



Conception, analyse et optimisation de méthodes de préhension et de mains mécaniques épicycloïdales pour la prise d'objets plats partiellement contraints

Thèse

Vincent Babin

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

Québec, Canada

© Vincent Babin, 2020

Conception, analyse et optimisation de méthodes de préhension et de mains mécaniques épicycloïdales pour la prise d'objets plats partiellement contraints

Thèse

Vincent Babin

Sous la direction de :

Clément Gosselin

Résumé

Dans les applications robotiques, la plupart des préhenseurs sont plus apparentés à des outils qui sont spécialisés pour effectuer une tâche extrêmement bien plutôt que d'effectuer une variété de tâches et de simplement les réussir. C'est dans cette optique que les travaux rapportés dans cette thèse proposent des solutions de préhension. Premièrement, des méthodes générales sont proposées pour permettre de prendre un type d'objets qui est généralement impossible à prendre pour les préhenseurs simples. Par la suite sont présentés les mécanismes planétaires qui sont au coeur des assemblages subséquents. Ces mécanismes sont utilisés pour améliorer les débattements des doigts et ainsi rendent possible un premier design pouvant prendre des petits et grands objets reposant sur des surfaces dures. Par la suite est présenté la conception d'un préhenseur complet qui inclut les propriétés du premier préhenseur mais aussi des propriétés de prises parallèles qui sont considérées comme indispensables pour être en mesure de saisir une grande panoplie d'objets. Finalement, le design du préhenseur proposé est optimisé et des capteurs y sont intégrés pour tenter de produire un design complet et sécuritaire pouvant être utilisé de manière simple par une grande panoplie de robots.

Abstract

Most robotic grippers excel at completing one task but are ill suited for completing many and very different tasks. It is with this fact in mind that this thesis proposes general solutions to the grasping problem. First, general methods are proposed that aim at picking small flat objects that could not otherwise be grasped by simple mechanical grippers. Planetary mechanisms are then proposed to increase the range of motion of the finger joints, hence providing a way to achieve the necessary properties to build and test a finger capable of grasping small flat objects lying on hard surfaces. A complete gripper design is then proposed and built. The novel design that includes the features of the previous design is also capable of performing parallel grasps which are considered essential to be able to grasp a wide range of unknown objects. Finally, the gripper design is optimised and sensing apparatus is included in the gripper to provide a gripper that is considered a complete solution to grasping and is simple to use on a wide range of robots.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des vidéos	xi
Remerciements	xiv
Introduction	1
1 Modèle de la méthode proposée	6
1.1 Introduction	6
1.2 Le ramassage d’objets de petite taille	10
1.3 Le ramassage d’objets de grande taille	13
1.4 Conclusion	20
2 Étude des mécanismes planétaires	22
2.1 Introduction	22
2.2 Cinématique du mécanisme planétaire de base	25
2.3 Dynamique	26
2.4 Prototype et test	32
2.5 Conclusion	35
3 Conceptualisation et prototypage d’un mécanisme de doigt spécialisé dans le ramassage d’objets de petites et grandes tailles	36
3.1 Introduction	36
3.2 Le design proposé	38
3.3 Discussion	46
3.4 Conclusion	48
4 Design d’un préhenseur adapté au ramassage et à la prise latérale parallèle	49
4.1 Introduction	49

4.2	Design proposé	50
4.3	Dimensions du prototype	59
4.4	Prise latérale à grande force	59
4.5	Ramassage d'objets	62
4.6	Discussion	71
4.7	Conclusion	73
5	Conception d'un préhenseur optimal, sécuritaire et simple à fabriquer	75
5.1	Introduction	75
5.2	Étage de transmission	76
5.3	Mécanisme de doigt	78
5.4	Les propriétés du préhenseur	81
5.5	Optimisation du mécanisme	84
5.6	Mécanisme d'ongle	90
5.7	Capteur d'efforts intégré	92
5.8	Design proposé	98
5.9	Courbes d'utilisation du design proposé	100
5.10	Conclusion	102
	Conclusion	103
	Bibliographie	106

Liste des tableaux

2.1	Ratio d'amplification du moteur secondaire selon le type et les paramètres i et j correspondants.	30
3.1	Propriétés du banc d'essai expérimental.	45
3.2	Propriétés des objets.	46
4.1	Dimensions du prototype	60
4.2	Liste des paramètres utilisés pour étudier les trois variations du ramassage. . .	63
5.1	Paramètres physiques caractérisant le mécanisme de transmission à l'exception de r_1 , qui est considéré comme un paramètre du doigt.	78
5.2	Paramètres de performance du mécanisme.	86
5.3	Paramètres de performance du mécanisme.	87
5.4	Paramètres de performance du mécanisme.	88
5.5	Paramètres de performance du mécanisme.	89

Liste des figures

1.1	Méthode d'un doigt utilisé comme une spatule pour un objet rigide (a) et un objet flexible (b). La méthode échoue à s'insérer entre la surface et l'objet dans les deux cas.	9
1.2	États initial et final de la préhension d'un objet reposant sur une surface dure.	10
1.3	La méthode du ramassage d'objets dans le plan à la suite de l'insertion du pouce.	11
1.4	Diagramme des corps libres de la méthode du ramassage de petits objets.	11
1.5	Méthode de ramassage d'objets de grande taille.	13
1.6	Diagramme des corps libres (DCL) du ramassage d'objets de taille moyenne.	14
1.7	Cône de friction statique et équation de la force de friction nécessaire pour maintenir l'objet en place en fonction de la pression sur l'objet.	15
1.8	Cas limite de l'insertion où $\phi = \alpha$	16
1.9	Le coefficient a en fonction de l'orientation de l'objet ϕ pour différentes valeurs des ratios k/l_o et h_o/l_o	16
1.10	Le coefficient b en fonction de l'orientation de l'objet ϕ pour différentes valeurs des ratios k/l_o et h_o/l_o . On note que le coefficient b est indépendant de k	17
1.11	Le paramètre a en fonction de α avec $\phi = 0$, pour différentes valeurs de k/l_o et h_o/l_o	17
1.12	Le paramètre b en fonction de α avec $\phi = 0$, pour différentes valeurs de h_o/l_o	18
1.13	Le paramètre a en fonction de k/l_o et h_o/l_o au moment de l'insertion initiale ($\phi = 0$ degré).	18
1.14	Le paramètre b en fonction de k/l_o et h_o/l_o au moment de l'insertion initiale ($\phi = 0$ degré).	19
1.15	Diagramme des corps libres (DCL) soumis à une force F pendant la prise semi-englobée.	19
2.1	Manipulateur utilisé pour faire fonctionner un commutateur Joslyn dans les voûtes du réseau électrique souterrain d'Hydro-Québec.	23
2.2	Information enregistrée par un capteur d'efforts multiaxes monté au bout d'un bras robotisé manipulant une poignée sur un commutateur Joslyn.	24
2.3	Mécanisme planétaire et les variables s'y rattachant.	25
2.4	Les trois configurations de base du planétaire proposé.	27
2.5	Les douze arrangements possibles avec les configurations modifiées : θ_p désigne l'entrée primaire, θ_s , l'entrée secondaire et θ_o , la sortie.	29
2.6	Les propriétés en régime permanent pour une transmission de type 2 avec $R < 1$	31
2.7	Les propriétés en régime permanent pour une transmission de type 2 avec $R < 1$ et une entrée autobloquante au moteur secondaire.	32
2.8	Robot avec l'articulation prototype assemblée à la troisième articulation.	33

2.9	Vue de coupe de l'articulation prototype.	33
2.10	Vue de coupe de l'articulation du joint prototype.	34
2.11	Essai pratique réalisé pour un mouvement de bas en haut de la troisième articulation du robot-test.	34
3.1	La même prise latérale peut être effectuée avec le préhenseur original et le préhenseur modifié, ce qui démontre que les propriétés du préhenseur ne sont pas trop affectées.	37
3.2	Le mécanisme proposé monté sur le préhenseur d'un robot Jaco.	38
3.3	(a) Un robot JACO muni du mécanisme de pouce proposé (b) Vue rapprochée du prototype avec (1) porte-satellites (2) phalange proximale (3) phalange distale (4) base de la main (5) actionneur linéaire (6) barre de lien (c) Schéma avec les paramètres géométriques.	39
3.4	Les schémas du prototype.	40
3.5	Banc d'essai utilisé pour tester le concept muni de marqueurs fiduciaires.	42
3.6	Paramètres additionnels ω et distance h_d	42
3.7	Prise semi-englobante d'un livre avec le rebord détecté : (a) Position d'approche (b) Mouvement vers le bas (c) Contact mesuré par le capteur (d) Ouverture du pouce (e) Rebord détecté (f) Adaptation (g) Fermeture du pouce (h) Position finale du pouce atteinte (i) Fermeture finale des doigts (j) Départ pour effectuer une tâche auxiliaire.	43
3.8	Prise semi-englobante d'une feuille de papier sans rebord détecté : (a) Position d'approche (b) Mouvement vers le bas (c) Contact mesuré par le capteur (d) Ouverture du pouce (e) Rebord non détecté (f) L'articulation passive atteint $\theta_3 = \theta_{3,max}$ (g) Fermeture du pouce (h) Position finale du pouce atteinte (i) Fermeture finale des doigts (j) Départ pour effectuer une tâche auxiliaire.	43
3.9	Diagramme montrant le processus de décision de la prise.	44
3.10	Orientation du mécanisme de pouce (θ_2) en fonction de l'entrée.	45
3.11	Ratio de vitesse du doigt.	46
4.1	Vue de côté du préhenseur proposé.	51
4.2	Vue de coupe du mécanisme pour montrer la mécanique des doigts et de la transmission.	52
4.3	Les variables utilisées pour étudier la cinématique du doigt.	53
4.4	Comparaison entre le mécanisme planétaire générique et l'implémentation de ce chapitre.	53
4.5	Comparaison de l'utilisation de mécanismes quatre barres.	55
4.6	Vues de côté présentant le mécanisme d'ongle.	58
4.7	Coordonnées du bout du doigt (x_f, y_f) et du bout du pouce (x_t, y_t) respectivement en fonction de la position de l'actionnement du doigt σ_f et du pouce σ_t	59
4.8	Distance entre le bout du pouce et le bout du doigt selon l'axe- x en fonction de la position respective de l'entrée du pouce σ_t et du doigt σ_f	61
4.9	Rapport de la vitesse du pouce (\dot{x}_t, \dot{y}_t) et du doigt (\dot{x}_f, \dot{y}_f) respectivement sur la vitesse des entrées $(\dot{\sigma}_t$ and $\dot{\sigma}_f)$. Les rapports de vitesse sont montrés sur la plage des configurations possibles des entrées σ_t et σ_f	61
4.10	Équivalence du paramètre ζ_r	63

4.11	Orientation du préhenseur ζ_r en fonction de l'entrée du pouce σ_t pour différentes valeurs de l'entrée du doigt σ_f	64
4.12	Préhenseur proposé assemblé sur un bras robotisé à six degrés de liberté (DDL).	64
4.13	Ramassage rigide effectué avec $\sigma_f = 10,16\text{mm}$ (voir vidéo 5-2).	65
4.14	Mécanisme compliant de la phalange distale montré dans les états au repos, intermédiaire et étiré. Pour l'état au repos est aussi montré l'axe connectant le bout du pouce P_t et le centre instantané de rotation I du pouce compliant.	66
4.15	Paramètres utilisés pour étudier le mécanisme de pouce compliant.	66
4.16	Orientation du préhenseur ζ_c définie comme l'orientation minimale faisable qui optimise l'angle d'attaque en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f	67
4.17	Distance entre le bout des doigts d_c correspondant à l'orientation minimale faisable qui optimise l'angle d'attaque en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f	67
4.18	Angle d'attaque le plus petit atteignable en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f	68
4.19	Méthode du ramassage compliant pour $\sigma_f = 10,16\text{mm}$ (voir vidéo 5-3).	68
4.20	ζ_r , ζ_c , ζ_{rot} et ζ_{opt} en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f	69
4.21	Orientations nécessaires pour effectuer le ramassage des figures 4.13, 4.19 et 4.22 avec l'entrée du doigt à une position $\sigma_f = 10,16\text{ mm}$	70
4.22	Exemple du ramassage statique (<i>idle scooping</i>) pour $\sigma_f = 10,16\text{ mm}$ (voir vidéo 5-4).	70
4.23	Le ramassage statique exécuté pour prendre une pièce de monnaie.	71
4.24	La méthode du ramassage statique effectuée sur une clef reposant sur une tige enfoncée dans un mur (voir vidéo 5-5).	73
4.25	Un groupe d'objets qui peuvent être pris par la méthode de ramassage statique, comme montré dans la vidéo 5-6. De gauche à droite et de haut en bas, les objets sont : un bloc de bois, un dépliant en papier, une règle en plastique, une vis en métal, une feuille de caoutchouc, un engrenage à vis, une carte d'autobus en plastique, une pièce de monnaie, un paquet de cartes de hockey, une bague d'étanchéité, une pince-étau et une clef à bout ouvert.	73
5.1	Vue de côté du mécanisme de transmission réversible à engrenages plats proposé.	77
5.2	Paramètres du mécanisme.	79
5.3	Paramètres et vecteurs utilisés pour étudier le ramassage compliant avec le nouveau mécanisme de compliance et d'angle.	83
5.4	Design obtenu avec la procédure 1.	86
5.5	Design obtenu avec la procédure 2.	87
5.6	Design obtenu avec la procédure 3.	88
5.7	Design obtenu avec la procédure finale.	90
5.8	Vues de côté montrant le mécanisme d'actionnement de l'angle.	90
5.9	Cercles et droites utilisés pour sélectionner la géométrie de la glissière d'actionnement.	91
5.10	Capteur de force proposé pour le préhenseur.	93
5.11	Vecteurs utilisés pour étudier la force mesurée par le capteur provenant de la force au bout du doigt.	94
5.12	Force appliquée en x (l'équation (5.23)) et force mesurée en x (l'équation (5.77)) en fonction de l'angle θ_1	97
5.13	Modèle 3D du design obtenu dans ce chapitre.	98

5.14	Vue explosée du préhenseur.	99
5.15	Présentation des pièces uniques utilisées dans le préhenseur.	100
5.16	Courbes d'utilisation du préhenseur.	100
5.17	Courbes de ramassage optimal ζ_c du préhenseur pour des valeurs de θ_1^F allant de θ_{1i} (courbe du bas) jusqu'à θ_{1f} (courbe du haut) pour des incréments constants.	101
5.18	Courbes de ramassage optimal du préhenseur avec hyperextension du pouce.	102

Liste des vidéos

3.1	Vidéo 4-1	38
4.5.1	Vidéo 5-1	64
4.5.1	Vidéo 5-2	64
4.5.2	Vidéo 5-3	68
4.5.3	Vidéo 5-4	70
4.6	Vidéo 5-5	72
4.6	Vidéo 5-6	72

*À Marthe Parent, Claude Babin
et Louyze-Marie Babin*

Don't think of robots as replacements for humans – think of them as things that will help make us better at tackling many of the problems we face.

EOIN TREACY, "How to profit from the peaceful rise of the robots", Money Week, April 21, 2016

Remerciements

Merci à mon directeur, Clément Gosselin, qui m'a dirigé tout au long de ce projet qu'est le doctorat. *Dirigé* est effectivement le bon mot, puisqu'il est toujours à l'écoute des mille et une idées que je lui propose constamment et qui rallongent nos rencontres hebdomadaires. De par ses questions pertinentes, il réussit à guider ses étudiants et à les faire cheminer dans leur réflexion, améliorant leur esprit critique et les aidant à atteindre l'objectif fixé. Cette qualité rare, combinée à sa disponibilité et à son ouverture, font de lui un directeur hors pair.

Merci au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), à Prompt Québec, à Hydro-Québec et à Robotiq qui ont appuyé financièrement les travaux présentés dans cette thèse.

Merci à Philippe Cardou, à Alain Curodeau et à Alexis Lussier-Desbiens qui ont accepté de figurer sur le comité de révision de cette thèse. De plus, merci à Louis-Alexis Allen-Demers, Jean-Philippe Jobin, Jean-François Allan et Pierre-Luc Richard, qui ont participé de près ou de loin aux rencontres qui ont dirigé les travaux présentés ici.

Merci à mes parents qui m'ont élevé avec des valeurs de persévérance et de curiosité dans la vie. Votre soutien inébranlable m'a permis d'avoir confiance en moi et de rêver à des projets ambitieux. Merci à ma soeur, ma confidente et un exemple d'exploratrice de grandes villes. Merci à ma famille étendue, Pol, Rino, Louise, Florent et Caroline, qui ont été d'excellents modèles. Merci d'ailleurs pour vos sofas sur lesquels vous m'avez laissé dormir pendant tout mon périple, qui a débuté à ma graduation à Saint-Quentin en 2006 et qui m'a mené à faire un doctorat jusqu'en 2019.

Merci aux professionnels de recherche du laboratoire, qui sont la mémoire des accomplissements et les sauveurs quand rien ne va plus avec les bancs d'essai. Thierry, avec son oeil de lynx, qui identifie toujours les failles dans mes designs malgré ma certitude et mon argumentation pour le convaincre du contraire. Simon, qui est resté en recul jusqu'au jour où il m'a montré à contrôler mes robots. Il en découle alors pour lui des années de questions et de problèmes qui, à ce jour, surviennent encore. Finalement, Boris, qui ne travaille plus au laboratoire, mais qui était toujours disponible pour partager son savoir sur Linux et «LaTeX», et donc à contribuer à la thèse bien faite présentée ici.

De plus, je remercie les gens du laboratoire de robotique pour une ambiance plus que chaleureuse et qui ont fait sentir un Néo-Brunswickois chez lui au Québec. Un merci spécial à Alexandre, André, Eric, Dihn, Julien, David, Pascal L., Alexis, Jérôme, Bruno, François G, François L, Pascal D.-G. et Xiaoling, avec qui les interactions ont assurément eu un impact sur l'aventure qu'ont été les études au laboratoire.

Finalement, je désire remercier ma compagne de vie, Sophie, qui n'a jamais perdu espoir de me voir dire les mots "j'ai fini ma thèse!" et qui fait partie des piliers sur lesquels je me suis appuyé pour ne pas tomber lors de ce périple.

Introduction

Que ce soit pour un usage personnel ou pour des applications industrielles, les robots sont de plus en plus présents dans la société. La motivation première des robots étant d’automatiser des tâches banales et répétitives, il n’est pas surprenant que ces derniers vaquent entre autres à nettoyer les planchers des logis, comme dans le cas du iRobot (Jones, 2006). La simplicité du design et l’accessibilité du iRobot ont mené rapidement à son utilisation dans différents domaines de recherche, comme la cartographie d’environnements non structurés (Zheng *et al.*, 2016). Plus récemment, des questions éthiques ont été soulevées à propos des potentielles tâches additionnelles à proscrire pour les robots, telle la sécurité armée du public (Kaplan, 2018).

Les systèmes robotiques dans la société prennent aussi la forme de prothèses et de systèmes d’augmentation humaine. En effet, l’étude des membres artificiels, tels que des jambes (Azocar *et al.*, 2018) et des bras robotiques (Gaetani *et al.*, 2018), est très active. Dans le design de prothèses, plus précisément le design de mains anthropomorphes, une contrainte est souvent de limiter le nombre de pièces mobiles et de fonctionnalités. En effet, puisque la main humaine est pourvue de plus de 28 degrés de liberté, un mécanisme l’imitant parfaitement est très complexe (Shadow Hand Company Website). Pour cette raison, beaucoup d’efforts sont investis dans le but de créer des designs simples pouvant imiter la main humaine jusqu’à un certain niveau avec des mécanismes simples, mais astucieux, nécessitant peu de moteurs (Birglen *et al.*, 2007; Baril *et al.*, 2013). Dans tous les cas, les mains, bras, jambes ou membres robotiques existent depuis plusieurs décennies ; des mécanismes ont été utilisés dans le passé dans le but de pourvoir à des capacités déficientes ou d’augmenter les capacités de l’humain au-delà de celles d’un humain moyen (Henschke et Mauch, 1949; Tureman, 1948; Waldemar, 1926).

De plus en plus de recherches se penchent sur le problème de l’interaction entre les robots et les humains (Casper et Murphy, 2003; Vasic et Billard, 2013; Labrecque *et al.*, 2017). En effet, dans certains scénarios, il est préférable de travailler avec des robots, que ce soit en raison du manque de main-d’oeuvre ou de la dangerosité des tâches devant être effectuées par les travailleurs. Certaines recherches se concentrent sur les interactions physiques entre l’humain et la machine pour créer des interfaces de travail intuitives (Labrecque *et al.*, 2017), tandis que d’autres recherches tentent de créer des machines anthropomorphes pour interagir avec

les humains et ainsi créer des liens de confiance humain-robot (Pedemonte *et al.*, 2016; Desai *et al.*, 2013).

Les robots en industrie prennent plusieurs formes, la plupart étant conçus pour effectuer des tâches très précises. Une tâche typique serait l'utilisation d'une caméra qui détecte des pièces défectueuses sur une chaîne de production (Borthakur *et al.*, 2015) et l'emploi coordonné de jets d'air ou de poussoirs pour les éjecter (Ma *et al.*, 2002; Key Technology Website). La tâche à être effectuée étant définie de manière très précise, aucune capacité d'adaptation, ou très peu, n'est mise en oeuvre lors du design. Cela signifie que le système est très difficilement adaptable pour effectuer une nouvelle tâche.

Pour répondre aux besoins d'accomplir des tâches plus générales, l'industrie fait davantage appel aux bras robotiques. Ces derniers peuvent plus facilement être réaffectés à de nouvelles tâches en raison de leur plage de mouvement couvrant des positions et orientations générales. En effet, les bras robotisés étant munis de six degrés de liberté, ils peuvent ainsi se positionner et s'orienter de manière arbitraire, à la condition que la pose demandée soit dans l'espace de travail du bras robotique. On adapte ces systèmes en modifiant l'outil terminal ou le préhenseur à la tâche devant être réalisée. Il existe beaucoup d'outils spécialisés pour les bras robotiques et, dans le cas de la préhension, certains tentent de généraliser la prise et le dépôt d'objets en utilisant des systèmes de succion (Yamaguchi *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2018).

En industrie, une pratique courante est d'utiliser un bras ou une plate-forme robotique et de changer ou d'adapter le préhenseur à la tâche devant être effectuée (Monkman *et al.*, 2007; Davis *et al.*, 2008). Afin de rendre un robot aussi général que possible, optimiser la performance du préhenseur sur le plus grand nombre de tâches possible permet de limiter ce besoin d'adaptation. Les tâches en industrie devant être accomplies par des robots se multipliant constamment, des préhenseurs pour effectuer des tâches générales gagnent en popularité. Un exemple de situation où les pinces peuvent s'adapter à différents types d'objets est lorsqu'elles sont utilisées pour la récolte de légumes (Monkman *et al.*, 2007; Ling *et al.*, 2004).

Le design de préhenseurs performants étant la clef d'un futur où les robots peuvent effectuer un grand éventail de tâches complexes, il n'est pas surprenant que la recherche dans ce domaine soit très active (Homberg *et al.*, 2019). Pour mentionner quelques domaines de recherche, on pense à l'étude de la main humaine dans le but de l'imiter (Cutkosky, 1989; Romeo *et al.*, 2017), l'étude mathématique de la distribution des forces autour des objets pour maintenir une prise (Guay *et al.*, 2014; Liu et Carpin, 2015) et l'étude de la manipulation d'objets en tirant avantage des propriétés intrinsèques du préhenseur (Tadakuma *et al.*, 2012) ou extrinsèques du préhenseur (Dafle *et al.*, 2014; Babin et Gosselin, 2018; Babin *et al.*, 2019). Ces champs de recherche mènent presque tous à l'étude de l'application de ces concepts et donc, inévitablement, à l'étude de design de mains robotiques.

Les mains robotiques, ou préhenseurs, peuvent être catégorisées en deux groupes : les mains

plus anthropomorphes, qui visent à ressembler à la main humaine (Xu et Todorov, 2016), ainsi que les mains non anthropomorphes ou industrielles, où les caractéristiques de la main découlent des besoins de la tâche et non pas de l'apparence du préhenseur (Karakerezis *et al.*, 1994).

De nombreuses études sont disponibles sur des mains anthropomorphes (Shadow Hand Company Website; Baril *et al.*, 2013; Della Santina *et al.*, 2018; Xiong *et al.*, 2016). Ces dernières proposent des préhenseurs qui imitent la main humaine sans toutefois être pourvus d'autant de degrés de liberté, ce qui les rendrait très complexes. Ces études se servent entre autres de mécanismes de sous-actionnement pour contraindre le mouvement entre les degrés de liberté dans le but d'imiter la main humaine (Baril *et al.*, 2013; Della Santina *et al.*, 2018).

Les préhenseurs industriels sont majoritairement utilisés pour des tâches qui sont bien définies et lorsque peu d'incertitudes sont présentes à propos de l'environnement (Karakerezis *et al.*, 1994; Tao *et al.*, 1990). Ces derniers sont très présents dans les industries où des procédés comme l'assemblage ou le soudage sont faits à répétition et où le positionnement des pièces et les occlusions dues à l'environnement sont connus a priori. La conception de ces préhenseurs incorpore parfois des caractéristiques de la main humaine, comme des doigts en opposition, cinq doigts (Shadow Hand Company Website) ou la présence de ce qui est clairement un pouce et des doigts (Robotiq Company Website).

Étudier les prises optimales et les arrangements mécaniques n'est cependant pas suffisant lorsque vient le temps de mettre en pratique la saisie et la manipulation des objets. La planification des trajectoires et l'étude des interactions avec l'environnement sont nécessaires pour la plupart des tâches (Karakerezis *et al.*, 1994). Cela est encore plus valide dans des environnements non structurés, comme la prise d'objets arrangés aléatoirement dans une boîte (Zeng *et al.*, 2018; Hernandez *et al.*, 2016).

Avec la puissance de calcul de plus en plus accessible, de nouvelles méthodes d'implantation de la préhension ont été présentées (Andrychowicz *et al.*, 2018; Quillen *et al.*, 2018). En effet, l'apparition de ce qui est appelé "l'apprentissage machine" permet d'entraîner un système avec une structure préétablie, avec des milliers d'essais et erreurs dans le but d'optimiser sa réaction aux stimuli qui sont mesurés. Ces systèmes requièrent cependant beaucoup d'informations sous la forme d'essais préalables ou de simulations. Il est alors parfois difficile de fournir à ces systèmes des exemples de tous les cas de réussites et d'échecs. Des modèles peuvent être utilisés pour entraîner ces systèmes, mais ces derniers sont difficilement capables de prendre en compte tous les aspects du monde réel.

Objectifs et structure de la thèse

La création de méthodes de préhension, de préhenseurs adaptés à ces méthodes et d'autres plus généraux capables d'interagir avec l'environnement de manière sécuritaire est l'objectif de cette thèse. Un objectif secondaire de la thèse est de présenter des designs qui utilisent les mécanismes épicycloïdaux pour augmenter les capacités de préhension des mains, mais aussi de démontrer leur facilité d'implantation.

Le chapitre 1 présente la revue de la littérature de différentes méthodes utilisées pour caractériser ou planifier la préhension d'objets. Une méthode nommée le ramassage d'objets de petite taille, qui vise à permettre la préhension d'objets plats, est proposée, et les paramètres influant la performance de la méthode sont étudiés. Une deuxième méthode, nommée le ramassage d'objets de grande taille, qui est une variation de la première méthode, est proposée. Cette dernière considère les objets de plus grande taille et accroît ainsi l'ensemble des objets pouvant être saisis. Finalement, l'influence de la flexibilité sur la méthode est brièvement étudiée et des conclusions sont tirées sur les propriétés d'un design qui serait adapté aux deux formes de ramassage.

Le chapitre 2 présente la revue de la littérature sur les mécanismes épicycloïdaux ou planétaires. Ces travaux portent sur l'utilisation des mécanismes planétaires dans les articulations de robot. Le fonctionnement de base des planétaires est présenté et les différentes configurations de base à deux degrés de liberté sont étudiées. Dans le but d'améliorer les propriétés d'une articulation d'un bras robotique, des configurations montrant les moteurs montés sur différentes membrures sont présentées et l'utilisation d'un mécanisme à vis est suggérée pour rendre une partie du mécanisme autobloquante. Une implémentation du mécanisme est présentée sous forme de prototype et les résultats d'un test sont montrés pour valider le concept.

Le chapitre 3 présente la revue de la littérature des différents mécanismes utilisés dans les doigts de préhenseurs et des systèmes spécialisés de préhension. Un doigt mécanique muni d'un mécanisme planétaire est proposé pour que ce dernier ait une grande ouverture, comme suggéré par les conclusions du chapitre 1, qu'il soit compact et qu'il montre la facilité d'implantation. Le robot sur lequel est monté le doigt proposé est présenté ainsi que les capteurs utilisés. Les étapes nécessaires pour effectuer le ramassage d'objets sont présentées ainsi que l'information colligée durant les tests menés avec le système.

Le chapitre 4 montre les designs de préhenseurs dans la littérature qui constituent des solutions complètes à des problèmes ou qui tentent d'être aussi généraux et faciles d'utilisation que possible. Un design de préhenseur complet est proposé, qui est non seulement adapté au ramassage d'objets, mais qui est aussi capable d'effectuer des prises latérales ou des pincées parallèles. Le chapitre présente la mécanique et la cinématique de transmission actionnant les doigts et des doigts eux-mêmes. La méthode de ramassage de petits objets est effectuée de trois différentes façons successivement plus simples et efficaces pour démontrer les avantages,

les inconvénients et les nécessités du ramassage d'objets avec le préhenseur en question.

Finalement, au chapitre 5, le design du chapitre 4 est revu pour optimiser la force de serrage, la taille de la pince et la géométrie des doigts selon les conclusions tirées du design précédent. Le design propose un nouveau mécanisme de transmission jugé moins rigide et donc plus sécuritaire lorsque l'interaction avec des humains est envisagée. L'utilisation d'un capteur intégré est proposée pour que le préhenseur soit une solution de préhension complète et pouvant directement être utilisée par un bras robotique standard. Enfin, les trajectoires de préhension pour utiliser la pince sont présentées ainsi que le design des pièces, qui sont soit conçues pour être usinables facilement, soit directement achetées, car leur design obéit aux tailles de pièces standards offertes.

Chapitre 1

Modèle de la méthode proposée

1.1 Introduction

La recherche sur la préhension, ou plutôt l'étude analytique de la préhension, est un sujet sur lequel se penchent beaucoup de chercheurs. Certaines de ces recherches étudient les géométries de doigts et comment distribuer les forces aux points de contact d'un objet de manière à maintenir l'équilibre statique. Ces études considèrent généralement que le préhenseur possède des doigts mécaniques, c'est-à-dire que les contacts sont des surfaces rigides (Nguyen, 1986; Li *et al.*, 2003; Birglen *et al.*, 2007; Roa et Suárez, 2009). Il a été démontré que, dans le cas spécial où les forces de friction sont présumées nulles, les prises obtenues étaient plus stables lors des tests que celles prévues analytiquement. En effet, celles-ci, ne nécessitant pas de forces de friction pour atteindre l'équilibre, se voient capables de mieux résister aux perturbations ou aux variations de forces dues aux forces de friction étant disponibles pour contrer certaines variations inattendues des forces (Reuleaux et Ferguson, 2012; Rimon et Burdick, 1998).

Des préhenseurs à actionnement électro-statique (Shintake *et al.*, 2016) tentent de générer des forces de friction aux points de contact d'un éventail d'objets autres que ceux faits de métaux. Ces derniers sont cependant mal adaptés aux objets sensibles aux champs électriques, comme les composants électroniques.

Une importante distinction est faite entre les études qui supposent l'absence d'occlusions et qui considèrent seulement la pose finale de l'objet (Miller *et al.*, 2003; Birglen *et al.*, 2007) et celles qui prennent en compte les occlusions dans l'environnement. Une solution triviale à la prise d'objets dans des environnements encombrés est de simplement trouver une trajectoire à travers les obstacles pour se rendre à l'objet en question (Berenson *et al.*, 2007). Cependant, les occlusions apparaissent parfois comme une position non souhaitable de l'objet, ce qui rend la prise impossible. En effet, même si une pose finale est souhaitable en raison de sa stabilité, les occlusions dans l'environnement peuvent empêcher l'approche de l'objet dans une pose nécessaire et ainsi rendre impossible la prise.

Certaines solutions sont moins sensibles aux occlusions des objets, car elles ne nécessitent pas de points de contact en opposition comme les préhenseurs mécaniques. Une de ces solutions consiste en des préhenseurs utilisant la succion ou l'aspiration (Kolluru *et al.*, 1998; Yamaguchi *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2018), qui sont simples à utiliser, mais mal adaptés aux objets munis de surfaces poreuses. Le préhenseur nommé *Universal Gripper*, pour sa part, utilise des pressions positives et négatives à l'intérieur d'une membrane contenant un matériel granuleux pour s'adapter à l'objet et ainsi appliquer une pression distribuée autour de celui-ci. Ces deux implémentations, bien que faciles d'utilisation (c'est-à-dire, approche, activation, mouvement et désactivation du préhenseur), sont mal adaptées aux changements de tâches. Un exemple en industrie serait de tenter de prendre des tissus rugueux en utilisant la succion. Certes, il est possible de soulever de objets poreux avec un débit d'air assez grand, mais au détriment de l'efficacité énergétique du système. Des solutions plus polyvalentes, telles que des préhenseurs solides à deux doigts, sont de plus en plus requises dans le but de pouvoir prendre à la fois des petits objets fragiles et des objets plus gros et plus lourds, qu'ils soient lisses ou poreux.

