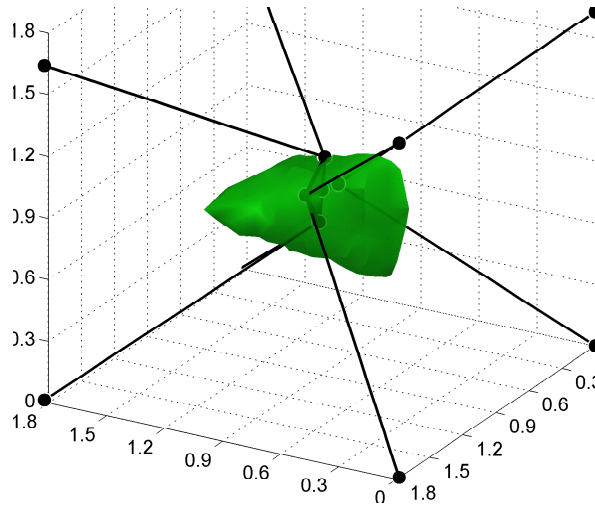
déterminées en observant le volume de travail disponible en fonction de l’angle de rotation. Une diminution marquée du volume après un certain angle permet de borner l’amplitude des rotations possibles. Ces amplitudes demeurent assez faibles, mais se comparent à ce que les mécanismes parallèles standards sont capables de reproduire. Cette limitation particulière sera abordée en détail dans le chapitre 7, où une architecture particulière permettant d’améliorer grandement les capacités en orientation y est présentée.

6.4 Conception de l’organe effecteur terminal

Maintenant que l’architecture du mécanisme est déterminée, il est possible de concevoir l’organe effecteur terminal. L’architecture prescrit les positions des points d’ancrage. Il reste par contre une variable à fixer : la taille de l’organe effecteur terminal. En effet, une taille de référence a été utilisée pour comparer les différentes architectures, mais celle-ci peut encore être légèrement changée pour optimiser l’espace de travail. En règle générale, il existe un compromis entre la taille de l’espace de travail en translation et les capacités en couples du mécanisme. Ce compromis est influencé par la taille de l’organe effecteur terminal. Plus ce dernier est gros, plus la capacité en couple est importante, mais une réduction de l’espace de travail en translation est observée. Cette réduction est observée, car plus l’organe effecteur terminal est grand, moins les câbles peuvent se rétracter avant d’interférer avec ce dernier. Pour déterminer l’impact du grossissement de l’organe effecteur terminal, on trace l’espace de travail pour une taille variant de 10 cm de côté à une taille de 40 cm de côté. La figure 6.11 montre la taille de l’espace de travail pour une progression de la taille de l’organe effecteur



(a) Espace de travail et architecture du mécanisme inspiré de l'article de Chen (26).



(b) Espace de travail et architecture du mécanisme modifié.

FIGURE 6.9 – Comparaison de l'espace de travail à orientation constante des deux architectures lorsque l'orientation de l'organe effecteur terminal est modifiée de 10° par rapport à son orientation de référence.

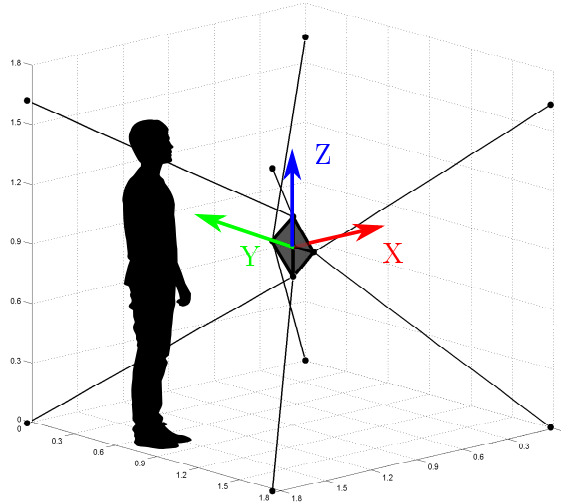


FIGURE 6.10 – Axes de rotation du mécanisme.

terminal. On observe dans ce cas que plus l'organe effecteur terminal est grand, plus le volume est important. On conclut donc que dans ce cas-ci, un organe effecteur terminal de grande taille serait bénéfique pour l'espace de travail. Ce n'est donc pas ce facteur qui limitera la taille. Le poids et l'inertie ajoutés sont quant à eux fortement impactés par la croissance de la taille de l'organe effecteur. Ces facteurs affectent négativement le rendu haptique en diminuant la transparence de l'interface. Plus l'inertie en mouvement du mécanisme est grande par rapport à celle qui doit être recrée, plus il est difficile d'obtenir un bon rendu haptique. Spécialement lorsque l'inertie à simuler est plus faible que l'inertie en mouvement. Par contre, le facteur le plus limitant pour cette implantation provient de la méthode de fabrication. En effet, une fabrication par prototypage rapide est privilégiée pour sa rapidité, son faible coût, la légèreté des pièces et sa capacité à faire des pièces complexes. Le prototypage rapide disponible imprime des pièces en acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) qui sont légères et assez rigides. Le volume d'impression disponible est un cube d'environ 25,4 cm de côté. Comme l'architecture choisie nécessite un organe effecteur terminal plan, ce dernier sera construit à plat et aura donc des côtés de longueurs correspondant aux dimensions de l'espace d'impression. Le cahier des charges de la conception de l'organe effecteur terminal se résume selon la liste suivante :

- Les ancrages pour les câbles doivent être placés aux sommets d'un losange, comme prescrit par l'architecture du mécanisme.
- Une poignée permettant la prise en main doit être présente et accessible.
- Un capteur d'effort six axes mini-40 de la compagnie ATI doit être interfacé entre la poignée et la base qui, elle, est reliée aux câbles.
- L'organe effecteur terminal doit pouvoir résister à des efforts à la poignée d'au minimum 40 N et 2 Nm. Ces chiffres correspondent aux efforts mesurables par le capteur d'effort.
- Les ancrages doivent résister à des tensions dans les câbles de plus de 40 N, force appli-

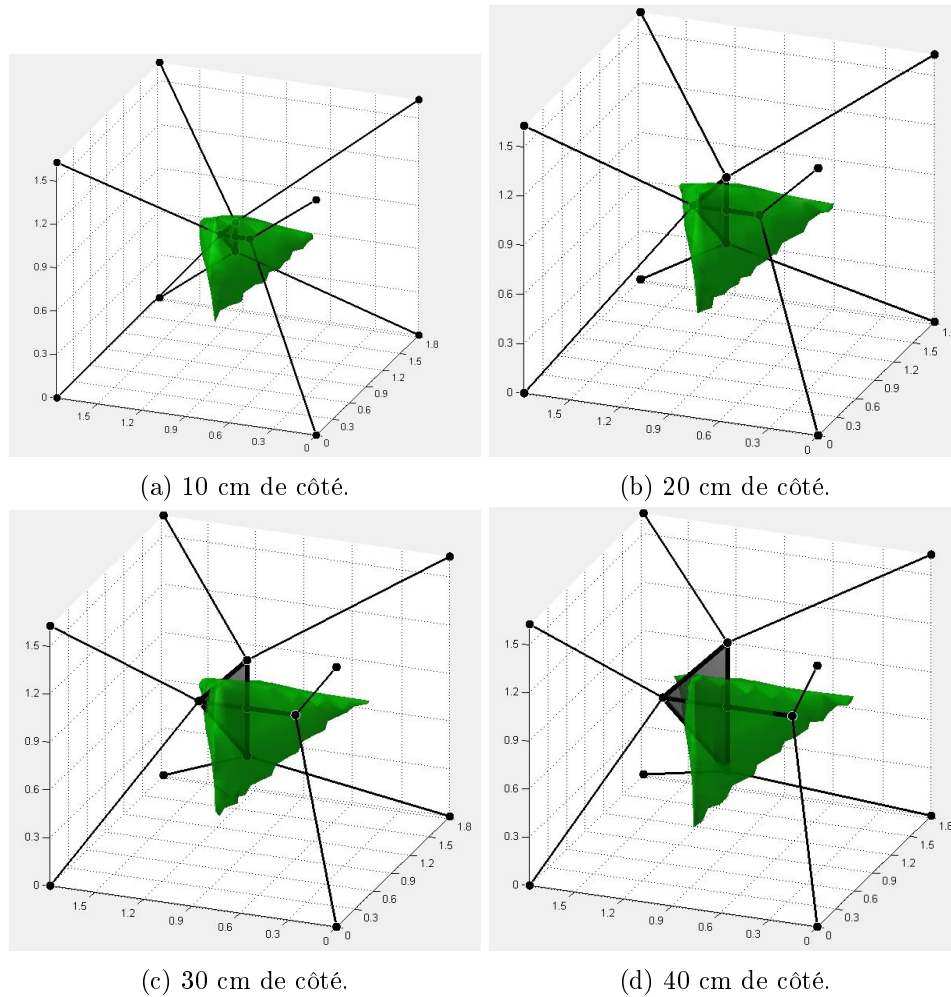


FIGURE 6.11 – Taille de l'espace de travail à orientation constante pour différente taille d'organe effecteur terminal.

cable par les enrouleurs.

- Le poids doit être minimisé pour améliorer la transparence et donc le rendu haptique.

Grâce à ces spécifications, un modèle de CAO est construit. Ce modèle est présenté à la figure 6.12. Dans cette conception, les câbles s'attachent directement au sommet du losange. On peut apercevoir des renforts à l'intérieur et des rainures formant des poutres en « H » permettant de limiter l'utilisation de matériel tout en gardant une bonne rigidité. Avec une contrainte de rupture conservatrice de 5 MPa, de simples calculs structuraux permettent de valider les capacités de la structure à résister aux efforts. La raideur par contre est plus complexe à évaluer à la conception. C'est pourquoi des trous ont été ajoutés à la structure permettant l'ajout de renforts si le besoin se présente. Comme la pièce est conçue pour être fabriquée par prototypage rapide, sa fabrication est simple et permet d'évaluer rapidement ses capacités. En effet, en plaçant l'organe effecteur terminal dans le mécanisme, et en mettant tous les câbles sous tension maximale, aucune déformation n'est perceptible. La rigidité quant

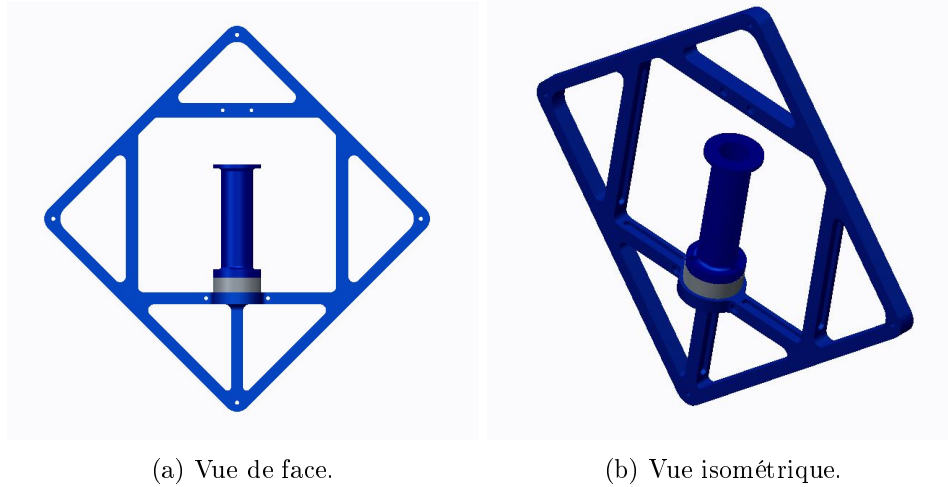


FIGURE 6.12 – Organe effecteur terminal.

à elle est jugée suffisante, elle est négligeable face aux efforts rencontrés et par rapport à la compliance des enrouleurs. Ce concept est donc conservé pour la suite du processus. Un dessin technique comportant les dimensions hors tout et les dimensions les plus importantes est disponible à l'annexe C.

6.5 Prototype

La phase de conception terminée, le mécanisme peut être mis en place, en premier lieu, sans le système de retour visuel, c.-à-d. hors du CAVE. Ceci permet de faire les tests et d'évaluer les performances mécaniques sans l'encombrement du système visuel. Comme la plateforme ayant servi à réaliser des prototypes plans et à trois dimensions est réutilisée, il suffit d'ajouter et de réorganiser les enrouleurs, et d'introduire le nouvel organe effecteur terminal pour réaliser ce nouveau prototype. Ceci démontre une fois de plus la flexibilité des mécanismes parallèles à câbles en général. Le montage final composé de l'architecture du mécanisme et de l'organe effecteur terminal est présenté à la figure 6.13. On peut y apercevoir les positions des ancrages au niveau de la base fixe et de l'organe effecteur terminal. Dans cette mise en œuvre, la disposition des points d'ancrage n'étant pas parfaitement cubique, les positions réelles des points d'ancrage diffèrent du design et doivent être étalonnées. Des méthodes d'étalonnage permettant de déterminer les positions de ces points sont présentées en détail dans le chapitre 2 de cette thèse.

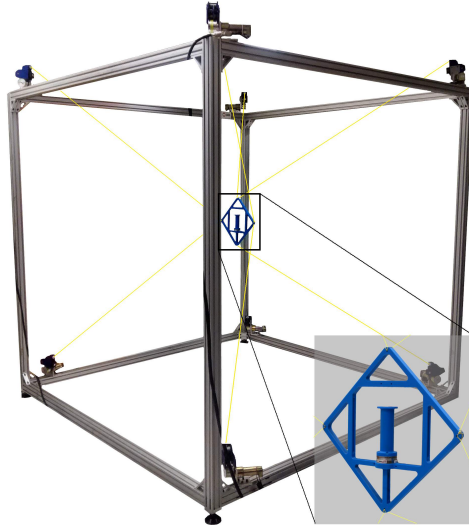


FIGURE 6.13 – Prototype de mécanisme à six ddl.

6.6 Caractérisation des performances

Pour pouvoir bien évaluer les performances du robot en tant qu'interface à retour haptique, il est nécessaire de faire une revue de la littérature sur le sujet et de trouver des interfaces auxquelles il sera possible de le comparer et selon quels critères.

6.6.1 Revue de littérature

Un des ouvrages pertinents dans ce domaine est le livre *Performance Metrics for Haptic Interfaces* (131). Ce livre présente plusieurs méthodes appliquées permettant de caractériser les mécanismes. De plus, un tableau résumant les caractéristiques de plusieurs interfaces modernes y est présenté. Ces données sont reproduites dans le tableau 6.1. Certaines des techniques présentées dans cet ouvrage seront utilisées pour évaluer le mécanisme. Un autre résumé des caractéristiques permettant d'évaluer les interfaces haptiques se retrouve dans l'article de Hayward (63). On y trouve des caractéristiques de haut niveau, comme le nombre de degrés de liberté, l'interface corps-mécanisme et des caractéristiques plus pointues comme la résolution et la bande passante. Une des caractéristiques souvent rencontrées est la plage d'impédance « Z-width ». Celle-ci mesure la plage des impédances que l'interface haptique est en mesure de reproduire. On rencontre cette mesure dans plusieurs articles, notamment celui de Colgate (28), qui suggère quelques méthodes pour maximiser son étendue. Augmenter l'amortissement inhérent du système, maximiser la résolution des capteurs, maximiser la fréquence d'échantillonnage et filtrer les lectures de vitesses sont les méthodes qui ressortent. L'augmentation de l'amortissement inhérent au système peut paraître contre-intuitive, mais elle permet la reproduction de plus grandes impédances. Pour limiter son impact sur la reproduction de faibles impédances, une impédance virtuelle négative peut être employée. Comme la plage d'impédances est difficilement mesurable, la méthode utilisée dans cet article pour

Tableau 6.1 – Un extrait du livre *Performance Metrics for Haptic Interfaces* (131) présentant les données des fabricants concernant les spécifications des interfaces haptiques commerciales

	Phantom Omni	omega.3	Novint Falcon	Virtuose	HD ²	Xitact IHP	Maglev 200
Architecture	Sérielle	Parallèle	Parallèle	Sérielle	Parallèle	Hybride	n/a
Espace de travail [10 ⁻³ m ³]	1.3	2.2	1.1	91	70	1.9	0.001
ddl	6	3	3	6	6	4	6
Res. Position [mm]	0.055	0.01	0.06	0.006	0.051	0.057	0.002
Force cont. [N]	0.9	12	9	10	10.8	20	n/a
Force max [N]	3.3	n/a	n/a	35	19.7	30	40
Raideur [N/mm]	2	14.5	n/a	n/a	3	n/a	50
Bande passante [Hz]	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2000

déterminer la plage d'impédance d'un mécanisme est expérimentale et consiste à faire une recherche en grille sur les paramètres de raideurs et d'amortissement virtuels permettant une interaction stable avec un mur virtuel. On peut ainsi tracer un graphique montrant la plage où les interactions sont stables en fonction de la raideur et de l'amortissement virtuel. Le défaut de cette caractéristique est qu'elle ne se résume pas en un seul indice et rend donc les comparaisons entre interfaces plus difficiles (144). On introduit également un concept important, celui de la passivité. Un système est dit passif si l'énergie qui y entre est plus importante que l'énergie produite par le système. La passivité est souvent utilisée pour démontrer la stabilité des systèmes. Elle n'est pas nécessaire pour avoir un système stable, mais permet de garantir qu'il le soit. Certains auteurs présentent leurs interfaces haptiques avec une évaluation des performances sous forme de caractéristiques. Yoon (76) présente une interface haptique basée sur un mécanisme parallèle à six ddl. Il analyse son espace de travail, les forces minimales et maximales applicables, sa bande passante et sa résolution de positionnement. Peer (117) présente un bras sériel sur actionné contrôlé par admittance. Dans cet article, les caractéristiques communes y sont présentées en plus de graphiques de fidélité de rendu d'impédance. On y compare l'impédance prescrite à celle qui est demandée. Najdovski (108) présente une interface haptique pour le geste de pincement. On y présente les caractéristiques comme les forces maximales, la résolution et l'espace de travail. Un récapitulatif des différentes caractéristiques communes mesurables et d'autres, plus subjectives, sont présentés par Khan (82). Samur (132) présente des tâches plus complexes pour évaluer les interfaces comme le toucher de surfaces rugueuses, la navigation dans un chemin restreint et des tâches de manipulation. Jia (74) se concentre sur l'évaluation de la performance des humains se servant d'une interface haptique. C'est donc avec ces exemples de caractérisation des performances que l'interface haptique sera évaluée et finalement comparée aux solutions commerciales et disponibles dans la littérature.

6.6.2 Caractérisation des enrouleurs

Commençons par les caractéristiques intrinsèques aux actionneurs. Ceux-ci permettent de donner un ordre de grandeur à plusieurs des caractéristiques du mécanisme final en matière de

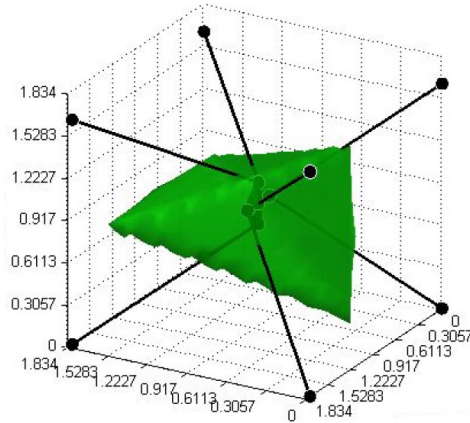


FIGURE 6.14 – Espace de travail statique pour l’orientation de référence de l’interface haptique.

puissance, de force et de raideur. Pour ce qui est de la puissance, les moteurs peuvent fournir normalement 28 W. Avec huit moteurs le mécanisme est donc capable de développer un total de 224 W. La puissance demeure donc relativement faible, ce qui facilite l’alimentation et favorise la sécurité. Les enrouleurs ont une capacité en tension continue de 20 N et sont limités en vitesse d’enroulement des câbles à 1.5 m/s. Pour la raideur, les câbles ont peu d’influence sur la raideur à l’organe effecteur terminal avec une raideur linéaire de plus de 50 Nm/mm. En comparaison, l’assemblage de plastique des enrouleurs est beaucoup moins raide avec une raideur mesurée de 6.6 N/mm. Ces derniers sont la principale source de compliance dans le mécanisme. Il sera donc difficile de rendre des impédances nécessitant une raideur plus importante. Les raideurs ont été mesurées à l’aide de dynamomètres et de pieds à coulisse. Pour ce qui est de la résolution et de la précision de positionnement, les encodeurs relatifs ont une résolution de 2048 incréments par tour. Ces derniers sont couplés à un réducteur d’un ratio de 5.9. Avec une poulie d’un diamètre de 2.5 cm la résolution de mesure des câbles est de 0.013 mm. Une précision de l’ordre de ± 5 mm s’avère, par contre, un meilleur estimé si l’on considère la compliance dans les enrouleurs. Ces données serviront ainsi à borner les résultats attendus pour le mécanisme et comme intrant dans les calculs suivants.

6.6.3 Espace de travail

Pour un mécanisme parallèle, l’espace de travail et les efforts maximaux sont liés. La section 1.5.7 de la thèse présente les différents types d’espaces de travail. On y décrit entre autres l’espace de travail statique « Static Workspace » (136) qui est l’ensemble des poses accessibles par l’organe effecteur terminal dans lesquelles il peut demeurer à l’équilibre. Ce dernier est présenté à la figure 6.14 pour une orientation constante, son orientation de référence. Un désavantage de cette représentation est qu’elle n’indique pas l’espace dans lequel le rendu haptique est de bonne qualité, mais seulement celui où l’organe effecteur peut y maintenir sa pose. L’espace le plus utile sera donc l’espace des efforts faisables (WFW), le même qui a servi pendant la conception de l’architecture du mécanisme. Ce dernier donne un meilleur estimé de la

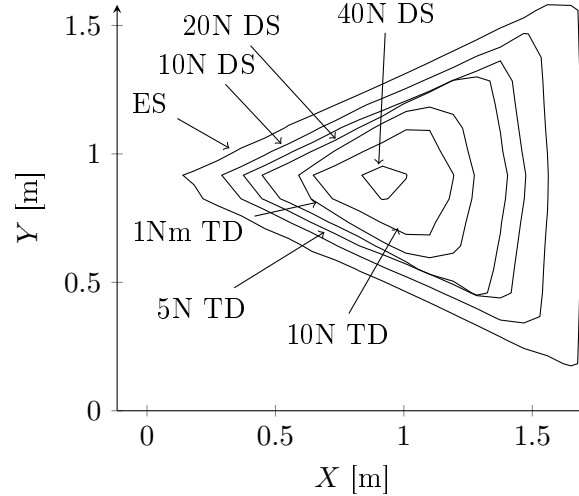


FIGURE 6.15 – Vue en coupe de l’espace de travail (WFW) à une hauteur de 1 selon l’axe des Z. ES signifie l’espace de travail statique, DS signifie direction simple et TD signifie toutes directions.

zone utile en spécifiant les efforts qui peuvent être demandés pour effectuer un rendu. Comme l’espace de travail a déjà été évalué dans la section de conception, on montre ici l’impact de la magnitude des efforts demandés sur le volume de travail. Pour ce faire, la figure 6.15 présente une vue en coupe du dessus de l’espace de travail au centre du mécanisme selon l’axe des Z. Chaque contour représente un différent jeu d’efforts. Des efforts comprenant des forces dans toutes les directions (TD), c.-à-d., des forces selon les axes X , Y et Z allant de $-f_W$ à f_W , ainsi que des efforts comprenant des moments allant de $-\eta_w$ à η_w dans chaque direction sont présentés. Des efforts selon un seul axe (DS) sont également présentés, c.-à-d. une force dans la direction X de $-f_W$ à f_W . Finalement, l’espace de travail statique (ES) est également présenté comme référence. Il est facile d’apercevoir sur la figure 6.15 l’impact de l’effort prescrit sur la taille de l’espace de travail. On peut également constater que le mécanisme peut résister à des efforts allant jusqu’à 40 N dans l’axe des X seulement, alors que les efforts selon tous les axes se limitent à 10 N.

6.6.4 Efforts maximaux

Pour évaluer les efforts maximaux, un mur virtuel est utilisé. Ce mur reproduit un comportement élastique. En faisant pénétrer l’organe effecteur terminal manuellement dans le mur, il est possible de déterminer la force à laquelle le mécanisme peut résister en mesurant la sortie du capteur d’efforts. La figure 6.16 présente ces résultats. La ligne pointillée horizontale représente la force maximale anticipée calculée en prenant en compte les tensions minimale et maximale que peut fournir chacun des câbles. Un algorithme de gestion des tensions est nécessaire pour déterminer cette force. Celui-ci est présenté dans le chapitre 4. On remarque dans ce cas que les forces maximales observées sont plus importantes qu’anticipées. Ces écarts

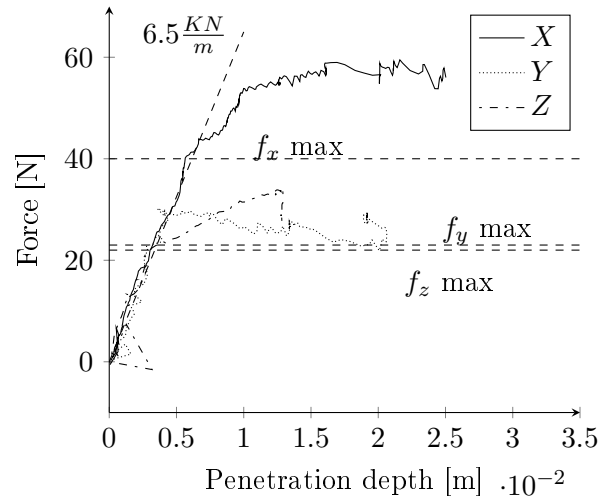


FIGURE 6.16 – Raideur et force maximale pour l’interface haptique, prises selon les trois axes principaux, soit X , Y et Z . La pente de la raideur prescrite est également affichée.

sont attribuables à la friction dans le mécanisme, qui permet à ce dernier de résister à de plus grands efforts. Les efforts applicables par le mécanisme sur l’utilisateur seront certainement moindres.

6.6.5 Raideur

La raideur maximale que peut rendre un mur virtuel est une caractéristique importante pour une interface haptique et est rencontrée dans la littérature. Cette caractéristique est un indicateur de la capacité d’une interface à rendre les surfaces rigides. En général, la raideur maximale possible est limitée par la stabilité du contrôle et par la compliance des composants du mécanisme. En effet, il est impossible de rendre une surface plus raide que la raideur intrinsèque de la structure de l’organe effecteur et des enrouleurs. Pour l’interface haptique proposée dans cette thèse, la raideur maximale d’un mur a été évaluée expérimentalement, avec une méthode similaire à celle qui est présentée dans (28). Pour ce faire, la raideur du mur virtuel est augmentée graduellement jusqu’à ce que le contact soit instable. Dans ce cas, la raideur déterminée est de 6.5 N/mm . La figure 6.16 montre les données expérimentales d’un utilisateur pressant l’organe effecteur contre un mur virtuel. Trois essais sont présentés, un correspondant à des murs dont les normales sont dans chacune des directions cartésiennes. L’abscisse représente la profondeur de pénétration de l’organe effecteur dans le mur virtuel. Cette profondeur est déterminée par la lecture des encodeurs aux enrouleurs. L’ordonnée représente la force lue au capteur dans la direction normale au mur virtuel. La raideur prescrite pour le mur virtuel est représentée par la ligne pointillée oblique. Dans les trois directions, la raideur prescrite est relativement bien suivie jusqu’à la force maximale où un plateau est atteint. La mesure de la force est prise directement à la poignée et représente donc fidèlement la force appliquée par l’utilisateur. Le déplacement de l’organe effecteur terminal, lui, est me-

suré grâce à la résolution du problème géométrique direct et de la lecture des encodeurs. De ce fait, la compliance dans la structure de l'organe effecteur terminal et dans les enrouleurs n'est pas prise en compte. La raideur mesurée est donc celle qui est mesurée par l'interface et non celle qui est perçue par la main de l'utilisateur. La raideur apparente est donc légèrement plus faible, considérant la raideur des enrouleurs mesurée à 6.6 N/mm, que la valeur de raideur la plus faible de l'ensemble du mécanisme. Pour obtenir un meilleur estimé de la raideur réelle à l'organe effecteur terminal, il est possible de convertir la raideur articulaire en raideur dans l'espace cartésien. Pour ce faire, on utilise les relations suivantes. On reprend le concept de matrice de structure présenté dans la section 1.5.6, qui relie les efforts articulaires aux efforts à l'organe effecteur terminal,

$$-\mathbf{A}^T \delta \boldsymbol{\tau} = \delta \mathbf{w}, \quad (6.1)$$

où \mathbf{w} est l'effort dans l'espace cartésien. En définissant la raideur articulaire k , qui est la même pour tous les enrouleurs, on peut écrire

$$\delta \boldsymbol{\tau} = -k \mathbf{1} \delta \boldsymbol{\rho}. \quad (6.2)$$

En remplaçant dans l'équation 6.1, la valeur de $\delta \boldsymbol{\tau}$ de l'équation précédente on obtient

$$\mathbf{A}^T k \mathbf{1} \delta \boldsymbol{\rho} = \delta \mathbf{w}. \quad (6.3)$$

Grâce aux relations cinématiques de premier ordre de l'équation 1.14 on peut remplacer $\delta \boldsymbol{\rho}$ dans l'équation pour obtenir

$$\mathbf{A}^T k \mathbf{1} \mathbf{A} \delta \mathbf{x} = \delta \mathbf{w}, \quad (6.4)$$

avec \mathbf{x} la pose de l'organe effecteur terminal. On obtient finalement la matrice de raideur \mathbf{K}_r d'un mécanisme parallèle pour une raideur articulaire égale pour chacun des enrouleurs,

$$\mathbf{K}_r = \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{x}} = k \mathbf{A}^T \mathbf{A}. \quad (6.5)$$

Ce résultat est reflété dans (48). Il faut faire attention, cependant, dans le cas des mécanismes entraînés par câbles, car les câbles ne peuvent travailler qu'en tension. Pour que cette relation soit valide, il faut qu'il y ait une tension initiale dans les câbles et que l'effort reste en tension sur la plage de déformations prise en considération. Pour l'interface haptique à sa pose de référence, on obtient alors des raideurs dans les directions cartésiennes de 22,5, 15,28 et 15,0 N/mm, qui sont dues principalement à la compliance des enrouleurs. Ces raideurs combinées en série avec la raideur virtuelle mesurée, on obtient alors des raideurs effectives à l'organe effecteur terminal de 5,0, 4,56 et 4,54 N/mm selon les axes X , Y et Z respectivement.

6.6.6 Plage d'impédance

Comme présenté dans la revue de littérature de cette section, la plage d'impédance « Z-width » est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer une interface haptique. Déterminer la plage d'impédance à partir d'un modèle mathématique continue est relativement

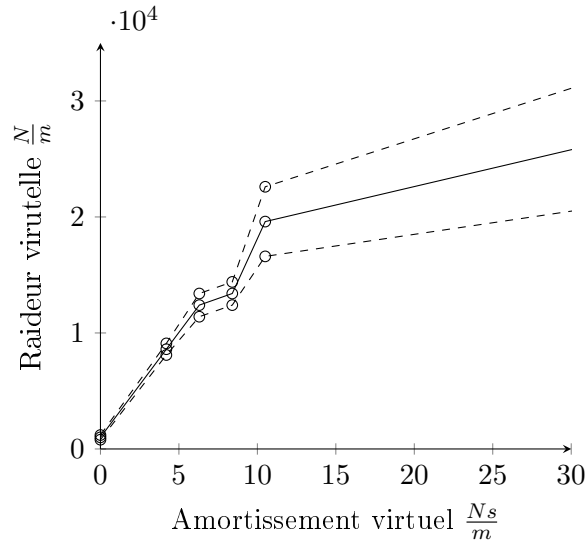


FIGURE 6.17 – Graphique raideur-amortissement de l’interface haptique pour une masse virtuelle de 0.5 kg lors du rendu d’un mur virtuel. L’aire sous la courbe présente les configurations stables. Les lignes pointillées représentent les seuils d’incertitudes.

aisé. Pour un mécanisme réel, la tâche est plus complexe. Il faut soit la modéliser et faire une linéarisation du mécanisme avec soin, soit la déterminer expérimentalement. Cette dernière approche est utilisée par Weir (144), mais demande un montage expérimental étant capable de générer des perturbations à l’organe effecteur terminal dans une grande plage de fréquences, ce qui est complexe dans le cas du mécanisme à câbles présenté dans ce chapitre. À la place, un graphique raideur-amortissement est présenté dans la figure 6.17 comme façon plus simple de présenter la plage d’impédance pouvant être reproduite par l’interface. Cette méthode est utilisée dans la littérature par Colgate (28), par exemple. Pour ce faire, un contact avec un mur virtuel de raideur et amortissement variables est utilisé. Une recherche par grille sur ces deux paramètres est utilisée pour déterminer la frontière de la stabilité. Une combinaison de paramètres est jugée instable lorsque l’utilisateur détecte des vibrations non réalistes lors du contact avec le mur. Sur le graphique de la figure 6.17, chaque point sur la ligne représente la raideur la plus importante observée pour un amortissement virtuel donné qui permettait un contact stable. La figure démontre qu’une raideur virtuelle du mur du même ordre de grandeur ($6KN/m$) que la raideur due à la compliance du mécanisme peut être atteinte à condition d’avoir un amortissement suffisant.

6.6.7 Résolution du positionnement

La résolution de positionnement à l’organe effecteur terminal d’un mécanisme parallèle peut être caractérisée par le conditionnement de la matrice jacobienne du mécanisme. Cet indice peut servir pour comparer différentes architectures à différentes poses, mais ne permet pas d’obtenir une valeur absolue de la précision à l’organe effecteur terminal. Une meilleure ap-

proche pour caractériser la résolution du positionnement consiste à utiliser les indices de sensibilité cinématique présentés par Cardou et coll. (21). Les indices $\sigma_{r,\infty}$ et $\sigma_{p,\infty}$ sont présentés dans la figure 6.18 pour une valeur constante selon l'axe Z de 1 m. Ces indices peuvent être utilisés pour évaluer la résolution de positionnement sachant la résolution de mesure à l'articulation. En modélisant les erreurs articulaires (ϵ_i) sur la mesure de la longueur des câbles comme pouvant prendre une valeur arbitraire selon

$$-\epsilon_{i,max} \leq \epsilon_i \leq \epsilon_{i,max} \quad i = 1, \dots, m, \quad (6.6)$$

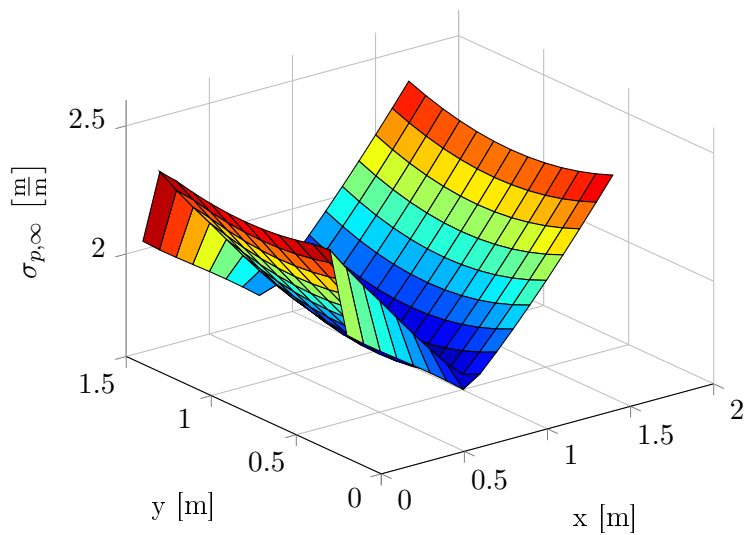
il est possible d'exprimer le vecteur d'erreur $\epsilon_{max} = [\pm\epsilon_{1,max} \quad \dots \quad \pm\epsilon_{m,max}]^T$. On peut alors évaluer la précision du positionnement cartésien et en orientation pour chaque pose donnée. Pour obtenir un indice général de la précision, il est possible de prendre l'indice de sensibilité le plus grand dans l'espace de travail et ainsi de le borner sur l'espace de travail. En prenant la norme infinie du vecteur d'erreurs articulaires ϵ_{max} et en la multipliant par chacun des indices de sensibilité, on obtient une borne supérieure pour la résolution de positionnement en position cartésienne et en orientation. Pour l'interface haptique, l'erreur sur la longueur des câbles est évaluée à 0.005 m. Pour l'indice de sensibilité en position de $\sigma_{p,\infty,max} = 1.95 \left[\frac{\text{m}}{\text{m}}\right]$, ce qui représente le plus élevé dans l'espace de travail, on obtient une précision de ± 0.0098 m. Pour la précision en orientation, avec un indice de $\sigma_{r,\infty,max} = 2.3 \left[\frac{\circ}{\text{mm}}\right]$, on obtient $\pm 11.5^\circ$. On constate ainsi que la précision du mécanisme est assez faible en orientation. Il sera donc nécessaire d'en tenir compte et de pallier à cette lacune avec d'autres mécanismes de mesure comme celui qui est utilisé dans le chapitre 7.

6.6.8 Réponse en fréquence

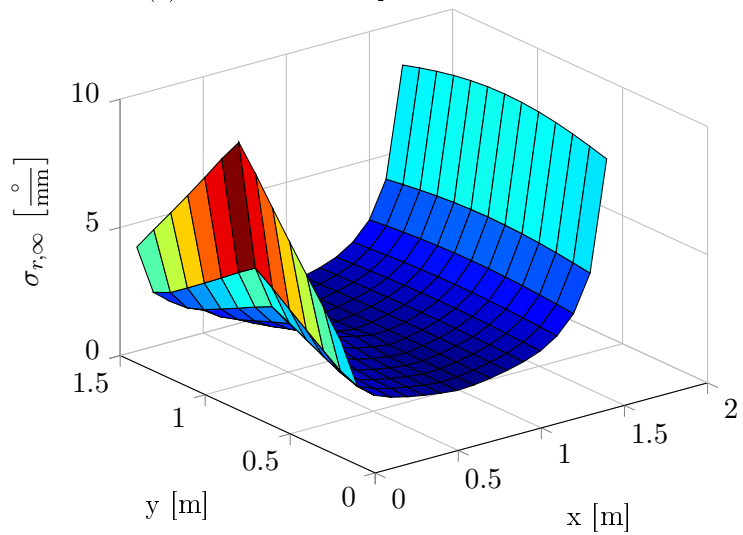
La réponse en fréquence est un indice permettant d'évaluer la vitesse de réponse d'un mécanisme. Elle permet d'évaluer ses capacités dynamiques. Cette dernière est également un bon indice quant à la qualité des impacts reproductibles. Une faible bande passante ne permet en effet pas de reproduire des impacts francs sur les surfaces. Une expérimentation servant à déterminer la réponse en fréquence du mécanisme a été effectuée en se basant sur la méthode expérimentale « open-end » présentée dans (131), dans laquelle l'organe effecteur terminal est libre de bouger. Cette méthode est sélectionnée pour sa simplicité de mise en œuvre et son indépendance aux variations causées par un humain dans la boucle. Son défaut est qu'elle ne considère justement pas la dynamique introduite par l'humain. Les résultats sont, par contre, plus comparables entre les mécanismes de cette façon. Une commande en vitesse de la forme

$$v = \frac{1}{\omega(t)} \sin(\omega(t) \cdot t), \quad (6.7)$$

avec $\omega(t) \propto t$ est donc prescrite à l'organe effecteur terminal. Un accéléromètre de type ADXL335 est placé sur l'organe terminal pour mesurer ces dernières. Un diagramme de Bode généré à l'aide du spectre de puissance du signal d'entrée et du signal de lecture de l'accéléromètre est présenté à la figure 6.19. On observe un gain statique de -10 dB entre les deux



(a) Sensibilité en déplacement cartésien



(b) Sensibilité en orientation

FIGURE 6.18 – Sensibilité cinématique à orientation constante et pour une valeur constante sur l'axe Z.

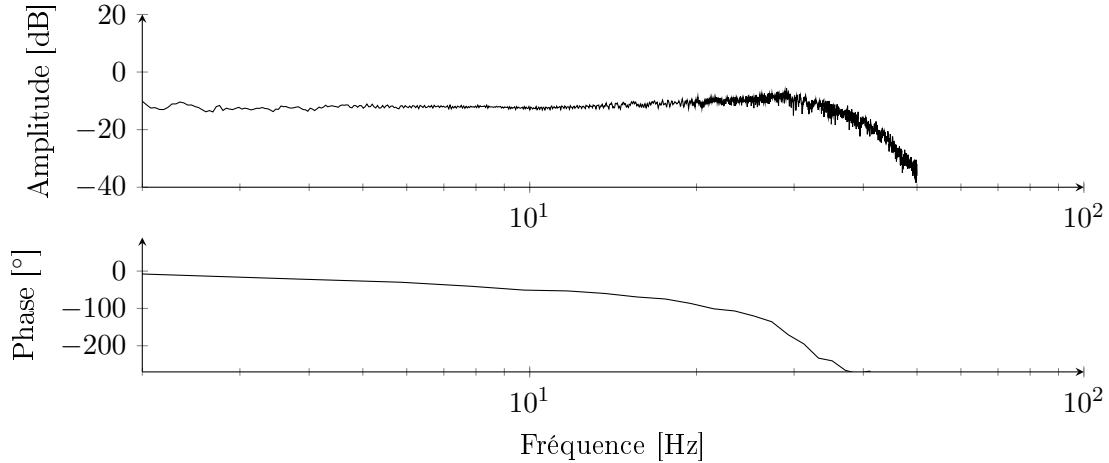


FIGURE 6.19 – Réponse en fréquence obtenue selon la méthode « open-end ».

signaux. Une réponse relativement constante peut être observée jusqu'à 20 Hz, après quoi une importante baisse en amplitude apparaît. On montre ainsi que le mécanisme est capable de rendre adéquatement des mouvements jusqu'à une fréquence de 20 Hz. À plus haute fréquence, on peut qualitativement observer un changement de mode vibratoire où les structures de l'organe terminal et de la poignée elle-même vibrent au lieu de se déplacer. De plus, on observe que la phase croise -90° à 20 Hz, ce qui limite donc la capacité de contrôle au-delà de cette fréquence. Un autre facteur limitant à prendre en considération est la bande passante du capteur d'efforts. Ce dernier fournit les consignes lors de l'utilisation de l'interface haptique et peut donc lui aussi limiter la bande passante. Expérimentalement, il a été déterminé qu'un filtre passe-bas ayant une fréquence de coupure de 15 Hz est nécessaire pour obtenir un bon compromis entre la dynamique du système et l'atténuation du bruit. De ce fait, l'interface est limitée dans sa dynamique de réponse par le capteur d'effort, même si la mécanique permet une plus grande bande passante. Pour mettre une bande passante de 15 Hz en perspective, Samur (131) note que la capacité d'un humain se situe sous 10 Hz pour les mouvements volontaires.