Lorsque vient le temps de formuler des hypothèses à propos d'une prise, une question qui doit être soulevée dans presque toutes les études de préhension est le nombre de doigts nécessaires. L'étude de Ceccarelli (2013) mentionne que selon des études statiques, de 60% à 70% des prises sont atteignables avec seulement deux doigts, ce qui suggère que des préhenseurs beaucoup plus simples que ceux imitant la main humaine (préhenseurs anthropomorphes) devraient être considérés dans des designs promouvant la simplicité et la minimisation du nombre de pièces du préhenseur.

Le présent chapitre se penche sur un cas spécial de la préhension que la plupart des préhenseurs simples ne peuvent solutionner et qui demeure problématique pour la plupart des préhenseurs dextres. Ce problème consiste en la prise d'objets minces reposant sur des surfaces dures par des moyens de préhension mécaniques. Pour résoudre le problème, la prise objective devant être obtenue à la suite de la manipulation doit d'abord être sélectionnée.

Un champ d'études de la préhension est la catégorisation des prises, que l'on appelle la taxonomie des prises (Cutkosky, 1989; Feix *et al.*, 2016). D'après la taxonomie la plus communément utilisée, les prises sont fréquemment catégorisées en trois types : la prise de force, la prise de précision et la prise pincée latérale (Iberall, 1987). La prise de force consiste en une prise où les points de contact entre les doigts et l'objet sont en opposition avec les points de contact entre la paume et l'objet. La prise de force est aussi une prise maximisant la taille et le poids des objets pouvant être saisis. La prise de précision consiste en deux points de contacts en opposition au bout des doigts. La prise de précision maximise la dextérité de la prise, ne nécessitant que deux points de contact, donc contraignant peu l'objet (Cutkosky, 1989). Finalement, la prise pincée latérale consiste en deux surfaces de contact en opposition au bout des doigts. La prise latérale est aussi une des prises les plus communément utilisées par l'humain pour tenir des objets (Kosuge *et al.*, 2008). La prise pincée latérale utilisant des surfaces de contact

plutôt que des points de contact, elle rend la manipulation d'un objet plus difficile, mais plus stable que la prise de précision (Odhner *et al.*, 2012; Ciocarlie *et al.*, 2014). C'est donc dire que la prise latérale constitue un compromis entre la prise de force et la prise de précision.

Les trois prises requérant des points de contact en opposition, les prises les moins contraignantes sont sélectionnées pour être étudiées. L'utilisation des prises de précision et latérale pour prendre les objets sont des bons candidats, car elles nécessitent moins de points de contact autour d'un objet. Ainsi, une méthode dégageant partiellement des faces en opposition d'un objet pourra potentiellement réussir à le saisir.

Des travaux utilisent la prise de précision pour saisir des petits objets reposant sur des surfaces dures (Odhner *et al.*, 2012). Pour ce faire, le bout des doigts est utilisé pour exercer une pression en position de prise de précision de chaque côté de l'objet et renverser ce dernier vers une des surfaces d'une phalange distale, comme le ferait un humain. Cette méthode, bien que prouvée capable de réussir la prise, est contrainte d'être effectuée sur de petits objets légers et introduit une phase où l'objet n'est pas contraint complètement, créant ainsi un potentiel pour l'objet d'être éjecté ou échappé. D'autres travaux utilisent un préhenseur sous-actionné à deux doigts et se servent de sa compliance pour amorcer un contact entre les doigts du préhenseur et la surface de chaque côté de l'objet (Ciocarlie *et al.*, 2014). Il applique par la suite une pression de chaque côté de l'objet et les propriétés du mécanisme vont transformer la prise en une prise latérale lorsque le préhenseur va s'éloigner de la surface. Cette méthode est moins susceptible d'éjecter l'objet, car celui-ci ne bouge pas jusqu'à ce que la prise finale soit atteinte. Elle converge cependant toujours vers une prise où l'objet est saisi à l'extrême bout des doigts. Les deux méthodes requièrent également du préhenseur une ouverture de la prise plus grande que la taille de l'objet.

La prise latérale offrant plus de stabilité que la prise de précision et l'objectif de ces travaux étant de saisir les objets et de les maintenir de manière à ce qu'ils ne glissent pas hors de la prise lors de mouvements, l'obtention d'une prise latérale d'objets en présence de l'occlusion d'une surface est donc étudiée.

Dans le but de saisir des objets en présence d'occlusions, certaines recherches proposent de tirer avantage des propriétés de l'environnement comme la surface rigide sur laquelle l'objet repose ou les rebords de cette surface afin de pouvoir saisir ce dernier (Eppner *et al.*, 2015; Kazemi *et al.*, 2014; Amend *et al.*, 2012). Étudier les relations entre le préhenseur et l'environnement lors de la prise d'objets en présence d'occlusions et la manière de repositionner cet objet pour effectuer une tâche mène au concept de dextérité extrinsèque. La dextérité extrinsèque est l'utilisation de ressources extrinsèques au préhenseur pour effectuer une tâche ou repositionner l'objet par rapport au préhenseur. Ces ressources peuvent être la gravité, une surface dure pour déposer et reprendre l'objet ou les propriétés dynamiques du bras robotique pour lancer et reprendre l'objet dans une pose différente (Dafle *et al.*, 2014). Un exemple trivial de la

dextérité extrinsèque est d'utiliser les doigts pour pousser l'objet au bord de la surface et ainsi dégager un côté de l'objet, qui pourra être saisi directement par prise latérale (Kappler *et al.*, 2011). Cette méthode se base cependant sur l'hypothèse que le dommage potentiel à l'objet est négligeable et qu'un rebord accessible est présent. Une étude (Kosuge *et al.*, 2008) propose un arrangement à un doigt avec une barre rigide en opposition pour tirer avantage des objets dont un rebord est surélevé. Cette méthode est intéressante, car elle tire avantage de l'enveloppe géométrique du doigt et de la barre pour saisir l'objet. Cependant, elle est mal adaptée aux objets dont les rebords ne sont pas surélevés.

Une méthode proposée qui tire également avantage de la surface, mais qui se sert plus du doigt, donc moins dépendante des propriétés de l'environnement, serait l'utilisation d'un des doigts comme spatule pour s'insérer sous l'objet et être en position de soulever et de transporter ce dernier (Xu *et al.*, 2009). Le problème avec cette méthode est que le pouce utilisé comme une spatule ne peut s'insérer sous l'objet sans l'action de forces externes pour maintenir l'objet en place. Cette force de réaction peut être la friction entre l'objet et la surface. Toutefois, cette stratégie échoue, car la friction est trop basse compte tenu des surfaces lisses et des objets légers. La figure 1.1 montre deux cas où un objet rigide et un objet flexible sont impossibles à saisir par la méthode d'un doigt utilisé comme spatule. Pour remédier à ce problème,

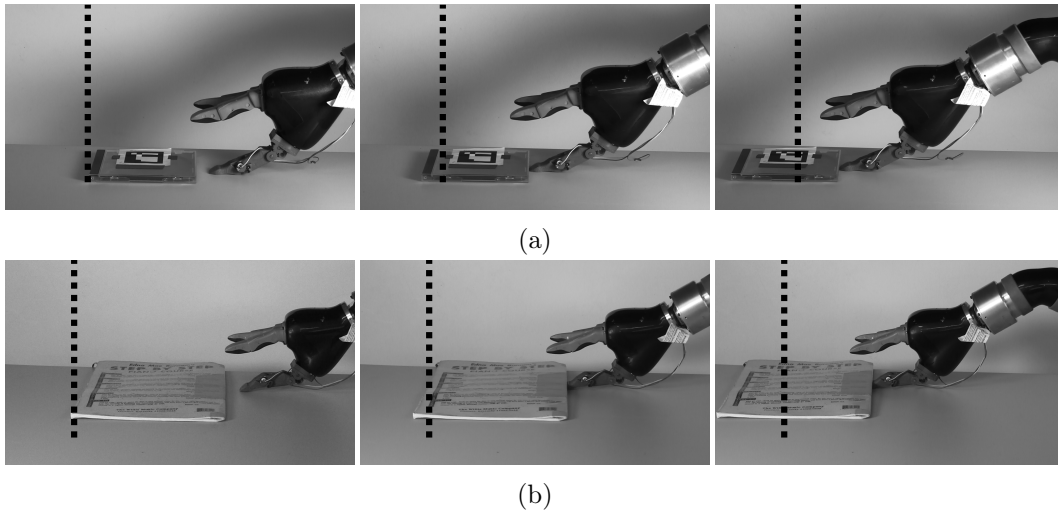


FIGURE 1.1 – Méthode d'un doigt utilisé comme une spatule pour un objet rigide (a) et un objet flexible (b). La méthode échoue à s'insérer entre la surface et l'objet dans les deux cas.

(Xu *et al.*, 2009) proposent d'ajouter un doigt dont le mouvement est perpendiculaire à la surface et dont l'objectif est d'entourer l'objet et de le tirer sur le doigt-spatule. Cette solution nécessite que le doigt-spatule ait une surface assez grande pour supporter les objets ou au minimum le centre de gravité pour garder l'objet en équilibre lors du transport. Le système pourrait être muni d'un troisième doigt, en opposition au doigt-spatule, ce qui permettrait de tenir les objets avec une prise robuste, mais nécessiterait par le fait même un préhenseur à trois doigts, dont un ne servirait que pour les objets au sol. Une autre option consiste en

l'utilisation des trajectoires d'approche très dynamiques pour tirer avantage de l'inertie des objets pour les manipuler (Kazemi *et al.*, 2014; Dogar et Srinivasa, 2010; Daffe *et al.*, 2014; Sintov et Shapiro, 2018). Dans le cas d'objets reposant sur des surfaces, approcher les objets assez rapidement en faisant l'hypothèse que l'inertie de ces derniers va les maintenir en place est une approche dynamique valide. Cependant, dans le cas où le pouce ne peut maintenir le contact avec la surface, il est possible que l'objet soit éjecté ou même endommagé. Dans des situations où des humains travaillent avec les robots, ce scénario est donc jugé plus dangereux que les méthodes quasi statiques.

Ce chapitre propose d'étudier la prise d'objets reposant sur des surfaces rigides en les manipulant dans le but d'obtenir une prise latérale. Les manipulations proposées excluent la possibilité d'amener l'objet au bord de la surface en le poussant ou en le soulevant avec des surfaces sous tension électrique vu le risque de dommages. De plus, la méthode vise à tirer avantage de l'environnement de manière à prendre des objets qu'il serait impossible de prendre autrement avec un préhenseur mécanique, ce qui est un scénario plus que commun avec les objets de tous les jours et en milieu industriel.

Ce chapitre propose une méthode, ici nommée le ramassage (le *scooping* dans Babin et Gosselin (2018) et Babin *et al.* (2019)), dont le modèle est d'abord présenté et dont les paramètres sont étudiés lorsque de petits objets, dont la largeur est plus petite que celle de la pince, sont manipulés. Par la suite, la méthode est appliquée à des objets de taille moyenne, puis la méthode modifiée est présentée et l'influence des paramètres de la méthode est à nouveau étudiée. Un survol de l'application de la méthode aux objets flexibles est présenté et des conclusions sont tirées quant aux futures étapes de conception d'un préhenseur optimisé pour mettre en oeuvre la méthode proposée.

1.2 Le ramassage d'objets de petite taille

Dans cette section, on présente le modèle statique du ramassage d'objets, dont le but est de passer de l'état initial, présenté à la figure 1.2a, à l'état final, présenté à la figure 1.2b. Le

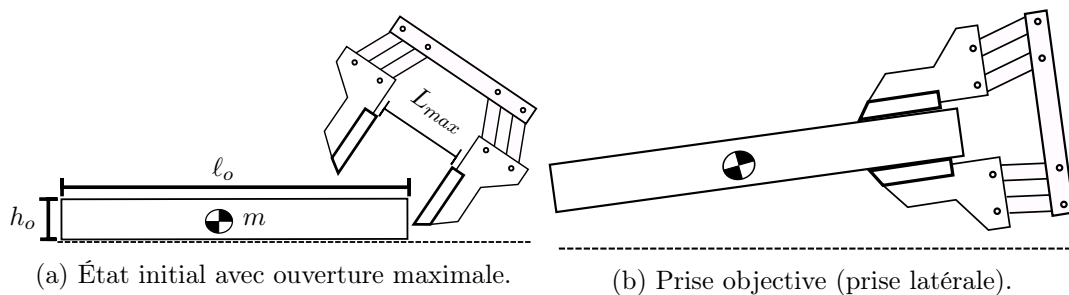


FIGURE 1.2 – États initial et final de la préhension d'un objet reposant sur une surface dure.

cas considère des objets de petite taille, donc des objets dont la longueur l_o est plus petite

que la distance d'ouverture du préhenseur L_{max} . Ces variables sont montrées à la figure 1.2. La méthode de manipulation proposée utilise les deux phalanges distales en opposition d'un préhenseur afin de créer d'une part un mur (doigt) d'un côté de l'objet et, d'autre part, une spatule (pouce) pour s'insérer sous celui-ci. Cette méthode est présentée à la figure 1.3, dans le plan, et les variables s'y rattachant y sont présentées. La figure 1.3 montre la primitive d'un

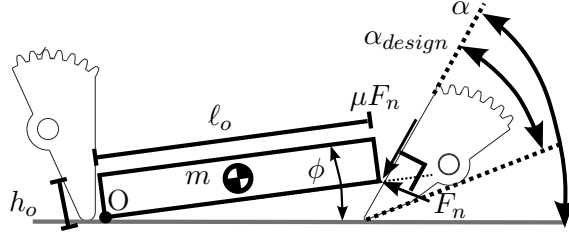


FIGURE 1.3 – La méthode du ramassage d'objets dans le plan à la suite de l'insertion du pouce.

doigt (phalange avec le bout arrondi) qui bloque l'objet d'un côté et du pouce qui s'insère en opposition au doigt. Il est supposé que l'objet pivote autour du point O durant la manipulation. Une fois la phalange distale du pouce insérée sous l'objet, la méthode est dite accomplie, car le doigt n'a qu'à se repositionner au-dessus de l'objet pour obtenir une prise latérale.

1.2.1 Modèle et analyse du ramassage de petits objets

Dans le modèle proposé, l'angle α est l'angle que forme le pouce avec la surface sur laquelle repose l'objet. La variable h_o représente la hauteur de l'objet ; ℓ_o la longueur de l'objet ; m la masse ; F_n la force de réaction normale à la surface du pouce ; et μF_n la force de friction maximale entre l'objet et la surface du pouce. Ce modèle suppose que la force de friction est proportionnelle à F_n . L'angle ϕ est l'orientation de l'objet à mesure que le pouce est inséré sous l'objet relativement à la surface sur laquelle il repose. Finalement, α_{design} est la valeur minimale que peut prendre α , car cela représente le cas où le dos du pouce est en contact avec la surface, donc le cas précis $\alpha = \alpha_{design}$. Dans le but d'étudier l'influence des paramètres sur les forces générées lors de la prise, le diagramme des corps libres (DCL) de la prise est présenté à la figure 1.4 avec g , l'accélération due à la gravité. La somme des moments au point O est

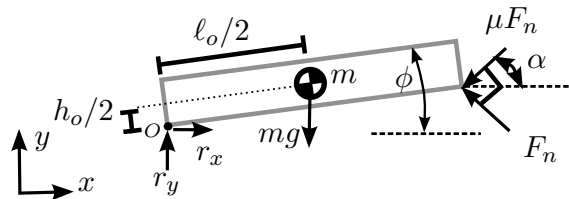


FIGURE 1.4 – Diagramme des corps libres de la méthode du ramassage de petits objets.

obtenue avec l'aide de la figure 1.4 en supposant que la prise est effectuée de manière quasi

statique, puis le terme F_n est mis en évidence pour obtenir

$$F_n = \frac{mg(\cos \phi - \frac{h_o}{\ell_o} \sin \phi)}{2(\cos(\alpha - \phi) - \mu \sin(\alpha - \phi))}. \quad (1.1)$$

Dans le but d'étudier ce résultat, il est important de mentionner que les actionneurs utilisés lors du design de préhenseurs ont des limites en ce qui a trait aux efforts maximaux produits. Par conséquent, s'il est possible de minimiser les forces de réaction transmises aux actionneurs, une plus grande panoplie d'objets pourront être saisis. Dans l'optique de ce chapitre, cela veut dire que le pouce pourra être inséré avec succès sous une plus grande diversité d'objets. Il en découle donc qu'étudier l'influence des paramètres qui minimisent F_n dans l'équation (1.1) minimisera les forces de réaction sur le préhenseur. Dans le cadre de ces travaux, il est supposé que les propriétés de l'objet m , h_o et ℓ_o sont connues, car on veut étudier les forces appliquées lors de la manipulation. L'étude se penche d'abord sur l'état initial ou au repos de l'objet, qui est lorsque $\phi = 0$. Il est aussi supposé que les objets ne peuvent pas être pris directement par une prise en pincée par le dessus, car les objets sont trop minces, donc h_o est très petit. Bien que le numérateur de l'équation (1.1) ne contienne que les variables liées aux propriétés de l'objet, on remarque tout de même que pendant l'insertion du pouce, c'est-à-dire lorsque ϕ augmente en raison de l'insertion, des valeurs plus grandes de $\frac{h_o}{\ell_o}$ font en sorte que le numérateur décroît plus rapidement. On en conclut que si le choix du côté de l'objet se présente, prendre l'objet par le côté correspondant à la plus petite valeur de ℓ_o réduira les forces de réaction sur le pouce lors de la manipulation. En pratique, lors de la prise avec la méthode proposée, on a initialement $\phi = 0$, et cet angle augmente ensuite à mesure que la prise s'opère. Le numérateur de l'équation (1.1) diminue jusqu'à ce que l'objet soit à un angle $\phi = \tan^{-1}(-\frac{h_o}{\ell_o}) + \pi$, qui est un équilibre instable où l'objet est presque tourné à 90 degrés pour les faibles valeurs de ℓ_o . Le numérateur ayant les propriétés mentionnées précédemment, ce dernier décroît de manière monotone à mesure que ϕ croît à partir de zéro. Un raisonnement similaire est fait pour le dénominateur de l'équation (1.1), qui croît jusqu'à ce qu'une valeur de $\phi = \tan^{-1}(-\mu)$ soit atteinte. Avec une valeur de $\mu = 0,4$, qui correspond au coefficient de friction des matériaux ABS en contact avec de l'acier (Committee, 1992), cette dernière valeur est de 111,8 °. Comme le pouce se positionne de manière à minimiser α et que pour une insertion réussie, l'angle α est bien inférieur à 111,8 degrés, les forces de réaction lors du ramassage de petits objets sont maximales lorsque l'objet est à plat et décroissent à mesure que le pouce est inséré sous l'objet. Par conséquent, la prise est étudiée à l'insertion initiale, c'est-à-dire $\phi = 0$ et, en supposant que cette insertion initiale peut être réalisée, la prise complète sera considérée comme réussie.

L'étude de cette section conclut que pour ramasser de petits objets, prendre ces derniers avec la méthode proposée par le côté avec la plus grande valeur de $\frac{h_o}{\ell_o}$ et sélectionner des matériaux avec lesquels la friction sera minimale entre le pouce et l'objet donneront les meilleurs résultats. De plus, le design minimisant α atteindra de meilleurs résultats lors de l'insertion.

1.3 Le ramassage d'objets de grande taille

Comme dans la section précédente, cette section se concentre sur la prise d'objets plats ne pouvant être pris directement, à la différence que ceux-ci sont de grande taille. Ces objets sont minces et le plus court côté de l'objet est plus long que la distance d'ouverture maximale du préhenseur L_{max} . Ils ne peuvent donc être ramassés avec la méthode de la section 1.2.

Certains des objets sont, par exemple, une feuille de papier, un livre ou un boîtier de disque. Les objets de grande taille occupent donc une grande partie des objets rencontrés dans la vie de tous les jours et dans les milieux industriels, et sont par conséquent le motif de cette section.

La méthode proposée vise à généraliser la méthode de la section 1.2 de manière à faire passer un objet de masse (m), de hauteur (h_o), de longueur (l_o) et un préhenseur d'un état initial vers un état final, comme présenté à la figure 1.2. Comme à la section 1.2, les conditions qui favorisent cette transition sont étudiées lorsque l'objet est supposé rigide.

La figure 1.5 présente l'interaction entre l'objet et le préhenseur dans le but d'obtenir une prise pincée parallèle pour des objets de grande taille. La méthode considère que le doigt ne

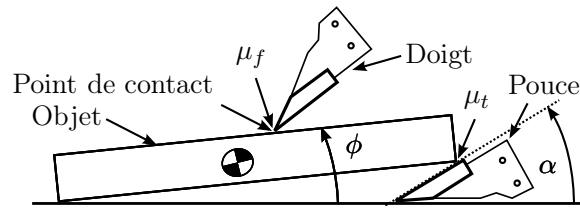


FIGURE 1.5 – Méthode de ramassage d'objets de grande taille.

peut faire contact avec la surface, donc le contact a lieu sur le dessus de l'objet alors que le pouce est inséré entre l'objet et la surface par le côté comme dans la section précédente.

1.3.1 Modèle et analyse du ramassage de grands objets

La figure 1.5 montre comment la méthode proposée dans cette section applique une force sur le dessus de l'objet pour le maintenir en place pendant que le pouce est inséré. Comme précédemment, ϕ est l'orientation de l'objet par rapport à la surface ; α l'angle d'attaque du pouce par rapport à la surface ; μ_t le coefficient de friction entre la surface de contact du pouce et l'objet ; et μ_f le coefficient de friction entre le bout du doigt et l'objet. La figure 1.6 montre le diagramme des corps libres (DCL) de la méthode présentée à la figure 1.5. La figure présente la force de friction F_f résultante de la pression appliquée par le doigt F à une distance k du rebord d'insertion. La relation entre ces deux forces est $F_f = \mu_f F$. Il en va de même pour les forces de réaction entre le pouce et l'objet f_t et $\mu_t f_t$, où la relation est appliquée directement dans le DCL. Dans le but d'étudier le pire des scénarios, on considère encore une fois que

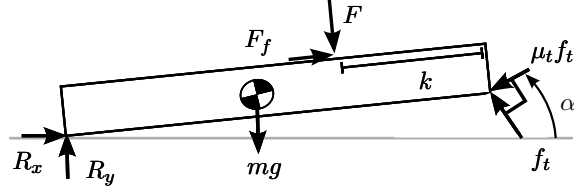


FIGURE 1.6 – Diagramme des corps libres (DCL) du ramassage d’objets de taille moyenne.

la friction entre l’objet et la surface sur laquelle il repose est nulle, c’est-à-dire, $R_x = 0$, car cette dernière aurait contribué à maintenir l’objet en place. Cela implique que dans le modèle proposé à la figure 1.6, les seules forces pouvant contrebalancer les composantes horizontales de $\mu_f f_t$ et f_t sont les composantes horizontales de F et F_f .

La solution proposée étudie donc les forces F et F_f nécessaires pour obtenir l’équilibre statique et stipule que la prise ne sera possible que si la force nette appliquée par le doigt (somme vectorielle de F et F_f) est contenue dans le cône de friction, c’est-à-dire

$$-\mu_f F \leq F_f \leq \mu_f F, \quad (1.2)$$

où F doit être plus grand que zéro. Si l’on considère qu’en pratique le coefficient de friction est inconnu, le DCL de la figure 1.6 est utilisé pour obtenir l’expression de F_f en fonction de la pression F et ainsi étudier les paramètres qui valident l’équation (1.2). La force de friction F_f nécessaire pour maintenir l’objet en place en fonction de la pression F est

$$F_f = aF + b, \quad (1.3)$$

où

$$a = \frac{s_\phi(c_{(\alpha-\phi)} - \mu_t s_{\alpha-\phi}) - (1 - \frac{k}{l_o})(\mu_t c_\alpha + s_\alpha)}{\frac{h_o}{l_o}(\mu_t c_\alpha + s_\alpha) - c_\phi(c_{(\alpha-\phi)} - \mu_t s_{(\alpha-\phi)})}, \quad (1.4)$$

$$b = \frac{mg}{2} \frac{(c_\phi - \frac{h_o}{l_o} s_\phi)(\mu_t c_\alpha + s_\alpha)}{c_\phi(c_{(\alpha-\phi)} - \mu_t s_{(\alpha-\phi)}) - \frac{h_o}{l_o}(\mu_t c_\alpha + s_\alpha)}, \quad (1.5)$$

avec $c_\phi = \cos \phi$, $s_\phi = \sin \phi$, $c_{(\alpha-\phi)} = \cos(\alpha - \phi)$ et $s_{(\alpha-\phi)} = \sin(\alpha - \phi)$. Une représentation graphique de la région définie par les inégalités des équations (1.2) et (1.3) se trouve à la figure 1.7.

L’équation (1.3) représente une droite avec une pente a et une ordonnée à l’origine b . Le cône de friction est la région ombrée contenue entre les deux droites miroirs. Dans ce système d’équations, la seule variable est la force F , qui est la pression exercée sur l’objet qui détermine où sur la droite se situe le point d’équilibre. Si le point est contenu dans le cône de friction, le système reste en équilibre. Sinon, l’équilibre est rompu et l’objet glisse, empêchant le pouce de s’insérer sous l’objet.

En comparaison, si la valeur de la pente a de l’équation (1.3) satisfait à $a \geq \mu_f$, il est impossible que le système soit en équilibre à l’intérieur du cône de friction. Effectivement, la droite définie

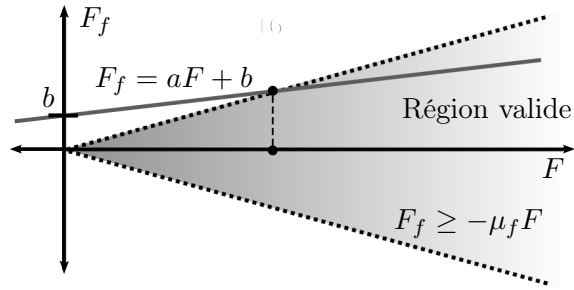


FIGURE 1.7 – Cône de friction statique et équation de la force de friction nécessaire pour maintenir l’objet en place en fonction de la pression sur l’objet.

par l’équation (1.3) sera parallèle à la partie supérieure du cône de friction ou s’en éloignera. En prenant la condition d’égalité de droit dans l’inéquation (1.2) et en la substituant dans l’équation (1.3), on obtient l’intersection entre la droite décrite par l’équation (1.3) et la limite du cône décrite par l’équation (1.2). En isolant la variable F_f dans cette équation, on obtient

$$F = \frac{b}{(\mu_f - a)}. \quad (1.6)$$

Cette relation montre la force minimale requise F pour empêcher l’objet de glisser hors de la prise pendant la manipulation, donc pour garder l’objet en équilibre statique. Si aucune force n’est appliquée, soit $F = 0$, l’insertion du pouce est impossible, ce qui équivaut à tenter d’insérer une spatule sous l’objet sans intervention d’une force externe. Il en résulte donc que réduire le paramètre a est important pour entrer dans le cône de friction plus rapidement. De même, on peut voir à la figure 1.7 et à l’équation (1.6) que la force minimale requise F pour obtenir l’équilibre statique est proportionnelle au paramètre b : donc minimiser b est souhaitable.

Le fait que b soit proportionnel à mg dans l’équation (1.5) suggère que plus les objets sont lourds, plus il sera difficile d’appliquer la méthode pour un préhenseur donné, car les pressions requises seront plus élevées. Cependant, le modèle supposant que $R_x = 0$ et les objets légers ne générant que peu de friction en raison de leur poids, ceux-ci obéiront au modèle tandis que, pour les objets lourds, en réalité une grande friction sera présente entre l’objet et la surface sur laquelle il repose rendant la prise plus facile. Le modèle considère donc le pire des cas, donc $R_x = 0$.

Influence des paramètres

La section précédente présente l’influence des paramètres sur a et b . Cette section étudie l’influence des paramètres physiques de la prise et de l’objet sur les paramètres a et b . Dans le but de simplifier l’étude, α est supposé être 0,5445 radians (31,2 degrés), ce qui correspond à la valeur utilisée pour la démonstration de faisabilité du chapitre 3. À la figure 1.8 est montré

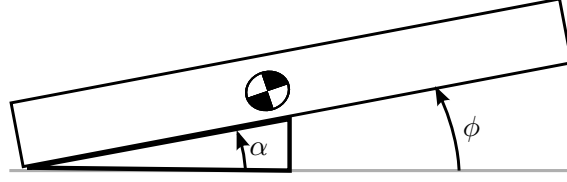


FIGURE 1.8 – Cas limite de l’insertion où $\phi = \alpha$.

qu’en pratique, la valeur maximale de l’orientation ϕ est limitée à α . La relation $0 \leq \phi \leq \alpha$ est donc utilisée pour étudier l’influence des paramètres.

Comme à la section 1.2, le coefficient de friction proposé entre le pouce et l’objet est $\mu_t = 0,4$ (Committee, 1992), c’est-à-dire celui du matériel ABS en contact avec de l’acier. Pour ce qui est de la masse maximale des objets étudiés, on utilise $m = 0,1667$ kg, ce qui correspond à la masse maximale des objets saisis dans le chapitre 3. L’observation faite ci-haut, c’est-à-dire que b est proportionnel à mg (voir l’équation (1.5)) et que minimiser b est souhaitable, mène à choisir la valeur de m la plus grande des objets étudiés, ce qui revient à étudier le pire des cas. Le reste des paramètres contenus dans les équations (1.4) et (1.5) sont la distance de contact du doigt k , la hauteur de l’objet h_o et la longueur de l’objet l_o . Dans le but d’étudier leur impact, on trace a et b en fonction de l’orientation de l’objet ϕ aux figures 1.9 et 1.10 pour différentes valeurs des ratios h_o/l_o et k/l_o . Dans les figures 1.9 et 1.10, a et b diminuent à

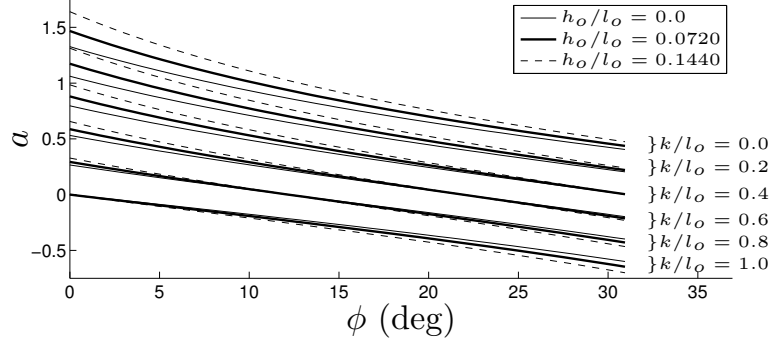


FIGURE 1.9 – Le coefficient a en fonction de l’orientation de l’objet ϕ pour différentes valeurs des ratios k/l_o et h_o/l_o .

mesure que le pouce est inséré (l’orientation ϕ augmente), ce qui suggère que la manipulation est la plus difficile à effectuer au moment de l’insertion initiale, c’est-à-dire à $\phi = 0$. Cette conclusion à propos de l’angle ϕ est la même que celle de la section 1.2 et sera celle utilisée pour le reste de l’étude.

L’impact des paramètres k , l_o , h_o et α influencera grandement le design des préhenseurs. En effet, k et α sont directement liés au design du préhenseur, tandis que l_o et h_o font partie des propriétés de l’objet et influencent l’approche et la manipulation de l’objet par le préhenseur, et non le design du préhenseur lui-même. Aux figures 1.11 et 1.12 sont tracés les paramètres

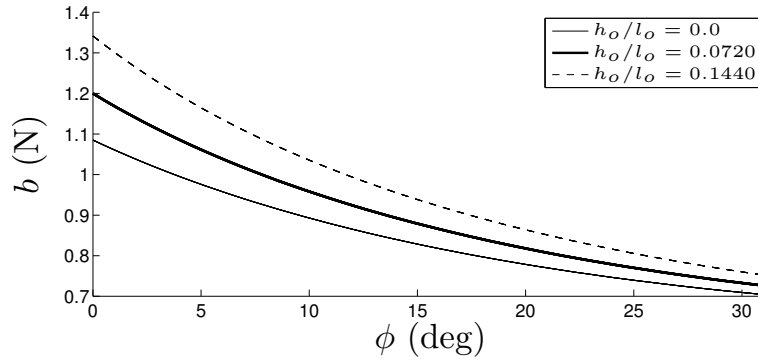


FIGURE 1.10 – Le coefficient b en fonction de l’orientation de l’objet ϕ pour différentes valeurs des ratios k/l_o et h_o/l_o . On note que le coefficient b est indépendant de k .

a et b en fonction de α pour différentes combinaisons des ratios k/l_o et h_o/l_o lorsque $\phi = 0$.

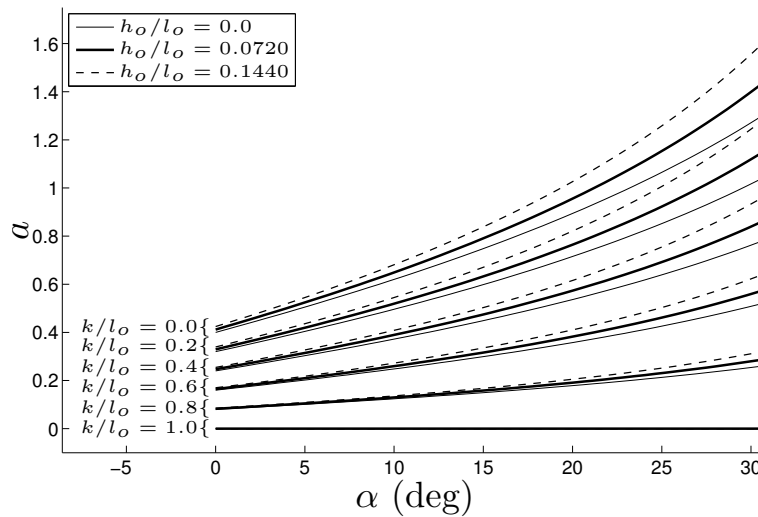


FIGURE 1.11 – Le paramètre a en fonction de α avec $\phi = 0$, pour différentes valeurs de k/l_o et h_o/l_o .

L’influence de h_o/l_o est d’abord étudiée. En observant les figures 1.11 et 1.12, il est possible de constater que réduire le ratio h_o/l_o , par exemple en ramassant l’objet par le côté le plus long, a pour effet de réduire les valeurs des paramètres a et b . Cependant, lorsque vient le temps d’étudier l’influence de k/l_o sur a , ce dernier suggère de maximiser le ratio, donc prendre l’objet par le côté le plus court et maximiser la valeur de k . On observe à la figures 1.11 que minimiser l_o a plus d’influence sur a que de le maximiser, donc le paramètre a ayant été jugé critique, minimiser l_o est choisi ce qui dicte de prendre les objets par le côté le plus court.

Dans les figures 1.11 et 1.12, il est important de réaliser que réduire le paramètre α se traduit par un pouce avec un angle d’attaque plus aiguë. À partir de ce point, la variable α est ajustée à 31,2 degrés pour permettre de visualiser de manière continue l’influence des paramètres a et b . Les résultats sont présentés aux figures 1.13 et 1.14.

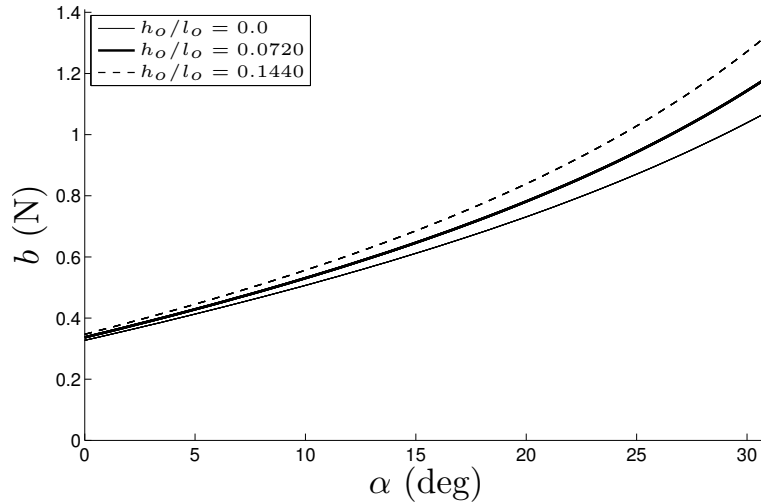


FIGURE 1.12 – Le paramètre b en fonction de α avec $\phi = 0$, pour différentes valeurs de h_o/l_o .

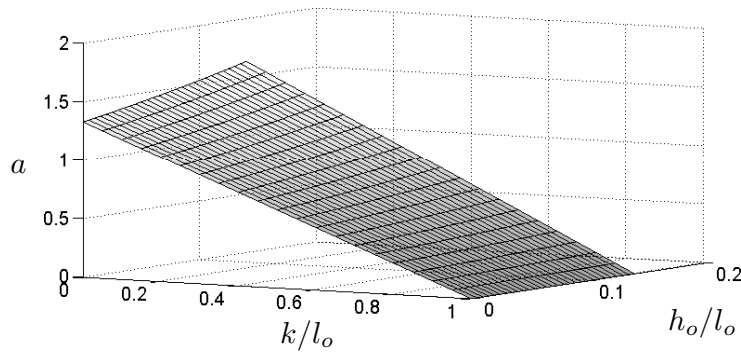


FIGURE 1.13 – Le paramètre a en fonction de k/l_o et h_o/l_o au moment de l'insertion initiale ($\phi = 0$ degré).

1.3.2 Le cas spécial des objets flexibles

Jusqu'à présent, les modèles ont considéré les objets de nature rigide seulement. Les objets de tous les jours varient cependant du très rigide, comme un étui de disque compact, au très flexible, comme une feuille de papier. Cette section survole le cas des objets flexibles et tire des conclusions très rudimentaires sur l'impact de la flexibilité sur la méthode du ramassage.

Le modèle présenté pour étudier le cas des objets flexibles est présenté à la figure 1.15. Le modèle considère que sous l'effet de la force F , l'objet va se déformer vers le bas et les forces F et F_f vont s'incliner d'un angle ϕ_{flex} à cause de la flexion, comme montré à la figure 1.15. Comme dans la section précédente, l'objectif est de déterminer les paramètres influençant la force de friction nécessaire pour maintenir l'objet en place et comment minimiser les réactions sur le pouce. Encore une fois, en supposant que la force de réaction R_x est nulle, on considère qu'aucune friction entre l'objet et la surface n'est présente. Avec la somme des forces selon

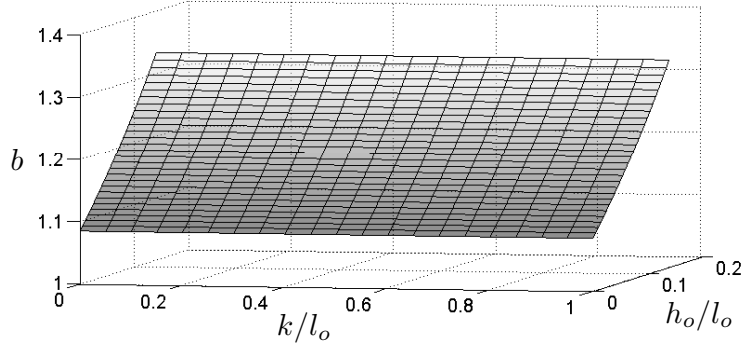


FIGURE 1.14 – Le paramètre b en fonction de k/l_o et h_o/l_o au moment de l'insertion initiale ($\phi = 0$ degré).

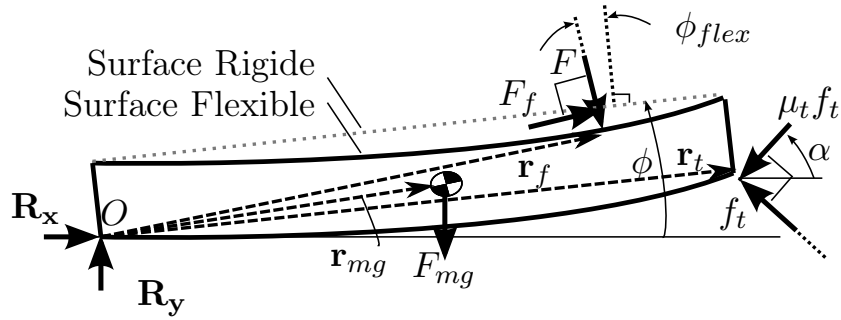


FIGURE 1.15 – Diagramme des corps libres (DCL) soumis à une force F pendant la prise semi-englobée.

l'axe- x et la somme des moments autour du point O , F_f est isolé pour obtenir

$$F_f = a_f F + b_f = \frac{c_1 c_5 - c_3 c_7}{c_2 c_5 - c_3 c_6} F + \frac{c_3 c_4}{c_2 c_5 - c_3 c_6} \quad (1.7)$$

qui est semblable à l'équation (1.3), où

$$c_1 = (\mathbf{Q}_\phi \mathbf{Q}_{\phi_{flex}} \mathbf{e}_y)^T \mathbf{e}_x, \quad (1.8)$$

$$c_2 = (\mathbf{Q}_\phi \mathbf{Q}_{\phi_{flex}} \mathbf{e}_x)^T \mathbf{e}_x, \quad (1.9)$$

$$c_3 = (\mathbf{Q}_\alpha \mathbf{e}_\mu)^T \mathbf{e}_x, \quad (1.10)$$

$$c_4 = ((\mathbf{Q}_\phi \mathbf{r}_{mg})^T \mathbf{E} \mathbf{F}_{mg})^T \mathbf{e}_z, \quad (1.11)$$

$$c_5 = ((\mathbf{Q}_\phi \mathbf{r}_t)^T \mathbf{E} \mathbf{Q}_\alpha \mathbf{e}_\mu)^T \mathbf{e}_z, \quad (1.12)$$

$$c_6 = ((\mathbf{Q}_\phi \mathbf{r}_f)^T \mathbf{E} \mathbf{Q}_\phi \mathbf{Q}_{\phi_{flex}} \mathbf{e}_x)^T \mathbf{e}_z, \quad (1.13)$$

$$c_7 = ((\mathbf{Q}_\phi \mathbf{r}_f)^T \mathbf{E} \mathbf{Q}_\phi \mathbf{Q}_{\phi_{flex}} \mathbf{e}_y)^T \mathbf{e}_z, \quad (1.14)$$

où

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.15)$$

$$\mathbf{Q}_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (1.16)$$

$$\mathbf{Q}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1.17)$$

et

$$\mathbf{Q}_{\phi_{flex}} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{flex} & \sin \phi_{flex} \\ -\sin \phi_{flex} & \cos \phi_{flex} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

sont des matrices de rotation, respectivement des angles ϕ , α et ϕ_{flex} selon l'axe- z , puis \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z sont des vecteurs unitaires selon, respectivement, les axes x , y et z , puis $\mathbf{F}_{mg} = [0 \quad -mg]^T$ et, finalement, $\mathbf{e}_\mu = [-\mu_t \quad 1]^T$.

Le modèle flexible obtenu à l'équation (1.7) est presque le même que celui de l'équation (1.3) du modèle original, à l'exception d'être exprimé sous forme vectorielle et de considérer une rotation de certains vecteurs d'un angle ϕ_{flex} . Lorsque l'angle ϕ_{flex} est nul, l'équation (1.3) et l'équation (1.7) donnent le même résultat, donc la seule différence est la matrice de rotation $\mathbf{Q}_{\phi_{flex}}$, qui apparaît dans les coefficients c_1 , c_2 , c_6 et c_7 . Par observation des coefficients, on constate qu'accroître la valeur de ϕ_{flex} est équivalent à faire tourner les forces F and F_f vers une orientation qui pousse les objets avec une plus grande force vers le pouce que dans le cas du modèle rigide. De plus, lorsque les objets sont déformés, une partie de ces objets vient en contact avec la surface, venant ainsi réduire les forces de réaction sur le pouce et, par conséquent, moins solliciter le préhenseur au niveau des efforts. Dans les cas extrêmes des objets très flexibles, la déformation peut être négligée complètement, car, au point d'application de la force k , l'objet va aussi être en contact avec la surface et la partie de l'objet en flexion se comporte comme un objet de petite taille, indépendamment de la pression exercée. Un exemple de ce phénomène serait de ramasser une feuille de papier en appliquant une pression au centre de l'objet avec le doigt. La partie entre le pouce et le doigt est soulevée en raison de l'insertion du pouce, mais l'autre côté de la feuille ne bouge pas, car elle n'est pas assez rigide.

On peut donc en conclure qu'étudier les objets rigides équivaut à étudier une méthode qui est comprise dans celle considérant les objets flexibles. Cela suggère que si la méthode fonctionne sur un objet rigide, le même objet, mais flexible, peut être ramassé en appliquant la même procédure.

1.4 Conclusion

Ce chapitre a abordé la problématique de la prise d'objets minces reposant sur des surfaces dures. Les contraintes appliquées sur l'étude ont été proposées et les raisons pour lesquelles des solutions directes comme la succion ou le déplacement des objets au bord des surfaces ont été écartées ont été énoncées. Une méthode, qui requiert de créer un mur d'un côté d'un objet

et d'insérer le pouce en opposition, nommée le ramassage de petits objets, a été présentée et les paramètres importants du modèle ont été étudiés.

Une deuxième méthode, dérivée de la première et motivée par le besoin de prendre des objets plus longs que l'ouverture d'un préhenseur, nommée le ramassage d'objets de grande taille, a été présentée. Encore une fois, les paramètres ont été étudiés et des conclusions sur l'influence des paramètres ont pu être tirées.

Pour les deux modèles, il a été possible de conclure qu'en présence d'objets de formes diverses, effectuer le ramassage est plus efficace en saisissant l'objet du côté le plus court. De plus, l'étude conclut que, dans le cas du ramassage de grande taille, augmenter la valeur du paramètre k , donc éloigner au maximum le bout du doigt du pouce, maximise les chances de succès. Ceci requiert donc un préhenseur à grande ouverture, ce qui augmente par le fait même la proportion des objets pour lesquels le ramassage de petite taille pourrait être utilisé. Les recommandations finales, bien que triviales, sont d'utiliser un pouce dont le bout est pointu pour s'insérer sous les objets ainsi qu'un préhenseur capable d'appliquer des grandes forces au bout des doigts.

Finalement, l'étude de l'effet de la flexibilité a été survolée pour tenter de prédire le résultat de l'application des méthodes sur des objets moyennement et très flexibles.

Chapitre 2

Étude des mécanismes planétaires

2.1 Introduction

Ce chapitre est basé sur les travaux publiés dans [Babin *et al.* \(2014\)](#). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une étude portant sur les concepts d'articulations planétaires développées pour l'utilisation dans les bras robotisés sériels. Les concepts de design d'articulations mécaniques étant très similaires pour les bras et les doigts de préhenseurs, bien qu'à une échelle différente, les travaux originaux sont présentés dans ce chapitre et l'adaptation des mécanismes à des doigts est montrée dans les chapitres subséquents.

Lorsque les ingénieurs ou les chercheurs travaillent sur le design d'un mécanisme d'articulation robotique, la vitesse, le couple, le poids, la taille et la charge utile de ce dernier doivent être considérés. La plupart des robots industriels sont construits pour être précis et productifs, donc leurs articulations sont conçues pour fournir de hautes performances. Pour les robots devant effectuer des tâches arbitraires, il est parfois requis qu'ils soient précis et, dans d'autres cas, rapides. Les scénarios dans lesquels ils sont utilisés varient beaucoup, ces derniers tentent donc de posséder des propriétés aussi diversifiées que possible. Par conséquent, les articulations de ces robots ont généralement de grandes plages de mouvement, de vitesse et de couple faisables pour pallier toute éventualité. La performance d'un robot étant étroitement liée à la performance de ses articulations, les mécanismes des articulations offrant un grand éventail de vitesses et de couples offriront aussi un grand éventail de tâches pouvant être exécutées. L'adaptabilité des robots à la tâche devant être effectuée est donc désirée. Les robots humanoïdes ([Xue *et al.*, 2013](#)), la mécanique d'exosquelettes ([Cha *et al.*, 2012](#)) et la robotique spatiale ([Seweryn *et al.*, 2013](#)), ne sont que quelques sujets de recherche qui s'intéressent au design d'articulations mécaniques des robots.

Le but de ce chapitre est d'étudier l'utilisation d'un mécanisme épicycloïdal, ici nommé mécanisme planétaire, comme amélioration d'une articulation de robot existante. Le robot en question est un bras à six degrés de liberté (DDL) actionné par des moteurs électriques à

très haut rapport de réduction et dont l'électronique y est intégrée (Allan *et al.*, 2008). Ce manipulateur a été construit dans le but de réaliser des tâches de maintenance dans les voûtes souterraines du réseau de distribution électrique d'Hydro-Québec. La figure 2.1 montre le robot en question accomplissant une tâche qui nécessite de saisir, de tourner, de tirer et d'insérer une poignée d'un équipement appelé un commutateur Joslyn. Ce type de tâche, spécialement la

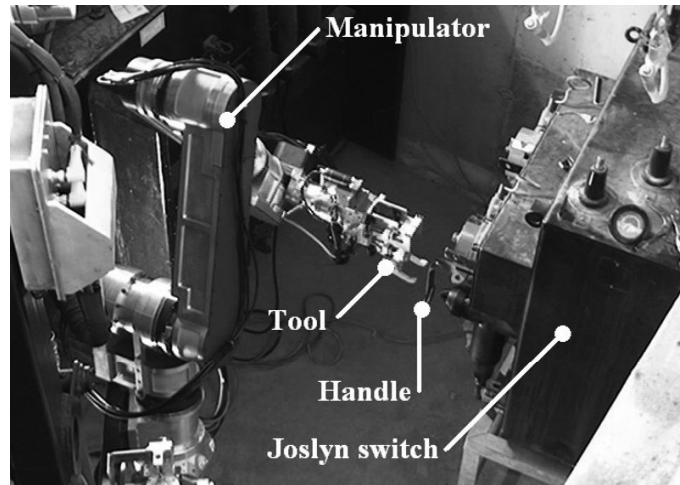


FIGURE 2.1 – Manipulateur utilisé pour faire fonctionner un commutateur Joslyn dans les voûtes du réseau électrique souterrain d'Hydro-Québec.

rotation de la poignée, requiert des grandes forces appliquées au préhenseur du robot, d'où le design original utilisant de grands rapports de réduction. Plusieurs de ces tâches se rattachent au positionnement du robot ou à la préparation du robot et de l'environnement pour accomplir la tâche principale (Allan *et al.*, 2010). La figure 2.2 montre l'information enregistrée à propos des forces appliquées par l'outil du robot lors de l'accomplissement des tâches. À la figure 2.2, il est montré que les grands efforts pour effectuer la tâche sont appliqués pendant moins de 10 secondes pour une séquence de tâche de 80 secondes au total. Pendant les déplacements du manipulateur, la vitesse de ce dernier est directement limitée par la vitesse maximale des moteurs ayant été atteinte. Les rapports de réduction des moteurs allant de 100 : 1 à 160 : 1 se traduisent par des déplacements lents du manipulateur, mais une capacité d'appliquer de grands efforts. Cette limitation des vitesses terminales affecte plus particulièrement les séquences de changement d'outils, c'est-à-dire quand de grands débattements sont nécessaires pour aller les chercher et revenir à la tâche. Pendant ces déplacements, de petites forces sont nécessaires. Par conséquent, si le but est d'accomplir la tâche et de la réaliser dans des délais raisonnables, améliorer les profils de vitesse des articulations est souhaitable. En effet, pour que le système soit jugé utile, la qualité du travail et les délais doivent être intéressants, surtout lorsque comparés à sa réalisation par des travailleurs.

De manière semblable, aux travaux de Grenier et Gosselin (2011), les systèmes de transmission envisagés dans ce chapitre sont catégorisés en deux catégories : les transmissions à rapport

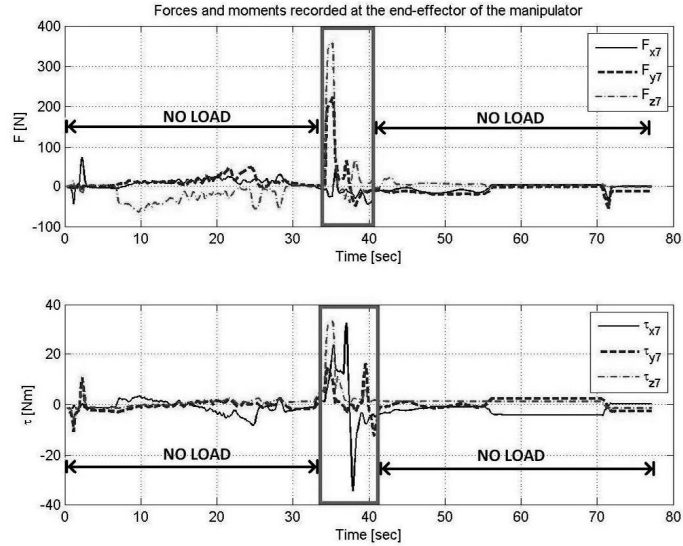


FIGURE 2.2 – Information enregistrée par un capteur d’efforts multiaxes monté au bout d’un bras robotisé manipulant une poignée sur un commutateur Joslyn.

continu (CVT) et les transmissions à rapport discret (DVT). Les CVT sont les transmissions dont le rapport de réduction peut être ajusté de manière continue entre deux valeurs. Cette propriété les rend utiles dans les situations où le profil des forces nécessaires varie beaucoup, comme dans le cas présent. Les transmissions sphériques continues (Peshkin *et al.*, 2001; Higuchi et Ogasawara, 2009) sont des cas où le rapport de transmission est ajusté de manière continue en modifiant la position des surfaces en contact avec des sphères. Ces systèmes sont cependant dépendants de la friction entre les surfaces de contact pour ne pas qu’un mouvement relatif ait lieu. Pour ces raisons, en présence de grands couples, ces systèmes connaissent des erreurs de positionnement à la suite de glissements des surfaces et par conséquent, ils sont jugés moins utiles.

Les transmissions à rapport discret sont des systèmes munis d’un nombre fini de rapports de réduction pour une transmission. Un exemple consiste en les transmissions automobiles, qui utilisent des combinaisons d’engrenages pour transmettre la puissance du moteur aux roues. L’utilisation d’engrenages dans les systèmes à rapport discret est un moyen efficace de prévenir le glissement entre le moteur et la sortie du système sous l’effet de grands efforts. Prévenir le glissement rend aussi possible la déduction de la position de la sortie avec l’information sur la position du moteur si les jeux sont négligés. Cependant, la synchronisation entre la sortie et le moteur étant très importante dans ces systèmes, modifier la configuration des engrenages lorsque le système est en mouvement n’est pas permis.

Le présent chapitre porte sur l’étude de mécanismes planétaires à engrenages dans le but d’améliorer le profil de vitesse d’une articulation d’un robot munie d’un réducteur à haut rapport. Cela vise à munir le manipulateur de profils vitesse-couple lent-fort et rapide-faible.

Le système propose d'ajouter un moteur supplémentaire à l'actionnement déjà présent en engageant ces deux moteurs par le biais du mécanisme planétaire. Cette configuration a pour objectif d'utiliser des engrenages pour ne pas introduire de glissement dans le système.

Les prochaines sections débutent en présentant les trois configurations entrée-sortie du planétaire, où deux degrés de liberté du planétaire sont pour les moteurs et un pour la sortie. Par la suite sont proposées douze nouvelles configurations, qui montrent comment le moteur peut être fixé sur le membre mobile, donc sur la sortie du système. Ces douze nouvelles configurations rendent possible le fait de préserver le rapport de réduction du moteur original tout en incluant un profil de vitesse rapide avec le nouveau moteur secondaire. Un étage d'engrenages à vis est ajouté pour rendre la sortie secondaire autobloquante, afin de prévenir la perte de puissance par le moteur secondaire. Finalement, un design expérimental est proposé pour valider les concepts et les suggestions de recherche futures sont proposées.

2.2 Cinématique du mécanisme planétaire de base

Comme présenté dans Grenier et Gosselin (2011), les planétaires ont été utilisés dans le passé dans les robots sériels. Rabindran et Tesar (2008) optimisent un planétaire à deux degrés de liberté utilisé dans les robots sériels et Kim *et al.* (2007) proposent un moyen de rendre les manipulateurs sécuritaires en les utilisant pour limiter les efforts de ces derniers. Les composants des planétaires sont présentés à la figure 2.3. Ces composants sont (1) l'engrenage planétaire

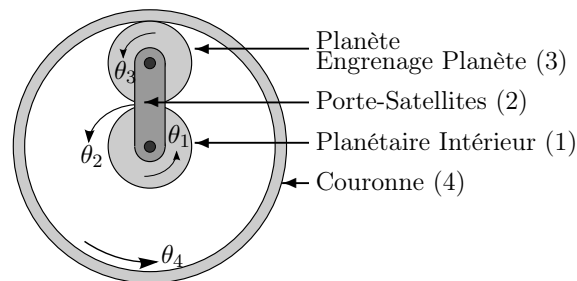


FIGURE 2.3 – Mécanisme planétaire et les variables s’y rattachant.

intérieur ou engrenage soleil, (2) le porte-satellites, (3) l’engrenage planète et (4) l’engrenage planétaire extérieur ou engrenage couronne. Avec le critère de Chebychev-Grübler-Kutzbach Myszka (2005), il est possible de montrer que ce système possède deux degrés de liberté (DDL). Il est supposé que les entrées et les sorties du système doivent être sélectionnées parmi les variables θ_1 , θ_2 et θ_4 . La variable θ_3 est omise, car cette dernière ne tourne pas coaxialement avec les autres engrenages. Il est donc difficile de concevoir une articulation de robot avec (3) comme entrée ou sortie d’un bras robotique supporté par un arbre central. Finalement, le paramètre N_i avec $i = 1, 2, 3, 4$ réfère au nombre de dents de l’engrenage i .

Dans le but d'obtenir les équations cinématiques qui décrivent le système, le rapport

$$n = \frac{N_1}{N_4} \quad (2.1)$$

est présenté. Ce rapport est le nombre de dents d'engrenages du soleil divisé par celui de la couronne. Il est équivalent de remplacer le nombre de dents de chaque engrenage par le rayon ou le diamètre de ce dernier. Le diamètre de l'engrenage soleil doit être plus petit que celui de l'engrenage couronne. Cette contrainte mène à l'inégalité $0 < n < 1$. Avec l'approche décrite dans Myszka (2005) et en réarrangeant les équations afin d'utiliser n pour décrire les proportions du mécanisme, la relation

$$n\theta_1 - (n + 1)\theta_2 + n\theta_4 = 0 \quad (2.2)$$

est obtenue, qui peut aussi être exprimée avec θ_3 pour obtenir

$$2n\theta_1 - (n + 1)\theta_2 + (1 - n)\theta_3 = 0. \quad (2.3)$$

Le système ayant deux DDL, imposer deux angles dans l'équation (2.2) ou l'équation (2.3) contraint complètement le système. Ce résultat est important pour l'obtention des équations dynamiques décrivant le système. En effet, pour obtenir la dynamique du système, il faut être en mesure de décrire les mouvements de toutes les pièces, même θ_3 , alors qu'elle n'est pas une entrée ou une sortie.

2.3 Dynamique

Pour obtenir les équations dynamiques du système, la méthode de Lagrange avec les équations de contraintes (2.2) et (2.3) est utilisée. Les équations dynamiques décrivant le système prennent la forme

$$\mathbf{t} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{k}t_o, \quad (2.4)$$

où \mathbf{t} , \mathbf{J} , \mathbf{B} et \mathbf{k} sont respectivement le vecteur de couple des moteurs, la matrice d'inertie généralisée, la matrice d'amortissement et le vecteur de réduction mécanique. Les paramètres t_o , $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ et $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ sont respectivement le couple de sortie du mécanisme, le vecteur vitesse des moteurs et le vecteur d'accélération des moteurs. La forme matricielle est présentée comme

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_i & J_0 \\ J_0 & J_j \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_i & B_0 \\ B_0 & B_j \end{bmatrix}, \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_i \\ k_j \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix}, \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_i \\ t_j \end{bmatrix}$$

qui est la formulation dynamique générale du système pour laquelle i et j dépendent de la configuration entrée-sortie du système.

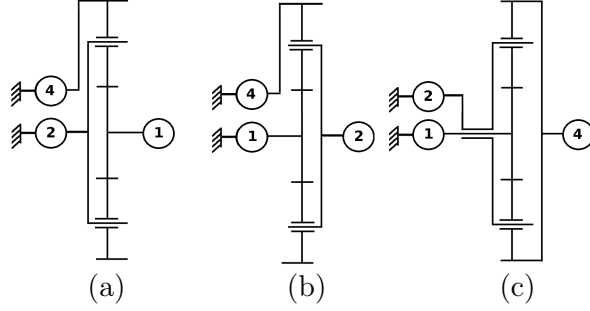


FIGURE 2.4 – Les trois configurations de base du planétaire proposé.

2.3.1 Modèle dynamique des trois configurations de base

La figure 2.4 montre les trois configurations possibles lorsque les moteurs sont attachés à la base du mécanisme, c'est-à-dire que le membre est considéré comme fixe. Chacune des configurations est identifiée par la partie du mécanisme qui sert de sortie du système. Par exemple, la configuration où la sortie du mécanisme est la couronne (4) est l'arrangement de type 4, et les deux entrées sont le porte-satellites (2) et le soleil (1).

Les paramètres d'inertie obtenus le sont aussi en fonction du type. Avec l'exemple précédent, l'inertie de l'entrée connectée sur le porte-satellites (2) est J_2 . Dans les équations suivantes, l'inertie du porte-satellites est positionnée au centre du mécanisme et r_2 est la distance entre le centre du mécanisme et le centre des planètes. Pour la configuration de type 1 avec $i = 2$ et $j = 4$, les paramètres d'inertie sont

$$J_2 = I_2 + m_3 r_2^2 + \frac{(n+1)^2}{n^2} I_1 + \frac{(n+1)^2}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.5)$$

$$J_4 = I_4 + \frac{I_1}{n^2} + \frac{4}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.6)$$

$$J_0 = \frac{(n+1)}{n^2} I_1 + \frac{2(n+1)}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.7)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} n+1 & -1 \\ n & n \end{bmatrix}^T, \quad (2.8)$$

où I_i est le moment d'inertie de l'engrenage i par rapport à son centre de masse, et où m_i est la masse de la composante i . Pour la configuration de type 2 ($i = 1$ et $j = 4$), les paramètres sont

$$J_1 = I_1 + \frac{n^2}{(n+1)^2} (I_2 + m_3 r_2^2) + \frac{n^2}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.9)$$

$$J_4 = I_4 + \frac{I_2 + m_3 r_2^2}{(n+1)^2} + \frac{I_3}{(1-n)^2} \quad (2.10)$$

$$J_0 = \frac{n}{(n+1)^2} (I_2 + m_3 r_2^2) - \frac{n}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.11)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \frac{n}{n+1} & \frac{1}{n+1} \end{bmatrix}^T. \quad (2.12)$$

Finalement, pour la configuration de type 4 avec $i = 1$ et $j = 2$, les paramètres sont

$$J_1 = I_1 + n^2 I_4 + \frac{4n^2}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.13)$$

$$J_2 = I_2 + m_3 r_2^2 + (n+1)^2 I_4 + \frac{(n+1)^2}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.14)$$

$$J_0 = n(n+1) I_4 + \frac{2n(n+1)}{(1-n)^2} I_3 \quad (2.15)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -n & n+1 \end{bmatrix}^T. \quad (2.16)$$

La matrice d'amortissement de chacune des configurations est obtenue en supposant que la force contre-électromotrice est le paramètre dominant, donc la matrice d'amortissement est découplée et peut être réécrite comme

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_i & 0 \\ 0 & B_j \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

pour toutes les configurations avec B_i et B_j , la tension induite du moteur connecté sur les membres moteurs i et j . Les équations dynamiques présentées pour les trois configurations montrent les propriétés statiques et dynamiques d'un système à deux entrées et une sortie qui est linéaire.

Les stratégies de commande de ces systèmes sont bien connues et ne sont que survolées ici. Un exemple de travail couvrant le sujet de la commande de systèmes à plusieurs degrés de liberté est couvert dans Jung et Nam (1999), où les effets de couplage du système sont compensés de manière à obtenir un système contrôlé à une entrée et une sortie.

Dans les trois configurations décrites précédemment, la composante de couplage des systèmes est J_0 . Si l'on observe les termes de couplage des trois systèmes, il est possible de voir que le couplage dynamique des systèmes de types 1 et 4 a toujours des valeurs positives, mais que, dans le cas du couplage des systèmes de type 2, le terme J_0 peut théoriquement être annulé et même changer de signe. Dans le cas où J_0 est nul, le mécanisme étudié est découplé dynamiquement et le contrôle s'en retrouve simplifié.

Si l'on observe le vecteur de réduction mécanique \mathbf{k} pour chaque configuration, il est noté qu'en ajoutant un étage de réduction planétaire à l'articulation d'un robot, son rapport de vitesse original est multiplié par une des valeurs de \mathbf{k} . Cela a pour effet de modifier les propriétés originales de l'articulation. Le moteur original de l'articulation est dorénavant nommé le moteur primaire et le nouveau moteur qui est ajouté, le moteur secondaire.

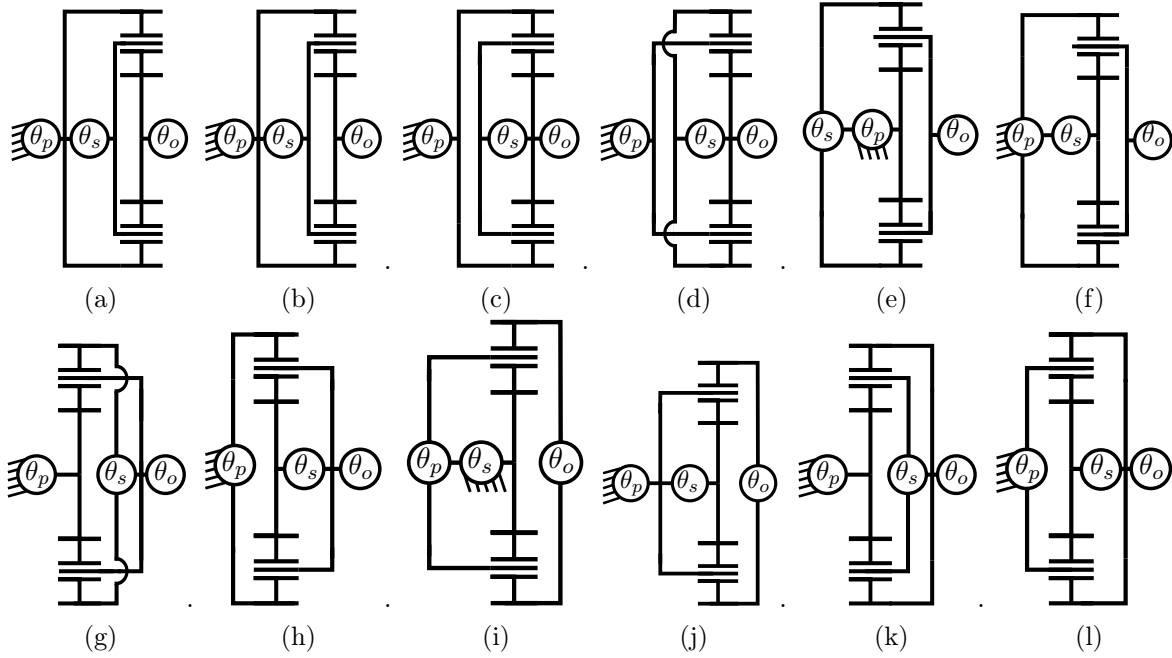


FIGURE 2.5 – Les douze arrangements possibles avec les configurations modifiées : θ_p désigne l'entrée primaire, θ_s , l'entrée secondaire et θ_o , la sortie.