6.6.9 Rendu de l'impédance et transparence

Une autre caractéristique importante est la capacité à rendre différentes impédances. Pour évaluer cette capacité, une expérimentation est proposée. Elle consiste à mesurer l'impédance lorsque le mécanisme se déplace librement, c.-à-d. sans contact, et de la comparer ensuite à celle qui est prescrite. Une limite inférieure de masse et d'amortissement a été précédemment déterminée expérimentalement en demandant à un utilisateur de maintenir fermement la poignée de l'organe effecteur terminal à plusieurs endroits de l'espace de travail tout en diminuant les valeurs de masse et d'amortissement virtuel jusqu'à l'instabilité. En utilisant cette approche, il est possible de déterminer le niveau de transparence de l'interface haptique. Ce niveau d'impédance minimal servira donc de borne inférieure d'impédance pour l'expé-

rimentation. Pour être capable d'évaluer l'impédance rendue par l'interface, des mesures de l'accélération, de la vitesse et des forces sont nécessaires. L'accélération de l'organe effecteur terminal est mesurée à l'aide d'accéléromètres tri axiaux (ADXL335) placés à chaque sommet de l'organe effecteur terminal. Grâce à cette disposition particulière, il est possible de mesurer les accélérations pointes et angulaires tel que présenté dans (22). La vitesse, elle, est mesurée par différentiation du signal des encodeurs et à l'aide de la solution au problème géométrique direct. Les forces et moments, eux, sont mesurés directement à la poignée par le capteur d'effort mini-40 de la compagnie ATI. Afin d'obtenir des données représentatives, c.-à-d. un bon rapport bruit-signal, l'utilisateur génère des mouvements d'amplitudes et de fréquences variées à différents endroits de l'espace de travail. Ce faisant, une grande quantité de données est recueillie sur tout l'espace de travail. Le modèle d'impédance pour les mouvements cartésiens selon l'axe des X prend la forme suivante,

$$\mathbf{f}_x = m_x \ddot{\mathbf{p}}_x + c_x \dot{\mathbf{p}}_x + f_{fx} \text{sgn}(\dot{\mathbf{p}}_x), \quad (6.8)$$

où \mathbf{f}_x , $\ddot{\mathbf{p}}_x$ et $\dot{\mathbf{p}}_x$ sont les forces, accélérations et vitesses selon l'axe des X respectivement pour toute la séquence. Les paramètres m_x , c_x et f_{fx} sont la masse, l'amortissement et la friction cinétique qui sont à identifier. On identifie ici, la friction cinétique, car celle-ci demeure présente et peut servir d'indice des efforts parasites ressentis. En réarrangeant l'équation 6.8, il est possible d'obtenir le système d'équations linéaires suivant,

$$\mathbf{f}_x = \mathbf{E} \begin{bmatrix} m_x \\ c_x \\ f_{fx} \end{bmatrix}, \quad (6.9)$$

où $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}_x & \dot{\mathbf{p}}_x & \text{sgn}(\dot{\mathbf{p}}_x) \end{bmatrix}$. En utilisant l'inverse généralisé de Moore-Penrose, $[\mathbf{E}^T \mathbf{E}]^{-1} \mathbf{E}^T$, il est possible d'obtenir une estimation optimale des paramètres du système au sens des moindres carrés. En premier temps, on effectue cette opération pour un déplacement sans le contrôle en admittance, c.-à-d. que les moteurs ne font que fournir un couple constant de façon à garder les câbles sous tension. L'organe effecteur terminal est ensuite déplacé à la main en lui imposant des mouvements dont l'intensité de la dynamique varie, de façon à capturer une grande plage dynamique. On obtient, grâce à l'inverse généralisée, le modèle dynamique moyen du système non contrôlé. Les paramètres sont 1.37 kg, 9.69 Ns/m, 2.37 N pour la masse m_x , le coefficient d'amortissement c_x et le coefficient de friction cinétique f_{fx} respectivement. En reproduisant l'expérience, mais en activant cette fois le contrôle par admittance reproduisant une faible impédance d'une masse de 0.5 kg et d'amortissement de 2 Ns/m, on obtient les paramètres identifiés suivants : 0.89 kg, 1.53 Ns/m et 0.3346 N. On peut voir que les paramètres se rapprochent de la dynamique demandée et que les effets de la friction cinétique sont beaucoup moins présents. En effectuant plusieurs fois cette opération pour un jeu de masses $\mathbf{M} = m \cdot \mathbf{1}_{3 \times 3}$ et d'amortissements $\mathbf{C}_t = c \cdot \mathbf{1}_{3 \times 3}$, il est possible de comparer le paramètre prescrit avec sa mesure. La figure 6.20 montre l'évolution des paramètres du modèle en fonction d'une

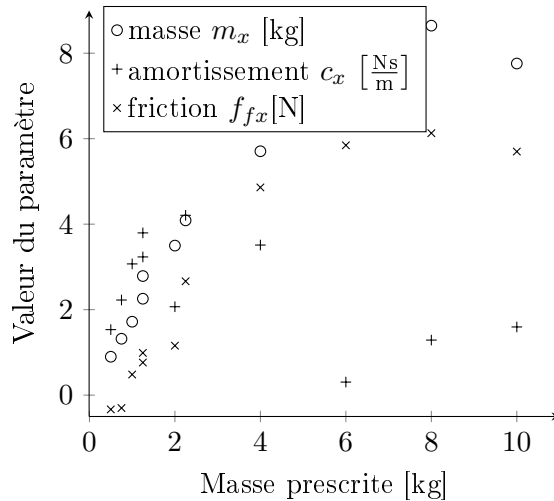


FIGURE 6.20 – Relation entre la mesure des paramètres m_x , c_x et f_{fx} de la masse prescrite M . L’amortissement prescrit (C_t) demeure constant.

augmentation de la masse prescrite de 0,5 kg à 10 kg. On peut y observer que la masse identifiée m_x suit linéairement la masse prescrite jusqu’à une masse virtuelle de 4 kg. À ce point, la relation devient non linéaire. Une masse virtuelle de 8,5 kg est atteignable, mais l’interface peut convenablement reproduire une masse de 0,5 kg à 4 kg. De plus, la figure 6.20 montre que l’amortissement est d’une moyenne de 2.6 Ns/m, bien que l’écart type soit de 1.17 Ns/m. Cela peut être expliqué par la faible valeur du paramètre, qui le rend vulnérable au bruit de mesure. La friction cinétique semble quant à elle être corrélée positivement avec la masse prescrite. Ce phénomène peut s’expliquer par l’augmentation de la tension dans les câbles nécessaire à la reproduction d’une masse élevée, qui génère plus de friction dans les enrouleurs.

La figure 6.21 présente les données de façon similaire, mais cette fois, l’amortissement virtuel varie. On peut voir que la mesure de ce paramètre croît également linéairement avec celui qui est prescrit. On peut voir dans les deux figures 6.20 et 6.21 que la relation entre les deux paramètres prescrits et le paramètre identifié est linéaire, mais que sa pente est de 1,31. Par contre, en prenant cette pente en considération, il est possible d’obtenir un rendu précis pour les valeurs de masse et d’amortissement. De plus, comme indicateur de la qualité de l’impédance modélisée, la figure 6.22 présente le résiduel de la solution des moindres carrées

$$\left(\mathbf{1} - \mathbf{E} [\mathbf{E}^T \mathbf{E}]^{-1} \mathbf{E}^T \right) \mathbf{f}_x, \quad (6.10)$$

ainsi que les forces mesurées \mathbf{f}_x pour le jeu de données correspondant à une masse virtuelle de 0.5 kg et un amortissement de 6 Ns/m. La valeur quadratique moyenne de ce jeu de données est de 1.62 N, et varie généralement entre 1 et 4 N pour les autres jeux de données.

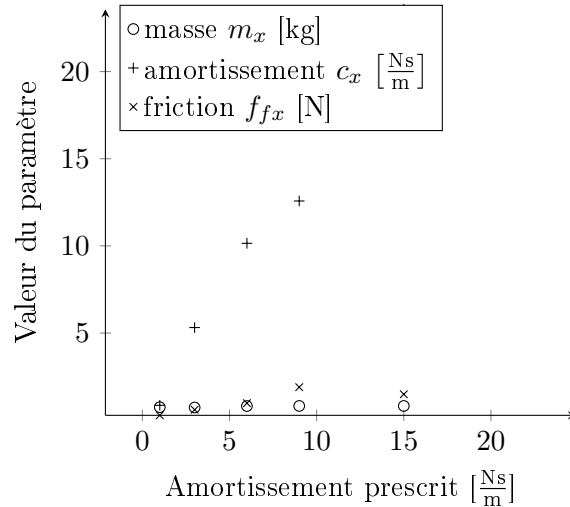


FIGURE 6.21 – Relation entre la mesure des paramètres m_x , c_x et f_{fx} et l'amortissement prescrit \mathbf{C}_t . La masse prescrite (\mathbf{M}) demeure constante.

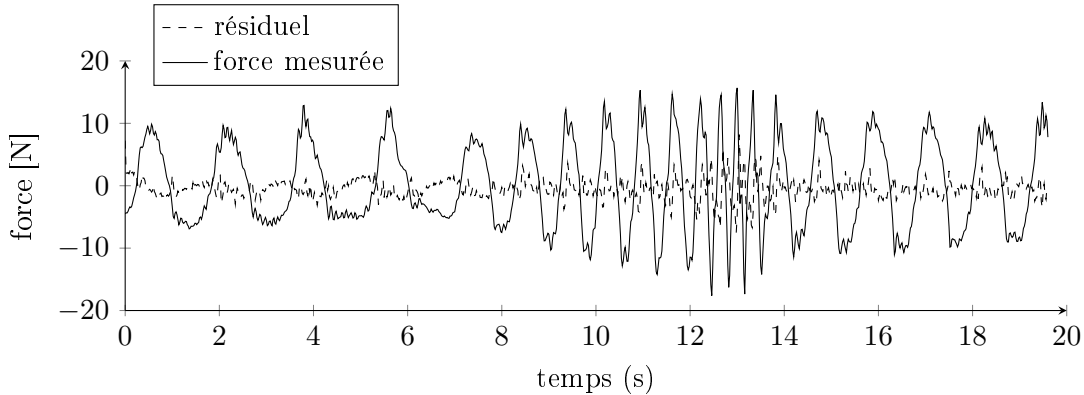


FIGURE 6.22 – Le résiduel des forces, soit la différence entre la force modélisée et la force mesurée, en fonction du temps. Les forces mesurées directement sont également présentes pour mettre les valeurs en perspective.

6.6.10 Comparaison avec les mécanismes existants

Pour compléter l'évaluation de l'interface haptique, le tableau 6.2 présente un résumé de la caractérisation. On peut alors comparer les résultats avec ceux du tableau 6.1. On note que l'avantage majeur de l'interface haptique proposé est son grand espace de travail. Ce dernier est obtenu en sacrifiant la précision de positionnement. La capacité en force et en raideur est largement similaire à celles des autres mécanismes. Pour ce qui est de la bande passante, il est difficile de comparer avec celles des autres interfaces, car celles-ci sont rarement disponibles. On note néanmoins que la bande passante de l'interface haptique proposée par Samur (131) dispose d'une bande passante de 13 Hz, ce qui demeure similaire à celle rapportée ici.

Tableau 6.2 – Caractéristiques de l’interface haptique présentée dans ce chapitre

Interface à câbles	
Architecture	Parallèle
Espace de travail [10^{-3} m ³]	1000
Capacité d’orientation [°]	30(y, z), 10(x)
ddl	6
Res. Position [mm]	9.8
Res. Position [°]	10
Force cont. [N]	20
Force max [N]	40
Raideur [N/mm]	5
Bande passante [Hz]	15

6.7 Intégration du système à retour visuel

Pour terminer la preuve de concept, le système doit être intégré au système de retour visuel, soit le CAVE disponible à l’Université Laval. Un prototype de jeu de tennis de table est développé pour évaluer qualitativement le rendu. La figure 6.23 montre le mécanisme en action.

6.7.1 Installation

Un schéma de l’installation est présenté à la figure 6.24. On y présente la Console interface utilisateur, par laquelle l’utilisateur, ou le thérapeute en réadaptation, interagit. Cette console communique avec les nœuds de calculs temps réel qui font l’asservissement du robot. Les boîtes d’amplifications s’occupent de l’alimentation en courants des moteurs. Le contrôleur graphique s’occupe de l’affichage et reçoit la position de différents objets graphiques définis dans les nœuds de calcul. Les objets graphiques à afficher sont relativement simples et sont définis préalablement. Ils sont au nombre de trois : une balle, une raquette et le terrain de jeu. Les positions dans l’espace de ces derniers sont gérées par le nœud de calcul principal. La simulation est donc entièrement contrôlée par l’environnement en temps réel RT-Lab. Le nœud de calcul principal envoie par le protocole UDP/IP la position du terrain de jeu lors de l’initialisation du système et envoie par la suite les positions de la raquette et de la balle à chaque cycle de

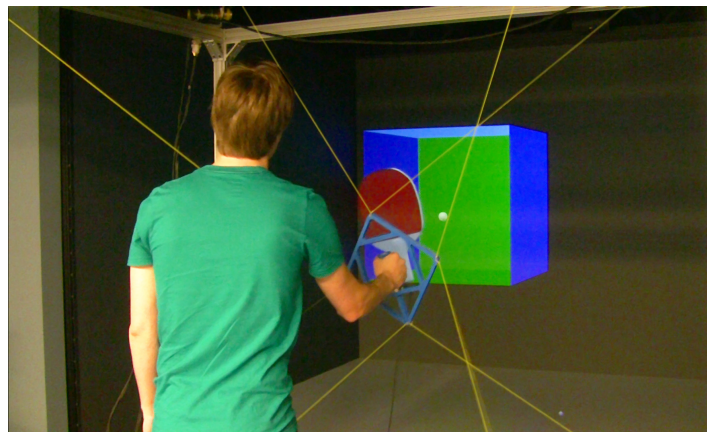


FIGURE 6.23 – Système de réalité immersif avec retour haptique

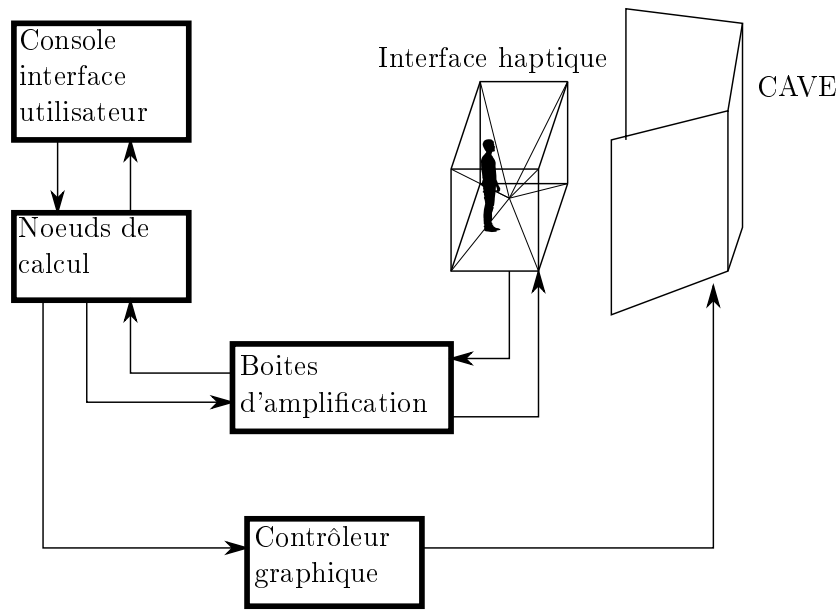


FIGURE 6.24 – Schéma de l'installation du prototype servant au jeu de tennis de table.

contrôle. L'étalonnage du référentiel du CAVE par rapport à celui de l'interface haptique se fait par des mesures conventionnelles en boucle ouverte. L'identification des longueurs initiales des câbles se fait par la suite à l'aide de l'affichage trois dimensions du CAVE. En effet, l'utilisateur n'a qu'à placer la poignée de l'organe effecteur réel en superposition avec celle qui est affichée par le CAVE. Grâce à cette méthode, l'initialisation se fait rapidement et est suffisamment précise pour les besoins du prototype. Une vidéo démontrant une personne interagissant avec le système est fournie avec cette thèse (prototype_CAVE.mp4) .

6.7.2 Observations qualitatives

Le jeu de tennis de table simulé consiste en une balle qui est envoyée vers le joueur à une certaine fréquence. Le joueur doit retourner la balle dans le terrain de jeu de façon à ne pas la perdre derrière lui. La balle a une masse simulée beaucoup plus importante que celle d'une balle de tennis de table réelle, de façon à ce que le contact avec la raquette soit franchement apparent. Les moments associés au lieu de l'impact sont rendus pour que le joueur sente le lieu de l'impact sur la raquette. L'inertie et la masse de la raquette sont également simulées. Grâce au système de vision stéréoscopique, le joueur a l'impression que la raquette est située dans sa main. En effet, le joueur tient un manche similaire à celui de la raquette, mais le reste de l'instrument n'existe que dans le monde virtuel, étant tracé par les écrans. Comme le jeu est relativement intuitif, peu de consignes sont nécessaires pour y jouer. Les limites en orientation doivent cependant être précisées, car la raquette ne peut se déplacer avec la même liberté que son équivalent réel. En effet, la raquette doit demeurer proche de son orientation de référence. Le jeu contraint le joueur à rester dans l'espace de travail cartésien, ne permettant pas à la balle de quitter ce volume. Le joueur n'a donc, pas à se soucier de demeurer à l'intérieur

de l'espace de travail du robot. Le jeu a été essayé par un groupe de 5 personnes de façon informelle. Les commentaires recueillis étaient majoritairement positifs. L'effet d'immersion était grandement apprécié et le réalisme impressionnant. Par contre, du côté négatif, les mouvements de grandes amplitudes et vitesses ne pouvaient pas être reproduits à la hauteur de ce qui se fait lors d'une partie de tennis de table. Le poids d'une raquette de tennis de table n'étant pas très important, plusieurs ne remarquaient pas cette composante. En augmentant le poids de la raquette, les joueurs le remarquaient plus facilement, et le jeu devenait alors plus physique. De ces observations, il est possible de dégager certaines conclusions. Ces dernières faciliteront le développement d'une tâche de réadaptation qui profitera des avantages de l'interface tout en diminuant l'impact de ses désavantages. Par exemple, concevoir une tâche qui limite intuitivement l'espace de travail à celui qui est disponible est d'une grande utilité. Une tâche reprenant une activité commune rend cette dernière intuitive et nécessite peu d'explications. Une tâche limitant les mouvements en orientation serait à privilégier sans quoi une modification de l'architecture est nécessaire. Les mouvements de grandes amplitudes et à haute vitesse sont à éviter, car le rendu est moins convaincant.

6.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception, la réalisation et la caractérisation d'un prototype d'interface haptique entraînée par câbles à six degrés de liberté pouvant être liées à un dispositif à retour visuel (CAVE). Les étapes de conception élaborées présentent un cadre de travail permettant de développer un mécanisme ayant un espace de travail suffisant pour une tâche donnée et l'optimisation de l'empreinte du mécanisme. Différentes architectures d'organe effecteur terminal sont également présentées et comparées à ce qui existe dans la littérature. La preuve de concept présentée dans ce chapitre a également permis d'évaluer les performances attendues pour un mécanisme à câbles de cette dimension. Ces performances permettent de borner les capacités du mécanisme et rendent donc possible le développement d'une tâche de réadaptation adéquate. L'interface avec un retour visuel montre qu'un retour visuel accompagné d'un retour haptique rend le système immersif et permet des interactions intuitives et réalistes.

Chapitre 7

Mécanisme 6 ddl à grand débattement selon un axe de rotation

Les mécanismes parallèles disposent généralement de plusieurs caractéristiques intéressantes, comme une grande rigidité, une capacité d'efforts importants (charge utile) pour une faible masse. Ces caractéristiques permettent des trajectoires à grandes dynamiques. Leur faiblesse principale est l'espace de travail réduit, spécialement en orientation. Pour la tâche de réadaptation proposée, c.-à-d. le transport de boîte, un besoin se fait sentir de pouvoir effectuer des mouvements de grandes amplitudes faisant intervenir la rotation du tronc du patient. Une rotation du tronc de 90° de chaque côté de la pose de référence est donc désirée. Un mécanisme permettant des changements d'orientation d'au moins 180° selon l'axe vertical est alors nécessaire, ce qui rend l'architecture conventionnelle inadéquate. Une solution de remplacement doit donc être conçue pour répondre à ces nouvelles contraintes. Ce chapitre présente donc en premier lieu le cahier des charges et une revue de littérature permettant l'élaboration d'un concept initial. Différents concepts initiaux sont ensuite présentés et analysés pour ensuite arriver au prototype final.

7.1 Cahier des charges

La problématique est donc la conception d'un mécanisme à retour haptique à six ddl permettant de faire des rotations importantes selon l'axe vertical pour simuler la tâche du transport de boîtes. Le système ne doit pas substantiellement ajouter de la masse à l'organe effecteur terminal. L'encombrement doit être limité et le système doit rester peu dispendieux. Le cadre de travail utilisé dans la création des précédents prototypes est conservé, c.-à-d. que les enrouleurs, le système de puissance électrique, les nœuds de calculs en temps réel et le système RT-Lab doivent être utilisés.

7.2 Revue de littérature

Quelques solutions sont proposées dans la littérature. Une solution simple est l'ajout d'une articulation de façon sérielle à l'organe effecteur terminal (55). Des architectures re configurables (4) ainsi que des architectures avec une redondance cinématique (53; 54; 84) sont également proposées comme moyens d'augmenter l'espace de travail, particulièrement en orientation. Comme un mouvement de grande amplitude selon l'axe vertical est convoité, les architectures permettant d'effectuer des mouvements de type Schönflies, trois translations et une rotation peuvent servir d'inspiration (107). Dans le domaine des robots parallèles à câbles, peu de publications disponibles proposent des architectures à six ddl permettant de grandes réorientations. Des couplages de mécanismes sériels et de robot à câbles ont été proposés pour augmenter la raideur dans la direction verticale (139). L'utilisation d'actionneurs doubles (88), doublant les câbles simples, permet l'ajout de degrés de liberté en actionnant des mécanismes supplémentaires à l'organe effecteur terminal. Pott (122) a également présenté un mécanisme parallèle à câbles permettant des rotations illimitées selon l'axe principal, mais cette méthode limite la rétro commande.¹ Une implantation plus complexe limitant les frottements sur les câbles en utilisant de multiples poulies à l'organe effecteur terminal est présentée dans (94). Dans ce cas, l'organe effecteur terminal est beaucoup plus massif et complexe, ce qui limite ses qualités d'interface haptique.