2.3.2 Obtention d'un rapport de réduction unitaire pour le moteur primaire

Pour obtenir une configuration où le rapport de réduction du moteur primaire n'est pas affecté par le planétaire ajouté, des nouvelles configurations sont présentées. Pour celles-ci, le moteur secondaire n'est pas assemblé sur la même membrure que le moteur primaire, mais bien sur la membrure suivante et est montré avec la relation

$$\theta_i = \theta_j + \theta_s, \quad (2.18)$$

où l'index i réfère à la partie du planétaire actionnée par le moteur secondaire, j réfère à la sortie du planétaire, et θ_s est l'angle de rotation du moteur secondaire. Par exemple, si le moteur secondaire actionne l'engrenage soleil (1) et est fixé sur l'engrenage couronne, la nouvelle contrainte est

$$\theta_1 = \theta_4 + \theta_s. \quad (2.19)$$

En substituant l'équation (2.18) à l'équation 2.2 pour toutes les combinaisons de i et j , les douze configurations entrée-sortie modifiées sont ainsi obtenues. La figure 2.5 présente ces nouvelles configurations, où θ_o , θ_p et θ_s sont respectivement la rotation de la sortie (*output*), la rotation de l'entrée primaire et celle de l'entrée secondaire. L'équation de contraintes qui lie les entrées primaires et secondaires à la sortie est

$$\theta_o = \theta_p + R\theta_s. \quad (2.20)$$

Le tableau 2.1 montre chaque configuration pour chaque combinaison de i et j (MOD $i-j$) et les valeurs du ratio de réduction R . Il y est montré qu'en utilisant les arrangements modifiés

Tableau 2.1 – Ratio d'amplification du moteur secondaire selon le type et les paramètres i et j correspondants.

Configuration	MOD $i-j$	Ratio R	Ref. Fig. 2.5
Type 1	$i=2, j=4$	$\frac{(n+1)}{n}$	(a)
Type 1	$i=4, j=2$	$\frac{-1}{n}$	(b)
Type 1	$i=2, j=1$	$-(n+1)$	(c)
Type 1	$i=4, j=1$	$\frac{-1}{(n+1)}$	(d)
Type 2	$i=4, j=1$	$\frac{1}{(n+1)}$	(e)
Type 2	$i=1, j=4$	$\frac{n}{(n+1)}$	(f)
Type 2	$i=4, j=2$	$\frac{1}{n}$	(g)
Type 2	$i=1, j=2$	n	(h)
Type 4	$i=2, j=1$	$(n+1)$	(i)
Type 4	$i=1, j=2$	$-n$	(j)
Type 4	$i=2, j=4$	$\frac{-(n+1)}{n}$	(k)
Type 4	$i=1, j=4$	$\frac{-n}{(n+1)}$	(l)

proposés, la contribution de l'entrée primaire est unitaire vers la sortie, ce qui est idéal dans l'implémentation d'un mécanisme voulant ajouter des propriétés à un mécanisme tout en préservant les propriétés originales de ce dernier. De plus, avec ces modifications proposées, il est possible d'obtenir un rapport de réduction R du moteur secondaire qui amplifie ou réduit l'apport en vitesse du moteur. De plus, les différentes configurations du mécanisme donnent deux possibilités pour chaque valeur de R , donc deux options pour accommoder le design mécanique sont toujours disponibles.

2.3.3 Évitement de la perte de puissance par l'entrée secondaire

Les équations du mouvement de l'arrangement modifié ayant la même forme que l'arrangement de base, l'équation (2.4) est utilisée et réécrite comme

$$\ddot{\theta} = \mathbf{J}^{-1}[\mathbf{t} - \mathbf{B}\dot{\theta} - \mathbf{k}t_o]. \quad (2.21)$$

Si la tension induite et les effets dynamiques sont négligés, les équations apparaissent comme

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{\theta}_s \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \left[\begin{bmatrix} t_p \\ t_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} t_o \right]. \quad (2.22)$$

En réarrangeant l'équation (2.22), l'équation devient

$$t_o = t_p. \quad (2.23)$$

En combinant l'équation (2.23) avec la deuxième composante de l'équation (2.22), la relation

$$\ddot{\theta}_s = C(t_s - Rt_p) \quad (2.24)$$

est obtenue, où C dépend des propriétés de \mathbf{J}^{-1} . À partir de l'équation (2.24), la condition pour prévenir la perte de puissance par le moteur secondaire est donc

$$|t_s| \geq |Rt_p|. \quad (2.25)$$

La figure 2.6 présente les propriétés des deux moteurs à l'entrée et à la sortie en régime permanent pour une configuration hypothétique. La figure présente la vitesse résultante en fonction du couple. L'intervalle de couple δ_1 de la figure 2.6 est la région où les deux moteurs

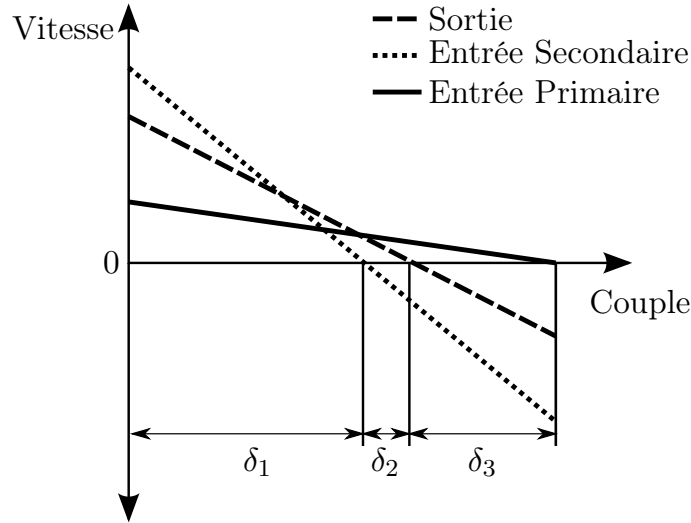


FIGURE 2.6 – Les propriétés en régime permanent pour une transmission de type 2 avec $R < 1$.

ont une puissance positive et donc produisent un travail vers la sortie, tandis que δ_2 représente

la région où de la puissance est perdue à travers le moteur secondaire. Finalement, la région δ_3 est la région où tellement de puissance est perdue à travers le moteur secondaire qu'aucun travail ne peut être produit en sortie, donc la sortie ne peut résister aux forces externes.

Dans le but d'éliminer les régions δ_2 et δ_3 et ainsi prévenir la perte de puissance par le moteur secondaire, Lee et Choi (2012) suggèrent d'utiliser un étage de réduction par engrenage à vis, ce qui agit comme mécanisme autobloquant sur l'entrée secondaire. Le profil de vitesse idéal du mécanisme est présenté à la figure 2.7. Il est facile de voir que la région δ_1 comprend

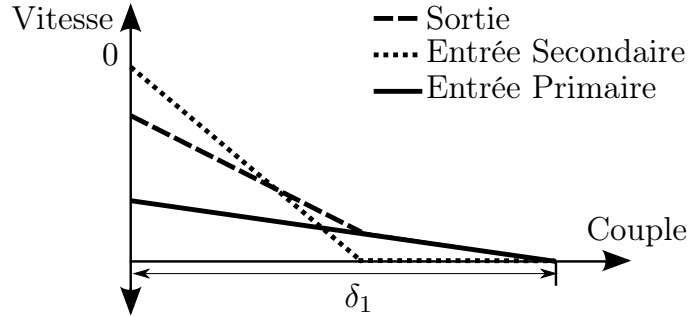


FIGURE 2.7 – Les propriétés en régime permanent pour une transmission de type 2 avec $R < 1$ et une entrée autobloquante au moteur secondaire.

maintenant tout le profil de vitesse utile du moteur primaire.

2.4 Prototype et test

Un prototype a été construit et une articulation avec une des configurations présentées dans cet ouvrage a été ajoutée à un robot existant. La troisième articulation du robot a été modifiée avec une transmission de type 4, MOD 1-4, (configuration (1) selon la figure 2.5 et le tableau 2.1). Pour cette configuration, les paramètres d'inertie de l'équation sont

$$J_p = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 \quad (2.26)$$

$$J_s = J_w + \frac{k^2}{(n+1)^2} J_1 + \frac{4k^2 n^2}{(n+1)^2 (1-n)^2} J_3 + \frac{k^2 n^2}{(n+1)^2} J_4 \quad (2.27)$$

$$J_0 = \frac{k}{(n+1)} J_1 - \frac{2kn}{(n+1)(1-n)} J_3 - \frac{kn}{(n+1)} J_4 \quad (2.28)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{-nk}{n+1} \end{bmatrix}^T, \quad (2.29)$$

où k est le rapport de réduction du mécanisme à vis et J_w est l'inertie combinée du moteur secondaire jusqu'au mécanisme à vis. Il est intéressant de voir la présence d'une soustraction dans le terme de J_0 , ce qui suggère que, pour cette configuration, il est aussi possible de découpler le système, comme discuté à la section 2.3.1. Une photo de l'articulation prototype montée sur le robot est montrée à la figure 2.8, où la troisième articulation est équipée avec

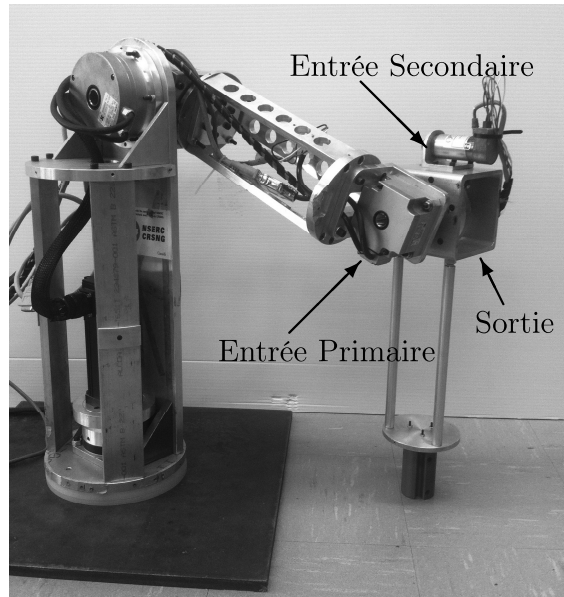


FIGURE 2.8 – Robot avec l'articulation prototype assemblée à la troisième articulation.

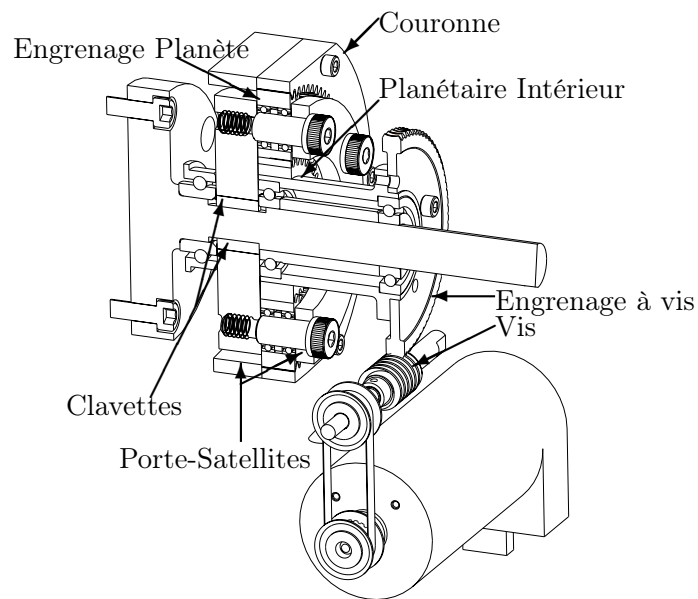


FIGURE 2.9 – Vue de coupe de l'articulation prototype.

l'articulation prototype à deux degrés de liberté. Des modèles CAO de l'articulation proposée sont aussi montrés plus en détails aux figures 2.9 et 2.10.

Finalement, un essai pratique est réalisé pour un mouvement de bas en haut de la troisième articulation seulement et les résultats sont présentés à la figure 2.11. À la figure 2.11 est montrée la contribution en déplacement à la sortie de chaque moteur. Il est possible de voir que la contribution du moteur secondaire est approximativement le double de celle du moteur primaire, ce qui est voulu, car ce dernier est le moteur ajouté pour améliorer les performances

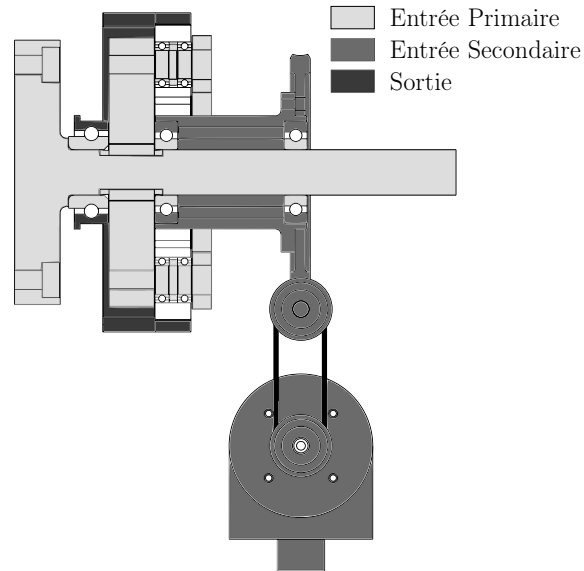


FIGURE 2.10 – Vue de coupe de l’articulation du joint prototype.

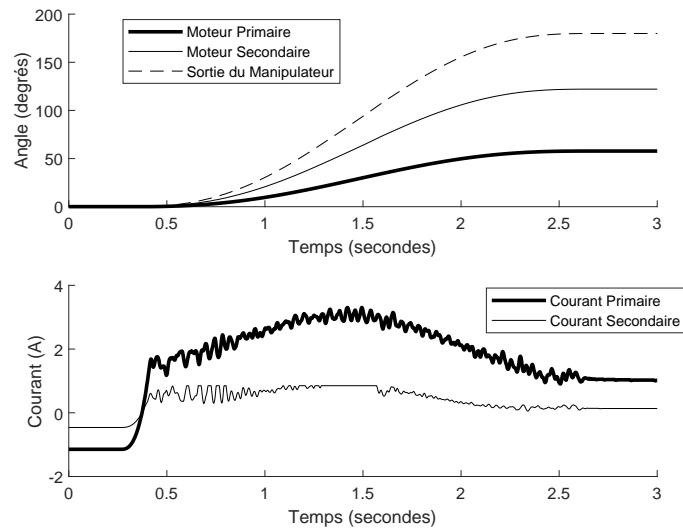


FIGURE 2.11 – Essai pratique réalisé pour un mouvement de bas en haut de la troisième articulation du robot-test.

en déplacements. De plus, il est possible d'observer que le courant utilisé par ce dernier est moindre que celui utilisé par le moteur primaire. Des études se penchent sur l'efficacité et la combinaison optimale de profils de vitesse de moteurs couplés par des mécanismes épicycloïdaux (Lee et Choi, 2012; Hu *et al.*, 2014). Ces études portent cependant sur des systèmes en régime permanent et sont donc un point de départ sur le couplage optimal, mais pas une procédure définitive pour de futurs travaux. De plus, au début de la trajectoire, il est possible d'observer une hausse de courant qui n'est pas négligeable par rapport à la hausse observée pendant le reste de l'essai. Cela suggère que les moteurs sont sous l'effet de frottements statiques qui ne sont pas négligeables par rapport aux effets gravitationnels et inertiels subis par la membrure. Il serait donc important pour des futurs travaux d'inclure les effets de la friction statique dans le modèle pour étudier les trajectoires optimales.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'utilisation de mécanismes épicycloïdes à deux degrés de liberté, ou planétaires, a été proposée pour améliorer les plages de couple et de vitesse caractéristiques d'une articulation robotique. D'abord, les trois configurations de base d'un planétaire à deux degrés de liberté ont été présentées. Dans le but d'utiliser le mécanisme dans un contexte où on préserve les propriétés initiales de l'articulation, un rapport de réduction unitaire d'une des entrées a été recherché et trouvé à l'aide des configurations modifiées. Ces configurations consistent à fixer le moteur secondaire sur l'articulation mobile, ce qui a nécessité l'étude de douze nouvelles configurations. Par la suite, la condition pour laquelle l'entrée secondaire du mécanisme n'est pas réversible a été étudiée et l'utilisation d'un mécanisme à vis a été justifiée pour prévenir ce phénomène. Finalement, une des configurations présentées a été sélectionnée pour être testée sur un banc d'essai. Le prototype a été présenté avec des données recueillies lors d'un essai de levée d'un bras robotique pour montrer clairement la faisabilité du concept et l'apport de chacune des entrées sur le mouvement en sortie.

Chapitre 3

Conceptualisation et prototypage d'un mécanisme de doigt spécialisé dans le ramassage d'objets de petites et grandes tailles

3.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre sont basés sur les travaux publiés dans Babin *et al.* (2019). Des concepts qui visent à être robustes et munis de mécanismes simples à utiliser dans le contexte de prothèses de bras ont été proposés (Smit et Plettenburg, 2010). Ces mécanismes relayent souvent la tâche complexe de planifier les mouvements et l'approche des objets à l'utilisateur.

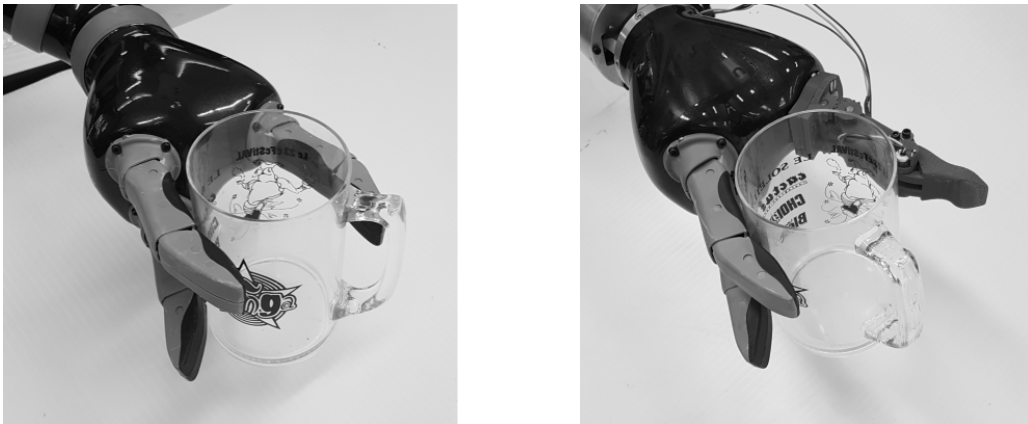
Plusieurs études proposent de nouveaux mécanismes dans le but de construire des doigts de préhenseurs avec des propriétés variées. Certaines de ces propriétés sont la vitesse de fermeture, la capacité d'appliquer des grandes forces lorsque nécessaire ou le but d'avoir un design compact. Combiner plusieurs de ces propriétés aboutit souvent à un compromis sur la complexité du mécanisme final. Un exemple est l'utilisation de mécanismes reconfigurables en fonction du contexte du contact avec les objets saisis (Takaki et Omata, 2011; Takayama *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2012; Spanjer *et al.*, 2012).

Les planétaires sont aussi utilisés pour coupler des moteurs ayant des propriétés différentes dans les articulations mécaniques de robots, comme montré dans le chapitre 2 et dans Babin *et al.* (2014). Lorsque les planétaires sont utilisés dans les articulations de préhenseurs, ils éliminent la superposition des centres de rotation des phalanges, mais ajoutent un lien mécanique de plus, ce qui ajoute de la solidité à l'articulation tout en étant un design compact (Catalano

et al., 2014).

Bien que certains préhenseurs soient munis des trajectoires et de propriétés prédéfinies indépendamment des objets pris (Catalano *et al.*, 2014), il est important de considérer comment le préhenseur va interagir non seulement avec l'objet, mais aussi avec l'environnement (Eppner *et al.*, 2015).

Dans ce contexte, ce chapitre présente la conception d'un mécanisme qui applique les méthodes proposées au chapitre 1, les mécanismes planétaires du chapitre 2, des mécanismes passifs et des instruments de mesure pour proposer un design de doigt rendant un préhenseur existant capable d'effectuer le ramassage de petits et de grands objets. L'objectif n'est pas seulement de valider la faisabilité du ramassage d'objets, mais aussi de tester si l'implémentation est possible sur des systèmes existants sans amoindrir leurs performances. Dans ce but, le design proposé est implémenté sur un préhenseur existant, comme montré à la figure 3.1a, et des prises simples comme la prise latérale parallèle montrée doit être encore atteignable avec l'utilisation



(a) Préhenseur original d'un bras JACO ayant saisi une tasse avec la prise latérale.

(b) Préhenseur d'un bras JACO muni d'un mécanisme optimisé pour le ramassage d'objets qui saisit une tasse avec la prise latérale.

FIGURE 3.1 – La même prise latérale peut être effectuée avec le préhenseur original et le préhenseur modifié, ce qui démontre que les propriétés du préhenseur ne sont pas trop affectées.

du mécanisme présenté dans ce chapitre, comme montré à la figure 3.1b.

Cette section est organisée comme suit. D'abord est présenté un bras robotique typique qui serait utilisé pour effectuer le ramassage d'objets. Ensuite est présenté un mécanisme de pouce qui remplace un doigt existant du robot. Les équations cinématiques du pouce sont présentées ainsi que les propriétés de ce doigt et les mouvements devant être effectués pour accomplir le ramassage.

Dans le but de tester la méthode de ramassage et la solution proposée pour l'effectuer, les dimensions physiques du mécanisme de pouce et les propriétés cinématiques s'y rattachant sont présentées. Un prototype est construit et la méthode est testée sur plusieurs objets de

manière continue pour montrer la répétabilité de la méthode, comme présenté dans la vidéo 4-1. Finalement, une discussion des succès et des échecs des tests est proposée et des suggestions pour les prochains designs sont faites.

3.2 Le design proposé

Un prototype de pouce est créé pour valider les concepts proposés au chapitre précédent. Dans le but de tester rapidement les concepts, un préhenseur existant a été modifié pour être capable de réaliser les prises. Le préhenseur choisi a été celui qui est normalement monté au bout du robot Jaco à six degrés de liberté. Le montage est aussi muni d'un capteur d'efforts au poignet, montré à la figure 3.2, dans le but de pouvoir appliquer des forces contrôlées sur l'environnement. La figure 3.2a montre le manipulateur en question avec le pouce modifié,

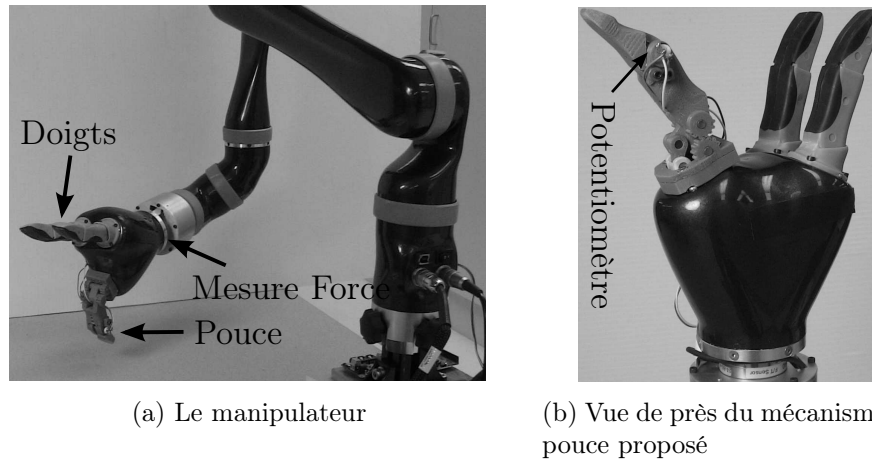


FIGURE 3.2 – Le mécanisme proposé monté sur le préhenseur d'un robot Jaco.

tandis que la figure 3.2b montre une vue rapprochée du mécanisme de pouce.

Le premier problème abordé dans ce chapitre lors de l'application des méthodes élaborées précédemment est la précision requise lors de l'insertion du pouce sous l'objet. En effet, lorsque les méthodes étaient présentées précédemment, aucune attention n'était portée à la nature du contact du pouce et à la façon de le réaliser. Un des problèmes potentiels est que si le pouce est un peu trop haut, donc pas en contact avec la surface, il va se heurter à l'objet et simplement bloquer, dans le cas de la méthode englobante, ou pousser l'objet plutôt que de s'insérer dessous. À l'opposé, si le pouce est trop bas ou tente de se positionner trop bas, de grandes forces vont être générées si le pouce est très rigide, et donc des dommages à l'équipement pourraient survenir.

La solution proposée pour résoudre le problème est de réduire la rigidité dans le système en utilisant un mécanisme de pouce avec retour par ressort plutôt que simplement un pouce rigide comme phalange distale. La figure 3.3 présente le schéma du mécanisme en question, incluant

le mécanisme de pouce avec retour par ressort, que l'on nommera pouce passif.

L'utilisation du mécanisme passif requiert que le manipulateur initie le contact avec le dos du pouce pour ainsi plier ce dernier dans le bon angle. Le ressort fait en sorte que le bout du doigt P est maintenu en contact avec la surface. Un capteur, ici un potentiomètre en rotation, est utilisé pour retirer de l'information sur le moment du contact et l'angle entre les phalanges proximale et distale, nommé θ_3 dans la figure 3.3c. L'utilisation du mécanisme passif permet donc de maintenir le contact entre le bout du pouce et la surface, même en présence d'erreurs sur le positionnement du poignet, de détecter les changements de surface lors de la prise, comme le rebord de l'objet si on se déplace sur la surface, et de prévenir la tentative du manipulateur de plier le mécanisme passif à des valeurs plus élevées que les valeurs permises par son design mécanique. Un deuxième mécanisme utilisé dans le design

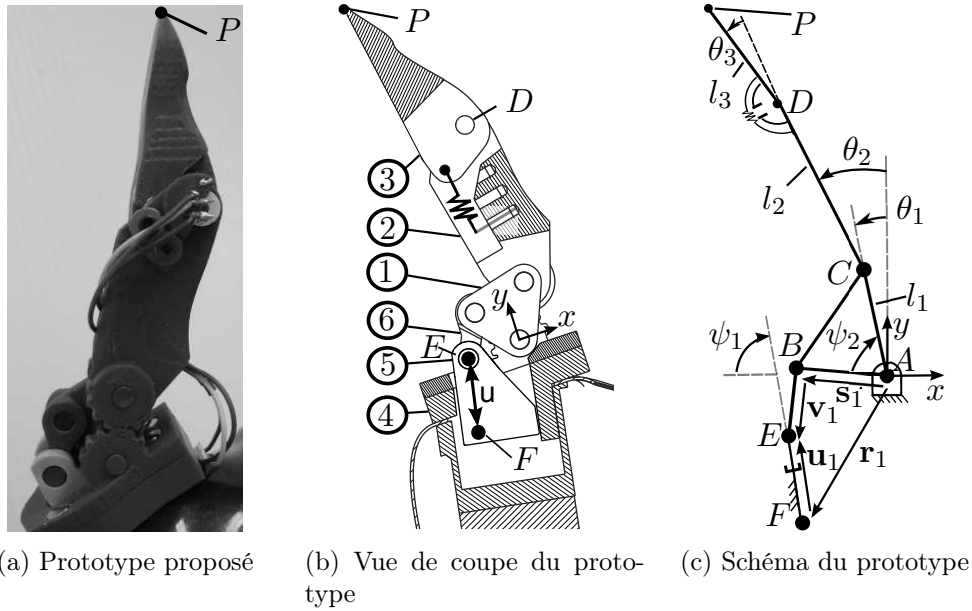


FIGURE 3.3 – (a) Un robot JACO muni du mécanisme de pouce proposé (b) Vue rapprochée du prototype avec (1) porte-satellites (2) phalange proximale (3) phalange distale (4) base de la main (5) actionneur linéaire (6) barre de lien (c) Schéma avec les paramètres géométriques.

du doigt est le mécanisme planétaire ou train d'engrenage épicyclique. En effet, un train planétaire est utilisé pour l'articulation entre la base du doigt et la phalange proximale dans le but d'accroître le gain entrée-sortie du mécanisme par rapport à un joint en rotation, comme présenté à la figure 3.3. Les figures 3.3c et 3.4b montrent les paramètres et les variables utilisés pour modéliser la cinématique du mécanisme présenté. La même notation qu'au chapitre 3, également utilisée dans Babin *et al.* (2014) est utilisée pour décrire les propriétés du mécanisme planétaire. Dans ce contexte, le mécanisme présenté est un train planétaire où le soleil est fixé à la base et où l'entrée du système est le porte-satellites. Cependant, une différence dans ce cas est que la sortie est le satellite, mais seulement un changement de variable est nécessaire pour exprimer les équations en fonction de cet angle, ici θ_2 . Un des ratios du mécanisme est

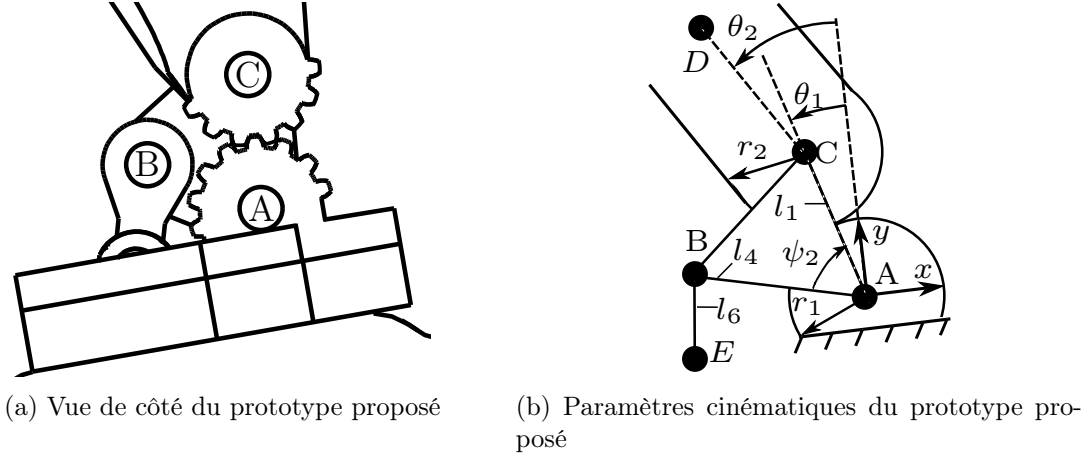


FIGURE 3.4 – Les schémas du prototype.

donc

$$n = \frac{r_1}{r_1 + 2r_2}, \quad (3.1)$$

où r_1 et r_2 sont le rayon des engrenages soleil et satellite, ou le nombre de dents des engrenages. Avec ces paramètres, la relation entrée-sortie des angles θ_1 et θ_2 est

$$\theta_2 = \frac{(n+1)}{(1-n)}\theta_1 + \theta_d \quad (3.2)$$

où θ_1 and θ_2 sont respectivement l'orientation du porte-satellites et de la phalange proximale, comme montré à la figure 3.3, et où θ_d est une constante de design qui influence le mode d'assemblage du mécanisme, qui est égale à la valeur de θ_2 quand θ_1 est zéro. L'entrée du mécanisme, θ_1 , est pour sa part actionnée par une liaison prismatique via un mécanisme de glissière-manivelle, comme montré à la figure 3.3c. Les équations cinématiques sont obtenues en manipulant l'équation vectorielle de la boucle fermée $ABEFA$ de la bielle-manivelle de la figure 3.3c. L'équation est donc réécrite comme

$$\mathbf{0}_2 = \mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_1 - \mathbf{s}_1, \quad (3.3)$$

où $\mathbf{0}_2$ est le vecteur nul à deux dimensions ; \mathbf{r}_1 est le vecteur du point A la base de l'actionneur au point F ; \mathbf{u}_1 le vecteur le long de la ligne d'action de l'actionneur prismatique ; \mathbf{v}_1 le vecteur qui connecte le point B du membre ABC au point E ; et \mathbf{s}_1 , le vecteur connectant le point A au point B sur la barre ABC . L'équation (3.3) est réarrangée pour isoler \mathbf{v}_1 et multipliée par sa transposée. Sachant que $\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 = l_6^2$, on obtient

$$l_6^2 = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1)^T (\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1) \quad (3.4)$$

avec $\mathbf{s}_1 = l_4[-\sin(\theta_1 + \psi_2) \quad \cos(\theta_1 + \psi_2)]^T$, $\mathbf{u}_1 = \sigma \mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_1 = [-\cos(\psi_1) \quad \sin(\psi_1)]^T$ et $\mathbf{r}_1 = [r_x \quad r_y]^T$, où ψ_1 et ψ_2 sont les paramètres physiques montrés à la figure 3.3c et où σ est la valeur de l'extension de l'actionneur prismatique à partir de la position rétractée. L'équation (3.4)

est exprimée en fonction de l'entrée σ pour la solution appropriée de l'équation quadratique. Le résultat obtenu est

$$\sigma = \frac{1}{2} \left((-2\mathbf{e}_1^T \mathbf{c}) - \sqrt{(2\mathbf{e}_1^T \mathbf{c})^2 - 4(\mathbf{c}^T \mathbf{c} - l_6^2)} \right) \quad (3.5)$$

avec $\mathbf{c} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{s}_1$. Avec ce résultat et si une valeur de θ_2 est prescrite, l'angle θ_1 peut être obtenu avec l'équation (3.2), puis \mathbf{s}_1 est calculé, et finalement, l'équation (3.5) est utilisée pour calculer la valeur de l'actionneur requise σ . L'équation (3.4) est dérivée par rapport au temps pour obtenir

$$\mathbf{e}_1^T(\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1)\dot{\sigma} = \mathbf{d}_1^T(\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1)\dot{\theta}_1 \quad (3.6)$$

avec $\mathbf{d}_1^T = l_4[-\cos(\theta_1 + \psi_2) - \sin(\theta_1 + \psi_2)]^T$. Finalement, la relation de vitesse entre l'entrée et la sortie est obtenue en dérivant l'équation (3.2) pour exprimer $\dot{\theta}_1$ en termes de $\dot{\theta}_2$, ce qui donne

$$\frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\sigma}} = \frac{\mathbf{e}_1^T(\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1)(n+1)}{\mathbf{d}_1^T(\mathbf{r}_1 + \mathbf{u}_1 - \mathbf{s}_1)(1-n)}. \quad (3.7)$$

3.2.1 Procédure expérimentale

Une procédure expérimentale a été mise en place pour tester la validité des conclusions proposées au chapitre 2 et l'efficacité du mécanisme proposé dans ce chapitre. Le banc d'essai est montré à la figure 3.5. Les marqueurs fiduciaires ARUCO (Garrido-Jurado *et al.*, 2016, 2014) sont utilisés comme moyen d'implémenter la prise des objets de manière automatique et consécutive. Le système de vision est implémenté avec deux marqueurs : *i*) le marqueur robot qui est fixé au repère de la base du robot et *ii*) les marqueurs objets qui sont fixés aux objets avec leur axe- z , perpendiculaire à la surface de l'objet sur lequel il est fixé, et leur axe- y , pointant vers le rebord d'insertion de l'objet. Dans le scénario implémenté, la distance entre le marqueur et le rebord de l'objet est mesurée au préalable et associée au numéro du marqueur de chaque objet. Le point de contact k peut donc facilement être obtenu. La procédure de prise englobante est basée sur l'insertion réussie du pouce sous l'objet, donc la plupart des explications sont à propos de l'implantation de cet aspect. La première étape est d'amener le manipulateur à une position prédéterminée dans l'espace articulaire. Ensuite, le manipulateur positionne le bout du doigt au-dessus de l'objet à une distance k du rebord avec un angle d'attaque ω , qui est l'orientation du doigt par rapport à l'axe- z du marqueur, comme montré à la figure 3.6. Le pouce est ajusté à une position initiale $\sigma = \sigma_i$. L'étape suivante consiste au manipulateur de rapprocher le bout du doigt de l'objet, selon l'axe- z , jusqu'à ce qu'un contact soit mesuré par le capteur d'effort, ce dernier mesurant une force plus grande qu'une valeur F_0 selon l'axe- z . L'étape suivante requiert d'appliquer une force F_1 en augmentant σ et en ajustant ω pour maintenir le point D (voir la figure 3.3c) à une distance constante de la surface. Ce mouvement produit un mouvement du point P vers le rebord de l'objet. Pendant que ce mouvement a lieu, le potentiomètre, monté à l'articulation passive, mesure l'angle θ_3 ,

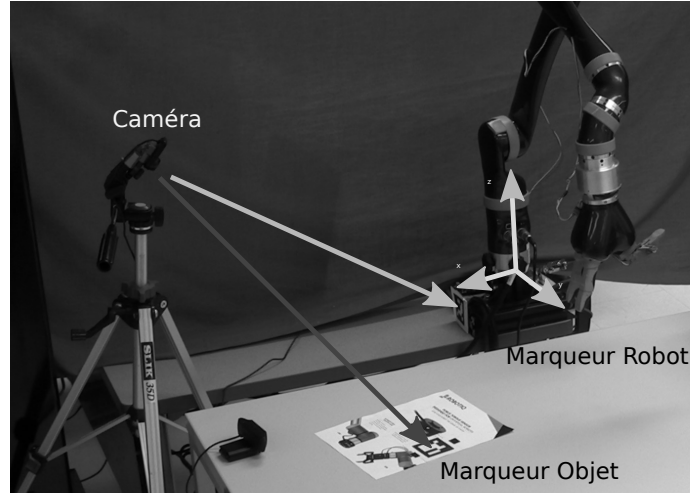


FIGURE 3.5 – Banc d’essai utilisé pour tester le concept muni de marqueurs fiduciaires.