7.3 Concepts initiaux

Deux concepts ont été évalués initialement. Le premier utilise un degré de liberté supplémentaire en ajoutant à l'organe effecteur terminal une articulation rotoïde actionnée. L'organe effecteur terminal initial devient alors une plateforme pouvant maintenir le moteur de l'articulation rotoïde pivotant l'organe effecteur terminal, qui comprend l'interface avec l'utilisateur. Dans ce cas-ci, l'interface avec l'utilisateur prend la forme d'une boîte à être manipulée par l'utilisateur. La figure 7.1a présente un schéma préliminaire de ce concept. Une architecture similaire à celle qui est utilisée par la preuve de concept du chapitre 6 sert de plateforme mobile gérant 5 degrés de liberté. Le sixième degré de liberté de la plateforme mobile est maintenu fixe et reprend les couples selon l'axe vertical qui proviennent d'un moteur mis en série. Le défaut majeur de cette solution est l'ajout important de masse à la plateforme mobile ce qui réduit la transparence et les performances dynamiques du mécanisme. Un aspect atténuant de cet impact est que la masse produit un effort dû à la gravité, le type d'effort qui sera demandé au mécanisme. L'ajout de masse ne devrait donc pas faire diminuer l'espace de travail faisable (WFW) substantiellement. Par contre, l'alimentation du moteur doit être acheminée directement à la plateforme mobile. Ceci impose donc l'utilisation de câbles électriques se rendant à la plateforme mobile. De plus comme ces fils auront à transporter de la puissance, ils devront posséder un diamètre important en comparaison avec les fils transportant le signal

1. En anglais : backdrivability

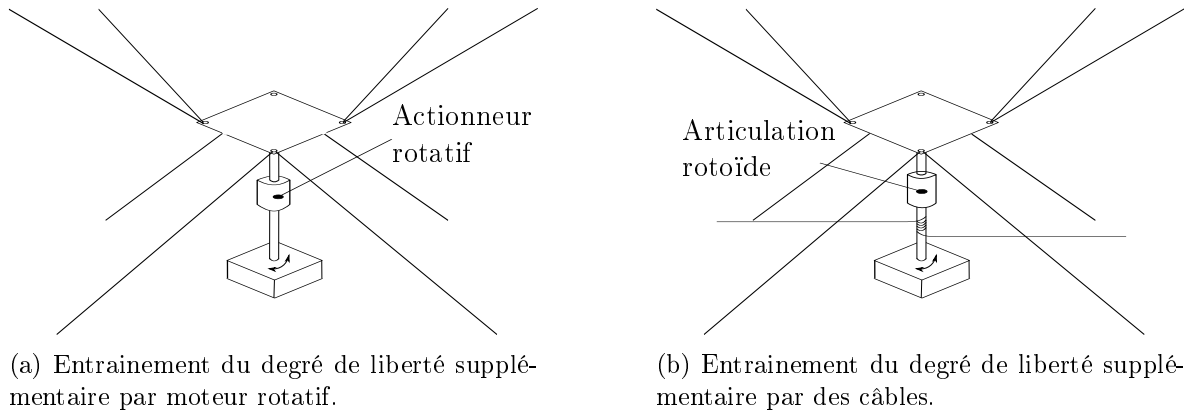


FIGURE 7.1 – Concept avec actionneur en série de mécanismes à câbles à grande capacité de réorientation dans l’axe vertical.

électrique du capteur d’effort. Ces inconvénients sont majeurs. Une alternative n’impliquant pas de moteur à la plateforme mobile permettrait de s’en affranchir.

L’ajout d’un degré de liberté en série est tout de même intéressant. L’actionnement de la rotation de l’axe pourrait être reporté à la base fixe pour éviter les inconvénients du moteur embarqué. En utilisant deux câbles, comme dans la publication de Le (88), il serait possible d’actionner le degré de liberté supplémentaire en gardant la masse des moteurs à la base. En laissant le câble s’enrouler sur l’organe effecteur terminal comme dans (90), l’espace de travail en orientation se trouve grandement augmenté. Ce concept est présenté à la figure 7.1b. Le problème du concept tel que présenté est qu’il nécessite deux câbles supplémentaires pour un total de dix. Pour que cette solution soit compatible avec le cadre de travail prescrit d’un maximum de huit câbles actionnés, l’architecture doit être adaptée. Le degré de liberté ajouté porte à sept le nombre de degrés de liberté du mécanisme. Pour avoir un mécanisme pleinement contraint, un minimum de huit câbles est donc nécessaire. Cette contrainte peut donc être satisfaite. Par contre, comme dans le cas du mécanisme à six degrés de liberté du chapitre 6, avoir un degré de redondance $r > 1$ peut être bénéfique pour le volume de l’espace de travail. Plutôt que d’augmenter le nombre d’actionneurs, on obtient un degré de redondance $r = 2$ en diminuant le nombre de degrés de liberté contrôlés à l’effecteur. Ainsi, la rotation de la plateforme mobile est laissée libre autour de l’axe à grands débattements de l’effecteur. La plateforme mobile perd donc un degré d’actionnement, celui qui commande la rotation autour de l’axe vertical dans la position de référence, permettant ainsi d’avoir les six degrés de liberté voulus.

7.3.1 Prototype

Le concept retenu possède donc une architecture à six degrés de liberté et huit câbles. Sa particularité est qu’un des degrés de liberté en orientation est découplé de la plateforme mobile et est également actionné par des câbles. La plateforme mobile possède en effet cinq

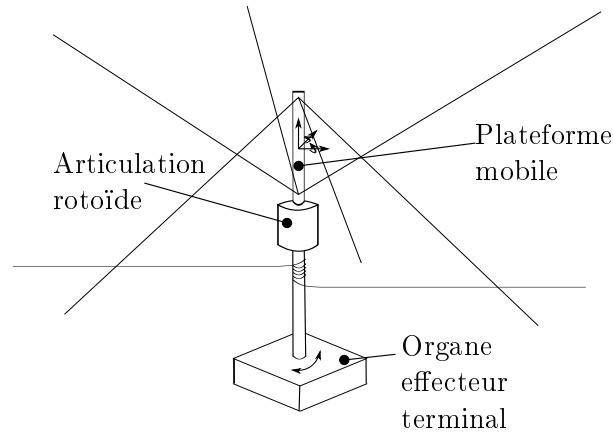


FIGURE 7.2 – Schéma de l'architecture du prototype.

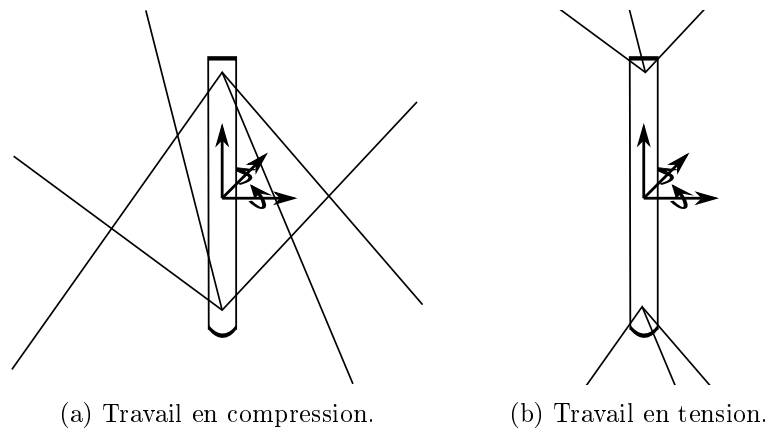


FIGURE 7.3 – Deux configurations pour la plateforme mobile (tige).

degrés de liberté. Dans sa pose de référence, elle peut donc résister à des efforts cartésiens et à des moments dans deux directions. L'organe effecteur terminal, lui, dispose d'un degré de liberté par rapport à la plateforme mobile, la rotation manquante. Ce dernier est lié à la plateforme mobile par un assemblage roulant lui permettant de tourner librement autour de l'axe vertical. Un schéma de cette architecture est présenté à la figure 7.2. L'architecture de la plateforme mobile ressemble à celle du FALCON (79) comprenant six câbles seulement. Ces six câbles sont attachés en deux points sur la plateforme mobile, qui s'apparente à une tige rigide. Deux configurations sont possibles pour les points d'attache sur la plateforme mobile. L'une fait travailler la tige en tension, l'autre en compression, tel que présenté à la figure 7.3. Comme l'espace en hauteur est limité, la configuration faisant travailler la tige en compression est privilégiée, car elle maximise le volume de l'espace de travail pour une hauteur de points d'attache donnée. Son désavantage est une propension aux interférences entre les câbles. Comme la plage d'orientation selon les axes horizontaux demeure faible, les interférences entre les câbles sont limitées. Pour actionner la rotation de l'organe effecteur terminal, un tambour est utilisé. Ce dernier permet l'enroulement et le déroulement du câble autour de l'organe effecteur terminal. Grâce à cette méthode, l'organe effecteur terminal peut

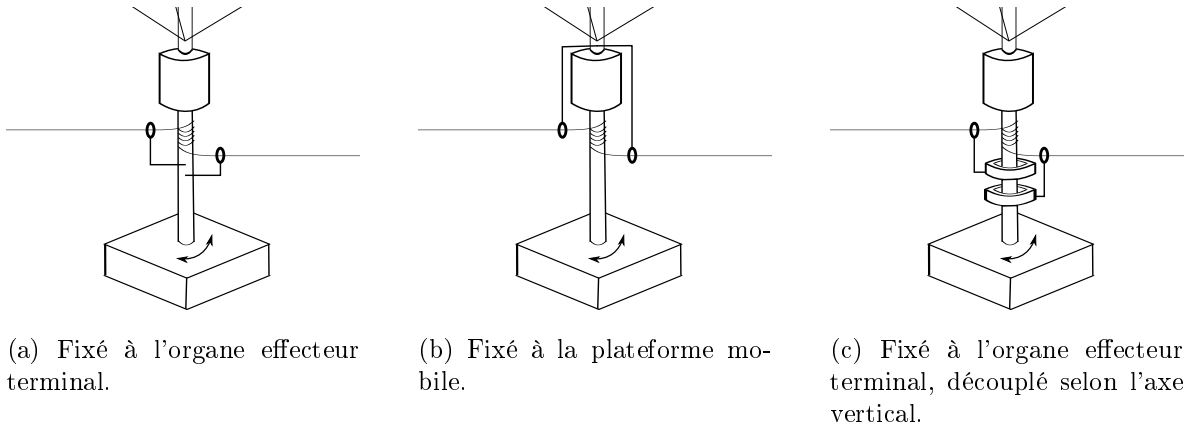


FIGURE 7.4 – Disposition des guides sur la plateforme et sur l'organe effecteur terminal.

théoriquement tourner de plusieurs tours selon l'axe vertical, tout dépendant des longueurs des câbles disponibles dans les enrouleurs. En pratique, cette rotation sera limitée par la conception du tambour et par le mécanisme de mesure. L'enroulement sur le tambour doit effectivement être géré pour être en mesure de connaître la longueur réelle des câbles qui y sont enroulés. Sans guide, l'enroulement serait fonction de la pose de l'organe effecteur terminal, de la tension dans le câble, de l'enroulement préexistant et autres. Il est donc nécessaire de concevoir un mécanisme permettant de guider l'enroulement du câble sur le tambour de l'organe effecteur terminal. Le guide permettra entre autres de connaître la position du point d'ancrage effectif du câble. En effet, en utilisant un œillet semblable à celui qui est situé sur les enrouleurs, il est possible d'utiliser ce point d'ancrage comme point d'ancrage effectif dans les calculs de la matrice jacobienne et dans la résolution du problème géométrique direct. La figure 7.4 montre différents concepts d'ancrage des guides. Le concept (a) fixe les guides directement à l'organe terminal, ce dernier est inadéquat, car il enlève complètement la possibilité de faire les rotations. Le concept (b) permet les rotations, mais engendre un couple selon l'axe vertical qui ne peut être repris par la plateforme mobile. La solution trouvée est donc le concept (c), qui fixe les guides à l'organe effecteur terminal à l'aide d'articulations rotoïdes, ce qui permet de libérer la rotation et évite de transmettre des couples selon l'axe vertical. Les positions des points d'ancrage effectifs deviennent donc, dans ce cas, dépendantes de la pose de la plateforme mobile, mais sont restreintes à un plan normal à l'axe de la tige et à une distance constante de cette dernière. Pour s'assurer d'un enroulement contrôlé, un tambour d'enroulement est aussi nécessaire. Le rayon de ce tambour a également un impact important sur la capacité en couple de l'organe effecteur terminal. Sa taille doit donc être assez importante pour générer les couples requis par la tâche, tout en restant d'une taille non encombrante. Plus sa taille est grande, plus la vitesse d'enroulement est restreinte. Lors de tests avec les premiers prototypes, et comme anticipé à l'aide des caractérisations du mécanisme à 6 ddl du chapitre 6. La précision de l'orientation de l'organe effecteur terminal selon l'axe de la tige est insuffisante pour effectuer un contrôle avec le capteur d'efforts. L'orientation du capteur

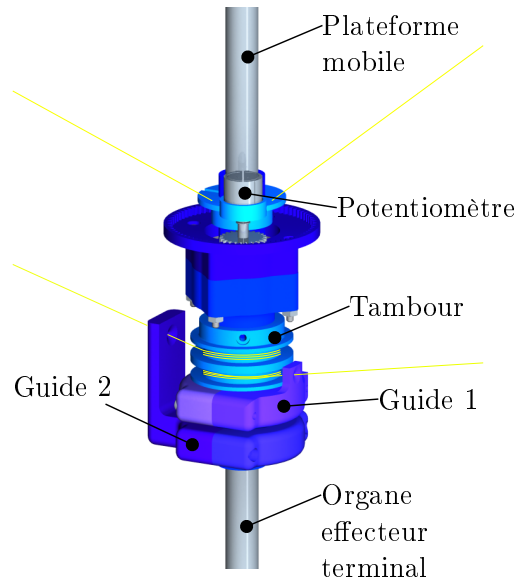


FIGURE 7.5 – Illustration du joint rotoïde et des guides pour les câbles.

d'efforts étant sensible aux erreurs, il faut ajouter un capteur supplémentaire pour pouvoir augmenter la précision de cette orientation. Un potentiomètre multi tours est donc ajouté pour lire la différence d'angle entre l'organe effecteur terminal et la plateforme mobile. Ce dernier est couplé à un engrenage permettant d'augmenter sa sensibilité d'un ratio de 3. Comme le potentiomètre multi tours dispose d'une plage de 10 tours, la plage de rotation autour de la tige sera limitée à 3.3 tours, ce qui sera suffisant pour effectuer les rotations 180° prescrites par la tâche. C'est en considérant ces concepts que la plateforme mobile et l'organe effecteur terminal sont conçus. Un assemblage de plastique (ABS) et d'aluminium est utilisé dans la fabrication. L'aluminium est utilisé dans la fabrication de la tige pour que cette dernière soit rigide en flexion et puisse résister aux efforts de compression. Les parties mobiles et les points d'attache sont fabriqués par prototypages rapides et sont donc en plastique pour limiter le poids et le temps de fabrication. Le mécanisme d'enroulement est présenté à la figure 7.5. Une vue en coupe de l'assemblage est disponible à l'annexe D. Pour éviter un mauvais enroulement des câbles, un tambour double a été conçu. Étant donné que la rotation est limitée à 3.3 tours. Les deux câbles, venant s'enrouler sur l'organe effecteur terminal, s'enroulent chacun sur sa section du tambour. Un pré enroulement minimum d'environ deux tours sur chaque tambour devient donc nécessaire pour pouvoir bénéficier de la plage de rotation complète, ce qui ne pose pas de problèmes et évite la complexité de la gestion de l'enroulement continu d'un seul câble. Pour une utilisation moins encombrante, des modules de communications sans fil sont introduits pour transmettre les signaux du capteur d'effort et du potentiomètre. Pour le capteur d'effort, une solution commerciale est privilégiée. Le module « Wireless F/T » de ATI-Automation est utilisé. Ce système sans fil fonctionne avec les normes wifi standard (IEEE 802.11 a/b/g/n) sur les bandes 2.4 et 5 GHz. La bande 5 GHz est préférable, car elle est moins encombrée et dispose de plus de bande passante, ce qui permettra d'avoir un signal du capteur

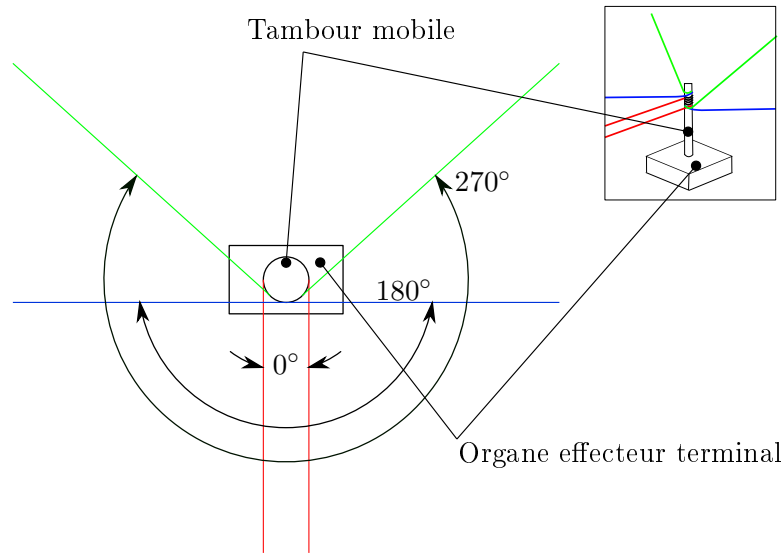


FIGURE 7.6 – Vue du dessus du mécanisme dans sa position de référence auquel seulement la paire de câbles d’intérêts est tracée dans trois configurations d’angle, soit celle à un angle de 0° en rouge, à 180° en bleu et à 270° en vert.

d’effort à haute fréquence et sans trop d’interférences, ce qui est crucial pour obtenir un bon rendu haptique. Le module de communication utilisé pour transmettre la valeur de la rotation du potentiomètre est un circuit imprimé comportant une puce esp8266 disposant d’une entrée analogique et d’une antenne wifi communiquant sur la bande de 2.4 GHz. Comme la fréquence de lecture de cette valeur est moins cruciale au rendu haptique, la plus faible bande passante et le délai légèrement plus élevé ne poseront pas de problèmes. Un dernier point de la conception reste à déterminer : les positions des points d’ancrage des enrouleurs responsables de la rotation sérielle. Intuitivement, ces enrouleurs doivent être placés sur un plan normal à la direction de la tige dans sa position de référence. Pour limiter le frottement aux œillets mobiles causé par un important angle de sortie du câble, la hauteur des points d’ancrage devrait être la même que celle du tambour situé sur l’organe effecteur terminal lors d’une utilisation typique. Il reste donc un paramètre à déterminer celui du positionnement angulaire des points d’ancrage dans le plan normal à la tige. Ce choix est présenté à la figure 7.6. Bien qu’un choix de solutions discrètes soit présenté dans la figure, ce choix est continu dans la plage 0° à 360° . Le volume de l’espace de travail à orientation constante a été évalué pour plusieurs de ces choix, 0° , 90° , 180° et 270° . La forme de l’espace de travail diffère pour les configurations symétriques (90° et 270° par exemple) dues à l’architecture des six autres câbles attachés à la plateforme mobile. Bien que des différences d’espace de travail soient présentes, la configuration à 270° a été choisie à cause de contraintes de fixation dans le laboratoire où l’interface sera installée. Une investigation plus en profondeur de ce paramètre pourrait être effectuée et se retrouve dans la section travaux futurs dans la conclusion de cette thèse.

7.4 Conclusion

Grâce au prototype à grand débattement développé dans ce chapitre. La tâche de transport de boîte nécessitant des rotations du tronc du patient de 180° devient possible. Ce type d'architecture peut, d'ailleurs, être réutilisé dans différents contextes. Avec son mouvement s'apparentant aux mouvements de type Schönflies des tâches de vissage et de palettisation pourrait facilement être effectuée par un mécanisme disposant de cette architecture. Une évaluation de l'espace de travail de ce type de mécanisme est effectuée au chapitre 8 dans l'élaboration de la tâche de transport de boîtes. Le prototype développé dans ce chapitre est montré en action de la vidéo (2ddl_a_6ddl.mp4) disponible avec la thèse. Deux dernières avenues intéressantes pour cette architecture sont, soit, l'enlèvement d'un des câbles supportant la plateforme mobile et le remplacement de son action par la paire de câbles responsable de l'actionnement du joint sériel, soit, l'addition de câbles à la plateforme mobile pour optimiser l'espace de travail, ou encore une combinaison des deux.

Chapitre 8

Mécanismes à câbles en haptique pour la réadaptation

Ce dernier chapitre présente le développement final du mécanisme à câbles pour une utilisation en réadaptation ainsi que le système d'immersion complet installé au CIRRS. Le système d'immersion complet inclut non seulement le retour haptique, mais aussi un retour visuel par casque de réalité virtuelle et un suivi du mouvement en temps réel. Des résultats préliminaires sont également présentés. Ces résultats portent sur l'utilisation du mécanisme par des sujets tests. Un manuel d'utilisation du mécanisme est fourni avec cette thèse (manuelCDPM.pdf).