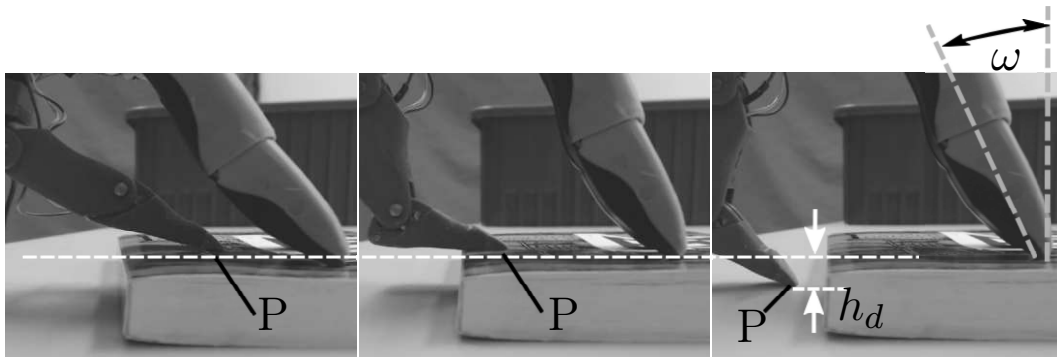


FIGURE 3.6 – Paramètres additionnels ω et distance h_d .

et la condition

$$\| \theta_3(i) - \theta_3(i-1) \| \geq \theta_f \quad (3.8)$$

est vérifiée. $\theta_3(i)$ est la valeur de θ_3 au temps i , et θ_f est une valeur seuil qui correspond à un rebord détecté. Le rebord de l’objet est détecté si l’équation (3.8) est satisfaite. Si un rebord est détecté, une force constante F_1 est appliquée pendant que le manipulateur ajuste ω pour abaisser le point D d’une quantité qui correspond à la quantité que le point P a baissé lors de la chute au rebord de l’objet. De plus, la condition

$$\theta_3(i) \leq \theta_{3,max} \quad (3.9)$$

est testée, où $\theta_{3,max}$ est la valeur maximale possible de θ_3 en raison des contraintes mécaniques. Lorsque l’équation (3.9) n’est pas satisfaite, la valeur limite θ_3 de l’articulation passive est atteinte. Cette situation correspond à prendre un objet tellement mince que le rebord n’est pas détecté ou à une valeur de k qui a été ajustée de telle manière que même à ouverture maximale, le rebord n’est pas compris dans l’ouverture de la pince. Les deux cas possibles sont montrés dans les figures 3.7 et 3.8.

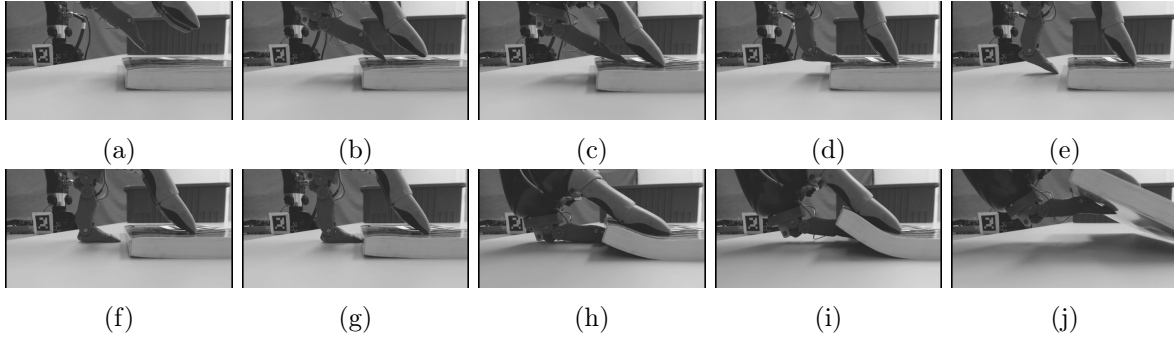


FIGURE 3.7 – Prise semi-englobante d’un livre avec le rebord détecté : (a) Position d’approche (b) Mouvement vers le bas (c) Contact mesuré par le capteur (d) Ouverture du pouce (e) Rebord détecté (f) Adaptation (g) Fermeture du pouce (h) Position finale du pouce atteinte (i) Fermeture finale des doigts (j) Départ pour effectuer une tâche auxiliaire.

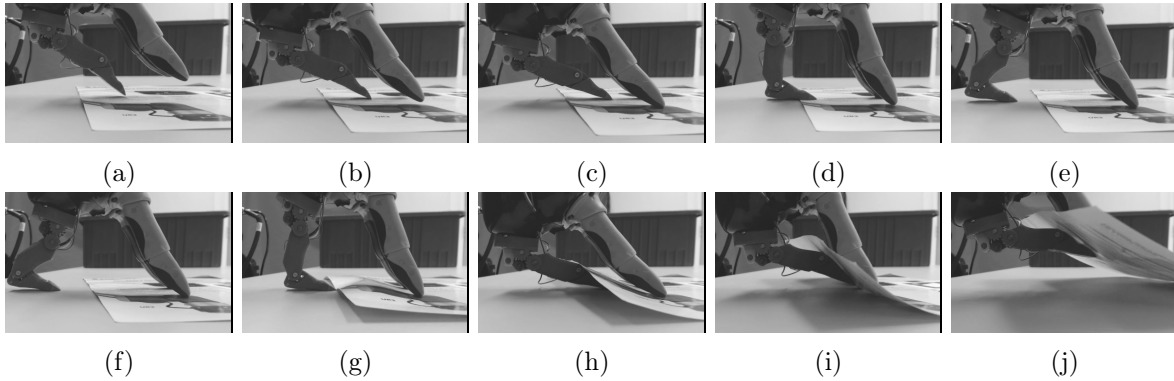


FIGURE 3.8 – Prise semi-englobante d’une feuille de papier sans rebord détecté : (a) Position d’approche (b) Mouvement vers le bas (c) Contact mesuré par le capteur (d) Ouverture du pouce (e) Rebord non détecté (f) L’articulation passive atteint $\theta_3 = \theta_{3,max}$ (g) Fermeture du pouce (h) Position finale du pouce atteinte (i) Fermeture finale des doigts (j) Départ pour effectuer une tâche auxiliaire.

Dans le cas de la figure 3.7, le rebord est détecté, l’ajustement pour la hauteur de l’objet est fait et la prise de l’objet est effectuée. Dans le cas de la figure 3.8, la limite mécanique de l’articulation passive est atteinte sans que le rebord de l’objet ne soit détecté, car l’objet est trop mince. La procédure de prise est tout de même effectuée lorsque la valeur maximale de θ_3 est atteinte.

L’étape d’insertion est semblable à l’étape d’ouverture du pouce, car une force F_1 est appliquée verticalement vers le bas pendant que le manipulateur ajuste ω dans le but de garder le point D à une hauteur constante. La différence étant que lors de cette étape, le pouce est positionné pour s’insérer sous l’objet pendant que la valeur de σ est augmentée jusqu’à une valeur de σ_f . Une fois $\sigma = \sigma_f$, la procédure de prise finale est effectuée. La séquence de prise finale veut que le préhenseur soit déplacé verticalement vers le haut jusqu’à une position prescrite pendant que le pouce et le doigt se referment de manière à appliquer une pression sur l’objet. Une fois

le mouvement des doigts stoppé par la force de réaction sur l'objet, on coupe le courant sur ces derniers pour prévenir une surchauffe. Les mécanismes d'actionnement linéaires étant auto-bloquants, la pression appliquée sur l'objet est maintenue en l'absence de puissance fournie. Une tâche auxiliaire, par exemple déposer l'objet dans une boîte, peut être effectuée par la suite selon le contexte. La liste des tâches est donnée dans le diagramme de la figure 3.9.

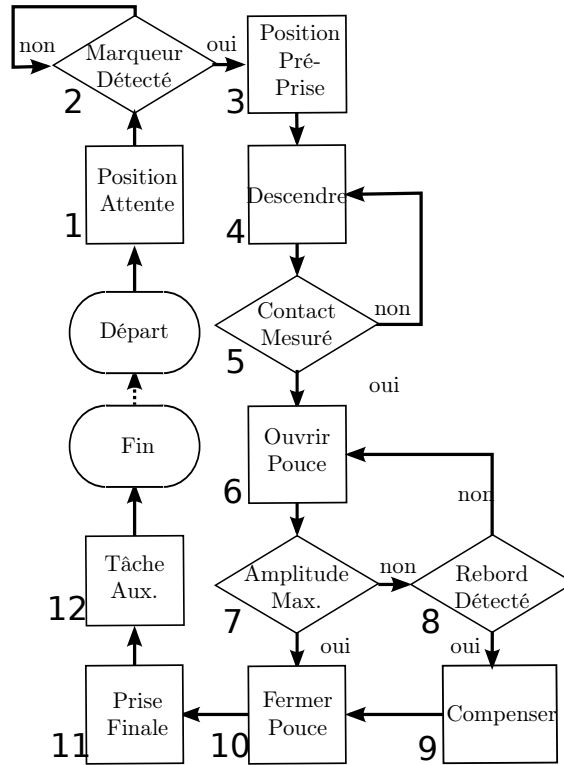


FIGURE 3.9 – Diagramme montrant le processus de décision de la prise.

1. Position attente : Bouger le manipulateur à une position articulaire prédéterminée dans l'espace articulaire.
2. Marqueur détecté : Attendre que le système de vision fournisse une position et une orientation d'un objet.
3. Position pré-préhension : Positionner le bout du doigt du préhenseur au-dessus de l'objet et à une distance k du rebord à un angle d'attaque ω , de manière à ce que le point D soit à une hauteur acceptable lorsque le contact a lieu avec l'objet au bout des doigts.
4. Descendre : Déplacer le robot verticalement vers le bas.
5. Une force mesurée : Mesurer une force d'amplitude égale ou plus grande que F_0 .
6. Ouvrir le pouce : Appliquer une force verticale F_1 vers le bas aux doigts, diminuer σ et garder le point D à une hauteur constante.
7. Amplitude maximale : Vérifier l'équation d'inégalité de l'équation (3.9).
8. Rebord détecté : Vérifier l'inégalité de l'équation (3.8).

9. Compenser : Accroître ω et abaisser le point D d'une distance h_d , comme montré à la figure (3.6).
10. Fermer le pouce : Appliquer une force verticale vers le bas F_1 aux doigts tout en augmentant σ jusqu'à une valeur σ_f , et maintenir le point D à une hauteur constante.
11. Préhension finale : Fermer les doigts tout en déplaçant le préhenseur vers le haut pour s'éloigner de la surface.
12. Tâche auxiliaire.

3.2.2 Paramètres expérimentaux et résultats

La procédure présentée à la section précédente a été implémentée avec le banc d'essai ayant les paramètres fournis dans cette section. Le tableau 3.1 montre les valeurs qui caractérisent le préhenseur tandis que le tableau 3.2 fournit les caractéristiques des objets sur lesquels la prise est testée. Avec ces paramètres, la cinématique du pouce construit est présentée à la figure 3.10

Tableau 3.1 – Propriétés du banc d'essai expérimental.

Paramètres du prototype			
Paramètre	Valeur (deg)	Paramètre	Valeur (mm)
α	31.20	l_1	15.00
θ_d	22.28	l_2	43.20
ψ_1	100.00	l_3	43.80
ψ_2	63.25	l_4	13.50
ω	28.00	l_6	12.00
$\theta_{3,max}$	110.67	r_x	-15.90
θ_f	3.52	r_y	-10.60
Paramètre	Valeur (N)	σ_i	18.46
F_0	2.00	σ_f	20.37
F_1	3.00	r_1	7.50
		r_2	7.50

et à la figure 3.11. La vidéo 4-1 montre la procédure de préhension implémentée et testée

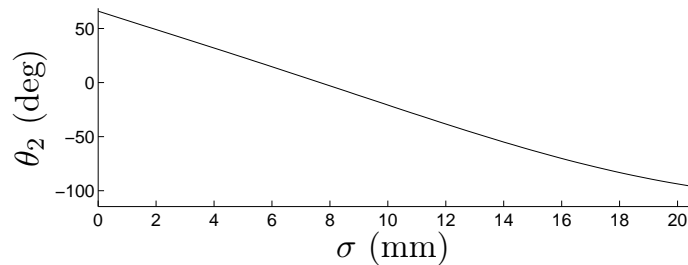


FIGURE 3.10 – Orientation du mécanisme de pouce (θ_2) en fonction de l'entrée.

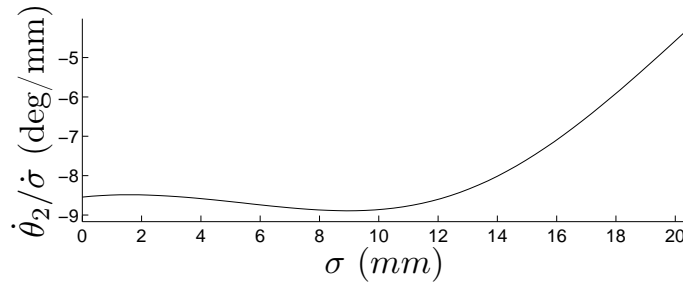


FIGURE 3.11 – Ratio de vitesse du doigt.

Tableau 3.2 – Propriétés des objets.

Propriétés des objets				
Description	h_o (mm)	l_o (mm)	m (kg)	k (mm)
Livret	3.05	229	0.1646	110
Pamphlet	0.59	88	0.0124	80
Livre	14.00	128	0.1667	80
Coffret Flexible	5.00	124	0.0368	110
Coffret Rigide	10.38	124	0.0765	110
Feuille de papier	0.13	209	0.0108	80

sur chacun des objets. La prise proposée saisit avec succès chacun des objets, comme montré dans les prises vidéos de plusieurs angles, enregistrées et montrées pour illustrer clairement les différents aspects de la méthode. Pour montrer la répétabilité de la méthode, les objets sont placés un à un sur une table, saisis par le manipulateur et déposés dans une boîte l'un à la suite de l'autre pour montrer que la procédure est faisable de manière continue et fiable avec les objets sélectionnés.

3.3 Discussion

On discute ici des observations faites lors des expérimentations. On remarque que les propriétés présentées dans le présent ouvrage et absentes des préhenseurs généralement rencontrés dans l'industrie sont l'utilisation d'une articulation passive pour garantir le contact du pouce avec la surface au point P . Cet atout est spécialement important dans l'exécution de la prise englobante présentée dans cette thèse en raison de la nature rigide du contact entre le pouce et la surface et des erreurs de positionnement présents lors du positionnement. Les incertitudes lors de la phase expérimentale émanent de trois sources. La première est l'utilisation d'un contrôleur proportionnel-dérivatif (PD) pour positionner chaque articulation. Ce contrôleur est utilisé dans le but d'introduire une certaine flexibilité des articulations du bras robotisé pour prévenir les dommages, mais contre moins l'effet de la gravité sur l'erreur de positionnement des articulations du robot. Plus précisément, en rendant le manipulateur plus flexible, on protège

mieux les doigts qui sont fragiles en comparaison au bras robotique. La deuxième source d'erreur provient des données fournies par la caméra. Comme dans tout système, le bruit est présent, et étant donné la nécessité de voir les deux marqueurs simultanément, la caméra doit être loin des marqueurs, introduisant plus d'erreurs sur le positionnement. La troisième source d'erreur est la fixation du robot. Un peu comme le contrôleur du robot qui est flexible, lorsque le bras s'éloigne de sa base, il a été observé que la fixation se déformait, entraînant encore plus d'erreurs de positionnement. Les effets de ces trois sources d'erreur peuvent être observés dans la vidéo 4-1. On peut en effet voir dans les vidéos que le préhenseur devrait toujours être aligné avec les axes principaux de l'objet, mais ce n'est pas toujours le cas.

Il a été observé pendant l'expérimentation que le fait d'utiliser un capteur pour mesurer l'angle θ_3 est comme utiliser un capteur d'effort avec une très grande flexibilité. Cet aspect de la mesure permettrait d'augmenter les vitesses d'approche des objets de manière relativement sécuritaire. En effet, lorsque le préhenseur approche la surface, sa vitesse est limitée par les forces qui seront induites par le contact avant qu'il ne puisse s'arrêter. En utilisant l'articulation passive, un grand débattement peut être induit sans endommager le système, ce qui permet donc d'arriver vers les objets à plus grande vitesse et de réduire les délais d'approche des objets.

À la figure 3.7, il est montré qu'à la suite de la détection du rebord d'un objet, l'extension du pouce cesse. De plus, une fois le rebord détecté, le manipulateur ajuste l'orientation du poignet pour obtenir un angle d'attaque optimal de la phalange distale du pouce. Cet angle d'attaque optimal augmente la probabilité d'une insertion du pouce réussie, comme montré à la figure 3.8. Dans le cas où aucun rebord n'est détecté, la prise peut tout de même être exécutée, car la valeur maximale de θ_3 est atteinte. La prise est alors effectuée.

Dans le but d'obtenir une procédure réussie, différents paramètres de prise ont été utilisés pour certains objets, par exemple pour les étuis de disques, car ils sont plus difficiles à prendre. Ces paramètres sont présentés à au tableau 3.2, où le paramètre k est plus élevé pour une meilleure chance d'insertion. On note que la procédure réussit à prendre tous les objets avec $k = 110$ mm et comme prédit dans le chapitre 2, augmenter la distance k accroît l'efficacité de la méthode. On remarque que les valeurs les plus grandes de k ont été utilisées uniquement pour la prise du livret afin de montrer dans la vidéo la profondeur à laquelle on peut insérer le pouce, et ce, même si la prise était réussie avec des valeurs plus petites. Il est important de mentionner que cette méthode est fortement basée sur l'hypothèse que le bras robotisé est capable de se positionner de manière à réaliser la méthode, et donc que les trajectoires sont dans l'espace de travail du robot.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, a été traitée l'implantation des prises englobante et semi-englobante d'objets rigides et flexibles reposant sur des surfaces rigides. Un prototype de pouce spécialisé dans l'exécution des prises englobante et semi-englobante a été construit et l'analyse cinématique du nouveau pouce a été présentée. Le banc d'essai a été testé et les résultats ont été présentés dans la vidéo 4-1. Dans la vidéo, chaque objet est pris par le système avec la méthode proposée de manière continue dans le but de montrer la répétabilité de la méthode sur les objets testés. Basés sur les données expérimentales, la procédure et le prototype avancés sont capables de prendre les objets proposés, même en présence d'occlusions. De manière à compenser les incertitudes de positionnement du manipulateur et de mesure du système de vision, il a été montré que l'articulation passive est une solution effective. Bien qu'utile, l'utilisation d'un potentiomètre pour mesurer la position de la phalange distale ne s'est pas avérée critique autrement que pour fournir une mesure additionnelle. Les designs futurs ne l'incluront donc pas. Les travaux futurs tenteront donc d'incorporer les conclusions précédentes dans un nouveau design.

Chapitre 4

Design d'un préhenseur adapté au ramassage et à la prise latérale parallèle

4.1 Introduction

Les travaux de ce chapitre sont basés sur les travaux publiés dans [Babin et Gosselin \(2018\)](#).

Au chapitre 3 a été présenté un mécanisme spécialisé dans le ramassage des objets. Bien que la solution proposée ait été adéquate pour accomplir la tâche, cette dernière est dépendante d'actionneurs déjà présents sur un bras pour être utilisée. Lors du design d'un préhenseur, l'objectif peut avoir une grande influence sur la forme du préhenseur obtenu. En effet, certains préhenseurs sont construits de manière à pouvoir manipuler des objets avec une grande dextérité en utilisant seulement les propriétés de la main ([Tadakuma *et al.*, 2012](#)). D'autres mains sont construites pour être pourvues d'un grand degré d'adaptabilité pour pouvoir envelopper diverses formes d'objets et se reconfigurer durant la saisie ([Quigley *et al.*, 2014](#); [Wei *et al.*, 2011](#); [Demers et Gosselin, 2011](#)). Cependant, la plupart des designs sont très rigides, en raison des matériaux utilisés et de la nécessité d'obtenir des mécanismes solides et fiables.

Comme mentionné au chapitre 3, des études travaillent activement à catégoriser les types de prises de la main humaine ([Cutkosky, 1989](#)). Ces travaux sont utiles pour prévoir les besoins lors du design de mains anthropomorphes, mais également pour exclure les prises complexes qui ne serviraient qu'à une petite proportion des objets à saisir. Parmi ces études, la reconnaissance de modèles avec des méthodes numériques est populaire pour tenter de trouver des formulations nouvelles ([Bicchi *et al.*, 2011](#); [Catalano *et al.*, 2014](#)).

La main étant un outil très complexe chez l'humain, lorsque des designs tentent de copier les capacités de cette dernière, les résultats sont souvent très complexes. Dans le but de montrer

que la main humaine n'est pas un bon objectif lorsque la préhension avec des mécanismes simples est recherchée, (Monkman *et al.*, 2007) montrent que la plupart des prises tirées de la main humaine peuvent être effectuées avec seulement deux doigts. Il est cependant mentionné que, bien que la prise finale soit stable, comme indiqué dans le chapitre 3, la manipulation qui mène à cette prise est tout aussi importante en raison du potentiel d'éjection (Birglen *et al.*, 2007).

Un problème répandu dans le design de doigts mécaniques est le débattement limité de ces derniers en raison des limitations du mécanisme quatre barres. Ces derniers ne pouvant être repliés sur eux-mêmes, les mécanismes ont peine à tirer avantage du plein mouvement des phalanges (Koganezawa et Ishizuka, 2008; Babin *et al.*, 2019).

Dans ce chapitre est présenté un design de préhenseur qui prend les concepts prouvés de mécanismes planétaires et de phalange passive du chapitre 3 et qui propose un design complet d'un préhenseur tirant avantage de ces concepts. Ce design a pour but d'être adapté au ramassage d'objets et d'inclure la possibilité de prises parallèles pour que ce dernier soit aussi général que possible.

On retrouve également dans ce chapitre la cinématique des différents mécanismes utilisés dans le design d'un préhenseur à prise parallèle ayant deux phalanges par doigt. D'abord, la configuration du planétaire utilisé est montrée, suivie de l'utilisation d'un mécanisme à quatre barres pour obtenir une prise parallèle des phalanges distales. La cinématique utilisée pour décrire chaque doigt est présentée, puis le mécanisme de transmission actionnant chaque doigt est étudié. Par la suite, un mécanisme d'ongle utilisé dans le but d'accroître les capacités de ramassage et de prise latérale du préhenseur est présenté. Les valeurs numériques du design sont ensuite présentées pour être en mesure de montrer quantitativement les propriétés du mécanisme. La manière de prendre des objets avec des grandes forces et de tirer avantage de la cinématique de la transmission est ensuite montrée. Finalement, l'application de la méthode du ramassage est étudiée pour ce préhenseur et trois stratégies sont proposées pour démontrer la nécessité des concepts utilisés par le préhenseur pour effectuer le ramassage.

4.2 Design proposé

Le préhenseur présenté dans cette section est muni d'un mécanisme de pouce passif comme au chapitre 3 pour maintenir le contact avec la surface et effectuer le ramassage avec un bon angle d'attaque. La suggestion du chapitre 1 et la validation au chapitre 3 de ramasser les objets avec un préhenseur muni de la plus grande ouverture possible est prise en compte. Cette ouverture nécessite donc un grand débattement des phalanges par rapport à chaque phalange adjacente. L'utilisation d'une articulation rotoïde, qui est courante dans le design de doigts, est ici mal adaptée pour deux raisons. La première est, qu'en pratique, il est plus complexe de concevoir des doigts avec un grand débattement des phalanges tout en empêchant que les surfaces

internes du même doigt n’entrent en contact, ce qui bloque le doigt. La deuxième est qu’une articulation en rotation n’est pas pourvue de mécanisme de transmission ou d’amplification. Le mécanisme d’actionnement doit donc être pourvu d’un grand débattement. Pour remédier à ces deux problèmes, les planétaires sont encore utilisés parce qu’ils sont munis d’un rapport d’amplification et que, les phalanges en mouvement roulant l’une sur l’autre, elles préviennent le contact prématuré des surfaces internes.

Le mécanisme présenté est aussi muni de deux doigts pour être capable de prendre des objets en opposition tout en gardant le design le plus simple possible. L’étude considérée supposant que la friction est présente, les objets pris pourront être tenus et réorientés avec seulement deux points de contact sur l’objet. Le design présenté utilise la même proportion pour chacun des doigts, mais est muni de mécanismes de transmission différents pour chacun. Les doigts possèdent également une largeur différente, comme montré à la figure 4.1, et ont donc des propriétés cinématiques différentes. Dans le but d’alléger la notation, les deux doigts sont

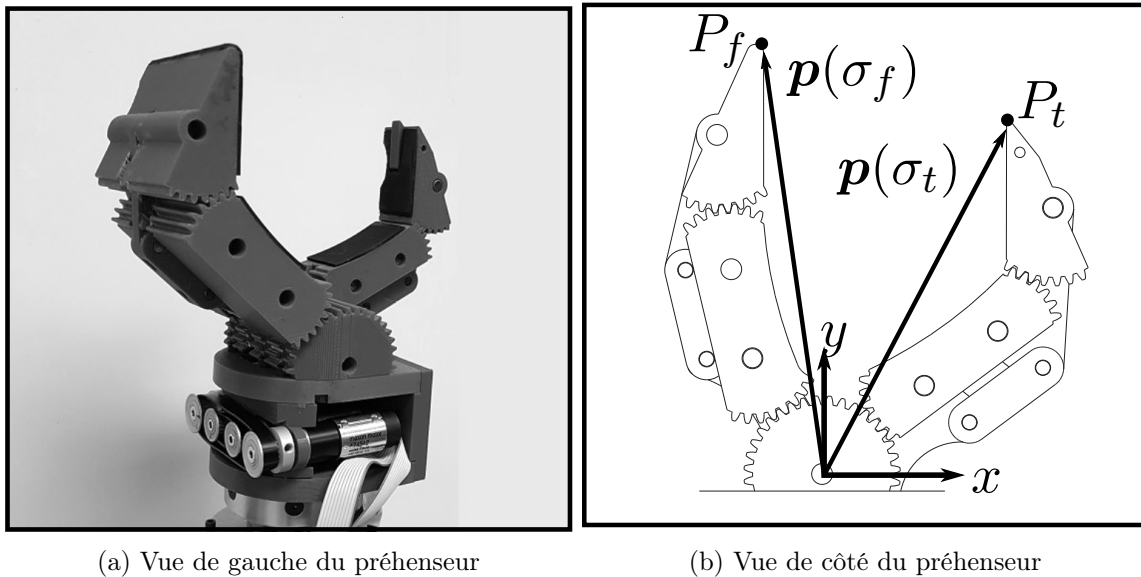


FIGURE 4.1 – Vue de côté du préhenseur proposé.

annotés par les indices f et t , respectivement le doigt *finger* et le pouce *thumb*. Avec cette notation, l’angle θ_{1i} du pouce est donc θ_{1t} .

La figure 4.2 montre que le doigt, à gauche, est plus large que le pouce, à droite. Ce choix est justifié par le besoin de pouvoir bien supporter des objets dont le centre de masse est éloigné de la pince. De plus, avoir une plus grande surface du doigt aide à mieux distribuer les forces sur la surface de contact. Chacun des doigts est actionné par un mécanisme bielle-manivelle monté sur une vis ACME. La vis est actionnée par le moteur au moyen d’une courroie, montrée de côté à la figure 4.1a. Les deux courroies sont assemblées de manière concentrique pour obtenir un design plus compact. Le mécanisme est donc étudié en deux

parties. La première est le mécanisme des doigts à partir de l'actionnement du porte-satellites et la deuxième, le mécanisme de la transmission, qui est l'étude du mécanisme du moteur jusqu'au porte-satellites, comme montré à figure 4.3.

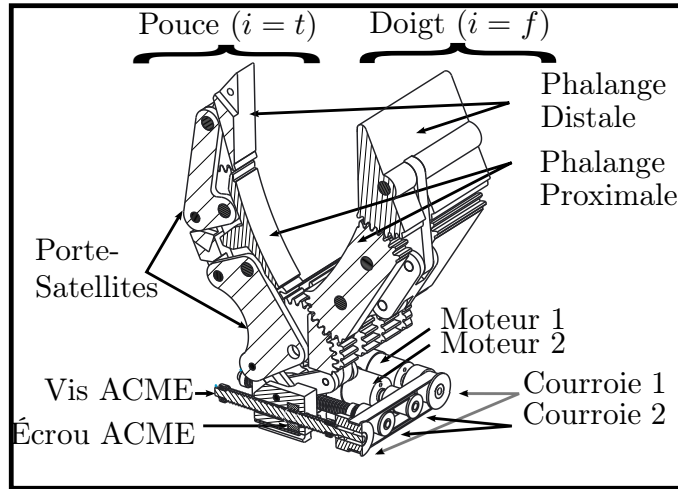


FIGURE 4.2 – Vue de coupe du mécanisme pour montrer la mécanique des doigts et de la transmission.

4.2.1 Mécanisme planétaire de base utilisé

Cette section établit le modèle cinématique des doigts. La structure des doigts étant la même, les équations sont obtenues avec le schéma de la figure 4.3, qui montre les liaisons planétaires et les liens mécaniques constituant les doigts. Contrairement à la plupart des doigts mécaniques apparaissant dans la littérature¹, le mécanisme utilise à chaque articulation entre deux phalanges un mécanisme planétaire dans le but d'accroître le débattement de ces derniers. Ce grand débattement permet aux préhenseurs d'être munis d'une grande ouverture de pince sans toutefois trop complexifier le mécanisme.

La notation qui se trouve dans Babin *et al.* (2014) est celle qui est utilisée pour caractériser le rapport de réduction du mécanisme planétaire. L'entrée du mécanisme est le porte-satellites et la sortie est l'engrenage planète. L'équivalence entre le mécanisme original et la version utilisée dans cet ouvrage est présentée à la figure 4.4. Les paramètres décrivant la géométrie

1. Il existe des mécanismes de doigt utilisant des liaisons planétaires (Catalano *et al.*, 2014).

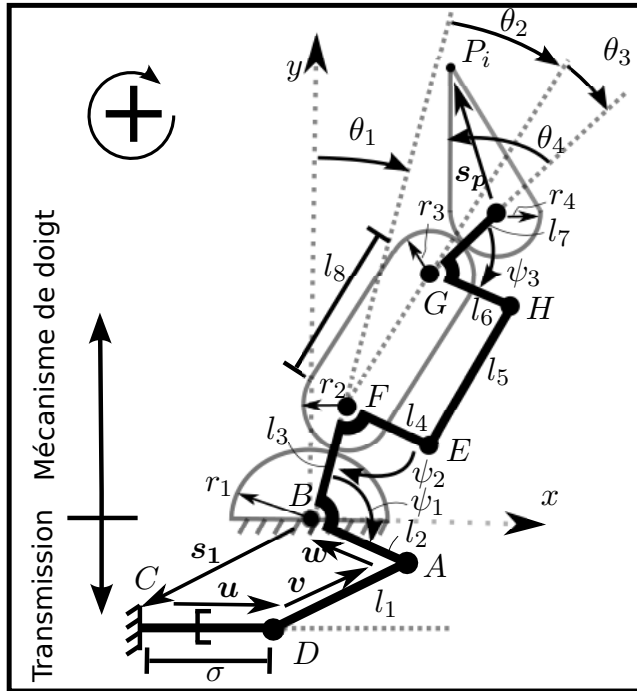
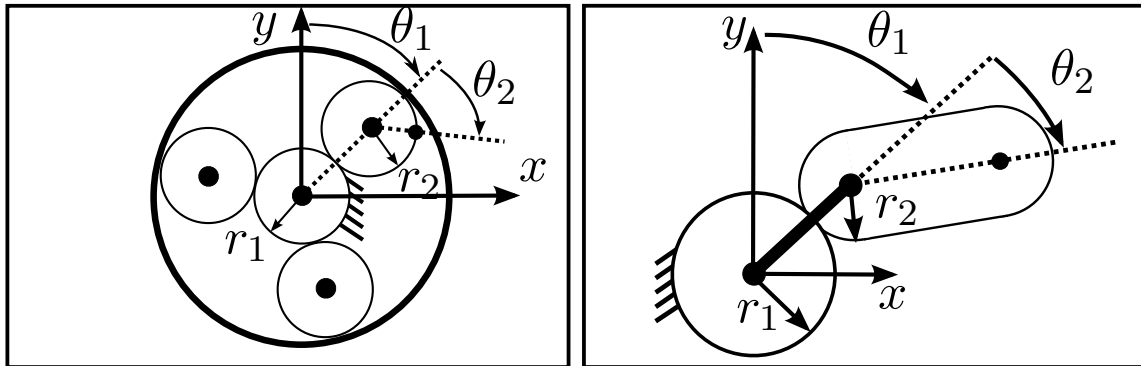


FIGURE 4.3 – Les variables utilisées pour étudier la cinématique du doigt.



(a) Mécanisme d'engrenages planétaires

(b) Mécanisme d'engrenages planétaires adapté pour que l'engrenage planète soit la phalange suivante

FIGURE 4.4 – Comparaison entre le mécanisme planétaire générique et l'implémentation de ce chapitre.

du planétaire sont

$$n_1 = \frac{r_1}{r_1 + 2r_2} \quad (4.1)$$

$$R_1 = \frac{2n_1}{1 - n_1} \quad (4.2)$$

$$n_2 = \frac{r_3}{r_3 + 2r_4} \quad (4.3)$$

$$R_2 = \frac{2n_2}{1 - n_2} \quad (4.4)$$

Les relations décrivant le mouvement des articulations à la figure 4.3 sont

$$\theta_2 = R_1\theta_1 + \theta_{d1} \quad (4.5)$$

et

$$\theta_4 = R_2\theta_3 + \theta_{d2}, \quad (4.6)$$

où r_1 et r_2 sont respectivement le rayon d'action des engrenages soleil et planète de l'articulation de la base; où r_3 et r_4 sont respectivement le rayon d'action des engrenages soleil et planète de la deuxième articulation planétaire de chaque doigt; et, finalement, où θ_{d1} et θ_{d2} consistent en des paramètres constants qui sont dépendants de l'assemblage initial des mécanismes planétaires. Les angles θ_1 , θ_2 , θ_3 et θ_4 sont eux aussi montrés à la figure 4.3 et sont des variables dépendantes de la configuration du mécanisme.

4.2.2 Mécanisme permettant la prise parallèle

Une propriété des préhenseurs qui est très recherchée est leur capacité d'un préhenseur à effectuer une prise parallèle. Cette prise est l'action de fermer les phalanges distales de chaque côté d'un objet tout en les gardant parallèles. Certains designs utilisent des moteurs supplémentaires pour contrôler chaque articulation indépendamment et ainsi obtenir cette propriété activement. Cette approche est cependant plus coûteuse, car elle utilise davantage de moteurs en comparaison à des méthodes passives mécaniques. Certaines méthodes utilisent des cames en combinaison avec des barres pour synchroniser le mouvement de la phalange distale avec la base du préhenseur (Bartholet, 1992). D'autres designs utilisent des mécanismes à quatre barres pour synchroniser le mouvement des articulations avec la base et ainsi obtenir des prises parallèles (Laliberté *et al.*, 2002). Cet arrangement est présenté à la figure 4.5a, tandis que l'arrangement utilisant un mécanisme à quatre barres quand les articulations sont des planétaires est présenté à la figure 4.5b. Si on se réfère aux figures 4.3 et 4.5b, le mécanisme à quatre barres est le parallélogramme $FEHG$ formé par les barres de longueurs ℓ_4 , ℓ_5 , ℓ_6 et ℓ_8 . Pour que le mécanisme se comporte comme un parallélogramme, les contraintes

$$\ell_5 = \ell_8 \quad (4.7)$$

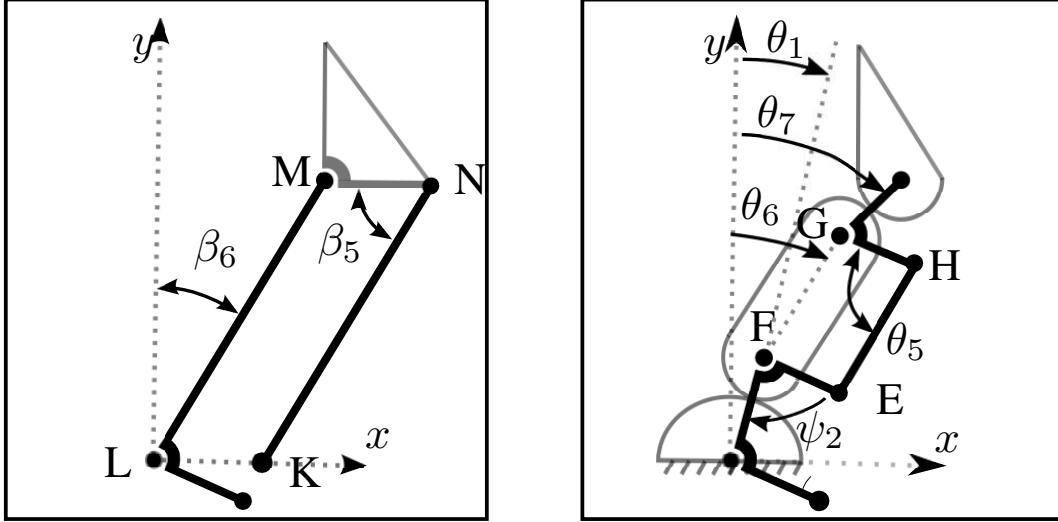
$$\ell_4 = \ell_6 \quad (4.8)$$

sont donc imposées. Pour mieux expliquer les avantages d'utiliser un mécanisme à quatre barres en tandem avec des articulations planétaires, la cinématique du doigt est développée plus en détail.

Premièrement, si on se réfère à la figure 4.3, les équations de fermeture de la boucle sont obtenues, c'est-à-dire

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0 \quad (4.9)$$

$$\theta_2 + \theta_3 + \psi_2 + \psi_3 = \pi, \quad (4.10)$$



(a) Utilisation d'un mécanisme quatre barres pour garder la phalange distale à une orientation constante. (b) Utilisation d'un mécanisme quatre barres dans le contexte où les joints sont des mécanismes planétaires pour garder la phalange distale à une orientation constante.

FIGURE 4.5 – Comparaison de l'utilisation de mécanismes quatre barres.

où ψ_2 et ψ_3 sont des constantes de design. Deuxièmement, le rapport de réduction R_2 de (4.4) nécessaire pour obtenir une parallèle doit être déterminé. En dérivant les équations (4.9), (4.10), (4.5) et (4.6), les relations

$$d\theta_1 + d\theta_2 + d\theta_3 + d\theta_4 = 0 \quad (4.11)$$

$$d\theta_2 + d\theta_3 = 0 \quad (4.12)$$

$$d\theta_2 = R_1 d\theta_1 \quad (4.13)$$

$$d\theta_4 = R_2 d\theta_3 \quad (4.14)$$

sont obtenues. En combinant les équations (4.11) jusqu'à (4.14), la relation

$$R_1 R_2 = 1, \quad (4.15)$$

qui est la contrainte nécessaire pour garder la phalange distale à une orientation constante, est obtenue. Ce résultat peut être exprimé en fonction des dimensions requises des engrenages de l'articulation planétaire distale. Pour ce faire, (4.4) et (4.15) sont combinées pour obtenir

$$R_1 \frac{2n_2}{1 - n_2} = 1. \quad (4.16)$$

Par la suite, (4.3) est utilisée pour exprimer (4.16) en termes du rayon d'action des engrenages, ce qui a comme résultat

$$2R_1 \frac{r_3}{r_3 + 2r_4} = 1 - \frac{r_3}{r_3 + 2r_4}, \quad (4.17)$$

qui peut être réarrangé comme

$$r_4 = R_1 r_3. \quad (4.18)$$

L'équation (4.18) est la condition finale qui doit être satisfaite pour que la phalange distale de chaque doigt maintienne une orientation constante pendant toute sa trajectoire d'ouverture et de fermeture.

4.2.3 Angle de transmission du mécanisme à quatre barres

À la figure 4.5a est montrée une implémentation commune d'un mécanisme quatre barres pour conserver une phalange distale à une orientation constante. L'angle β_5 y est présenté comme l'angle de transmission du mécanisme. L'entrée est le lien connectant les points L et M , et la sortie du mécanisme est le lien connectant les points M et N . Dans ce cas, l'angle β_5 doit dévier le moins possible de 90 degrés pour que le mécanisme quatre barres soit le plus propice possible à transmettre des forces. L'expression de l'angle de transmission en fonction de l'angle β_6 est

$$\beta_5 = \frac{\pi}{2} - \beta_6. \quad (4.19)$$

Si on observe la figure 4.5b, la relation

$$\pi = \psi_2 + \theta_5 + \theta_6 - \theta_1 \quad (4.20)$$

est obtenue et, à partir des figures 4.4b, 4.5b et de l'équation (4.5), la relation

$$\theta_6 = (R_1 + 1)\theta_1 + \theta_{d1} \quad (4.21)$$

est obtenue. Cette dernière est réarrangée pour θ_1 et (4.20) y est combinée pour obtenir l'expression de θ_5 en fonction de θ_6 . Le résultat obtenu est

$$\theta_5 = \pi - \psi_2 - \frac{\theta_{d1}}{R_1 + 1} - \frac{R_1}{R_1 + 1}\theta_6, \quad (4.22)$$

où θ_{d1} est un paramètre de design dépendant de l'assemblage initial. Dans le but de comparer les mécanismes, les équations (4.19) et (4.22) sont dérivées, ce qui donne

$$d\beta_5 = -d\beta_6 \quad (4.23)$$

$$d\theta_5 = -\frac{R_1}{R_1 + 1}d\theta_6. \quad (4.24)$$

En comparant les relations des équations (4.23) et (4.24), on peut observer que la déviation à partir d'un angle quelconque de la configuration avec articulations planétaires se fait de manière moins rapide, car elle est multipliée par une constante toujours plus petite que l'unité en ajustant R_1 . Par contre, le mécanisme avec des liaisons rotoïdes de la figure 4.5a voit la déviation de l'angle de transmission croître de un lorsque l'entrée croît de un et ce gain ne peut être modifié.

4.2.4 Équations cinématiques des doigts

Si on se réfère à la figure 4.3, le vecteur \mathbf{p} est présenté comme la position du point P_i , située au bout du doigt par rapport au système d'axes d'origine, situé au point B . Avec les angles

$$\theta_6 = \theta_1 + \theta_2 \quad (4.25)$$

$$\theta_7 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4.26)$$

montrés à la figure 4.5b, le vecteur \mathbf{p} est exprimé comme

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} l_3 \sin \theta_1 + l_8 \sin \theta_6 + l_7 \sin \theta_7 \\ l_3 \cos \theta_1 + l_8 \cos \theta_6 + l_7 \cos \theta_7 \end{bmatrix} + \mathbf{s}_p, \quad (4.27)$$

où \mathbf{s}_p est le vecteur montré à la figure 4.3, pointant du pivot de la phalange distale au bout du doigt. Avec la combinaison des équations (4.26) et (4.10), l'angle θ_7 en fonction de θ_1 est exprimé comme

$$\theta_7 = \theta_1 + \pi - \psi_2 - \psi_3. \quad (4.28)$$

En dérivant l'équation (4.27) et en combinant le résultat avec l'équation (4.5) et avec la notation $s_1 = \sin \theta_1$, $c_1 = \cos \theta_1$, $s_6 = \sin \theta_6$, $c_6 = \cos \theta_6$, $s_7 = \sin \theta_7$ et $c_7 = \cos \theta_7$, on obtient le résultat suivant :

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} l_3 c_1 + (R_1 + 1)l_8 c_6 + l_7 c_7 \\ -l_3 s_1 - (R_1 + 1)l_8 s_6 - l_7 s_7 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1. \quad (4.29)$$

Il représente la vitesse du bout des doigts en fonction de la vitesse de l'entrée $\dot{\theta}_1$ pour une configuration θ_1 du doigt donnée.

4.2.5 Mécanisme de transmission

Comme mentionné précédemment, chaque doigt est muni de son mécanisme de transmission. Ce mécanisme consiste en un mécanisme bielle-manivelle qui actionne l'entrée du doigt θ_1 . La bielle est actionnée par une vis ACME, qui agit comme la liaison prismatique σ montrée à la figure 4.3. Pour trouver la relation entre l'entrée et la sortie du mécanisme, l'équation de fermeture

$$-\mathbf{v} = \mathbf{s}_1 + \mathbf{u} + \mathbf{w} \quad (4.30)$$

est présentée avec les vecteurs \mathbf{y} apparaissant qui se trouvent à la figure 4.3. Le vecteur \mathbf{s}_1 est un vecteur constant, $\mathbf{u} = \sigma_i [1 \ 0]^T$, $\mathbf{w} = l_2 [-\sin(\theta_1 + \psi_1) \ -\cos(\theta_1 + \psi_1)]^T$, $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = l_1^2$ et σ_i est le vecteur d'entrée. En multipliant chaque côté par sa transposée, le résultat

$$\mathbf{v}^T \mathbf{v} = (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u} + \mathbf{w})^T (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u} + \mathbf{w}) = \ell_1^2 \quad (4.31)$$

est obtenu. Ce résultat est réarrangé pour avoir

$$2(\mathbf{s}_1 + \mathbf{u})^T \mathbf{w} + (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u})^T (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u}) + \ell_2^2 - \ell_1^2 = 0. \quad (4.32)$$

Avec

$$A_k = -2\ell_2(\mathbf{s}_1 + \mathbf{u})^T \mathbf{e}_1, \quad (4.33)$$

$$B_k = -2\ell_2(\mathbf{s}_1 + \mathbf{u})^T \mathbf{e}_2, \quad (4.34)$$

$$C_k = (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u})^T (\mathbf{s}_1 + \mathbf{u}) + \ell_2^2 - \ell_1^2, \quad (4.35)$$

l'équation (4.32) peut être exprimée comme

$$A_k \sin(\theta_1 + \psi_1) + B_k \cos(\theta_1 + \psi_1) + C_k = 0, \quad (4.36)$$

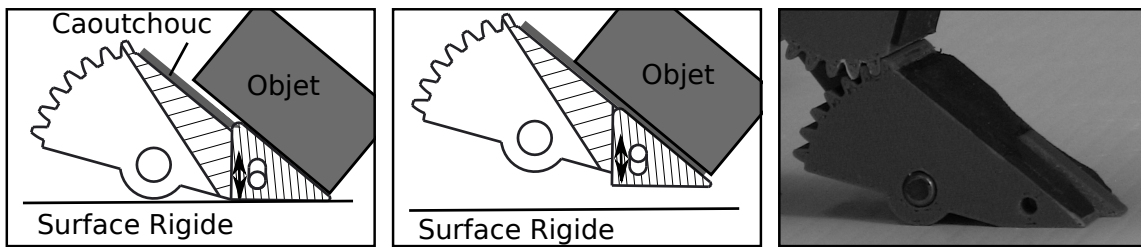
où $\mathbf{e}_1 = [1 \ 0]^T$, $\mathbf{e}_2 = [0 \ 1]^T$, et $k = t, f$ (pouce et doigt). L'équation (4.36) est résolue pour θ_1 en fonction de l'entrée σ_i , donc

$$\theta_1 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{-A_k - \sqrt{A_k^2 + B_k^2 - C_k^2}}{C_k - B_k} \right) - \psi_1. \quad (4.37)$$

Une fois que l'angle θ_1 est calculé, le reste des variables exprimant la configuration du doigt peuvent être obtenues avec (4.21) et (4.28).

4.2.6 Mécanisme d'ongle rétractable

Avec le raisonnement présenté au chapitre 1, il a été conclu que l'utilisation d'un matériel qui a un faible coefficient de friction avec l'objet en question est préférable. Cette propriété des doigts n'est cependant pas souhaitée lorsque le but est de saisir des objets en prise latérale avec une prise la plus robuste possible. En effet, lorsque les objets sont saisis, la friction entre les doigts et les objets devrait être la plus élevée possible pour les empêcher de glisser. Pour remédier à ce problème, un mécanisme d'ongle rétractable, montré à la figure 4.6, est proposé pour modifier les propriétés de friction du pouce en fonction du contexte de prise en question. Lorsque le pouce est en contact avec la surface, l'ongle est poussé vers la surface intérieure



(a) Le mécanisme d'ongle lorsque le pouce est en contact avec la surface dure, forçant l'objet à glisser sur l'ongle.
 (b) Le mécanisme d'ongle lorsque le pouce n'est pas en contact, permettant à l'objet d'être en contact avec la surface caoutchoutée du doigt.
 (c) Photo du mécanisme d'ongle

FIGURE 4.6 – Vues de côté présentant le mécanisme d'ongle.

du pouce, ce qui force l'objet à glisser sur une surface glissante, l'ongle étant construit en ABS, comme montré à la figure 4.6a. Le poids de l'objet ne peut repousser l'ongle, car la force est transmise directement à la surface. Une fois que le pouce se dégage de la surface, un mouvement de l'ongle est possible et ce dernier va se rétracter, permettant à l'objet d'entrer en contact avec la surface caoutchoutée et d'être bien saisi, comme montré à la figure 4.6b. Le mécanisme construit est présenté à la figure 4.6c.

4.3 Dimensions du prototype

Un prototype de préhenseur est construit avec les propriétés cinématiques présentées dans ce chapitre. La majorité des composants sont faits avec un procédé d'impression 3D en plastique ABS. Dans le but de présenter les propriétés cinématiques spécifiques au design de cette section, les dimensions du mécanisme qui obéissent aux contraintes de prise parallèle des équations (4.9) et (4.10) sont montrées au tableau 4.1.

Au tableau 4.1, le paramètre θ_{3min} est seulement présenté pour le pouce, car il s'agit d'un paramètre exclusif au pouce et est présenté dans les sections suivantes. Les dimensions présentées serviront à étudier deux procédures de préhension. La première est le serrage à grande force pour certaines configurations des doigts. La seconde, qui constitue la contribution principale de ce chapitre, est l'étude de l'utilisation du ramassage de petits objets par le préhenseur mécanique présenté dans cette section.

4.4 Prise latérale à grande force

Dans le but d'étudier les propriétés de serrage du préhenseur, les équations cinématiques de la section 4.2 sont utilisées. Les coordonnées du bout du doigt (x_f, y_f) et du bout du pouce (x_t, y_t) sont tracées à la figure 4.7 en fonction de la position de l'actionnement σ_i de chacun. Il

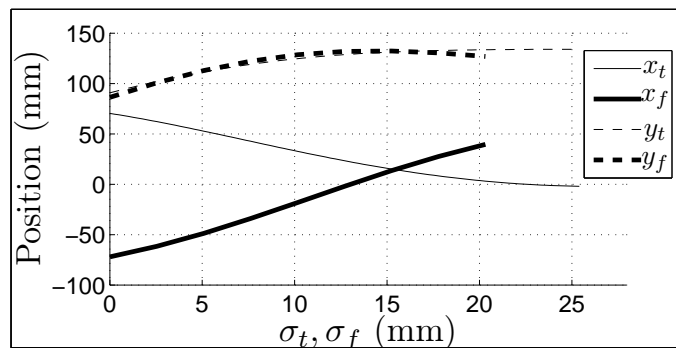


FIGURE 4.7 – Coordonnées du bout du doigt (x_f, y_f) et du bout du pouce (x_t, y_t) respectivement en fonction de la position de l'actionnement du doigt σ_f et du pouce σ_t .

est mentionné que la cinématique du doigt est la symétrie de la même que celle du pouce, ce

Tableau 4.1 – Dimensions du prototype

Paramètres du prototype		
Paramètres	Pouce (mm)	Doigt (mm)
l_1	17.27	21.59
l_2	26.67	18.79
l_3	41.14	41.14
l_4	17.78	13.97
l_5	27.94	27.94
l_6	17.78	13.97
l_7	41.14	41.14
l_8	27.94	27.94
r_1	22.60	22.60
r_2	18.54	18.54
r_3	18.54	18.54
r_4	22.60	22.60
σ_{max}	25.40	22.86
\mathbf{s}_1	$[-0.76 \quad -25.40]^T$	$[-17.01 \quad -25.40]^T$
\mathbf{s}_p	$[-14.22 \quad 26.92]^T$	$[-14.22 \quad 24.89]^T$
Paramètres	Pouce (deg)	Doigt (deg)
ψ_1	85	110
ψ_2	100	120
ψ_3	105	85
θ_{d1}	-55	-55
θ_{d2}	0	0
θ_{3min}	-40.65	-
α_{design}	38.66	-

qui nécessite de prendre la valeur négative de la coordonnée x dans les équations. Les doigts effectuant un mouvement dans le plan, la distance entre ces derniers, qui représente la taille des objets pouvant être pris en prise parallèle, est la distance selon l'axe x . Cette distance est donc présentée à la figure 4.8 en fonction de l'actionnement des doigts avec des courbes de niveau montrant que, pour une même distance, il existe une infinité de solutions combinant la position des deux actionneurs. Toutefois, pour chaque droite de solutions, une seule solution représente une distance où la hauteur du bout des deux doigts est égale. Cette solution est l'intersection de la distance voulue et de la droite de symétrie. Elle est également la solution où les deux doigts sont à une distance égale de l'axe- x .

Lorsqu'on analyse les trajectoires de la figure 4.7, une attention particulière est portée aux zones où la dérivée de la position par rapport aux entrées est petite ou nulle. Deux de ces zones existent. Ces zones sont lorsque x_t et y_t arrivent en fin de trajectoire, donc σ_t tend vers 25,4 mm, et lorsque y_f tend vers zéro alors que σ_f tend vers 15,24 mm. Le deuxième cas n'est

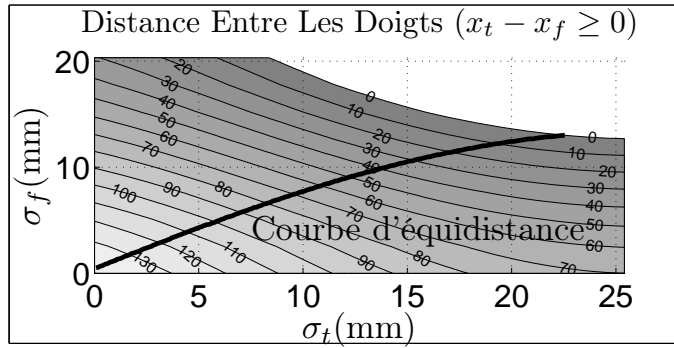


FIGURE 4.8 – Distance entre le bout du pouce et le bout du doigt selon l'axe- x en fonction de la position respective de l'entrée du pouce σ_t et du doigt σ_f .

pas intéressant dans l'étude de la force de serrage, car seulement l'étude des forces dans la direction x sert à la saisie. Avec ce même raisonnement, la zone où σ_t tend vers 25,4 mm est donc étudiée. Les dérivées des trajectoires présentées à la figure 4.7 par rapport aux entrées en fonction de la configuration des doigts sont montrées à la figure 4.9 avec l'aide de (4.29). À la figure 4.9, il est confirmé que les dérivées des trajectoires du pouce, donc les vitesses,

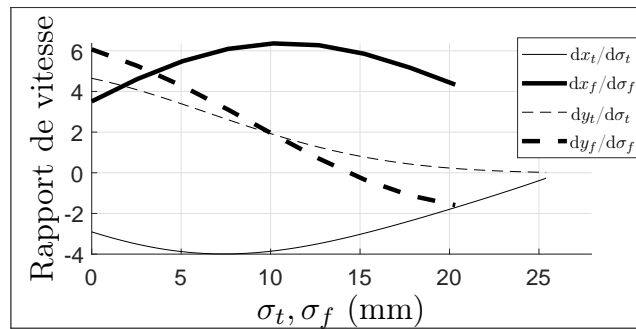


FIGURE 4.9 – Rapport de la vitesse du pouce (\dot{x}_t, \dot{y}_t) et du doigt (\dot{x}_f, \dot{y}_f) respectivement sur la vitesse des entrées ($\dot{\sigma}_t$ and $\dot{\sigma}_f$). Les rapports de vitesse sont montrés sur la plage des configurations possibles des entrées σ_t et σ_f .

tendent vers zéro alors que σ_t tend vers 25,4 mm. Cette réalisation permet d'utiliser le pouce en fin de trajectoire pour appliquer des grandes forces, car, à ce point, la réduction de vitesse entre l'entrée et le bout du pouce est très élevée. Dans ce contexte, l'ajustement à la taille de l'objet est effectué par le doigt. Il est noté que dans ce cas, les bouts des doigts ne sont pas nécessairement à la même hauteur.

La plage des objets pouvant être pris avec cette méthode à haute force est caractérisée par la distance entre le doigt et le pouce lorsque le pouce approche la fin de course, donc lorsque σ_t tend vers 25,4 mm. À partir des figures 4.7 et 4.9, il est possible de voir que la largeur des objets sur laquelle cette méthode de serrage à haute force peut être appliquée va de zéro à 70 mm, donc la moitié de l'ouverture maximale de la pince de 140 mm. Une propriété du mécanisme utile à la méthode est le fait que les entrées utilisent chacune une vis ACME autobloquante

pour empêcher que les doigts soient actionnés sous l'effet de grandes forces externes. Pour résumer, des grandes forces peuvent être appliquées, car le doigt est autobloquant et le pouce est dans une configuration spéciale caractérisée par un grand rapport de réduction. Il est mentionné que la capacité d'appliquer de grandes forces n'étant pas présente sur toute la trajectoire des doigts ne vient pas trop nuire aux performances des prises. De plus, cette propriété d'appliquer des grandes forces n'est pas considérée comme un danger pour les objets compliants, puisque cette grande force ne peut être appliquée que sur un petit déplacement, le rapport d'amplification de force n'étant élevé qu'en fin de course des doigts. Cela signifie donc que si une main était saisie par le préhenseur avec cette méthode, le serrage débiterait, mais, après peu d'écrasement, le préhenseur arriverait en fin de course et s'arrêterait. La méthode est donc bien adaptée aux objets durs et gros qui, par leur taille, nécessitent des plus grandes forces pour être bien saisis.

4.5 Ramassage d'objets

La contribution principale de ce chapitre est présentée dans cette section comme l'étude de la prise d'objets minces reposant sur des surfaces dures avec un préhenseur à grande ouverture. L'étude de la prise est explorée au moyen de trois méthodes : le ramassage rigide (*rigid scooping*), le ramassage compliant (*compliant scooping*) et le ramassage statique (*idle scooping*). Le ramassage rigide vise à introduire l'implémentation de la méthode avec un préhenseur utilisé de manière simple, mais qui n'est pas performant pour le ramassage et exigeant en ce qui concerne la planification des trajectoires. Le ramassage compliant introduit le concept de la compliance dans le pouce du préhenseur, ce qui est, par design, un mécanisme très performant pour le ramassage, mais qui nécessite lui aussi une bonne planification des trajectoires du manipulateur. Finalement, le ramassage statique est abordé. La méthode tire avantage des propriétés du préhenseur pour effectuer le ramassage en maintenant le manipulateur dans une pose stationnaire. Cette dernière méthode est beaucoup plus simple à utiliser que les deux premières. Les méthodes nécessitant l'utilisation de nombreuses nouvelles variables, le tableau 4.2 décrit les plus importantes.

4.5.1 Le ramassage rigide

Dans cette section sont étudiés les mouvements requis du préhenseur pour effectuer le ramassage d'objets. Les mouvements sont étudiés dans le plan $x-y$. L'angle ζ est défini comme l'angle entre l'axe x ou la base du préhenseur et une droite reliant le bout du doigt et du pouce, comme montré à la figure 4.10. De manière similaire, l'angle α est défini comme l'angle entre la surface du pouce et la surface dure montrée à la figure 4.10. Dans cette section, les variables ζ_r et α_r réfèrent donc à ζ et α dans le contexte où le ramassage est effectué avec les doigts obéissant à la cinématique décrite dans (4.27). L'accent est mis sur cette notation, car les sections suivantes présentent deux autres méthodes en introduisant un nouveau méca-

Tableau 4.2 – Liste des paramètres utilisés pour étudier les trois variations du ramassage.

Variable	Description
σ_i	Entrée i , où i peut être : t pour le pouce ou f pour le doigt.
ζ_i	Orientation du préhenseur en utilisant le ramassage i , où i peut être : r pour rigide, c pour compliant ou $Idle$ pour constant.
α_i	Angle d'attaque du pouce en utilisant le ramassage i , où i peut être : r pour rigide, c pour compliant ou $Idle$ pour constant.
ζ_{min}	Un paramètre d'optimisation utilisé pour obtenir la valeur de ζ_c .
ζ_{rot}	Orientation maximale du préhenseur pour laquelle le pouce compliant peut être activé.
ζ_{opt}	Orientation initiale du préhenseur pour laquelle l'angle α_c est optimal ou minimal.

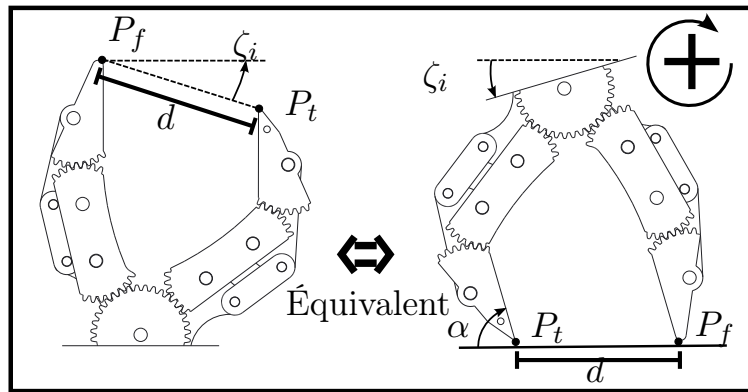


FIGURE 4.10 – Équivalence du paramètre ζ_r .

nisme qui modifie la cinématique du pouce. La figure 4.10 montre qu'étudier l'angle formé par la droite passant par les points P_f et P_t est équivalent à étudier l'orientation du préhenseur par rapport à la surface de référence. Dans ce chapitre, les angles horaires sont positifs, donc l'angle ζ_r , montré à la figure 4.10, est négatif et α_r est positif. Comme expliqué précédemment à l'aide de la figure 4.9, le design du préhenseur combine l'utilisation d'un doigt rapide et autobloquant avec un pouce lent et fort. Cette propriété va faire bloquer le doigt lorsque ce dernier va appliquer une force sur la surface. Pour cette raison, la méthode rigide suppose que le doigt ne bouge pas à la suite du contact avec la surface pendant le mouvement du pouce. À la figure 4.11 sont présentées les courbes de ζ_r en fonction de σ_t pour différentes positions du doigt σ_f . La relation entre l'orientation du préhenseur ζ_r et l'angle d'attaque du pouce α_r est

$$\alpha_r = \zeta_r + \frac{\pi}{2}, \quad (4.38)$$

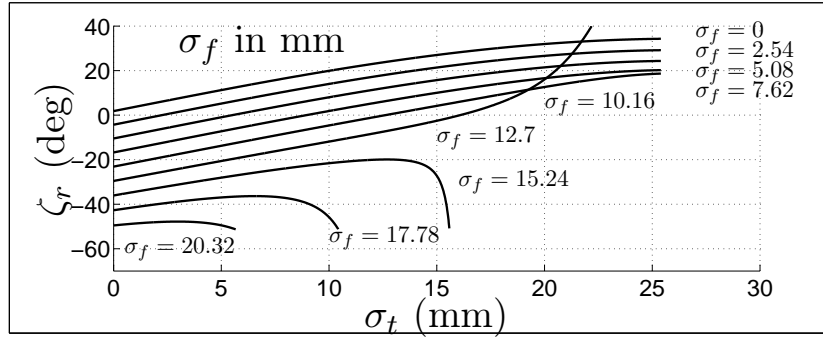


FIGURE 4.11 – Orientation du préhenseur ζ_r en fonction de l'entrée du pouce σ_t pour différentes valeurs de l'entrée du doigt σ_f .

qui est simplement l'orientation du préhenseur présenté à la figure 4.11, à une constante près. Pour prendre des objets, il est aussi nécessaire de connaître la distance entre le bout des doigts pour savoir si l'objet va entrer entre ces derniers lors de l'approche. La distance en question est d_r et représente la longueur d'un objet qui peut être logé entre le bout des doigts.