8.1 Cahier des charges

Pour que le mécanisme puisse devenir un outil pour les thérapeutes, une tâche démontrant les capacités du mécanisme doit être reproduite. Cette tâche doit permettre à un patient qui l'effectue d'être évalué ou d'être entraîné à une tâche spécifique. Pour ce faire, le mécanisme à grand débattement présenté au chapitre 7 est utilisé comme interface à retour haptique. Il est ainsi nécessaire d'adapter l'architecture du robot de façon à optimiser le volume de l'espace de travail en prenant en compte les contraintes de taille de la pièce dans laquelle il sera installé et en fonction de la tâche de transport de boîte développée à la section 8.2. Une intégration avec le système à retour visuel développé par Michaël Bonenfant (9), un étudiant à la maîtrise du Laboratoire de vision et systèmes numériques de l'Université Laval, devra également être effectuée. Ce système utilise un casque de réalité virtuelle de type Oculus Rift, combiné avec un système de suivis par caméra de type Kinect qui permettent de suivre la personne en temps réel et ainsi de refléter ses déplacements réels dans l'environnement virtuel. Pour faire l'intégration de ces deux systèmes, le développement d'une méthode d'étalonnage permettant de faire coïncider leurs deux systèmes de coordonnées est également nécessaire. Cet étalonnage permet de faire coïncider la boîte virtuelle et la boîte réelle fournie par l'interface haptique. Finalement, des tests préliminaires doivent être effectués sur des personnes non familières

avec l'interface haptique afin d'évaluer leur réponse et obtenir une première impression sur l'utilisation d'un tel système.

8.2 Développement de la tâche

La tâche prévue est de faire déplacer une charge par un patient d'une position à une autre. Cette tâche a déjà été envisagée comme tâche pour réadapter les militaires lorsqu'ils souffrent d'un mal de dos chronique non spécifié au bas du dos « chronic non-specific low back pain » et de blessures traumatiques légères au cerveau « mild traumatic brain injury » (72). La tâche proposée par les chercheurs du CIRRIIS participant au projet consiste à faire décharger pour le patient un camion de sacs de sable et à les placer sur une palette, le tout dans un environnement virtuel, comme présenté à la figure 8.1. Comme le déplacement de sacs de sable demande des



FIGURE 8.1 – Tâche de déplacement de charge dans un environnement virtuel. Image tirée de (72)

efforts plus importants que ceux qui sont possibles avec le mécanisme (voir le chapitre 6) une tâche légèrement différente est proposée : le transport de boîtes. Le poids des boîtes en questions demeure dans la plage reproductible par le mécanisme et elles permettent une prise en main plus facile à reproduire. La prise par des poignées comme sur une caisse de lait est privilégiée à l'opposé d'une prise quelconque sur un objet de forme irrégulière. La tâche de transport consiste à déplacer les caisses d'une surface de travail (table) à une étagère à trois tablettes.

8.3 Ajustement de l'architecture

L'architecture du mécanisme à câbles doit premièrement être revue pour l'adapter à la pièce dans laquelle il sera installé. Comme la tâche nécessite des rotations du tronc, les câbles doivent être installés de façon à ne pas interférer avec l'utilisateur. Grâce au système développé au chapitre 7, la plateforme mobile et l'organe effecteur sont en mesure de faire les rotations nécessaires à la tâche. Par contre, pour libérer l'espace de travail des câbles pouvant entraver

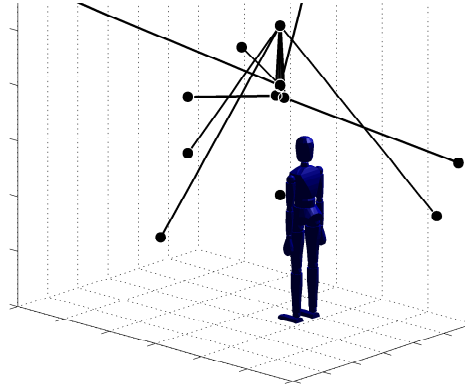


FIGURE 8.2 – Visualisation de l'utilisateur et du mécanisme à câbles à une position médiane.

les mouvements, l'organe effecteur doit être éloigné de la plateforme mobile. À cette fin, la plateforme mobile et les ancrages des câbles sont déplacés vers le haut ce qui a pour effet de libérer l'espace sous les câbles. Pour que l'organe effecteur soit toujours accessible, la tige qui le relie à la plateforme mobile est allongée. En allongeant cette tige, les efforts selon les axes parallèles au plancher produiront des couples plus importants à la plateforme mobile. Pour contrer ce phénomène, la distance entre les deux points d'attache principaux de la plateforme peut être augmentée. Ce changement a comme impact de réduire la hauteur de l'espace de travail. Un compromis doit donc être effectué. Pour ce faire, on trouve la taille minimum de la tige reliant l'organe effecteur terminal à la plateforme mobile permettant d'éviter les interférences avec l'utilisateur lorsque celui-ci effectue une rotation du torse de 90° . Pour ce faire, on modélise une personne de taille normale que l'on insère dans le modèle du mécanisme. La figure 8.2 présente une visualisation des câbles et d'un utilisateur pour une position de référence où l'utilisateur tient la boîte en position basse, qui est la plus critique. On remarque que les câbles responsables de l'enroulement à grand débattement sont les plus contraignants à cet égard. On trouve donc la longueur de la tige pour que l'utilisateur puisse passer confortablement sous les câbles lors de cette pose critique. La hauteur des points d'ancrage sur la base est également à déterminer, principalement ceux qui sont les plus bas. Ces derniers peuvent également venir interférer avec l'utilisateur. Toujours avec l'outil dérivé du logiciel ARACHNIS, on évalue les configurations possibles permettant de maximiser le volume de l'espace de travail. Les principales variables à évaluer sont la longueur de la tige de la plateforme mobile et la hauteur des points d'ancrage bas. La hauteur des points d'ancrage hauts étant limitée principalement par la hauteur du plafond. La taille de la pièce dicte les dimensions sur le plan horizontal. Comme le placement de caisses dans une étagère fait partie de l'objectif, celle-ci est également tracée dans le graphique de l'espace de travail. La figure 8.3 présente un exemple de la visualisation obtenue. Connaissant les capacités du mécanisme à 6 ddl, il est possible de prescrire un ensemble d'efforts que le mécanisme serait en mesure de réaliser. On choisit une plage d'efforts de ± 5 N dans les directions cartésiennes, sauf dans la direction de la gravité, où l'on désire reproduire un poids, et où l'on choisit -15 N. Pour les couples, comme les efforts

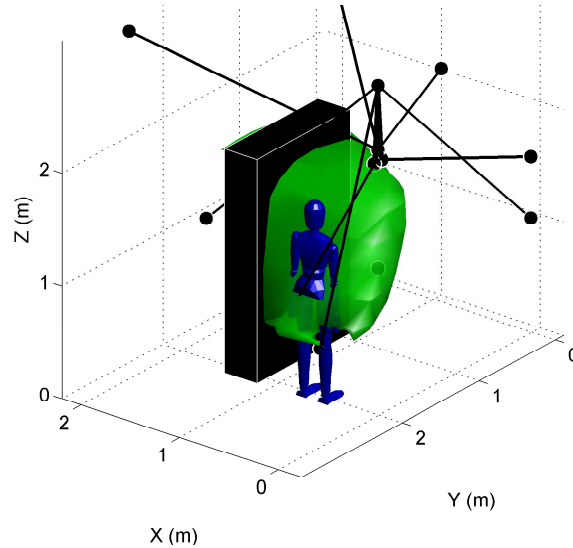
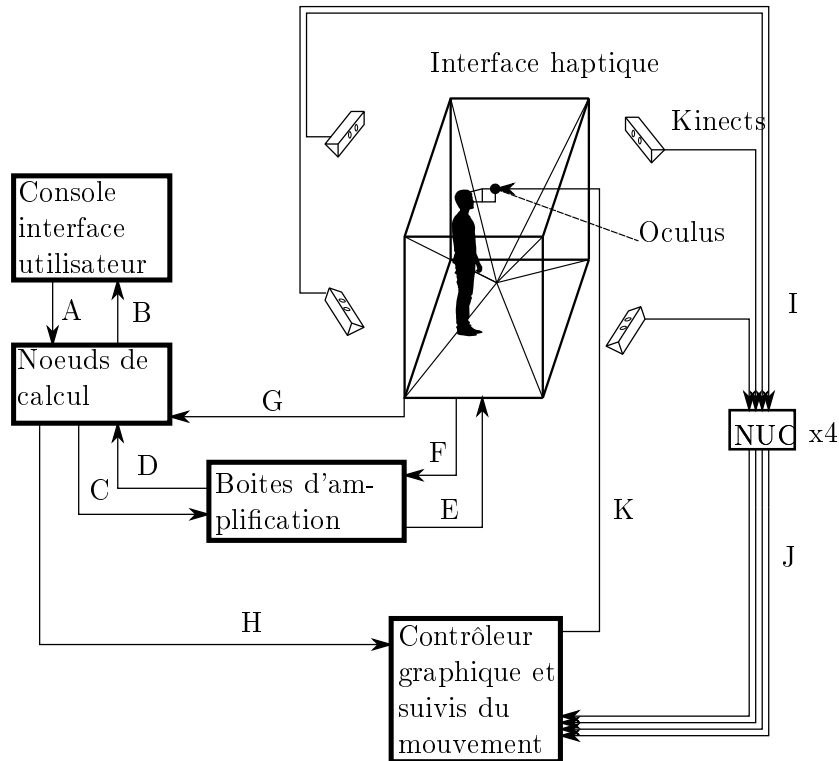


FIGURE 8.3 – Visualisation de l’espace de travail avec l’utilisateur et l’étagère.

inertiels en couple sont assez faibles, on choisit des couples de ± 0.1 N. Cet ensemble d’efforts est donc utilisé pour tracer l’espace de travail faisable.

8.4 Système complet

L’interface complète de réadaptation est assez complexe. Cette section présente les composantes principales et leurs interactions. Un schéma du système est présenté à la figure 8.4. Le sens de transmission de l’information y est indiqué par les flèches. Le contenu des signaux d’information est décrit dans le tableau associé. Le contrôle de l’interface haptique s’effectue de façon analogue aux interfaces présentées dans les chapitres précédents, à la différence que le capteur d’effort envoie maintenant les informations à l’aide d’un protocole sans fil. Le système de suivi du mouvement passe par des Kinects de seconde génération. Ces dernières captent des images couleur, infrarouges et de profondeur. Elles permettent également de reconstruire un squelette de l’utilisateur. Ces informations sont passées à des mini-ordinateurs (NUC) qui colligent les données et les envoient sur demande au contrôleur graphique qui fonctionne sous Windows. Ce contrôleur graphique fait la gestion du rendu et de l’affichage à envoyer au casque de réalité virtuelle Oculus. La communication entre le contrôleur graphique et les nœuds de calcul de l’interface haptique est unidirectionnelle, des nœuds vers le contrôleur graphique. L’information transmise comprend la pose de l’organe effecteur terminal, la position des réflecteurs IR dans le repère du robot, la pose des boîtes et la position des surfaces de contact comme les tablettes. La console d’interface utilisateur présente au thérapeute les commandes de l’interface haptique. C’est à partir de cette console que le poids de la boîte peut être ajusté. C’est aussi là que la mise en route du robot s’effectue. La figure 8.5 présente l’interface de la console. Celle-ci est programmée en Python et communique avec les nœuds



Signal	Contenu	Fréquence [Hz]
A	Signaux de contrôle de l'interface haptique : Démarrage, Arrêt, Poids, etc.	≈10
B	État de l'interface haptique.	≈10
C	Consignes de courant destinées aux moteurs.	500
D	Signaux en quadrature des encodeurs.	-
E	Courant envoyé aux moteurs.	-
F	Signaux en quadrature des encodeurs.	-
G1	Capteur d'effort	≈500 (sans fil)
G2	Orientation selon l'axe à grand débattement	≈100 (sans fil)
H	Position des éléments mobiles et des surfaces physiques : Boîtes, tablettes, table, positions des marqueurs IR, etc.	≈500
I	Image RGB, Image IR, Nuage de points.	30
J	Squelette, Image IR.	30
K	Images à afficher par l'Oculus rift.	[60-75]

FIGURE 8.4 – Schéma du système complet et description des signaux de transmission d'informations entre les composants.

de calcul par l'interface de programmation d'applications du logiciel RT-Lab. Le contrôleur graphique a également une seconde tâche, celle de faire le suivi de l'utilisateur. Ce dernier utilise l'information de squelette provenant des quatre Kinects pour en faire une fusion et obtenir la posture complète avec autant de précision que possible. La disposition des Kinects permet également d'éviter les occlusions pouvant se produire. Les points les plus critiques de la posture sont les positions de la tête et des mains. La position de la tête est importante

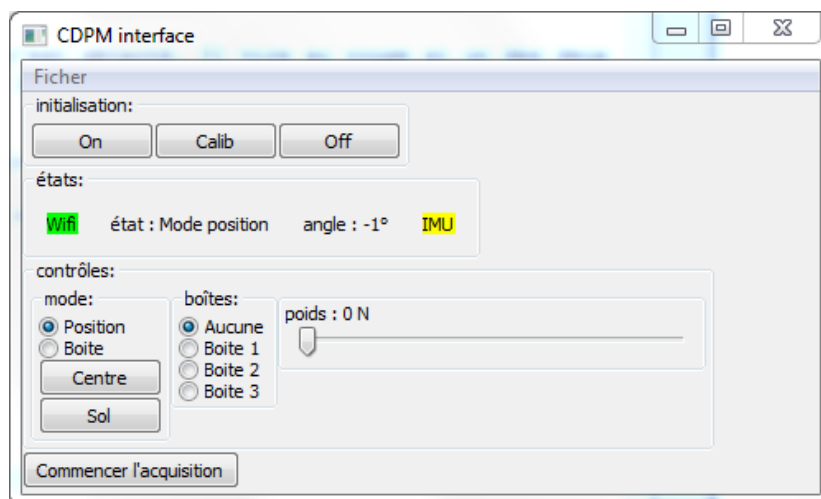


FIGURE 8.5 – Interface de la console d’interface utilisateur utilisée par le thérapeute

puisque le point de vue affiché à l’utilisateur en dépend. Lorsque ce dernier se déplace, son point de vue doit se déplacer d’autant pour être réaliste. Un décalage de déplacements entre la tête de l’utilisateur et son point de vue cause un malaise instantané qui s’apparente au mal des transports et rend l’expérience déroutante. Les mains doivent également être bien suivies, afin que les mains virtuelles concordent avec les mains de la personne. Cela est nécessaire pour interagir intuitivement avec les objets réels reproduits dans le monde virtuel. Finalement, un bon suivi de la posture complète permet au thérapeute d’évaluer un patient en visualisant ses mouvements et en les comparant à d’autres.

8.5 Étalonnage entre le mécanisme à câbles, l’environnement virtuel et le suivi

L’étalonnage entre les différentes composantes du système consiste à trouver les différentes transformations linéaires permettant de passer du repère d’un des systèmes à un autre. Les différents repères utilisés sont :

- Repère Monde : Utilisé pour positionner les objets physiques dans le monde.
- Repère Robot : Utilisé par le robot pour définir sa pose, la position de ses points d’ancrage fixes et les éléments physiques de la simulation (boîtes et surfaces de contact).
- Repère Kinects : Un pour chacune des caméras Kinect, ces dernières l’utilisent pour reporter leurs informations d’images et de squelette.
- Repère Graphique : Les éléments graphiques sont dessinés dans ce repère.

La figure 8.6 présente la relation d’étalonnage entre chaque repère. Chacune des flèches présente une étape d’étalonnage nécessaire pour que l’affichage et l’interface haptique coïncident. Le repère Graphique correspond faiblement au repère monde, c.-à-d. que les éléments graphiques

non physiques, avec lesquels il n'y a pas d'interaction, sont référencés de la même façon de sorte qu'ils apparaissent au même endroit dans le monde virtuel que dans le monde réel. En effet, l'environnement réel est reproduit dans l'environnement virtuel pour les fins de l'étude. Le local de test est donc reproduit intégralement dans l'environnement virtuel, de sorte que lorsqu'on met le casque, on retrouve dans le monde virtuel le même endroit que précédemment dans le monde réel. La relation d'étalonnage entre le repère Monde et le repère

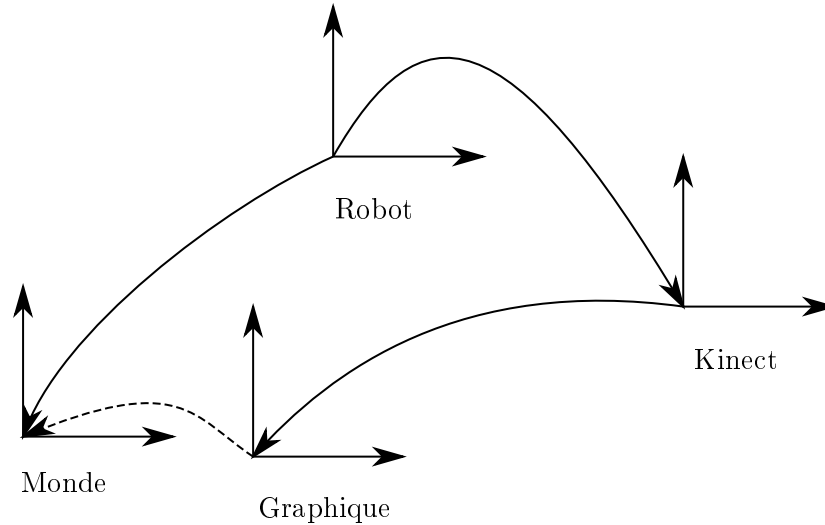


FIGURE 8.6 – Relation d'étalonnage entre les différents repères. Les lignes pointillées présentent une relation d'étalonnage indirecte.

Robot, est définie lors de l'étalonnage du mécanisme à câble, tel que présenté au chapitre 2. En définissant les positions des points d'ancrage fixes dans le repère Monde on obtient la transformée entre les deux repères. Les Kinects ont chacune leur propre repère. Il doit donc y avoir un étalonnage permettant de trouver les transformations reliant chacune de leurs repères au repère graphique. Pour se faire, plusieurs marqueurs sont placés dans le champ de vision commun aux Kinects. En obtenant la position de chacun des marqueurs (trois) dans chaque repère, il est possible de trouver les transformations reliant les différents repères des Kinects. Il est ensuite possible de les placer dans le repère graphique dans lequel se fait la fusion des données du squelette et des images infrarouges. Le dernier étalonnage nécessaire est celui qui lie le robot et les Kinects, qui permettra ensuite de placer le robot dans le monde virtuel. Pour ce faire, trois réflecteurs infrarouges sont placés à une position connue sur l'organe effecteur terminal. Lors de la mise en marche du robot, l'organe effecteur terminal prend une pose permettant à au moins deux Kinects de voir les réflecteurs infrarouges. En obtenant leurs positions par triangulation dans le repère Graphique, il devient possible de trouver la pose de l'effecteur terminal dans ce repère. Comme le robot exprime sa pose dans son propre repère, la transformation entre les deux repères peut être inférée. Les détails d'implantation de ces étalonnages sont disponibles dans le mémoire de Michaël Bonenfant (9). Avec cet étalonnage, on observe une erreur d'étalonnage de quelques centimètres. L'impact négatif principal de cette

précision relativement faible survient lorsque l'utilisateur essaie de prendre l'organe effecteur terminal. En effet, il peut rester une erreur résiduelle qui fait que les mains virtuelles ne coïncident pas avec les mains réelles de plusieurs centimètres. L'utilisateur doit donc tâter légèrement l'organe effecteur terminal pour l'empoigner. Ce phénomène est amplifié par le fait que les mains ne sont pas suivies avec détail par les Kinects. Les mains demeurent donc à une orientation constante dans l'environnement virtuel et les doigts y demeurent immobiles. Avec une résolution de positionnement du mécanisme à câble de l'ordre de quelques centimètres, voir chapitre 6, combiné à une résolution du suivi par les Kinects variant de 1 cm à 10 cm (9), il est difficile d'obtenir avec l'équipement présent une meilleure correspondance.