Pour réaliser la méthode avec le préhenseur proposé, ce dernier est monté sur un bras robotique muni de six degrés de liberté (DDL), comme montré à la figure 4.12. Le robot est présenté dans la vidéo 5-1 et la méthode du ramassage rigide est montrée à la figure 4.13 et dans la vidéo 5-2.

Il est observé à la figure 4.11 et avec l'équation (4.38) que pour des grandes ouvertures du

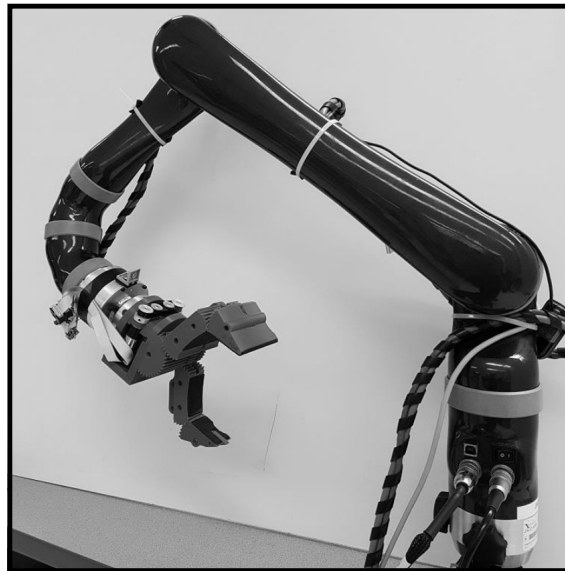


FIGURE 4.12 – Préhenseur proposé assemblé sur un bras robotisé à six degrés de liberté (DDL).

préhenseur, c'est-à-dire, σ_t et σ_f près de zéro, l'angle d'attaque α_r est presque de 90 degrés, ce qui rend presque impossible l'insertion du pouce sous l'objet.

Lorsque la méthode du ramassage rigide est utilisée, en plus de la planification complexe

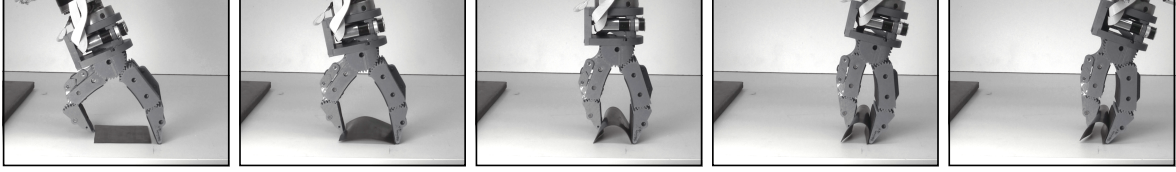


FIGURE 4.13 – Ramassage rigide effectué avec $\sigma_f = 10,16\text{mm}$ (voir vidéo 5-2).

nécessaire décrite ci-haut, des problèmes liés au matériel sont rencontrés. Un des défis est l'erreur de positionnement du manipulateur. En effet, en raison des erreurs de positionnement du manipulateur et de l'actionnement du préhenseur, le positionnement du bout du doigt et du pouce n'est pas parfait. En pratique, le positionnement parfait des articulations est impossible sur une trajectoire donnée, donc dans le cas présent, maintenir le bout du doigt et du pouce en contact avec la surface et garantir ce contact est impossible.

Une solution au problème peut être d'utiliser un capteur d'efforts au poignet du robot pour appliquer une force sur la surface et ainsi garantir le contact du bout du doigt. Cependant, une grande précision est encore nécessaire pour contrôler de manière précise le bout du pouce pour garder ce dernier près de la surface. De plus, cette méthode requiert un modèle précis du manipulateur et de l'environnement et un système de contrôle performant, ce qui est à l'opposé du but de cette thèse, c'est-à-dire d'étudier les solutions les plus simples possibles.

4.5.2 Le ramassage compliant

Dans cette section est présenté un mécanisme passif présenté comme l'addition d'un degré de liberté dans le pouce, qui permet au préhenseur de garantir passivement que son bout est en contact avec la surface. Le contact du pouce est garanti par l'utilisation d'un capteur d'efforts au poignet et par l'application d'une force en rétroaction sur la surface. L'avantage de cette méthode est que les deux contacts sont garantis par le mécanisme et l'application d'une force, ce qui compense les erreurs de positionnement du banc d'essai. La solution proposée pour introduire la complianc dans le mécanisme et garantir le contact du pouce est présentée à la figure 4.14, où le membre connectant les points H et E à la figure 4.3 est remplacé par un membre agissant comme un ressort de longueur ℓ_5 . Ce membre est obtenu en séparant le membre original en deux et en retenant les deux parties avec un ressort, ce qui rend par conséquent la phalange distale compliant. Le mécanisme compliant permet à la phalange distale du pouce de bouger par rapport à la phalange proximale du même pouce, indépendamment du mouvement de l'entrée σ_t . Ce comportement introduit une nouvelle variable dans le système et donc un degré de liberté additionnel caractérisé par la variable θ_{3t} . Les variables nécessaires pour complètement définir l'état du préhenseur lors du ramassage sont donc σ_t , σ_f and θ_{3t} . Pour élaborer sur les avantages que le mécanisme apporte au ramassage d'objets, les variables ζ_c et ζ_{min} sont proposées et présentées à la figure 4.15. En l'absence de contact ou de forces externes sur le pouce, le mécanisme de complianc ne sera pas activé. La cinématique

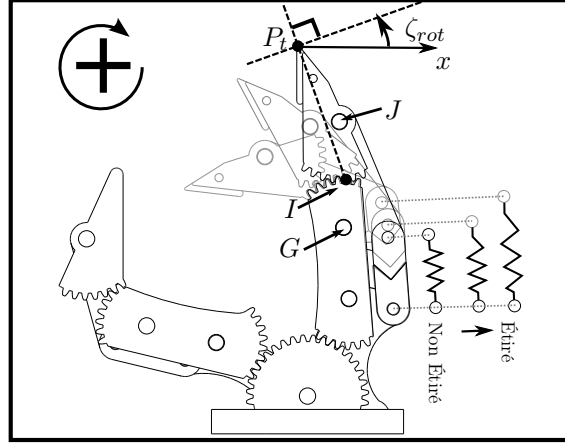


FIGURE 4.14 – Mécanisme compliant de la phalange distale montré dans les états au repos, intermédiaire et étiré. Pour l'état au repos est aussi montré l'axe connectant le bout du pouce P_t et le centre instantané de rotation I du pouce compliant.

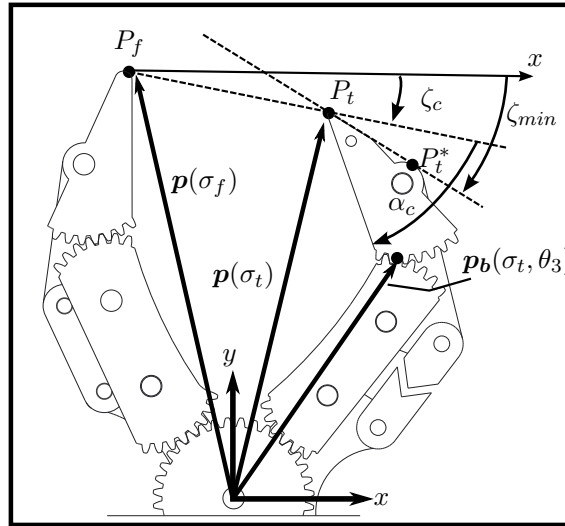


FIGURE 4.15 – Paramètres utilisés pour étudier le mécanisme de pouce compliant.

originale est donc valide. Cependant, lorsque le pouce va effectuer du ramassage d'objets, le mécanisme de compliance va s'activer et la phalange distale du pouce va pouvoir se replier avec un débattement défini par

$$\theta_{3min} \leq \theta_{3t} \leq \pi - \psi_2 - \psi_3 - \theta_2, \quad (4.39)$$

dont la partie de gauche est la limite qui fait en sorte que les engrenages restent engagés, et la partie de droite est la limite qui correspond à la compliance étant inactive. Les variables ζ_c et ζ_{min} — respectivement l'orientation du préhenseur lorsque le mécanisme de compliance est activé et l'angle entre le dos du pouce et la surface dure — sont utilisées pour déterminer l'orientation qui correspondra à la configuration utilisant la compliance au maximum. Accroître

l'angle aurait pour effet de pousser des parties du mécanisme du préhenseur à travers la surface, ce qui pourrait endommager ce dernier. De plus, le problème de minimisation

$$\underset{\theta_{3t}}{\text{minimiser}} \quad (\zeta_c - \zeta_{min})^2, \quad (4.40)$$

qui doit respecter les inégalités (4.39), fournit la valeur minimale de ζ_c et, par conséquent, la trajectoire de la méthode du ramassage compliant qui a le meilleur angle d'attaque du pouce, c'est-à-dire la valeur de α_c la plus faible. De la minimisation découle la relation

$$\zeta_c \leq \zeta_r, \quad (4.41)$$

qui signifie que pour une position du doigt σ_f , l'orientation du préhenseur lorsque le ramassage rigide est effectué est toujours plus petite que l'orientation du ramassage compliant pour une position du pouce σ_t donnée. Les angles ζ_c , α_c et les distances d_c sont tracés aux figures 4.16, 4.17 et 4.18 en fonction de la position de l'entrée du pouce σ_t pour différentes positions de l'entrée du doigt σ_f . Un résultat intéressant de l'optimisation proposée est que

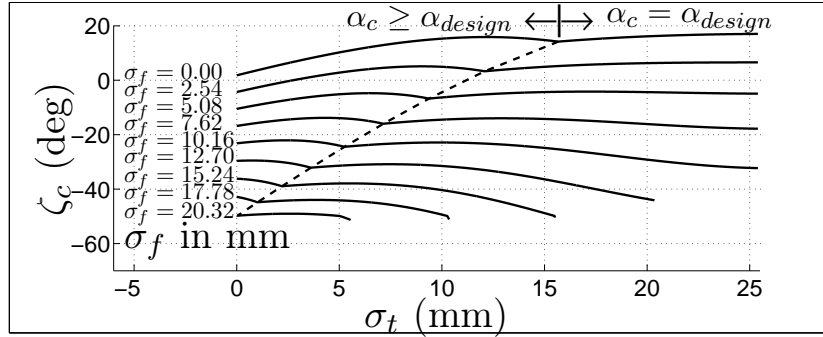


FIGURE 4.16 – Orientation du préhenseur ζ_c définie comme l'orientation minimale faisable qui optimise l'angle d'attaque en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f .

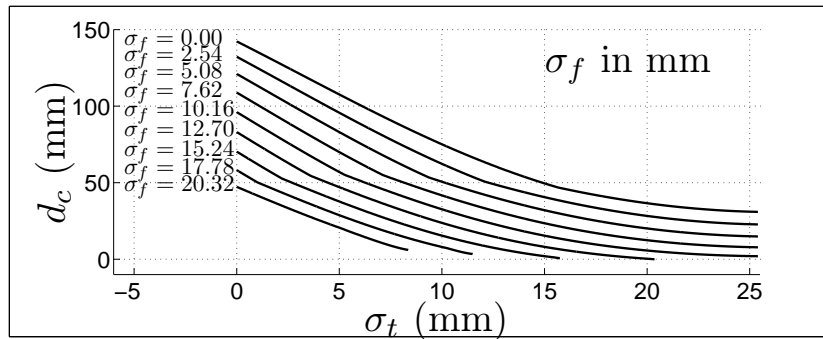


FIGURE 4.17 – Distance entre le bout des doigts d_c correspondant à l'orientation minimale faisable qui optimise l'angle d'attaque en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f .

lorsque la valeur de α_c diminue pour atteindre la valeur de α_{design} , elle reste constante à cette valeur pour le reste de la fermeture du pouce, car le dos du pouce étant en contact avec la surface, l'angle α_c a la plus petite valeur possible.

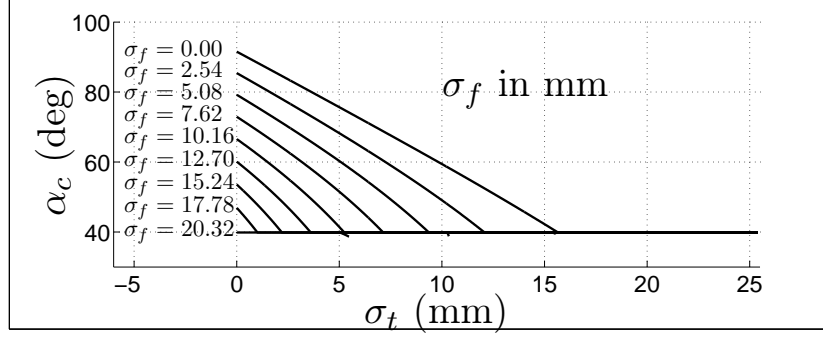


FIGURE 4.18 – Angle d’attaque le plus petit atteignable en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f .

La méthode du ramassage compliant est implémentée et présentée à la figure 4.19 et dans

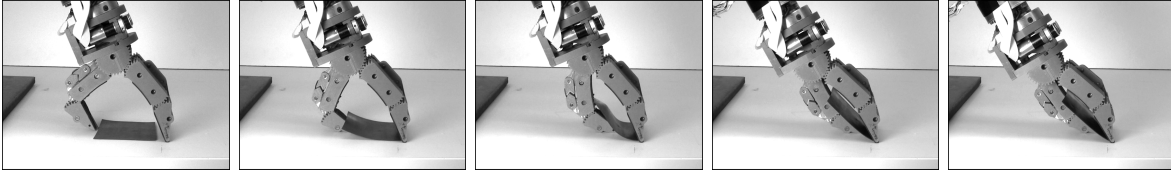


FIGURE 4.19 – Méthode du ramassage compliant pour $\sigma_f = 10,16\text{mm}$ (voir vidéo 5-3).

la vidéo 5-3. La trajectoire de ζ_c y est présentée pour la position du doigt $\sigma_f = 10,16\text{mm}$. Contrairement à la méthode du ramassage rigide de la figure 4.13, le pouce s’insère directement sous l’objet sans trop déformer ce dernier.

Dans le but de déterminer les conditions pour lesquelles le mécanisme de pouce compliant va être activé, le centre instantané de rotation (*instantaneous centre of rotation* (ICR)) est défini à la figure 4.14. Puisque le mécanisme de la phalange roule, en raison du fait que la phalange proximale est un mécanisme planétaire, le ICR de ce dernier est positionné au point d’engagement des engrenages (I) à la figure 4.14. Le vecteur \mathbf{p}_b est défini en fonction de σ_t et θ_{3t} , comme

$$\mathbf{p}_b(\sigma_t, \theta_{3t}) = \begin{bmatrix} l_3 \sin \theta_1 + l_8 \sin \theta_6 + r_3 \sin \theta_7 \\ l_3 \cos \theta_1 + l_8 \cos \theta_6 + r_3 \cos \theta_7 \end{bmatrix}. \quad (4.42)$$

De plus, l’angle ζ_{rot} de la figure 4.14 est défini comme l’angle entre la droite perpendiculaire à la droite passant par les points I et P_t et l’axe des x . Si l’on suppose l’absence de forces de friction entre le bout du pouce et la surface car le matériel du pouce est glissant, la force de réaction est donc perpendiculaire à la surface. Avec ce résultat est défini l’angle ζ_{rot} , qui est l’orientation du préhenseur nécessaire pour que la force de contact soit orientée selon l’axe $I-P_t$. Il en découle que l’orientation du préhenseur doit être inférieure à la valeur de ζ_{rot} lorsque ce dernier approche la surface pour que le mécanisme de pouce compliant soit activé.

En résumé, à la figure 4.20, les valeurs de ζ_r , ζ_c et ζ_{rot} sont présentées. La variable ζ_{opt} est

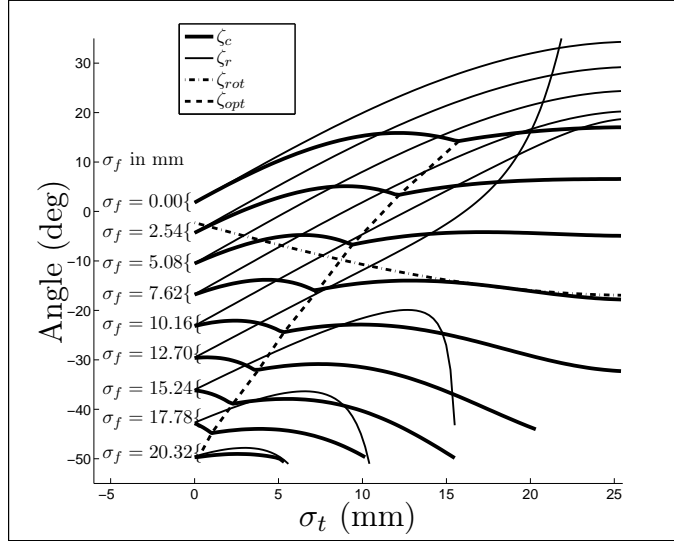


FIGURE 4.20 – ζ_r , ζ_c , ζ_{rot} et ζ_{opt} en fonction de σ_t pour différentes valeurs de σ_f .

aussi introduite, qui est la valeur à laquelle l'angle α_c est égal à α_{design} .

La figure 4.20 montre pour différentes valeurs de σ_f les valeurs de ζ_r et ζ_c , qui représentent les orientations maximales et minimales du préhenseur pour lesquelles le bout du doigt et du pouce sont en contact avec la surface en supposant que l'on requiert que le préhenseur applique une force constante sur la surface.

4.5.3 Le ramassage statique

Jusqu'à présent, ce chapitre s'est concentré sur les conditions pour lesquelles le contact du bout des doigts pouvait être assuré en effectuant soit le ramassage rigide ou compliant. Le ramassage rigide, bien que facile à comprendre et à étudier, a été montré moins efficace pour effectuer le ramassage en ce qui concerne l'angle d'attaque du pouce α . Cela a mené à l'étude du ramassage compliant, qui permet de garantir le contact du pouce avec la surface, mais qui requiert un positionnement précis du bout du doigt ou l'utilisation d'un contrôle en force du préhenseur pour appliquer une pression sur la surface.

La présente section propose une méthode qui effectue le ramassage d'objets à une orientation et à une position constantes du préhenseur. Cette procédure est donc jugée facile à implémenter, car le robot sur lequel le préhenseur est monté n'a aucune action à effectuer durant le ramassage.

Avant de présenter la méthode, il est important de remarquer que la région contenue entre les courbes de ζ_r et ζ_c représente toutes les orientations possibles du préhenseur qui garantissent le contact du pouce à condition que le doigt soit en contact avec la surface. Le ramassage à orientation constante et à position constante est désigné ici comme le ramassage statique

(*idle scooping*). L'orientation du préhenseur requise pour effectuer le ramassage est ζ_{idle} et doit satisfaire à la relation

$$\zeta_c \leq \zeta_{idle} \leq \zeta_r. \quad (4.43)$$

Les valeurs de ζ_{idle} sont trouvées en utilisant les courbes de ζ_r et ζ_c de la figure 4.20 pour une valeur donnée de σ_f , car le doigt est censé être bloqué à la suite du contact avec la surface. Le problème est donc de trouver une droite horizontale dans la figure 4.20 qui satisfait à l'équation (4.43).

À la figure 4.21 sont montrées les variables ζ_r et ζ_c et une solution trouvée de ζ_{idle} , qui est la

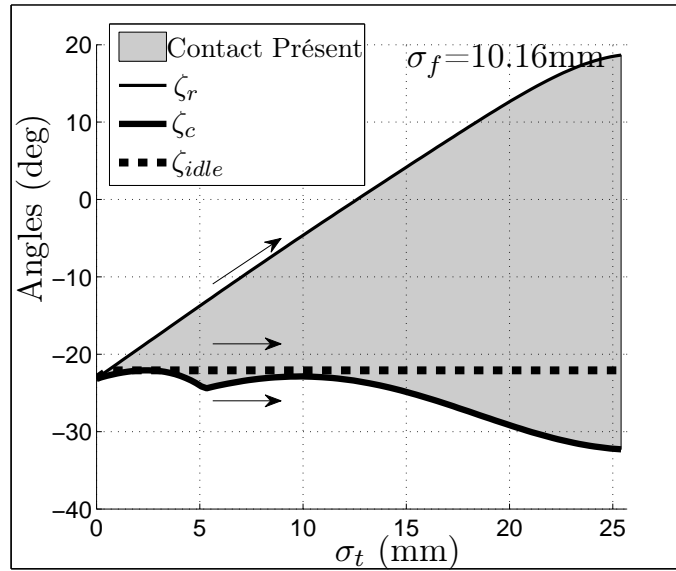


FIGURE 4.21 – Orientations nécessaires pour effectuer le ramassage des figures 4.13, 4.19 et 4.22 avec l'entrée du doigt à une position $\sigma_f = 10,16$ mm.

droite avec l'orientation minimale respectant (4.43). Cette droite étant la plus petite possible, elle intersecte la courbe ζ_c à son point maximum. ζ_{idle} représente donc l'orientation constante pour laquelle le mécanisme compliant garantit le contact des doigts lors de la prise dont l'angle d'attaque du pouce α est optimale en un point. La figure 4.22 et la vidéo 5-4 montrent

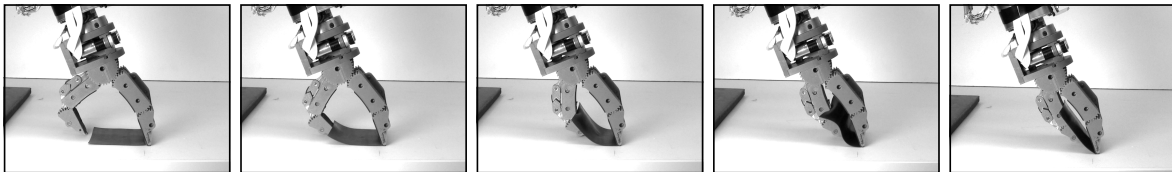
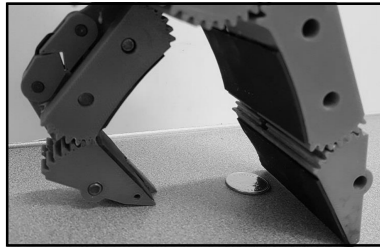


FIGURE 4.22 – Exemple du ramassage statique (*idle scooping*) pour $\sigma_f = 10,16$ mm (voir vidéo 5-4).

le ramassage statique effectué à l'angle ζ_{idle} de la figure 4.21.

La méthode du ramassage statique proposée requiert seulement que la pose nécessaire ζ_{idle} soit dans l'espace de travail du bras robotisé et que le bout du doigt soit en contact ou assez bas pour empêcher le glissement de l'objet. À la figure 4.21 est présentée la région ombragée, qui est la zone des orientations ζ_{idle} possibles garantissant le contact du bout des phalanges et obéissant à (4.43). La méthode proposée ne nécessitant pas de mouvements du manipulateur, elle est considérée comme la plus facile à utiliser, car seulement une approche et une validation du contact sont nécessaires pour la réaliser.

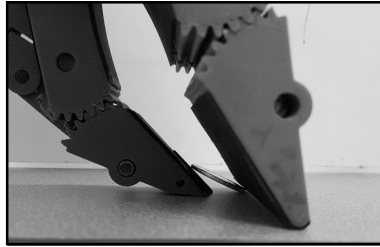
La procédure du ramassage statique est présentée à la figure 4.23 avec une pièce de monnaie.



(a) Doigt (droite) en contact avec la surface



(b) Pouce (gauche) glissant vers l'objet en maintenant le contact avec la surface



(c) Pouce (gauche) s'insérant sous l'objet à la suite de l'insertion initiale réussie du pouce



(d) Pouce (gauche) continuant sa course jusqu'à ce que l'objet soit saisi complètement

FIGURE 4.23 – Le ramassage statique exécuté pour prendre une pièce de monnaie.

4.6 Discussion

Aux sections précédentes a été étudié le mécanisme du préhenseur proposé et comment tirer avantage des propriétés de ce dernier. Trois versions du ramassage d'objets de petite taille ont été présentées pour permettre de mieux comprendre l'implémentation de la méthode. Dans cette section, on discute de l'utilité de la méthode et des scénarios où la méthode peut être effectuée.

Comme mentionné aux sections précédentes, le ramassage rigide, bien que facile à comprendre, est mal adapté aux interactions avec l'environnement. La méthode nécessite une planification précise des trajectoires et une exécution parfaite pour qu'elle soit réussie. De plus, les angles d'attaque α obtenus en effectuant la méthode sont loin d'être optimaux pour que le pouce puisse s'insérer sous l'objet.

L'introduction du ramassage compliant a permis de valider le contact avec la surface en appliquant une force sur celle-ci pendant qu'un mécanisme compliant dans le pouce garantit le contact de ce dernier avec la surface. Avec cette méthode, les erreurs de positionnement du robot sont moins critiques. Cependant, une commande en force du manipulateur et de l'équipement de mesure des forces est nécessaire. Certains robots utilisent des estimations des forces par le biais des mesures des courants à chaque moteur. Ces mesures étant dépendantes de la configuration du manipulateur, elles sont souvent moins précises que des mesures de capteurs installés au poignet du robot.

La dernière méthode présentée propose une méthode de ramassage qui requiert que le préhenseur atteigne une configuration prédéterminée, puis qu'il la maintienne pendant qu'il effectue le ramassage. La méthode, bien que seulement optimale en un point des trajectoires de ramassage en ce qui concerne l'angle α , est capable de saisir les objets plats reposant sur des surfaces rigides. Le robot devant rester immobile à un angle constant pendant la prise, il est possible pour un robot muni de moins de six DDL d'effectuer le ramassage statique. Un exemple serait l'utilisation d'un robot de type SCARA avec le préhenseur monté à son poignet à un angle fixe pour approcher l'objet dans l'espace, initier le contact, et actionner le pouce jusqu'à ce que l'objet soit saisi pendant que le bras est immobile. Cela implique que le type de capteur nécessaire pour les mesures peut être beaucoup plus simple, car seulement la validation du contact doit être faite et non une mesure analogique de la force. Un exemple de ce type de capteur serait un interrupteur monté au bout du doigt.

Il est important de noter que la plupart des objets pris étaient de petite taille. En effet, le ramassage d'objets de petite taille a été l'objet principal des tests réalisés avec ce préhenseur, car le ramassage d'objets de grande taille n'a été réussi que pour les objets flexibles, comme démontré avec la feuille de caoutchouc. Les paramètres de la prise étant tous les mêmes pour le mécanisme du chapitre 3 et le préhenseur du chapitre 4, l'exception de α_{design} , il a été conclu que le fait d'avoir augmenté l'angle d'insertion minimal du pouce de 31,2 degrés au chapitre 3 à 38,66 degrés pour le nouveau préhenseur a eu un impact très néfaste sur l'insertion initiale du pouce.

La méthode du ramassage n'est pas restreinte aux objets reposant sur une table. Une variation intéressante est le cas où un objet repose sur une tige enfoncée dans un mur. Ce cas est présenté à la figure 4.24 et dans la vidéo 5-5, où le ramassage statique est effectué sur une clef à extrémité ouverte. Dans le but de montrer la répétabilité et la performance du ramassage statique, une variété d'objets est sélectionnée et montrée à la figure 4.25. Dans la vidéo 5-6, la méthode du ramassage statique est effectuée sur ces objets, où le capteur d'efforts est utilisé seulement pour détecter le contact, c'est-à-dire que, lorsque la valeur de la force dépasse une valeur limite, un signal d'arrêt est envoyé au planificateur de trajectoire. Dans la vidéo, les objets sont saisis l'un à la suite de l'autre et relâchés dans un contenant pour montrer la répétabilité de la méthode et l'exécution dans un contexte de prise et de dépôt.



(a) Le préhenseur approche la clef qui repose sur une tige enfoncée dans un mur. (b) Vue du dessus du préhenseur avant le contact avec le mur.

FIGURE 4.24 – La méthode du ramassage statique effectuée sur une clef reposant sur une tige enfoncée dans un mur (voir vidéo 5-5).

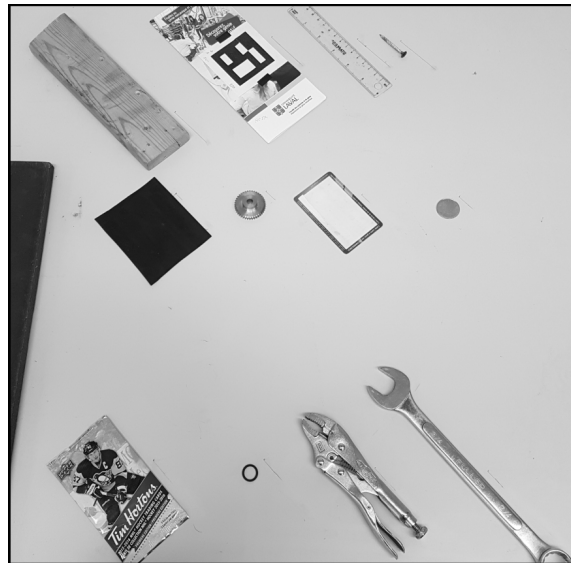


FIGURE 4.25 – Un groupe d'objets qui peuvent être pris par la méthode de ramassage statique, comme montré dans la vidéo 5-6. De gauche à droite et de haut en bas, les objets sont : un bloc de bois, un dépliant en papier, une règle en plastique, une vis en métal, une feuille de caoutchouc, un engrenage à vis, une carte d'autobus en plastique, une pièce de monnaie, un paquet de cartes de hockey, une bague d'étanchéité, une pince-étau et une clef à bout ouvert.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre a été proposé un nouveau préhenseur. La cinématique des doigts a été présentée pour mieux comprendre son fonctionnement et ses capacités. Une implémentation du ramassage de petits objets a été présentée comme méthode sous-optimale, qui simplifie la compréhension des défis à relever pour effectuer la prise, mais qui est peu performante. Par la

suite a été proposé un mécanisme compliant qui améliore grandement les angles d'attaque du pouce et garantit le contact avec la surface, mais requiert des algorithmes de commande et des équipements de mesure d'efforts précis pour être utilisé. Finalement, la méthode du ramassage statique a été présentée. La méthode assure elle aussi le contact avec l'environnement, mais requiert seulement une mesure qui valide instantanément le contact sans fournir des mesures continues de la force. La méthode s'avère beaucoup plus simple à utiliser, nécessitant seulement que le manipulateur reste immobile pendant la prise.

De plus, il a été supposé que la position des objets et leur taille étaient connues au préalable de manière parfaite. Les travaux futurs tenteront de quantifier l'influence des erreurs de positionnement des objets sur l'efficacité de la prise.

Chapitre 5

Conception d'un préhenseur optimal, sécuritaire et simple à fabriquer

5.1 Introduction

Dans le but de concevoir des préhenseurs performants, des recherches proposent des méthodes de saisie qui sont utilisées par les préhenseurs pour prendre avantage de l'environnement (Babin *et al.*, 2019). Des designs ont été proposés pour tester ces méthodes, valider les prédictions et observer les phénomènes imprévus lors de tests avec des prototypes (Babin *et al.*, 2014; Babin et Gosselin, 2018; Babin *et al.*, 2019).

À la suite de phases de tests, il n'est pas toujours nécessaire de proposer des nouveaux designs, car certains ajouts ou modifications ont une grande influence sur les designs. Par exemple, dans certains cas, conserver l'architecture de la main tout en apportant des changements aux dimensions et au système d'actionnement du préhenseur rend ce dernier capable de manipulation et de préparation à la prise, ce qui était difficile avec le mécanisme original (Della Santina *et al.*, 2018).

Une propriété de plus en plus recherchée dans les systèmes robotisés est leur capacité de travailler avec les humains de manière sécuritaire. En effet, certaines recherches ayant pour but de réadapter ou d'accroître les capacités de force des humains développent des mécanismes appelés *exosquelettes* (Gerez *et al.*, 2019). Ces mécanismes montés autour des membres d'un humain, captent les intentions de ce dernier et amplifient les forces appliquées par l'utilisateur dans le but d'effectuer une tâche. D'autres mécanismes voient les robots travailler en équipe avec l'humain en captant les intentions de ce dernier en mesurant les interactions directement entre l'humain et le robot (Labrecque et Gosselin, 2015). La plupart des mécanismes ayant pour but de mesurer les intentions d'un usager pour amplifier ses efforts, tentent de le faire avec des mécanismes à faible impédance pour ne pas trop solliciter d'efforts de la part de l'utilisateur et risquer de fatiguer ou de blesser ce dernier (Labrecque *et al.*, 2016). Les mécanismes à faible

impédances doivent donc utiliser des méthodes de mesure directe avec des algorithmes de contrôle très performants ou utiliser des mécanismes légers ou transparents en ce qui concerne leurs actionneurs (Véronneau *et al.*, 2018) pour permettre des mouvements du manipulateur causés directement par le contact avec l'utilisateur.

Les mécanismes à faible impédance ou ceux dont les actionneurs sont facilement réversibles sont généralement considérés comme plus sécuritaires, car ils sont considérés comme plus mous. En effet, lors d'un contact, les forces générées ne seront pas aussi élevées pour un même déplacement subséquent du robot.

Le but de ce chapitre est de prendre les concepts des chapitres précédents, de réutiliser ceux validés et de proposer une nouvelle version du préhenseur du chapitre 4, qui améliore ses failles sur les thèmes de la transmission, de l'ongle et des dimensions. Le design proposé tente de réutiliser le plus de pièces facilement usinables ou achetables pour un design facile à construire.