8.6 Essais préliminaires

Des essais préliminaires ont été effectués sur différents sujets de façon à comparer l'accomplissement d'une tâche en réalité virtuelle comprenant un retour haptique avec l'accomplissement de la même tâche, dans le monde réel. Ces tests permettent de faire ressortir l'impression générale des utilisateurs face au mécanisme et de recueillir des données sur le mouvement effectué. Les essais réalisés consistent à déplacer une caisse sur l'étagère selon le schéma présenté à la figure 8.7. La première étape est de prendre la boîte et de la positionner sur une table à droite de l'utilisateur. Une rotation du tronc est donc nécessaire pour effectuer cette tâche, comme prescrit dans la section 8.2. La suite de la tâche consiste à déplacer la caisse sur l'étagère à sa position de départ. Par la suite, on demande à l'utilisateur de changer la caisse de tablette, c.-à-d., de mettre la caisse sur la tablette juste en dessous. Ce mouvement est plus vertical et permet donc d'évaluer un deuxième type de mouvement. Finalement, l'utilisateur doit remettre la caisse à sa position de départ. Un exemple de la tâche effectuée en réalité virtuelle est présenté dans une vidéo jointe à la thèse (essai_preliminaire.mp4) . Cette

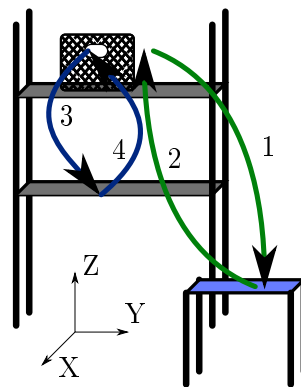


FIGURE 8.7 – Étapes de déplacement de la boîte pour effectuer la tâche.

tâche est effectuée en réalité virtuelle avec retour haptique et est effectuée par la suite dans le monde réel pour fin de comparaison. Les informations récoltées lors des essais sont la pose de la boîte dans le temps. Pour la tâche en réalité virtuelle, la mesure de l'organe effecteur

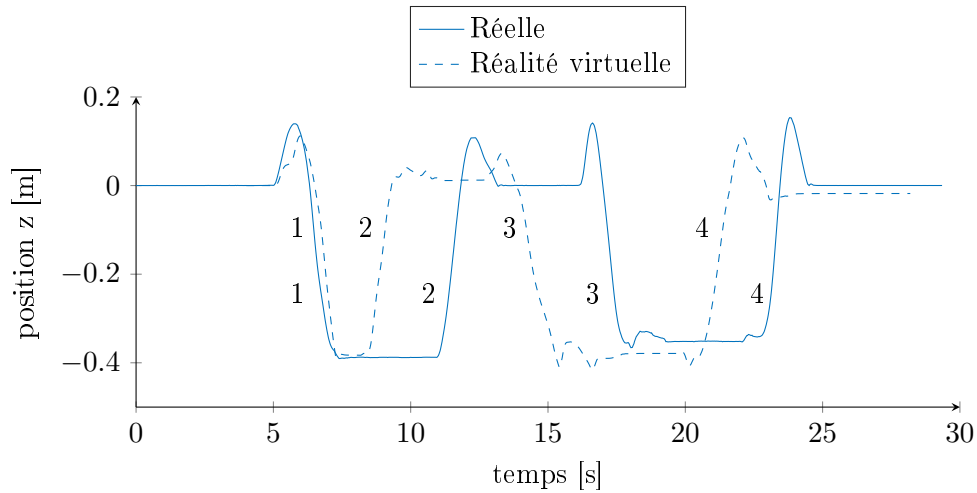


FIGURE 8.8 – Trajectoire de la caisse durant la tâche selon l’axe des Z en réalité virtuelle et dans le monde réel. Les chiffres présentent la section du mouvement correspondante.

terminal sert de mesure de la pose de la caisse virtuelle, alors que lorsque la tâche est effectuée dans le monde réel, un système de caméras VICON est utilisé pour enregistrer la pose de la vraie caisse sur laquelle des marqueurs réfléchissants sont installés. Ces tests sont effectués sur quatre sujets, dont trois sont naïfs face à la réalité virtuelle et à l’interface haptique, c.-à-d. qu’ils n’ont pas été préalablement exposés à de la réalité virtuelle par casque, ni n’ont utilisé l’interface haptique à câbles rapportée dans cette thèse. Les sujets ont été exposés à la tâche lors d’un court breffage. Ils ont effectué la tâche dans le monde réel en premier pour qu’ils puissent comprendre la tâche facilement. Le poids de la caisse réelle est de 15 N (1.53 kg), poids qui est également reproduit par l’interface haptique. En effectuant la même tâche selon les deux méthodes, il est donc possible de comparer les trajectoires empruntées par la caisse pour la même tâche. La trajectoire d’un des essais est présentée à la figure 8.8. On peut y voir l’évolution de la position de la caisse selon l’axe vertical (Z) pour les deux méthodes. On peut observer que les deux courbes sont décalées, même si l’origine du mouvement est simultanée. En effet, les temps d’attente entre chacune des phases du mouvement ne sont pas les mêmes. Pour pouvoir faire des comparaisons valables, seules les sections en mouvement seront comparées. Le premier mouvement est reproduit pour chacun des quatre sujets à la figure 8.9. On peut y voir le trajet de la caisse lors des essais avec la vraie caisse et avec l’interface haptique. On remarque que les temps de déplacement sont pour la plupart plus longs en réalité virtuelle que dans le monde réel, ce qui est particulièrement apparent dans l’axe Z . Le temps de déplacement observé est en moyenne deux fois plus grand en réalité virtuelle. On remarque, par contre, que pour l’essai avec la personne habituée au mécanisme, un temps de déplacement similaire est observé entre les essais en réalité virtuelle et avec la vraie caisse. Cela montre qu’il est possible d’atteindre le même temps de mouvement et que le temps de mouvement n’est pas limité par les capacités physiques du mécanisme. Pour les utilisateurs naïfs, les vitesses moyennes sont plus faibles pour les essais en réalité virtuelle que pour les

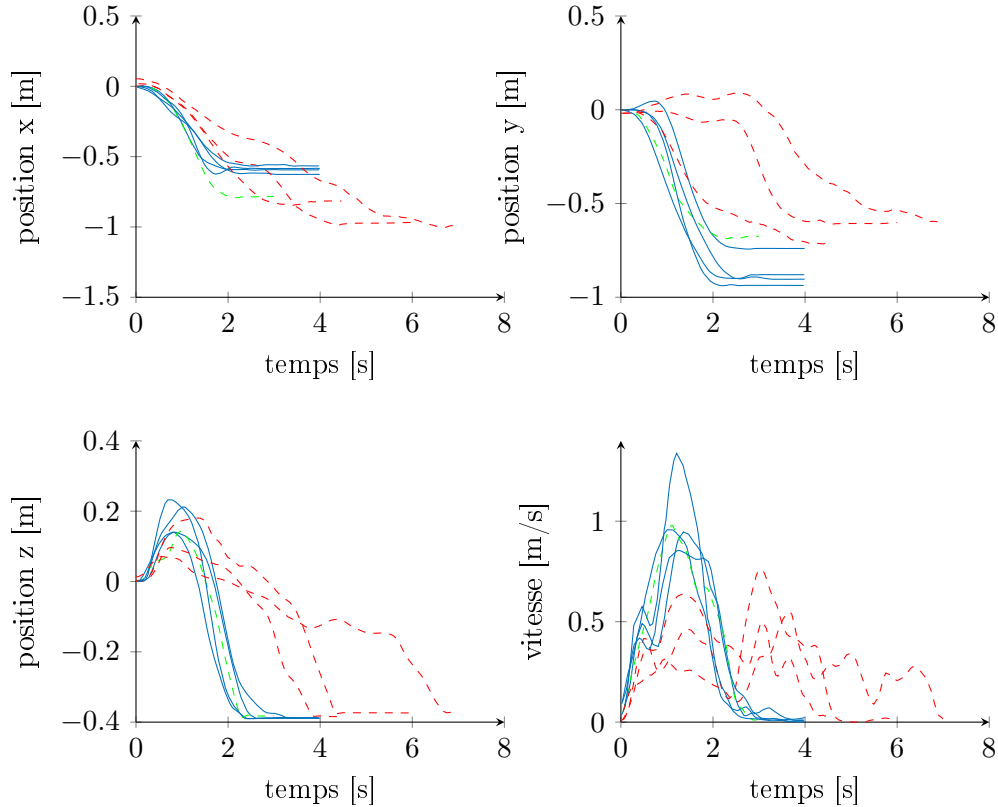


FIGURE 8.9 – Trajectoire de la caisse durant le mouvement 1 selon les axes principaux en réalité virtuelle (ligne pointillée) et dans le monde réel (ligne pleine) pour quatre sujets. La ligne verte représente la personne ayant une familiarité avec le mécanisme haptique. Le graphique de la vitesse représente la magnitude du vecteur de la vitesse cartésienne, elle est filtrée à l'aide d'une fenêtre gaussienne de 0.2 s.

essais réels. Les pics de vitesses maximales sont atteints plus tard dans le mouvement et sont moins bien définis, ce qui montre une hésitation dans le mouvement, dont il n'y a pas trace dans la tâche réelle. Il est possible de faire des observations similaires sur les mouvements 2 et 3. Ces derniers sont présentés aux figures 8.10 et 8.11. On peut observer que la position de repos sur l'axe X et Y n'est pas nécessairement la même. Ceci est dû au fait que ces positions ne sont pas contraintes physiquement, l'utilisateur ayant la possibilité de déposer la caisse plus près ou plus loin de lui, plus à gauche ou à droite de l'étagère et du tableau. De plus, on remarque que les atterrissages, moment où la caisse entre en contact avec la surface, sont pour la plupart bien définis. Ceci indique une bonne définition de la surface comme l'anticipe l'utilisateur. Des commentaires qualitatifs ont également été récoltés auprès des utilisateurs naïfs. La qualité de l'immersion a été appréciée par l'ensemble, avec des commentaires comme « on s'y croit ». Un des utilisateurs a remarqué qu'il tenait la caisse à bout de bras et ne trouvait donc pas sa pose naturelle. Un autre trouvait ses mouvements robotisés. Deux des utilisateurs ont commenté à savoir qu'ils avaient l'impression d'être saouls, ce qui porte à croire qu'il y a un conflit visuel entre l'affichage et le déplacement de la tête. La vitesse d'affichage du casque

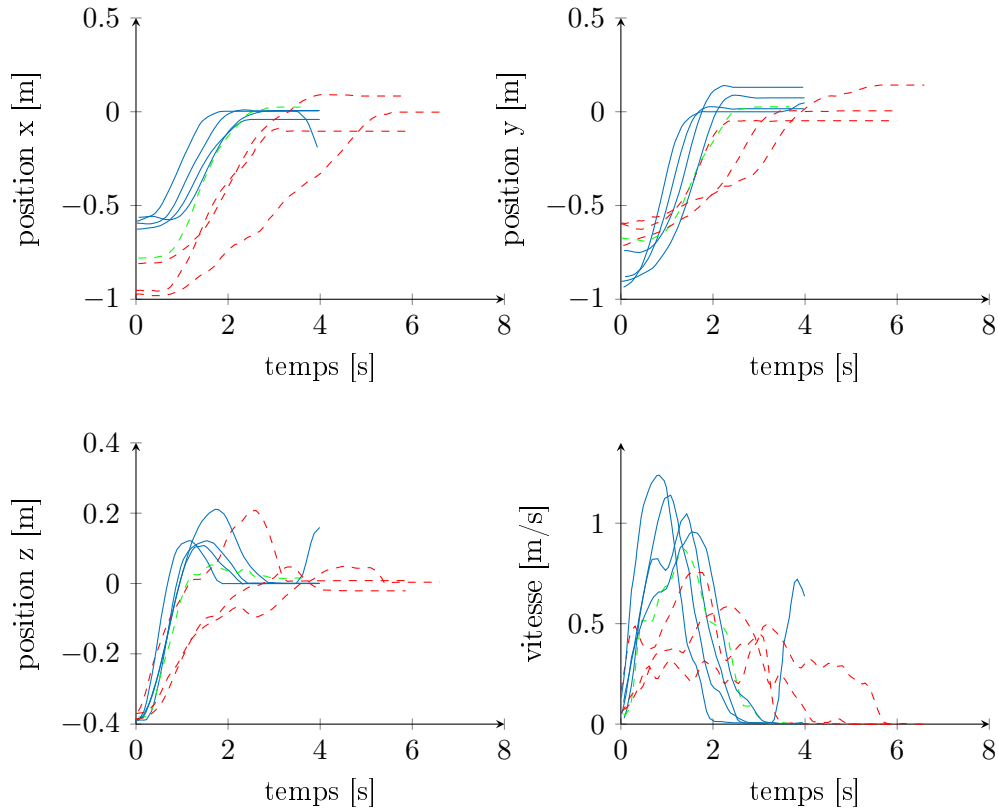


FIGURE 8.10 – Trajectoire de la caisse durant le mouvement 2 présentée comme à la figure 8.9

de réalité virtuelle ou un délai dans le suivi de la tête en sont les causes soupçonnées. Un autre commentaire et une observation effectuée sont que les mains de l'avatar ne coïncident pas parfaitement avec les mains réelles de l'utilisateur, ce qui fait que ce dernier doit tâter l'organe effecteur terminal pour trouver les positions exactes des poignées et y insérer ses mains. Une fois pris en main, ce problème n'est plus gênant, car les mains peuvent se déplacer légèrement par rapport aux poignées sans avoir d'impact. Comme les poses de la caisse et des surfaces de contact sont calculées dans le même repère, il n'y a pas de décalage entre elles, l'occurrence des contacts n'est donc pas impactée par l'étalonnage entre le système du suivi et du robot. L'utilisateur tend à se préoccuper de la position de la caisse et non plus de ses mains lors qu'il tient la caisse. Néanmoins, une meilleure correspondance améliorerait grandement l'immersion. Ces observations préliminaires portent à croire qu'une période de familiarisation avec le mécanisme haptique est nécessaire pour que l'utilisateur soit en mesure de reproduire des mouvements réalistes. Bien que les mouvements aient été faits avec plus d'hésitation, les mouvements sont réussis et intuitifs. Grâce à l'immersion totale, la compréhension de la tâche est facile, et elle est effectuée sans difficulté par les utilisateurs. Une indication simple telle que : « prendre la caisse et la mettre sur le tableau » suffit pour que l'utilisateur comprenne quoi faire et soit en mesure de l'effectuer.

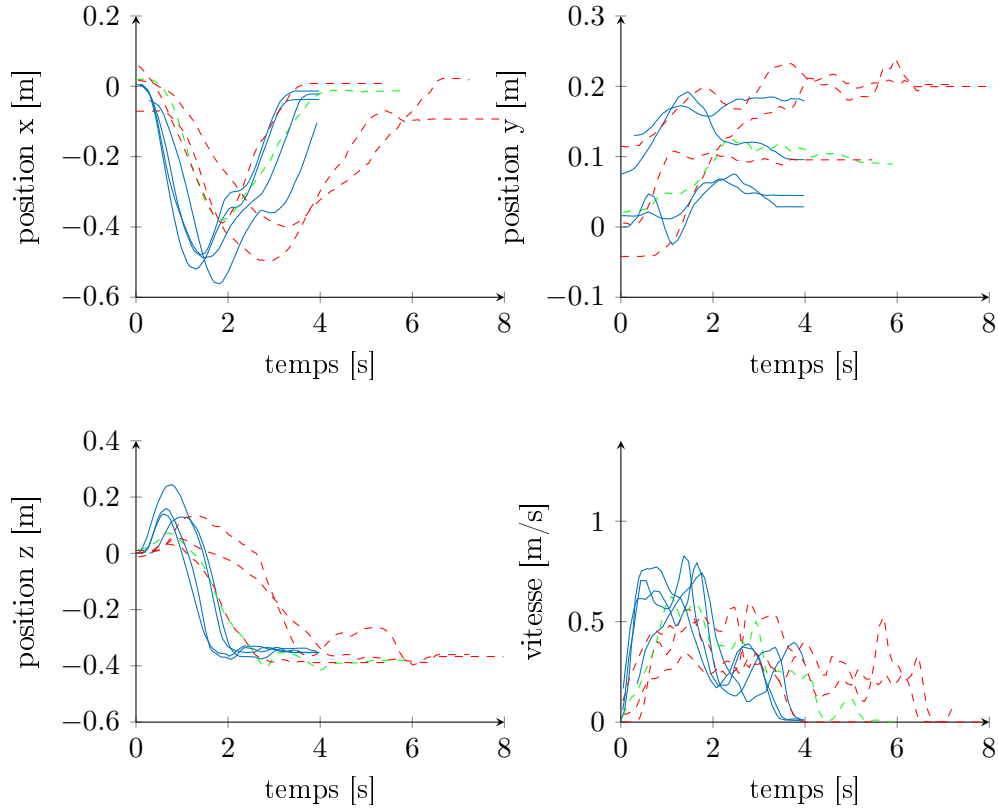


FIGURE 8.11 – Trajectoire de la caisse durant le mouvement 3 présentée comme à la figure 8.9

8.7 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats préliminaires et le développement des outils nécessaires à l'utilisation du mécanisme haptique à câbles en réadaptation au CIRRIS. L'ajustement de l'architecture du robot a été présenté en plus de l'intégration et de l'étalonnage du système de vision, ainsi que le suivi du mouvement de l'utilisateur. Les tests préliminaires ont montré que le mécanisme est en mesure d'être utilisé pour effectuer la tâche de transport des boîtes et a permis de cibler certains points à améliorer. Les points à retenir sont que l'immersion totale est généralement bien rendue en incluant le retour visuel et le rendu haptique et permet d'effectuer intuitivement la tâche, car celle-ci est très semblable à la réalité. Une phase de familiarisation avec l'interface haptique est toutefois nécessaire pour que les utilisateurs soient confiants et effectuent des mouvements réalistes et habituels. Quelques points restent tout de même à améliorer comme le conflit visuel donnant un léger vertige et la correspondance entre les mains réelles et les mains virtuelles.

Conclusion

Contributions

Cette thèse présente plusieurs des contributions effectuées au cours du projet doctoral. Ces contributions sont diverses et seront utiles à des chercheurs de différents domaines, principalement dans la robotique à câbles, l'haptique, la réalité virtuelle et la réadaptation physique. Ces contributions auront non seulement un impact dans la littérature scientifique grâce aux publications, elles auront un impact réel sur des patients grâce à la plateforme de réadaptation en environnement immersif développée dans ce projet, implantée au CIRRIS sur laquelle diverses études pourront être menées par des chercheurs et étudiants en réadaptation physique. Les diverses contributions sont résumées ici chapitre par chapitre. Le chapitre d'introduction n'apporte pas de nouveautés scientifiques comme telles, mais présente un résumé de concepts pouvant être utiles à ceux qui désirent commencer dans le domaine des mécanismes à câbles. Le chapitre 2 présente une nouvelle méthode permettant de faire l'étalonnage de mécanismes à câbles. Les méthodes d'auto étalonnage sont peu abordées dans la littérature et manque d'exemples d'applications. Cette méthode n'a pas pour objectif d'améliorer la précision d'un étalonnage, mais bien d'automatiser sa réalisation dans certaines circonstances. En effet, selon les résultats observés, on ne peut espérer atteindre de grandes précisions comme le requièrent des machines-outils par exemple. Le chapitre 3 présente une avenue encore peu explorée soit l'augmentation de la précision des mécanismes à câbles en employant des capteurs d'angles aux enrouleurs. Ces capteurs permettent en effet d'augmenter légèrement la précision de mécanismes de tailles moyennes, surtout aux frontières de leurs espaces de travail. Ces résultats pourront aider à la conception de nouveaux mécanismes à câbles en présentant les améliorations atteignables par l'ajout de capteurs d'angles. Le principal désavantage des capteurs d'angles est que leur précision diminue avec la longueur des câbles, ce qui est l'un des principaux attrait des mécanismes à câbles. Le chapitre 4 présente un algorithme de gestion de la tension dans les câbles inspirés des méthodes de résolution par programmation quadratique. Cette méthode de résolution n'est pas nouvelle, mais l'ajout de variables d'écart permet de trouver une solution secondaire lorsque l'organe effecteur se retrouve hors de l'espace de travail, situation qui peut être plus fréquente en haptique. Le fonctionnement de cet algorithme a fait ses preuves lors de son utilisation dans le contrôle des interfaces qui sont présentées dans

les chapitres de la thèse. Bien que cet algorithme puisse fonctionner en temps réel, son coût de calcul reste hors de portée d'ordinateur à faible puissance comme les systèmes embarqués par exemple. Le chapitre 5 présente la méthode d'asservissement des interfaces développées pour cette thèse. Cet asservissement repose sur le contrôle par admittance avec une boucle interne d'asservissement en vitesse des enrouleurs. Cette méthode de contrôle est différente de celle rencontrée dans la littérature par l'utilisation d'une boucle en vitesse des enrouleurs, ce qui atténue les problèmes liés au sur actionnement. Le chapitre 6 présente le premier prototype visant à combiner l'interface haptique à 6 ddl avec un retour visuel immersif, dans ce cas-ci un CAVE. Ce prototype a permis d'évaluer quantitativement les performances attendues pour une interface haptique à échelle humaine avec des moteurs à basse puissance. Ce chapitre donne donc un bon point de comparaison avec d'autres interfaces haptique et pourra donc être utile par d'autres chercheurs lors de choix de type d'interface haptique. Ces caractéristiques ont entre autres permis la définition d'une tâche de réadaptation demeurant à l'intérieur des contraintes de performances de l'interface. Par contre, cette tâche nécessitait une grande capacité en réorientation selon un axe. Comme les capacités en réorientation des architectures traditionnelles s'avèrent inadéquates, une architecture particulière a dû être développée. Le chapitre 7 est donc dédié au développement de cette solution. Une architecture novatrice y est rapportée, qui permet de grandes rotations selon un axe, d'une façon similaire à un mouvement de type Schönflies. L'enroulement du câble sur l'organe effecteur terminal a permis d'atteindre l'objectif de rotation d'au moins 180° selon l'axe vertical, ce qui permet d'effectuer une tâche de réadaptation où le patient doit effectuer des mouvements de rotation du tronc. Enfin, le chapitre 8 présente l'aboutissement des travaux des chapitres précédents. La combinaison des savoirs acquis et présentés aux chapitres 1 à 7, a permis de développer une interface haptique à retour visuel immersif unique servant de prototype pour effectuer une tâche en réadaptation, soit le déplacement d'une charge. On y présente des résultats préliminaires sur quelques étudiants. Ces résultats sont positifs, mais quelques limitations ont été observées qui pourraient être améliorées. Les participants n'étant pas parfaitement en confiance par rapport au mécanisme leurs déplacements manquaient de fluidités. Ce problème étant exacerbé par un certain décalage entre les mains virtuelles et les mains réelles. Les tâches étaient par contre intuitives et ont été accomplies par les participants sans difficulté, ce qui confirme la méthode et permettra de pousser les études cliniques davantage. Finalement, bien qu'un avancement significatif ait été effectué et présenté dans cette thèse, certains points méritent encore d'être développés. La section suivante en fait un résumé.

Travaux futurs

Les travaux futurs sont présentés selon les chapitres auxquels ils se rapportent.

Chapitre 2 : Bien que l'auto étalonnage des mécanismes à câbles fonctionne pour des mécanismes à 3 ddl et possiblement plus, ses capacités sont plus limitées pour les mécanismes à

6 ddl. L'ajout de capteurs proprioceptifs comme une centrale inertielle pourrait contribuer à augmenter son efficacité. Des algorithmes d'optimisation plus efficaces pour s'extirper des minimums locaux seraient également à envisager, tels que les algorithmes génétiques ou à essais particuliers.

Chapitre 3 : Des développements sont encore à effectuer sur les capteurs d'angles dans les mécanismes. Une solution analytique prenant en considération le bruit de chacun des capteurs pour trouver la pose optimale est une direction prometteuse, un article de Garant (47) sur le sujet a été soumis pour présentation à une conférence sur les robots à câbles en 2017 (CableCon2017). Chapitre 4 : Pour la gestion de la tension dans les câbles, l'algorithme, au lieu de proposer la solution faisable la plus proche au sens des moindres carrés, pourrait proposer une solution tendant à ramener l'organe effecteur terminal dans une configuration polyvalente.

Chapitre 5 : L'engin physique utilisé dans l'asservissement de l'interface pourrait être amélioré pour le rendre facilement personnalisable. Une intégration à un environnement de création 3D comme Unity 3D serait l'idéal, permettant à un maximum de gens de développer des environnements virtuels différents et personnalisés. L'ajout de contacts plus complexes serait aussi un avantage, car cela permettrait un réalisme encore meilleur.

Chapitre 6 : Le développement d'organes effecteurs terminaux divers et interchangeable serait aussi bénéfique, car il permettrait d'étendre le nombre de tâches différentes reproductibles par l'interface.

Chapitre 7 : L'architecture de l'interface à grande réorientation pourrait encore être bonifiée en modifiant les points d'ancrage des deux câbles servant à la rotation de sorte qu'ils reprennent les efforts d'un des câbles de la plateforme mobile. Il serait alors possible de libérer ce câble et de l'utiliser pour agrandir le volume de l'espace de travail total. Le simple ajout de câbles pourrait également être utilisé pour augmenter le volume de l'espace de travail. Dans ce cas, les interférences entre les câbles pourraient cependant devenir plus problématiques. Le développement de capteurs de tension fiables et précis pourrait également être utile pour augmenter la qualité du rendu haptique en permettant un contrôle plus précis des tensions dans les câbles. Finalement, une solution utilisant la réalité augmentée pourrait être privilégiée de façon à ce que le patient ne soit pas complètement coupé de l'environnement réel. Cela demanderait possiblement moins de temps d'adaptation, car le patient verrait son propre corps au lieu de celui d'un avatar. Il n'y aurait ainsi plus de décalage entre les positions de ses mains et de celles de l'avatar.

L'objectif final a donc été atteint. Le développement d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles utilisé comme interface à retour haptique visant la réadaptation physique en environnement immersif a été effectué. Ce qui permettra à d'autres de prendre la relève et de continuer le développement de la recherche scientifique.

Annexe A

Code de vérification des simplifications

```
1 function flechissement()
2
3 a = [2 0]; % point sur l'effecteur dans le repere fixe qui origine
      au point b
4 b = [0 0]; % ancrage dans le repere fixe
5
6 ta = 2; % Tension au point a
7 mg = 0.0015*-9.81; % 1.5 g/m
8 k = 50000; % 50N/mm
9 X0 = [ta 0 norm(a)]' ; % [tbx tbz 10]
10 fun = @(X) sys_equation(a, mg, k, ta, X);
11 X = fsolve(fun,X0);
12 tbx = X(1);
13 tbz = X(2);
14 l0 = X(3);
15
16 tb = norm([tbx tbz]);
17
18 w = mg*l0;
19
20 s = 0:0.001:10;
21 xs = tbx * s / k + abs(tbx) * l0/w * ( asinh(tbz/tbx) - asinh( ( tbz
      -( w * s / l0 ) )/tbx ) ); % eq. 2.55 de la these de Samuel
      Bouchard
22 zs = w * s / k .* ( tbz/w - s/( 2*l0 ) ) + l0/w * ( sqrt( tbx^2 +
      tbz^2 ) - sqrt( tbx^2 + ( tbz - (w.*s)/l0 ).^2 ) );
23 plot(xs, zs)
```

```

24 axis equal
25 angle_a = atand(tbz/tbx)
26
27 tax = ta*cosd(angle_a);
28 taz = ta*sind(angle_a);
29
30 Cfl11 = sign(tax)*(asinh(taz/tax) - asinh(-tbz/tax))-taz/ta - tbz/
    tb;
31 Cfl12 = tax/ta - tax/tb;
32 Cfl21 = tax/ta - tax/tb;
33 Cfl22 = taz/ta - tbz/tb;
34
35 Cfl = 1/(mg) * [Cfl11 Cfl12; Cfl21 Cfl22];
36 Cax = 10/k * eye(2);
37
38 C = Cfl + Cax;
39
40 K = inv(C);
41
42 norm(K * [1;0]) / (k/10)
43
44 function res = sys_equation(a, mg, k, ta, X)
45 ax = a(1);
46 az = a(2);
47
48 tbx = X(1);
49 tbz = X(2);
50 l0 = X(3);
51
52 w = mg*l0;
53
54 res = zeros(3,1);
55 res(1) = ta - sqrt(tbx^2 + (tbz - w)^2); % eq. 2.51 Samuel
    Bouchard
56 res(2) = -ax + tbx * 10 / k + abs(tbx)*10 / w *(asinh(tbz/tbx) -
    asinh((tbz-w)/tbx)); % eq. 2.57
57 res(3) = -az + w * 10 / k * (tbz / w - 0.5) + 10 / w *( sqrt(tbx^2 +
    tbz^2) - sqrt(tbx^2 + (tbz - w)^2)); % eq. 2.58

```

Annexe B

Calibration mécanisme CIRRIS

La méthode présentée dans la section 2.3.1 est utilisée pour identifier les positions des points d'ancrage du mécanisme. Un exemple pour un des points d'ancrage est présenté ici. Les poses connues correspondent à quatre points situés sur le plancher de la salle où il est facile de mesurer les coordonnées par rapport au système de références fixe qui se trouve aussi sur le plancher. Une mesure supplémentaire est prise à une distance du sol afin d'obtenir un système d'équations linéaires de plein rang. Certaines positions ont été mesurées plus d'une fois pour augmenter le niveau de signal sur bruit.

Les positions mesurées sont

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{c}_p^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1.8288 & 0 & 0 \\ 1.2192 & 0.9144 & 0 \\ 0.3048 & 0.75565 & 0 \\ 1.2192 & 0.9144 & 0 \\ 1.8288 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} m, \quad (\text{B.1})$$

où $p = 8$ représente le nombre de positions mesurées. Les longueurs mesurées pour les m câbles sont

$$\begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{1,p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{m1} & \cdots & \rho_{m,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.4711 & 1.1012 & 1.7207 & 2.342 & 1.7083 & 1.084 & 2.4818 & 2.2762 \\ 2.3823 & 2.558 & 1.604 & 1.683 & 1.6015 & 2.5504 & 2.3899 & 2.1739 \\ 3.0198 & 3.0108 & 3.0715 & 3.0678 & 3.0735 & 3.0048 & 3.0058 & 2.0842 \\ 1.1986 & 2.6987 & 2.3978 & 1.6687 & 2.3934 & 2.6982 & 1.2021 & 0.69631 \end{bmatrix} m. \quad (\text{B.2})$$

Grâce à l'équation 2.10 utilisée quatre fois, on trouve des estimés des positions des quatre

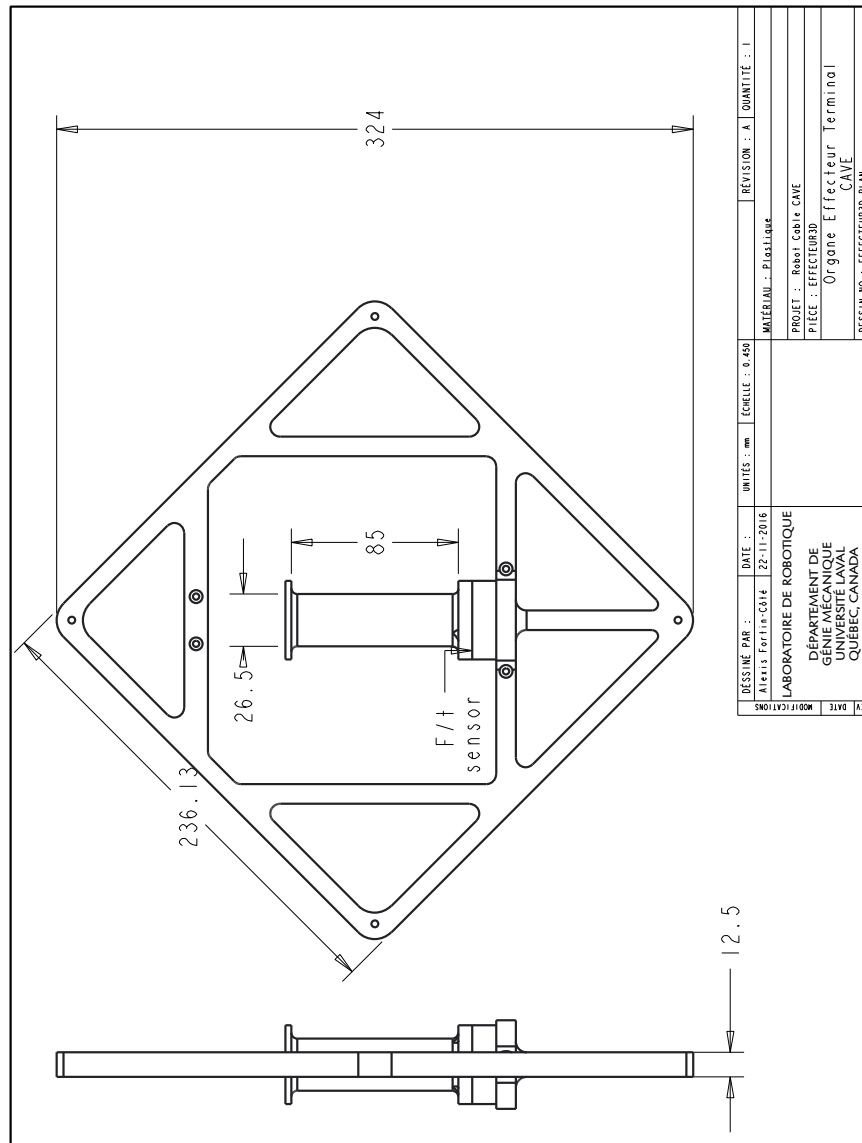
ancrages,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T \\ \mathbf{a}_2^T \\ \mathbf{a}_3^T \\ \mathbf{a}_4^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.2604 & -0.024783 & 0.96261 \\ 0.68315 & 2.0544 & 0.97478 \\ 0.93309 & -0.14456 & 2.8877 \\ -0.68332 & -0.17276 & 0.97589 \end{bmatrix} m \quad (\text{B.3})$$

qui correspondent aux mesures prises manuellement.

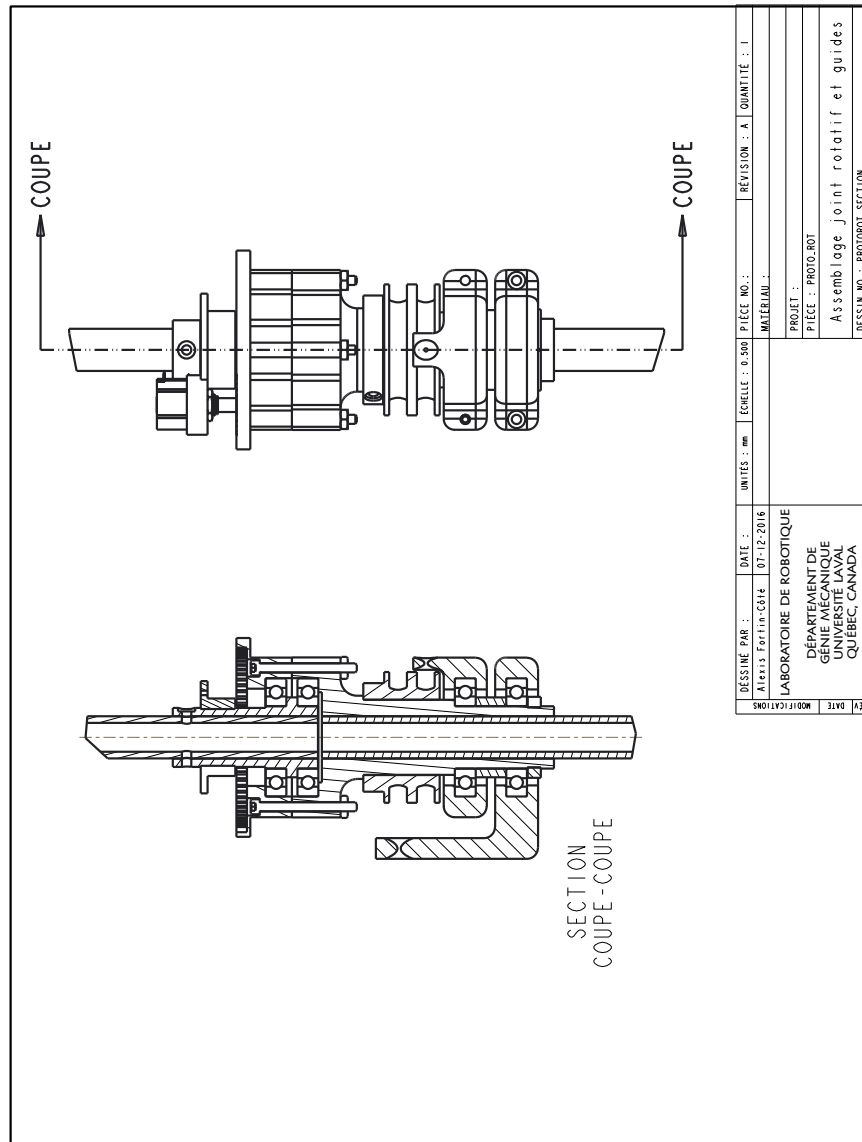
Annexe C

Plan de l'organe effecteur terminal



Annexe D

Plan du mécanisme à grand débattement



Bibliographie

- [1] Ghasem Abbasnejad, Jungwon Yoon, and Hosu Lee. Optimum kinematic design of a planar cable-driven parallel robot with wrench-closure gait trajectory. *Mechanism and Machine Theory*, 99 :1–18, 2016.
- [2] James Albus, Roger Bostelman, and Nicholas Dagalakis. The NIST SPIDER, a robot crane. *Journal of research of the NIST*, 97(3), 1992.
- [3] Chae H An and John M Hollerbach. Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 890–896. IEEE, 1987.
- [4] Prakash Bande, Martin Seibt, Eckart Uhlmann, S. K. Saha, and P. V M Rao. Kinematics analyses of Dodekapod. *Mechanism and Machine Theory*, 40(6) :740–756, 2005.
- [5] Yaakov Bar-Shalom, X.-Rong Li, and Thiagalingam Kirubarajan. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2001.
- [6] Eric Barnett and Clément Gosselin. Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing*, 7 :27–44, jul 2015.
- [7] Randall Beer, David Mayhew, Christine Bredfeldt, and Benjamin Bachrach. Technical evaluation of the MACARM : A cable robot for upper limb neurorehabilitation. *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pages 942–947, oct 2008.
- [8] P.R. Belanger, P Dobrovolny, A Helmy, and X Zhang. Estimation of Angular Velocity and Acceleration from Shaft-Encoder Measurements. *The International Journal of Robotics Research*, 17(11) :1225–1233, 1998.
- [9] Michaël Bonenfant. Capture de mouvement par fusion de poses multivues pour une réadaptation en environnement virtuel [soumis]. Technical report, Université Laval, 2016.

- [10] P.H. Borgstrom, B.L. Jordan, B.J. Borgstrom, M.J. Stealey, G.S. Sukhatme, M.A. Batalin, and W.J. Kaiser. NIMS-PL : A Cable-Driven Robot With Self-Calibration Capabilities. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5) :1005–1015, oct 2009.
- [11] P.H. Borgstrom, B.L. Jordan, G.S. Sukhatme, M.A. Batalin, and W.J. Kaiser. Rapid Computation of Optimally Safe Tension Distributions for Parallel Cable-Driven Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(6) :1271–1281, dec 2009.
- [12] Paul Bosscher, Andrew T. Riechel, and Imme Ebert-Uphoff. Wrench-Feasible Workspace Generation for Cable-Driven Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(5) :890–902, 2006.
- [13] Samuel Bouchard. *Géométrie des robots parallèles entraînés par des câbles*. PhD thesis, UNIVERSITÉ LAVAL, 2008.
- [14] Macauley S Breault, Adam D. Costanza, Nathan A Wood, Michael J Passineau, and Cameron N Riviere. Auto-calibration for a planar epicardial wire robot. In *2015 41st Annual Northeast Biomedical Engineering Conference (NEBEC)*, pages 1–2, Troy, NY, USA, apr 2015. IEEE.
- [15] Tobias Bruckmann, Andreas Pott, and Manfred Hiller. Calculating force distributions for redundantly actuated tendon-based Stewart platforms. In *Advances in Robot Kinematics*, pages 403–412. Springer Netherlands, 2006.
- [16] Stephen P. Buerger and Neville Hogan. Complementary stability and loop shaping for improved human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(2) :232–244, 2007.
- [17] David B. Camarillo, Christopher F. Milne, Christopher R. Carlson, Michael R. Zinn, and J. Kenneth Salisbury. Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(6) :1262–1273, 2008.
- [18] Perry D Campbell, Patrick L Swaim, and Clark J Thompson. Charlotte™ Robot Technology for Space and Terrestrial Applications. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 1995.
- [19] Alexandre Campeau-lecours. *Développement d’algorithmes de commande et d’interfaces mécatroniques pour l’interaction physique humain-robot*. PhD thesis, Université Laval, 2012.
- [20] Alexandre Campeau-Lecours, Simon Foucault, Thierry Laliberte, Boris Mayer-St-Onge, and Clement Gosselin. A Cable-Suspended Intelligent Crane Assist Device for the Intuitive Manipulation of Large Payloads. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(4) :2073–2084, aug 2016.

- [21] P. Cardou, S. Bouchard, and C. Gosselin. Kinematic-Sensitivity Indices for Dimensionally Nonhomogeneous Jacobian Matrices. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(1) :166–173, 2010.
- [22] Philippe Cardou and Jorge Angeles. Linear Estimation of the Rigid-Body Acceleration Field From Point-Acceleration Measurements. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 131(4) :041013, 2009.
- [23] CR Carignan and KR Cleary. Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments. *Haptics-e*, 1(2) :1–14, 2000.
- [24] Ryad Chellal, Loïc Cuvillon, and Edouard Laroche. A Kinematic Vision-Based Position Control of a 6-DoF Cable-Driven Parallel Robot. In Tobias Bruckmann and Andreas Pott, editors, *Cable Driven Parallel Robots*, volume 12 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 213–225. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [25] Ryad Chellal, Edouard Laroche, Loïc Cuvillon, and Jacques Gangloff. An Identification Methodology for 6-DoF Cable-Driven Parallel Robots Parameters Application to the INCA 6D Robot. In Tobias Bruckmann and Andreas Pott, editors, *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 12 of *Mechanisms and Machine Science*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [26] Zhongyuan Chen, Yaojun Yuru Yaojun Yuru Zhang, Dangxiao Wang, Chaobin Li, and Yaojun Yuru Yaojun Yuru Zhang. iFeel6-BH1500 : a large-scale 6-DOF haptic device. In . . . *Computer Interfaces and . . .*, 2012 IEEE International Conference on Virtual Environments Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS), pages 121–125, Tianjin, China, jul 2012. IEEE.
- [27] Stefano Chiaverini, Bruno Siciliano, and Luigi Villani. A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, 4(3) :273–285, 1999.
- [28] J.E. Colgate and J.M. Brown. Factors affecting the Z-Width of a haptic display. *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3205–3210, 1994.
- [29] L L Cone. Skycam : an aerial robotic camera system. *BYTE*, 10 :122–132, 1985.
- [30] Tej Dallej, Marc Gouttefarde, Nicolas Andreff, Redwan Dahmouche, and Philippe Martinet. Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1581–1586, 2012.

- [31] David Daney, Nicolas Andreff, Gilles Chabert, and Yves Papegay. Interval method for calibration of parallel robots : Vision-based experiments. *Mechanism and Machine Theory*, 41(8) :929–944, 2006.
- [32] Dinh Quan Nguyen, Marc Gouttefarde, Olivier Company, and Francois Pierrot. On the simplifications of cable model in static analysis of large-dimension cable-driven parallel robots. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 928–934. IEEE, nov 2013.
- [33] JA dit Sandretto, D Daney, M Gouttefarde, and C Baradat. Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot. Technical report, INRIA, Rocquencourt, 2012.
- [34] Julien Alexandre Dit Sandretto, Gilles Trombettoni, and David Daney. Confirmation of hypothesis on cable properties for cable-driven robots. *Mechanisms and Machine Science*, 7 :85–93, 2013.
- [35] Julien Alexandre dit Sandretto, Gilles Trombettoni, David Daney, and Gilles Chabert. Certified Calibration of a Cable-Driven Robot Using Interval Contractor Programming. *Computational Kinematics*, 15 :209–217 TS – CrossRef, 2014.
- [36] Ludovic Dovat, Olivier Lambercy, Roger Gassert, Thomas Maeder, Ted Milner, Teo Chee Leong, and Etienne Burdet. HandCARE : a cable-actuated rehabilitation system to train hand function after stroke. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering : a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 16(6) :582–91, dec 2008.
- [37] Vincent Duchaine and Clément M. Gosselin. Investigation of human-robot interaction stability using Lyapunov theory. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2189–2194, 2008.
- [38] Vincent Duchaine, Boris Mayer St.-Onge, Dalong Gao, and Clément Gosselin. Stable and Intuitive Control of an Intelligent Assist Device. *IEEE Transactions on Haptics*, 5(2) :148–159, apr 2012.
- [39] Gamal El-Ghazaly, Marc Gouttefarde, and Vincent Creuze. Adaptive Terminal Sliding Mode Control of a Redundantly-Actuated Cable-Driven Parallel Manipulator : CoGiRo. In *Cable-Driven Parallel Robots*, chapter Part III, pages 179–200. Springer International Publishing, 2015.
- [40] Steven Daniel Eppinger. *Modeling robot dynamic performance for endpoint force control*. Thesis, Massachusetts Institue of Technology, 1988.
- [41] Hachmia Faqihi, Maarouf Saad, Khalid Benjelloun, Mohammed Benbrahim, and M Nabil Kabbaj. Tracking Trajectory of a Cable-Driven Robot for Lower Limb Rehabilitation. 10(8) :910–915, 2016.

- [42] Fanny Ficuciello, Luigi Villani, and Bruno Siciliano. Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human-Robot Physical Interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(4) :850–863, 2015.
- [43] Alexis Fortin-Cote, Philippe Cardou, and Alexandre Campeau-Lecours. Improving cable driven parallel robot accuracy through angular position sensors. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4350–4355. IEEE, oct 2016.
- [44] Alexis Fortin-Cote, Philippe Cardou, and Clement Gosselin. An admittance control scheme for haptic interfaces based on cable-driven parallel mechanisms. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 819–825, may 2014.
- [45] Alexis Fortin-Cote, Philippe Cardou, and Clément Gosselin. A Tension Distribution Algorithm for Cable-Driven Parallel Robots Operating Beyond their Wrench-Feasible Workspace. In *Proceeding of the 15th International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeongyu, 2016.
- [46] Paolo Gallina, Giulio Rosati, and Aldo Rossi. 3-d.o.f. Wire Driven Planar Haptic Interface. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 32(1) :23–36, 2001.
- [47] Xavier Garant, Alexandre Campeau-Lecours, Philippe Cardou, and Clément Gosselin. Improving the Forward Kinematics of Cable-Driven Parallel Robots Through Cable Angle Sensors (in Review). In *Cablecon*, Québec, 2017. Springer.
- [48] C. Gosselin. Stiffness mapping for parallel manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 6(3) :377–382, jun 1990.
- [49] C M Gosselin, R Poulin, and D Laurendeau. A Planar Parallel 3-DOF Cable-Driven Haptic Interface. In *12th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, volume 3, pages 266–271, Orlando, FL, USA, 2008.
- [50] Clément Gosselin. *Éléments de Robotique GMC-3351*, 2012.
- [51] Clément Gosselin. Cable-driven parallel mechanisms : state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), 2014.
- [52] Clément Gosselin and Martin Grenier. On the determination of the force distribution in overconstrained cable-driven parallel mechanisms. *Meccanica*, 46(1) :3–15, feb 2011.
- [53] Clément Gosselin, Thierry Laliberté, and Audrey Veillette. Singularity-Free Kinematically Redundant Planar Parallel Mechanisms With Unlimited Rotational Capability. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2) :457–467, 2015.

- [54] Clement Gosselin and Louis Thomas Schreiber. Kinematically Redundant Spatial Parallel Mechanisms for Singularity Avoidance and Large Orientational Workspace. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(2) :286–300, 2016.
- [55] Florian Gosselin, Claude Andriot, Florian Bergez, and Xavier Merlhiot. Widening 6-DOF haptic devices workspace with an additional degree of freedom. *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pages 452–457, mar 2007.
- [56] M Gouttefarde and C M Gosselin. Analysis of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(3) :434–445, 2006.
- [57] M Gouttefarde, J.-P. Merlet, and D Daney. Wrench-Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1492–1497, Roma, Italy, 2007.
- [58] Marc Gouttefarde, Jean-Francois Collard, Nicolas Riehl, and Cedric Baradat. Geometry Selection of a Redundantly Actuated Cable-Suspended Parallel Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2) :501–510, apr 2015.
- [59] Marc Gouttefarde, Johann Lamaury, Christopher Reichert, and Tobias Bruckmann. A Versatile Tension Distribution Algorithm for n-DOF Parallel Robots Driven by n+2 Cables. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6) :1444–1457, dec 2015.
- [60] F Guay, Philippe Cardou, AL Cruz-Ruiz, and S Caro. Measuring How Well a Structure Supports Varying External Wrenches. *New Advances in Mechanisms, . . .*, pages 1–8, 2014.
- [61] Blake Hannaford and Jee-Hwan Ryu. Time-domain passivity control of haptic interfaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 18(1) :1–10, 2002.
- [62] Hanqi Zhuang and Lixin Liu. Self-calibration of a class of parallel manipulators. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 994–999. IEEE, 1996.
- [63] Vincent Hayward and Oliver R Astley. *Performance Measures for Haptic Interfaces*. 1996.
- [64] Peng He. *Estimating the orientation of a game controller from inertial and magnetic measurements*. PhD thesis, Université Laval, 2015.
- [65] Jie Huang, Xumiao Xie, and Zan Liang. Control of Bridge Cranes With Distributed-Mass Payload Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1) :481–486, 2015.

- [66] Ryojun Ikeura, Tomoki Moriguchi, and Kazuki Mizutani. Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human. *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 500–505, 2002.
- [67] H. Irvine. *Cable Structures*. The MIT Press, structural edition, 1981.
- [68] H M Irvine and G B Sinclair. The Suspended Elastic Cable Under the Action of Concentrated Vertical Loads. *International Journal of Solids and Structures*, 12(4) :309–317, 1976.
- [69] M Ishii and Makoto Sato. A 3D interface device with force feedback : a virtual work space for pick-and-place tasks. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (Cat. No.93CH3336-5), pages 331–335, Seattle, WA, USA, 1993. IEEE.
- [70] Jean-Baptiste Izard, Marc Gouttefarde, Cedric Baradat, David Culla, and Damien Sallé. Integration of a Parallel Cable-Driven Robot on an Existing Building Façade. volume 12, pages 149–164. 2013.
- [71] Jean-baptiste Izard, Marc Gouttefarde, Micaël Michelin, Olivier Tempier, and Cedric Baradat. A Reconfigurable Robot for Cable-Driven Parallel Robotic Research and Industrial Scenario Proofing. In Tobias Bruckmann and Andreas Pott, editors, *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 12 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 135–148. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [72] Luc J. Hébert, Bradford J. McFadyen, Nicolas Robitaille, Jean Larochelle, Catherine Mercier, Philip Jackson, Laurent Bouyer, Shirley Fecteau, and Carol L. Richards. Interactive Virtual Reality Real-Time Avatar for Military Rehabilitation in the Canadian Forces. In *STO Human Factors and Medicine Panel (HFM) Symposium*, Milan, 2013. NATO Science and Technology Organization.
- [73] Juan Carlos Jáuregui, Eusebio E. Hernández, Marco Ceccarelli, Carlos López-Cajún, and Alejandro García. Kinematic calibration of precise 6-DOF Stewart platform-type positioning systems for radio telescope applications. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3) :252–260, sep 2013.
- [74] Dawei Jia, Asim Bhatti, Saeid Nahavandi, Senior Member, and Ben Horan. Human Performance Measures for Interactive Haptic-Audio-Visual Interfaces. 6(1) :46–57, 2013.
- [75] Xiaoling Jiang and Clement Gosselin. Dynamic Point-to-Point Trajectory Planning of a Three-DOF Cable-Suspended Parallel Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6) :1550–1557, dec 2016.

- [76] Jungwon Yoon and Jeha Ryu. Design, fabrication, and evaluation of a new haptic device using a parallel mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3) :221–233, 2001.
- [77] Sture Kahlman. Arrangement for controlling the direction of movement of a load hoist trolley, 1994.
- [78] J Kang, D Martelli, V Vashista, I Martinez-Hernandez, H Kim, and S K Agrawal. Robot-driven downward pelvic pull to improve crouch gait in children with cerebral palsy. *Science Robotics*, 2(8), jul 2017.
- [79] S. Kawamura, W. Choe, S. Tanaka, and S.R. Pandian. Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system. In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 215–220. IEEE, 1995.
- [80] Sadao Kawamura and Mizuto Ida. Development of a virtual sports machine using a wire drive system—a trial of virtual tennis. *Intelligent Robots and . . .*, pages 111–116, 1995.
- [81] Wisama Khalil and Sébastien Besnard. Self calibration of Stewart-Gough parallel robots without extra sensors. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 15(6) :1116–1121, 1999.
- [82] Muzafar Khan, Muhammad Tahir, S Sulaiman, and M D a Said. Exploring the quantitative and qualitative measures for haptic systems. *2010 International Symposium on Information Technology*, pages 31–36, jun 2010.
- [83] Ong-seok Kim, Keum-shik Hong, Seung-ki Sul, Yong-seok Kim, Keum-shik Hong, and Seung-ki Sul. Anti-sway control of container cranes : inclinometer, observer, and state feedback. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2(4) :435–449, 2004.
- [84] J. Kotlarski, H. Abdellatif, T. Ortmaier, and B. Heimann. Enlarging the useable workspace of planar parallel robots using mechanisms of variable geometry. *2009 ASME/IF- ToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots*, pages 63–72, 2009.
- [85] Kris Kozak, Qian Zhou, and Jinsong Wang. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(3) :425–433, 2006.
- [86] Robert L. Williams II. Cable-Suspended Haptic Interface. *International Journal of Virtual Reality*, 3(3) :13–21, 1998.
- [87] H. Lamine, S. Bennour, and L. Romdhane. Dynamic Simulation of a Cable-Based Gait Training Machine. In *Mechanisms and Machine Science*, volume 37, pages 199–207. 2016.

- [88] Tam Nhat Le, Hiroki Dobashi, and Kiyoshi Nagai. Configuration of redundant drive wire mechanism using double actuator modules. *ROBOMECH Journal*, 3(1) :25, dec 2016.
- [89] A Lecours, S Foucault, T Laliberte, C Gosselin, B Mayer-St-Onge, D Gao, and R J Menassa. Movement system configured for moving a payload in a plurality of directions, 2015.
- [90] MAn Cheong Lei and Denny Oetomo. Cable Wrapping Phenomenon in Cable-Driven Parallel Manipulators. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 28(3) :386–396, jun 2016.
- [91] Hui Li, Xinyu Zhang, Rui Yao, Jinghai Sun, Gaofeng Pan, and Wenbai Zhu. Optimal Force Distribution Based on Slack Rope Model in the Incompletely Constrained Cable-Driven Parallel Mechanism of FAST Telescope. In *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 12, pages 87–102. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [92] R Lindemann and D Tesar. Construction and Demonstration of a 9-String 6-DOF Force Reflecting Joystick for Telerobotics. In *NASA International Conference on Space Telerobotics*, pages 55–64, 1989.
- [93] Manolis I A Lourakis. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar. *Foundation of Research and Technology*, 4 :1–6, 2005.
- [94] Toru Makino and Takashi Harada. Cable collision avoidance of a pulley embedded cable-driven parallel robot by kinematic redundancy. In *Proceedings of the 4th International Conference on Control, Mechatronics and Automation - ICCMA '16*, pages 117–120, New York, New York, USA, 2016. ACM Press.
- [95] Ying Mao and Sunil Kumar Agrawal. Design of a Cable-Driven Arm Exoskeleton (CAREX) for Neural Rehabilitation. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(4) :922–931, aug 2012.
- [96] Ying Mao, Xin Jin, Geetanjali Gera Dutta, John P Scholz, and Sunil K Agrawal. Human movement training with a cable driven ARm EXoskeleton (CAREX). *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 23(1) :84–92, jan 2015.
- [97] James A Maples and Joseph J Becker. Experiments in force control of robotic manipulators. *Robotics and Automation. Proceedings.*, 3 :695–702, 1986.
- [98] Jacob Mattingley and Stephen Boyd. CVXGEN : a code generator for embedded convex optimization. *Optimization and Engineering*, 13(1) :1–27, mar 2012.
- [99] D. Mayhew, B. Bachrach, W.Z. Rymer, and R.F. Beer. Development of the MACARM - a Novel Cable Robot for Upper Limb Neurorehabilitation. *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005.*, pages 299–302, 2005.

- [100] J. P. Merlet. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensor data. In *Proceedings IEEE International Conference in Robotics and Automation*, pages 200–204, 1993.
- [101] Jean-Pierre Merlet. *Parallel Robots*, volume 208. 2006.
- [102] Jean-pierre Merlet. MARIONET, A Family of Modular Wire-Driven Parallel. In Jadran Lenarcic and Michael M. Stanisic, editors, *Advances in Robot Kinematics : Motion in Man and Machine*, pages 53–61. Springer Netherlands, Dordrecht, 2010.
- [103] G Meunier, B Boulet, and M Nahon. Control of an overactuated cable-driven parallel mechanism for a radio telescope application. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(5) :1043–1054, 2009.
- [104] Philipp Miermeister and Andreas Pott. Auto Calibration Method for Cable-Driven Parallel Robots Using Force Sensors. In Jadran Lenarcic and Manfred Husty, editors, *Latest Advances in Robot Kinematics*, pages 269–276. Springer Netherlands, Dordrecht, 2012.
- [105] Lars Mikelsons, Tobias Bruckmann, Manfred Hiller, and Dieter Schramm. A real-time capable force calculation algorithm for redundant tendon-based parallel manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3869–3874. IEEE, may 2008.
- [106] T. Morizono, K. Kurahashi, and S. Kawamura. Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 4 of *Proceedings. 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.97CH35992)*, pages 3025–3030, Albuquerque, NM, USA, 1997. IEEE.
- [107] Vincent Nabat and María De La O Rodríguez. Schoenflies motion generator : A new non redundant parallel manipulator with unlimited rotation capability. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005(April) :3250–3255, 2005.
- [108] Zoran Najdovski, Saeid Nahavandi, and Toshio Fukuda. Design, Development, and Evaluation of a Pinch–Grasp Haptic Interface. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 19(1) :45–54, 2014.
- [109] So Ryeok Oh and Sunil K. Agrawal. Cable suspended planar robots with redundant cables : Controllers with positive tensions. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(3) :457–465, 2005.
- [110] Shimpei Ohtomo and Toshiyuki Murakami. Estimation method for sway angle of payload with reaction force observer. In *13th International Workshop on Advanced Motion Control*, pages 581–585, 2014.

- [111] Martin Otis, Vincent Duchaine, Greg Billette, Simon Perreault, Clément Gosselin, and Denis Laurendeau. Cartesian Control of a Cable-Driven Haptic Mechanism. In Mehrdad Hosseini, editor, *Advances in Haptics*, chapter 4, pages 75–103. InTech, apr 2010.
- [112] Martin J. D. Otis. *Analyse, Commande et Intégration d'un Mécanisme Parallèle Entraîné par des Câbles pour la Realisation D'une Interface Haptique comme Metaphore de Navigation dans un Environnement Virtuel*. PhD thesis, Université Laval, 2009.
- [113] Martin J D Otis, Marielle Mokhtari, Charles Du Tremblay, Denis Laurendeau, Francois Michel De Rainville, and Clément M. Gosselin. Hybrid control with multi-contact interactions for 6DOF haptic foot platform on a cable-driven locomotion interface. *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2008 - Proceedings, Haptics*, pages 161–168, 2008.
- [114] Erika Ottaviano, Marco Ceccarelli, and Francesco Palmucci. An application of CaTraSys, a cable-based parallel measuring system for an experimental characterization of human walking. *Robotica*, 28(01) :119, may 2009.
- [115] Bo Ouyang and Weiwei Shang. Rapid optimization of tension distribution for cable-driven parallel manipulators with redundant cables. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29(2) :231–238, 2016.
- [116] Amit J. Patel and Kornel F. Ehmann. Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(4) :489–512, mar 2000.
- [117] Angelika Peer and Martin Buss. A New Admittance-Type Haptic Interface for Bimanual Manipulations. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(4) :416–428, aug 2008.
- [118] J Perret and L Dominjon. The INCA 6D : a Commercial Stringed Haptic System Suitable for Industrial Applications. In *SPIDAR Anniversary Symposium*, 2009.
- [119] Michael A. Peshkin. Non-contacting sensors, 2003.
- [120] Andreas Pott. State of the art on cable-driven parallel robots. In *innorobo, European Workshop on Applications of Parallel and Cable-driven Robots*, pages 1–48, Lyon, France, 2014.
- [121] Andreas Pott, Tobias Bruckmann, and Lars Mikelsons. Closed-form Force Distribution for Parallel Wire Robots. In *Computational Kinematics*, pages 25–34. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [122] Andreas Pott and Philipp Miermeister. Workspace and interference analysis of cable-driven parallel robots with an unlimited rotation axis. In *International Conference on Advances in Robot Kinematics*, pages 345–353, Grasse, 2016.

- [123] Andreas Pott, Hendrick Mütterich, Werner Kraus, Valentine Schmidt, Philipp Miermeister, and Alexander Verl. IPAnema : A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications. In Tobias Bruckmann and Andreas Pott, editors, *Cable-Driven Parallel Robots*, volume 12 of *Mechanisms and Machine Science*, pages 119–134. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [124] Régis Poulin. *Architecture et commande d'une interface de locomotion utilisant un mécanisme parallèle entraîné à l'aide de câbles*. Mémoire, Université Laval, 2005.
- [125] Pierre Renaud, Nicolas Andreff, Jean Marc Lavest, and Michel Dhome. Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1) :12–22, 2006.
- [126] Nicolas Riehl, Marc Gouttefarde, Sébastien Krut, Cédric Baradat, and François Pierrot. Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2193–2198, 2009.
- [127] Giulio Rosati and Mattia Andreolli. Performance of cable suspended robots for upper limb rehabilitation. In *Robotics, 2007. ICORR*, volume 00, pages 385–392, Noordwijk, 2007. IEEE.
- [128] Giulio Rosati, Damiano Zanotto, and Aldo Rossi. Performance Assessment of a 3D Cable-Driven Haptic Device. In *Volume 12 : Mechanics of Solids, Structures and Fluids*, volume 12 of *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings*, pages 597–606, Dept. of Innovation in Mechanics and Management (DI-MEG), University of Padua, Faculty of Engineering, via Venezia 1, 35131 Padova, Italy, 2008. ASME.
- [129] Frank Röthling, Robert Haschke, Jochen J. Steil, and Helge Ritter. Platform portable anthropomorphic grasping with the Bielefeld 20-DOF Shadow and 9-DOF TUM Hand. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2951–2956, 2007.
- [130] Ana Lucia Cruz Ruiz, Stéphane Caro, Philippe Cardou, and François Guay. ARACHNIS : Analysis of Robots Actuated by Cables with Handy and Neat Interface Software. In *Cable-driven Parallel Robots*. 2015.
- [131] E Samur. *Performance Metrics for Haptic Interfaces*. Springer, 2012 editi edition, 2012.
- [132] Evren Samur and Fei Wang. Generic and systematic evaluation of haptic interfaces based on testbeds. In *Intelligent Robots and ...*, pages 2113–2119, 2007.

- [133] Khalid L. Sorensen, William Singhose, and Stephen Dickerson. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes. *Control Engineering Practice*, 15(7) :825–837, 2007.
- [134] Henry Stark and John W Woods. *Probability, random processes, and estimation theory for engineers*, volume 1. 1986.
- [135] Gabor Stepan, Andras Toth, Laszlo Kovacs, Gunnar Bolmsjo, Giorgos Nikoleris, Dragoljub Surdilovic, Andreas Conrad, Antonios Gasteratos, Nikolaos Kyriakoulis, Dimitrios Chrysostomou, Rigas Kouskouridas, Joseph Canou, Tom Smith, William Harwin, Rui Loureiro, Rafa Lopez, and Miguel Moreno. ACROBOTER : a ceiling based crawling, hoisting and swinging service robot platform. In *Proceedings of beyond gray droids : domestic robot design for the 21st century workshop at HCI 2009*, page 2, 2009.
- [136] Ethan Stump and Vijay Kumar. Workspaces of Cable-Actuated Parallel Manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 128(1) :159, 2006.
- [137] S. Tadokoro, R. Verhoeven, M. Hiller, and T. Takamori. A portable parallel manipulator for search and rescue at \nlarge-scale urban earthquakes and an identification algorithm for the \ninstallation in unstructured environments. *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*, 2 :1222–1227, 1999.
- [138] Lukas Tappeiner, Erika Ottaviano, and Manfred L. Husty. A Cable-Driven Robot for Upper Limb Rehabilitation Inspired by the Mirror Therapy. pages 174–181. 2018.
- [139] Alberto Trevisani, Paolo Gallina, and Robert L. Williams. Cable-Direct-Driven Robot (CDDR) with passive SCARA support : Theory and simulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems : Theory and Applications*, 46(1) :73–94, 2006.
- [140] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, and K. Hara. Variable impedance control based on estimation of human arm stiffness for human-robot cooperative calligraphic task. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, 1(May) :644–650, 2002.
- [141] MW W Ueberle. *Design, Control, and Evaluation of a Family of Kinesthetic Haptic Interfaces*. PhD thesis, Technische Universität München, 2006.
- [142] Kostas Vlachos and Evangelos Papadopoulos. Transparency maximization methodology for haptic devices. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 11(3) :249–255, jun 2006.

- [143] C.W. Wampler, J.M. Hollerbach, and Tatsuo Arai. An implicit loop method for kinematic calibration and its application to closed-chain mechanisms. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(5) :710–724, 1995.
- [144] David W. Weir, J. Edward Colgate, and Michael a. Peshkin. Measuring and increasing Z-width with active electrical damping. *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2008 - Proceedings, Haptics*, pages 169–175, 2008.
- [145] Rui Xiao, Jie Huang, and Pingdong Wu. Large space force feedback system based on string. In *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*, volume vol.4 of *Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology*, pages 2705–2708, Harbin, China, dec 2011. IEEE.
- [146] Wei Yang Ho, Werner Kraus, Alexander Mangold, and Andreas Pott. Haptic Interaction with a Cable-Driven Parallel Robot Using Admittance Control. In *Cable-Driven Parallel Robots*, pages 201–212. 2015.
- [147] Yinyu Ye and Edison Tse. An extension of Karmarkar’s projective algorithm for convex quadratic programming. *Mathematical Programming*, 44(1-3) :157–179, may 1989.
- [148] Jinyu Zhang. STRING-MAN : Wire-robot technology for safe, flexible and human-friendly gait rehabilitation. 00(c), 2007.
- [149] H Zhuang, J Yan, and O Masory. Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals. *Journal of Robotic Systems*, 15 :395–405, 1998.
- [150] Hanqi Zhuang. Self-calibration of parallel mechanisms with a case study on Stewart platforms. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(3) :387–397, jun 1997.
- [151] Hanqi Zhuang, Oren Masory, and Jiahua Yan. Kinematic calibration of a Stewart platform using pose measurements obtained by a single theodolite. *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, 2 :329–334 vol.2, 1995.