Dans ce chapitre est présenté un mécanisme de transmission révisé pour permettre un mécanisme avec des propriétés cinématiques linéaires et réversibles (*backdrivable*). Par la suite, la structure du mécanisme des doigts du chapitre 4 est réutilisée et les propriétés du système sont mises en équations en fonction des paramètres de design du préhenseur. Les propriétés présentées sont utilisées comme fonctions de coût pour optimiser la performance du mécanisme. Puis, le mécanisme d'ongle du chapitre 4 est remplacé par un mécanisme contraint cinématiquement, ce qui résout certains des problèmes d'actionnement de l'ongle passif. Dans le but d'intégrer les capteurs dans la pince et d'avoir une solution de préhension moins coûteuse, le capteur d'efforts six axes est remplacé par un capteur à une dimension et son implantation ainsi que ses limitations sont présentées. Finalement, un design CAO qui utilise les propriétés issues de l'optimisation réalisée est expliqué, les pièces utilisées sont présentées et les courbes d'utilisation pratique du préhenseur sont montrées.

5.2 Étage de transmission

Le design du préhenseur du chapitre 4 présente les avantages d'un étage de transmission qui est autobloquant en raison de l'utilisation d'un mécanisme à vis et d'un grand rapport d'amplification de force sur la moitié de l'ouverture maximale entre les deux doigts. Comme le mentionne la conclusion du chapitre 4, cela rend la chaîne cinématique du doigt très rigide et la rendrait encore plus dans le cas où les matériaux utilisés étaient des métaux rigides.

Ce chapitre propose l'étage de transmission présenté à la figure 5.1, qui utilise seulement des engrenages droits. Le fait de retirer le mécanisme à vis ainsi que le mécanisme bielle-manivelle et de les remplacer par des engrenages droits apporte quelques avantages et inconvénients. Donc, un couple appliqué sur θ_1 cause une réaction au moteur, ce qui signifie que le système est réversible. La rigidité du système s'en trouve réduite, car, lors d'un contact en présence de

friction négligeable dans le système, le robot décélérera et le doigt bougera dans la direction de la force et réduira ainsi cette dernière.

La figure 5.1 montre le mécanisme de transmission, où l’engrenage de rayon r_1 est fixé à la base du préhenseur et ne peut pas tourner. Les engrenages de rayons r_{t1} , r_{t2} et r_{t3} sont fixés sur la membrure porte-satellites et peuvent tourner sur eux-mêmes. Puis, les engrenages droits r_{t2} et r_{t3} sont fixés ensemble et ne peuvent donc pas tourner entre eux. Finalement, l’angle positif dans le sens horaire θ_1 décrit l’orientation du porte-satellites entre la droite fixée à la base y et la droite passant par les points O_1 et O_2 . La relation entre l’orientation du porte-satellites

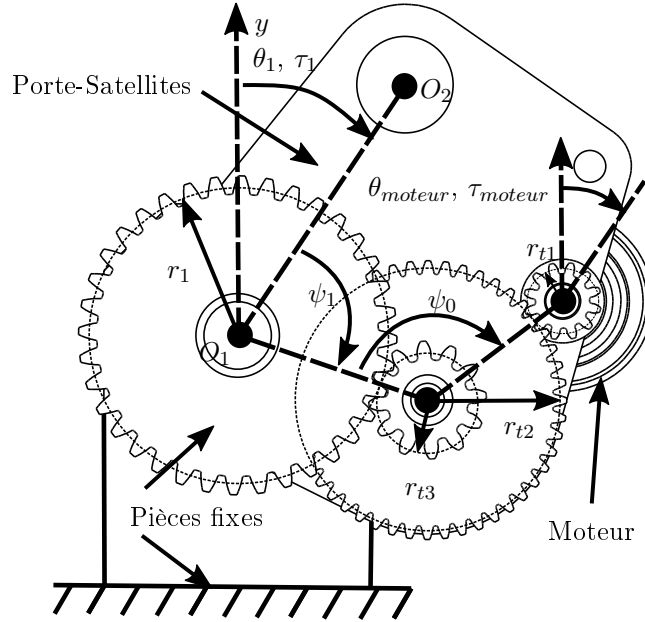


FIGURE 5.1 – Vue de côté du mécanisme de transmission réversible à engrenages plats proposé.

par rapport à la base θ_1 et l’orientation du moteur par rapport au porte-satellites θ_{moteur} est la relation linéaire

$$\theta_1 = \frac{r_{t1} r_{t3}}{r_{t2} r_1} \theta_{moteur}, \quad (5.1)$$

et la relation entre le couple fourni par le moteur τ_{moteur} et le couple appliqué par le porte-satellites τ_1 est la relation linéaire

$$\tau_1 = \frac{r_{t2} r_1}{r_{t1} r_{t3}} \tau_{moteur}. \quad (5.2)$$

La linéarité des équations 5.1 et 5.2 est intéressante, car elle implique qu’un couple τ_{moteur} peut générer la même réaction τ_1 indépendamment de la position du mécanisme θ_1 . De plus, le porte-satellites est capable de tourner de manière continue autour de l’engrenage de rayon r_1 en l’absence d’interférence avec d’autres pièces. Cette propriété permet de concevoir les doigts de manière indépendante de la transmission, puisque le mécanisme de transmission est assuré d’être valide, peu importe les positions initiale et finale du porte-satellites. On note que

l'engrenage droit r_1 est le même qui sert d'engrenage soleil dans le mécanisme de doigt. Cela est avantageux, car réutiliser une pièce existante réduit non seulement le nombre de pièces de l'assemblage, mais rend aussi le design plus compact. Cette réutilisation de pièces a cependant pour conséquence de rendre r_1 dépendant du design des doigts. Les paramètres de transmission sélectionnés sont présentés au tableau 5.1.

r_1 (mm)	r_{t1} (mm)	r_{t2} (mm)	r_{t3} (mm)	ψ_0 (deg)	ψ_1 (deg)
N/A	3.175	12.700	4.7625	75	125

Tableau 5.1 – Paramètres physiques caractérisant le mécanisme de transmission à l'exception de r_1 , qui est considéré comme un paramètre du doigt.

5.3 Mécanisme de doigt

Un préhenseur a été présenté au chapitre 4, où les différentes parties du mécanisme ont été étudiées, la cinématique présentée, et les avantages du mécanisme présentés. Le présent chapitre tente de modifier les paramètres des doigts et d'améliorer le précédent design. Il tente également de produire un design avec des pièces non seulement bien adaptées à la construction par processus additifs, comme l'impression stéréolithographique, mais également aux processus d'usinage simples. Pour atteindre ces objectifs, l'architecture de doigt et les contraintes de prise parallèle présentées au chapitre 4 sont réutilisées et les paramètres physiques qui améliorent les propriétés du préhenseur sont recherchés. Il est très difficile de prédire l'influence de tous les paramètres physiques simultanément sur les différentes propriétés du mécanisme, entre autres l'ouverture maximale, la force de serrage et la taille du mécanisme, car les relations sont non linéaires. Une approche numérique est donc employée pour maximiser la performance du préhenseur.

5.3.1 Les paramètres physiques du mécanisme

Le but étant de simplifier la conception, le design utilise les mêmes architectures et propriétés pour les deux doigts, c'est-à-dire le doigt et le pouce. Un paramètre physique, tel que la longueur l_8 , caractérise donc la longueur d'une membrure du doigt et du pouce du préhenseur. La figure 5.2a présente l'architecture et les paramètres utilisés. Comme au chapitre 4, les contraintes de design qui assurent que la phalange distale conserve une orientation constante et est toujours parallèle à l'axe y sont implémentées. Comme mentionné à la section 5.2, on considère que la variable d'entrée de chaque doigt est θ_1 , donc avec le vecteur pointant de l'origine au point de fixation de la phalange distale \mathbf{p}_0 en fonction de l'angle θ_1 est

$$\mathbf{p}_0(\theta_1) = \begin{bmatrix} (r_1 + r_2) \sin(\theta_1) + l_8 \sin(\theta_1 + \theta_2) + (r_3 + r_4) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ (r_1 + r_2) \cos(\theta_1) + l_8 \cos(\theta_1 + \theta_2) + (r_3 + r_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

En utilisant les contraintes

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0 \quad (5.4)$$

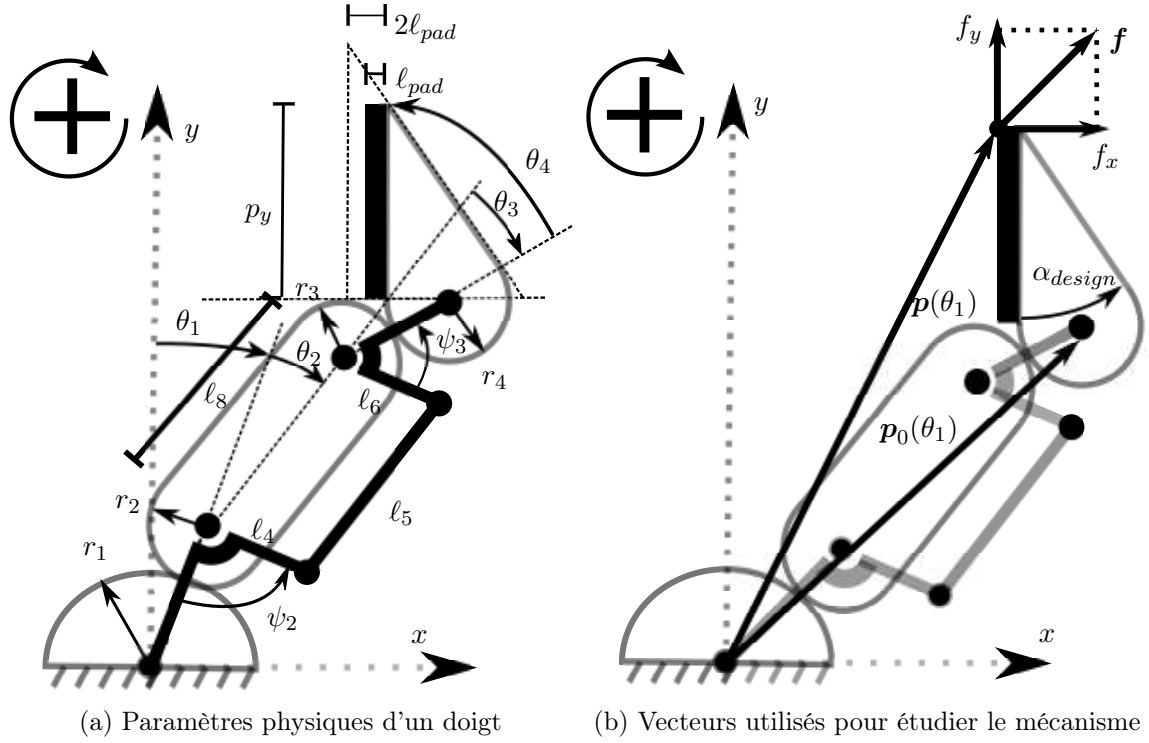


FIGURE 5.2 – Paramètres du mécanisme.

et

$$R_2 = \frac{1}{R_1} \quad (5.5)$$

énoncées au chapitre 4, qui assurent que la surface de contact des phalanges distales sont parallèles à l'axe y , avec

$$n_1 = \frac{r_1}{r_1 + 2r_2} \quad (5.6)$$

$$R_1 = \frac{2n_1}{1 - n_1} \quad (5.7)$$

et les équations cinématiques décrivant le comportement du planétaire proximal

$$\theta_2 = R_1\theta_1 + \theta_{d1} \quad (5.8)$$

et du planétaire distal

$$\theta_4 = R_2\theta_3 + \theta_{d2}, \quad (5.9)$$

où θ_{d1} et θ_{d2} sont des paramètres de design, on peut finalement exprimer les angles de l'équation (5.3) en fonction de θ_1 avec

$$\theta_1 + \theta_2 = (R_1 + 1)\theta_1 + \theta_{d1} \quad (5.10)$$

et

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \theta_1 + \frac{\theta_{d1} - R_1\theta_{d2}}{R_1 + 1}. \quad (5.11)$$

Finalement, on montre à la figure 5.2b la position du bout du doigt avec la relation

$$\mathbf{p}(\theta_1) = \mathbf{p}_0(\theta_1) + \begin{bmatrix} -(r_3 + \ell_{pad}) \\ p_y \end{bmatrix}, \quad (5.12)$$

où ℓ_{pad} caractérise l'épaisseur d'une couche de caoutchouc utilisée pour améliorer le coefficient de friction entre la surface de contact et l'objet saisi. En ce qui a trait aux variables optimisées pour le design, le chapitre 4 a conclu que l'équation (5.5) est équivalente à

$$r_4 = R_1 r_3, \quad (5.13)$$

donc avec les équations (5.3), (5.10), (5.11), (5.12) et (5.13), on peut voir que les variables à sélectionner pour caractériser complètement le design du doigt sont r_1 , r_2 , r_3 , ℓ_8 , p_y , θ_{d1} et θ_{d2} . Pour ce qui est des variables ℓ_4 , ℓ_5 et ℓ_6 et des angles ψ_2 et ψ_3 , ces angles n'interviennent pas dans la cinématique des doigts si les membrures comprenant ℓ_4 , ℓ_5 , ℓ_6 forment un parallélogramme. Cette contrainte a été présentée au chapitre 4 pour garantir que les phalanges distales restent parallèles sur toute la trajectoire du doigt et du pouce.

5.3.2 Les positions initiale et finale du doigt

Dans le but de caractériser le débattement de θ_1 , il est nécessaire d'énoncer les conditions d'ouverture minimale et maximale du doigt. Tout d'abord est présenté l'angle initial θ_{1i} , qui est la valeur de θ_1 lorsque les deux doigts sont en contact, c'est-à-dire lorsque la composante selon l'axe x de \mathbf{p} est nulle. Pour ce faire, on utilise l'algorithme `fzero` de Matlab avec les paramètres par défaut. Avec $\mathbf{e}_x = [1 \ 0]^T$, on formule la recherche de solution comme

$$\text{trouver}_{\theta_{1i}} \quad \mathbf{p}(\theta_{1i})^T \mathbf{e}_x = \mathbf{0} \quad (5.14)$$

avec une estimation initiale

$$\theta_{1i-estimate} = \frac{\theta_{d1}}{R_1 + 1}, \quad (5.15)$$

qui est la valeur de θ_1 lorsque la phalange proximale est perpendiculaire à l'axe y , comme illustré à la figure 5.2a.

Finalement, la valeur θ_{1f} est la valeur de l'angle θ_1 à l'ouverture maximale du préhenseur. Cette ouverture maximale est caractérisée par la valeur maximale de la composante en x de \mathbf{p} . Pour trouver cette valeur, l'équation (5.12) est dérivée par rapport au temps pour obtenir la relation des vitesses

$$\dot{\mathbf{p}}(\theta_1) = \mathbf{J}(\theta_1) \dot{\theta}_1, \quad (5.16)$$

où $\mathbf{J}(\theta_1)$ est la matrice jacobienne en fonction de l'angle θ_1

$$\mathbf{J}(\theta_1) = \begin{bmatrix} (r_1 + r_2) \cos(\theta_1) + (R_1 + 1) \ell_8 \cos(\theta_1 + \theta_2) + (r_3 + r_4) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ -(r_1 + r_2) \sin(\theta_1) - (R_1 + 1) \ell_8 \sin(\theta_1 + \theta_2) - (r_3 + r_4) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

Pour trouver l'angle d'ouverture maximal, on utilise la notion qu'augmenter θ_1 à partir de θ_{1i} va augmenter la valeur de $\mathbf{p}(\theta_{1i})^T \mathbf{e}_x = \mathbf{0}$ jusqu'à ce qu'elle soit maximale pour une valeur de $\theta_1 = \theta_{1f}$. À cette position, la vitesse du bout du doigt est orientée vers le bas selon l'axe y . Par conséquent, la vitesse selon l'axe x est nulle et $\mathbf{J}(\theta_{1f})^T \mathbf{e}_x = 0$. Avec ce résultat, l'algorithme `fzero` de Matlab peut être à nouveau utilisé pour ainsi formuler

$$\underset{\theta_{1f}}{\text{trouver}} \quad \mathbf{J}(\theta_{1f})^T \mathbf{e}_x = 0. \quad (5.18)$$

5.4 Les propriétés du préhenseur

Maintenant que pour un vecteur de $r_1, r_2, r_3, \ell_3, p_y, \theta_{d1}$ et θ_{d2} donné le préhenseur est complètement défini physiquement et cinématiquement, les propriétés qui expriment la performance du préhenseur pour effectuer certaines tâches sont énoncées.

5.4.1 La force de serrage minimale $f_x(\theta_{fmin})$

Une propriété très importante des préhenseurs consiste en leur capacité à appliquer des forces sur les objets pris. Lorsque les objets sont saisis et déplacés, les composantes de la force normale et tangentielle à la surface de la phalange en contact interviennent. La force tangentielle étant la force de friction causée par la force normale à la surface, c'est la force normale qui est étudiée.

Pour exprimer la force exercée sur l'objet par la pince, le principe du travail virtuel est encore utilisé et formulé comme

$$\mathbf{f}^T \delta \mathbf{p} = \tau_1 \delta \theta_1, \quad (5.19)$$

où le préfixe δ désigne un incrément de la variable subséquente, \mathbf{f} est le vecteur des forces cartésiennes produites au bout du doigt et τ_1 est le couple fourni qui crée un mouvement θ_1 . L'équation (5.16) est exprimée en fonction des incréments δ pour obtenir

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{J}(\theta_1) \delta \theta_1. \quad (5.20)$$

Elle est finalement combinée avec l'équation (5.19) pour obtenir la relation

$$\mathbf{f}^T \mathbf{J}(\theta_1) \delta \theta_1 = \tau_1 \delta \theta_1. \quad (5.21)$$

Puisque cette dernière équation doit être valide pour toute valeur de $\delta \theta_1$, on peut alors écrire

$$\mathbf{J}^T(\theta_1) \mathbf{f} = \tau_1. \quad (5.22)$$

Finalement, la composante de serrage de \mathbf{f} , soit la composante parallèle à l'axe x , est combinée avec l'équation (5.2) pour obtenir

$$f_x(\theta_1) = \frac{\mathbf{J}(\theta_1)^T \mathbf{e}_x}{\mathbf{J}^T(\theta_1) \mathbf{J}(\theta_1)} \frac{r_{t2}}{r_{t1}} \frac{r_1}{r_{t3}} \tau_{moteur}, \quad (5.23)$$

où $\mathbf{J}^T(\theta_1)\mathbf{J}(\theta_1)$ est un scalaire. L'équation (5.23) présente l'équation de la force de serrage en fonction de l'angle θ_1 du mécanisme. La valeur recherchée pour l'optimisation est la valeur $\theta_1 = \theta_{fmin}$ qui cause la fonction $f_x(\theta_{fmin})$ à être minimum. La valeur de θ_{fmin} est obtenue avec la minimisation suivante :

$$\begin{aligned} & \underset{\theta_{fmin}}{\text{minimiser}} && f_x(\theta_{fmin}) \\ & \text{sujet à} && \theta_{1i} \leq \theta_{fmin} \leq \theta_{1f}, \end{aligned} \quad (5.24)$$

qui est solutionnée avec la fonction `fmincon` de Matlab. La quantité $f_x(\theta_{fmin})$ représente la force de serrage maximale qui peut être appliquée dans n'importe quelle configuration de la pince où θ_1 est compris dans $\theta_{1i} \leq \theta_1 \leq \theta_{1f}$.

5.4.2 Angle d'attaque du pouce α_{design}

Pour déterminer l'angle d'attaque, le fonctionnement du mécanisme d'ongle doit d'abord être présenté. Le chapitre 4 mentionne qu'un des problèmes est que l'ongle reste sorti en l'absence d'objets. Étant pointu, l'ongle représente un risque pour les personnes qui travaillent en collaboration avec le préhenseur. De plus, de grandes forces étaient parfois nécessaires pour activer l'ongle. Cela, combiné avec un mécanisme compliant, causait des problèmes. Pour ces raisons, cette section étudie le ramassage des objets en considérant un mécanisme d'ongle différent de celui présenté au chapitre 4.

Le design du mécanisme d'ongle requiert la connaissance des dimensions du mécanisme. Alors, le comportement idéal de l'ongle est considéré pour présenter les propriétés de ce dernier. Le mécanisme idéal veut que l'ongle rétracté soit complètement à l'intérieur de la phalange distale, comme montré en gris à la figure 5.3, et qu'il dépasse d'une longueur ℓ_{pad} , comme présentée à la figure 5.2a, la surface de caoutchouc lorsque la compliance est activée, comme montré en noir à la figure 5.3. Avec les propriétés de la phalange distale, l'angle d'attaque de l'ongle α_{design} est présenté comme

$$\alpha_{design} = 2 \tan^{-1}\left(\frac{r_4}{p_y}\right). \quad (5.25)$$

Le mécanisme d'ongle propose que la phalange distale pivote autour du centre de rotation de l'engrenage r_4 et que l'engrenage soit fixe. L'actionnement de l'ongle est causé par le mouvement relatif entre la phalange et l'engrenage. L'angle d'attaque de l'ongle étant le même que celui du pouce, la longueur de l'ongle p_n , utilisée pour décrire le bout du doigt lorsque le mécanisme compliant est activé, s'exprime comme

$$p_n = p_y + \frac{2\ell_{pad}}{\tan(\alpha_{design})}. \quad (5.26)$$

La longueur p_n , présentée à la figure 5.2a. Pour étudier les propriétés du ramassage, l'ongle sera considéré comme sorti dans tous les cas.

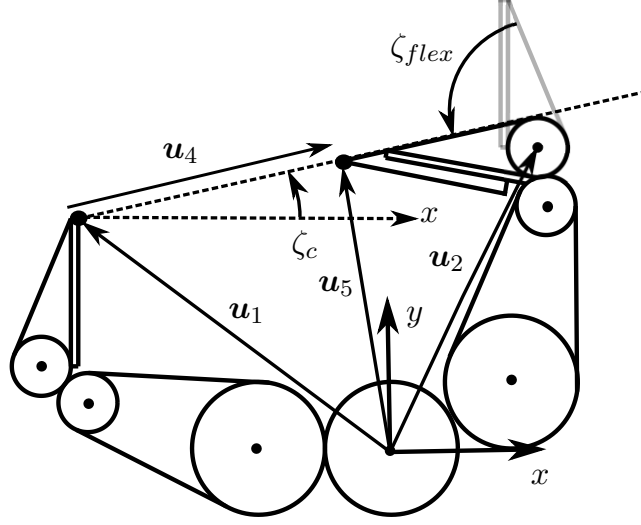


FIGURE 5.3 – Paramètres et vecteurs utilisés pour étudier le ramassage compliant avec le nouveau mécanisme de complianc et d'angle.

5.4.3 Angle de ramassage ζ_c

L'optimisation de la procédure de ramassage considère que le dos de la phalange distale est en contact avec la surface. Donc, comme au chapitre 4, l'angle de ramassage optimal ζ_c est étudié. Le mécanisme de phalange compliant ayant un centre de rotation constant, l'angle ζ_c peut être obtenu directement. L'angle ζ_c est l'angle formé par une droite passant par le bout du doigt et l'intersection de la tangente au cercle de rayon r_4 , montré à la figure 5.3, et l'axe x . Avec les vecteurs \mathbf{u}_1 et \mathbf{u}_2 , présentés à la figure 5.3, les relations :

$$\mathbf{u}_1 = M\mathbf{p}(\theta_1^f), \quad (5.27)$$

où

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

avec θ_1^f , qui caractérise l'angle d'actionnement θ_1 du doigt ; et

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{p}_0(\theta_1^t), \quad (5.29)$$

avec θ_1^t , qui caractérise l'angle d'actionnement θ_1 du pouce, on obtient

$$\mathbf{u}_3 = \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1 \quad (5.30)$$

et

$$\mathbf{e}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (5.31)$$

Donc, l'expression de ζ_c est

$$\zeta_c(\theta_1^f, \theta_1^t) = \tan^{-1}\left(\frac{\mathbf{u}_3^T \mathbf{e}_y}{\mathbf{u}_3^T \mathbf{e}_x}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{r_4}{(\mathbf{u}_3^T \mathbf{u}_3)^{\frac{1}{2}}}\right). \quad (5.32)$$

5.4.4 La longueur d'ouverture de ramassage ℓ_c

Comme au chapitre 4, il est aussi important de décrire la longueur des objets pouvant être ramassés. Cette longueur, appelée ℓ_c , est la longueur du vecteur \mathbf{u}_4 , pointant du bout du doigt vers le bout du pouce lorsque le préhenseur effectue le ramassage optimal. Elle est donc fonction des variables d'entrée θ_1^f et θ_1^t . L'expression de ce vecteur est obtenue avec

$$\theta_{flex} = \frac{\pi}{2} - \alpha_{design} + \zeta_c \quad (5.33)$$

$$\mathbf{u}_5 = \mathbf{u}_2 + \begin{bmatrix} \cos \theta_{flex} & -\sin \theta_{flex} \\ \sin \theta_{flex} & \cos \theta_{flex} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(2\ell_{pad} + r_4) \\ p_n \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

et

$$\mathbf{u}_4 = \mathbf{u}_5 - \mathbf{u}_1. \quad (5.35)$$

L'expression de l'ouverture de ramassage est

$$\ell_c(\theta_1^f, \theta_1^t) = \sqrt{\mathbf{u}_4^T \mathbf{u}_4} \quad (5.36)$$

et la valeur maximale de ℓ_c pour un design donné est donc

$$\begin{aligned} & \underset{\theta_{1c}^f, \theta_{1c}^t}{\text{minimiser}} && -\ell_c(\theta_{1c}^f, \theta_{1c}^t) \\ & \text{sujet à} && \theta_{1i} \leq \theta_1^f \leq \theta_{1f}, \\ & && \theta_{1i} \leq \theta_1^t \leq \theta_{1f}, \end{aligned} \quad (5.37)$$

où θ_{1c}^f et θ_{1c}^t sont respectivement les angles de θ_1 du doigt et du pouce, qui produisent une valeur maximale de ℓ_c , chacune comprise entre θ_{i1} et θ_{1f} . Pour simplifier la notation de la section suivante, la valeur ℓ_{cmax} introduite est

$$\ell_{cmax} = \ell_c(\theta_{1c}^f, \theta_{1c}^t). \quad (5.38)$$

5.5 Optimisation du mécanisme

À la section 5.4 sont présentées les propriétés du mécanisme de préhension pour les valeurs données de r_1 , r_2 , r_3 , ℓ_8 , p_y , θ_{d1} et θ_{d2} . Le but est de déterminer la combinaison de ces valeurs qui fournissent les meilleures performances possibles pour des dimensions raisonnables. Pour ces raisons, une optimisation avec contrainte est effectuée avec l'aide de la fonction `fmincon` de Matlab. Pour ce faire, les paramètres à optimiser sont exprimés sous forme vectorielle, comme

$$\mathbf{x} = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \ell_8 \ p_y \ \theta_{d1} \ \theta_{d2}]^T. \quad (5.39)$$

Pour obtenir un design de taille raisonnable, chaque élément du vecteur \mathbf{x} est limité à une valeur supérieure correspondante dans le vecteur \mathbf{x}_u et de même pour la valeur inférieure de chaque élément contenu dans \mathbf{x}_l . Les valeurs utilisées dans ces vecteurs sont

$$\mathbf{x}_u = [28.57 \ 28.57 \ 28.57 \ 101.60 \ 50.80 \ 90 \ 45]^T \quad (5.40)$$

et

$$\mathbf{x}_l = \left[12.70 \quad 12.70 \quad 12.70 \quad 6.35 \quad 12.70 \quad -90 \quad -45 \right]^T, \quad (5.41)$$

avec les longueurs en millimètres et les angles en degrés. Ces valeurs sont constantes pour toutes les optimisations effectuées dans cette section. La valeur $\ell_{pad} = 3.2$, est aussi constante, car l'épaisseur du caoutchouc de contact est sélectionnée au préalable. La valeur de couple du moteur $\tau_{moteur} = 9.26 \times 10^{-2}$ Nm est aussi présentée, car le moteur utilisé est sélectionné à l'avance.

Le procédé d'optimisation est formulé comme

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{x}}{\text{minimiser}} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{sujet à} && \mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u, \\ & && \mathbf{c}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}, \\ & && \mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5.42)$$

où $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ et $\mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x})$ sont, dans l'ordre, la fonction de coût à minimiser, le vecteur des contraintes d'inégalité et le vecteur des contraintes d'égalité. L'expression générale est présentée, car l'optimisation est réalisée en étapes et les sections suivantes présentent des formulations différentes de $f(\mathbf{x})$, $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ et $\mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x})$. En effet, certaines contraintes ne peuvent pas être formulées a priori, donc certaines valeurs maximales sont obtenues, puis ces valeurs sont utilisées pour la formulation. Pour cette raison, les sections 5.5.1 à 5.5.3 contiennent chacune une étape d'optimisation avec une fonction de coût différente, et la section 5.5.4 répète la procédure en imposant des valeurs précises des engrenages.

5.5.1 Maximisation de la force de serrage minimum $f_x(\theta_{fmin})$

La première étape consiste à maximiser la valeur de $f_x(\theta_{fmin})$, qui est la plus petite force de serrage sur toute la plage de mouvement du préhenseur, en considérant que les deux doigts sont synchronisés pour être exactement face à face. Pour cette raison, seule l'étude des forces appliquées par un doigt est nécessaire. La fonction de coût à minimiser est donc

$$f(\mathbf{x}) = -f_x(\theta_{fmin}). \quad (5.43)$$

Par la deuxième étape, il est nécessaire de formuler les contraintes de design. Les contraintes $r_2 + \ell_{pad} - (r_1 + r_2) \sin(\theta_{1i}) \leq 0$ et $r_3 + \ell_{pad} - \mathbf{p}_0^T(\theta_{1i})\mathbf{e}_x \leq 0$ sont proposées pour prévenir un design qui causerait une interférence entre, respectivement les paires d'engrenages r_2 ou r_3 du préhenseur lors du contact des surfaces des phalanges distales. De plus, une des propriétés les plus importantes des préhenseurs étant la longueur d'ouverture maximale pour englober un objet, la contrainte $2\mathbf{p}^T(\theta_{1f})\mathbf{e}_x - 140 = 0$ est formulée, qui impose qu'à ouverture maximale, la distance entre les deux phalanges distales soit de 140 mm. Avec ces équations, les vecteurs

de contraintes sont

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} r_2 + \ell_{pad} - (r_1 + r_2) \sin(\theta_{1i}) \leq 0 \\ r_3 + \ell_{pad} - \mathbf{p}_0^T(\theta_{1i}) \mathbf{e}_x \leq 0 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

et

$$\mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x}) = \left[2\mathbf{p}^T(\theta_{1f}) \mathbf{e}_x - 0.140 \right]. \quad (5.45)$$

Une fois la procédure d'optimisation terminée (à l'aide de `fmincon`), le vecteur \mathbf{x} obtenu est

$$\mathbf{x} = \left[28.575 \quad 28.575 \quad 12.7002 \quad 39.1851 \quad 31.75 \quad -89.9995 \quad -14.203 \right]^T. \quad (5.46)$$

Au tableau 5.2 sont présentées les propriétés d'un préhenseur construit avec les valeurs contenues dans \mathbf{x} , et à la figure 5.4, une représentation de ce design avec en haut la pince en

f_{xmin} (N)	l_{cmax} (mm)	α_{design} (deg)	ζ_{const} (deg)
9.9378	114.0517	22.6202	-19.9367

Tableau 5.2 – Paramètres de performance du mécanisme.

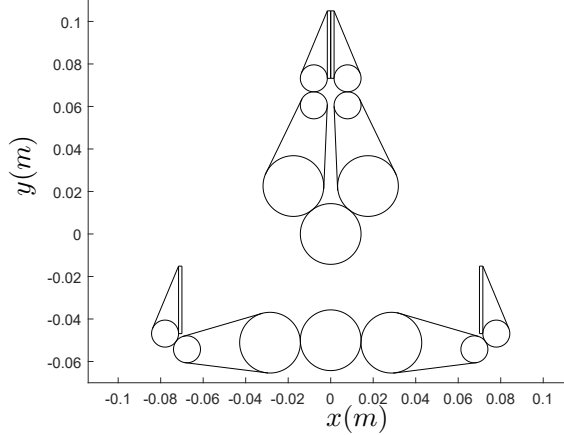


FIGURE 5.4 – Design obtenu avec la procédure 1.

fermeture, c'est-à-dire $\theta_{1i}^t = \theta_{1i}^f$ et, en bas de la figure, la pince en ouverture maximale, c'est-à-dire $\theta_{1f}^t = \theta_{1f}^t$.

5.5.2 Maximisation de la longueur d'ouverture du ramassage ℓ_c

À la section précédente, la valeur maximale de $f_x(\theta_{fmin})$ est 9,94 N. Cette valeur étant jugée supérieure à la force nécessaire pour prendre des petit objets, la contrainte $8,9182 - f_x(\theta_{fmin}) \leq 0$ est ajoutée. Cette contrainte est ajoutée au vecteur $\mathbf{c}(\mathbf{x})$, ce qui a pour effet d'imposer que la force minimale applicable par le préhenseur soit d'au moins 8,91 N, ce qui équivaut à la force nécessaire pour soulever 0,91 kg (2 lbm). La force minimale étant maintenant contrainte, la fonction de coût est

$$f(\mathbf{x}) = -\ell_{cmax}, \quad (5.47)$$

ce qui maximise la longueur d'ouverture maximale du préhenseur pour pouvoir effectuer la procédure de ramassage sur des objets plats les plus longs possibles. La fonction de contrainte d'inégalité est maintenant

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 8.9182 - f_x(\theta_{fmin}) \\ r_2 + \ell_{pad} - (r_1 + r_2) \sin(\theta_{1i}) \\ r_3 + \ell_{pad} - \mathbf{p}_0^T(\theta_{1i}) \mathbf{e}_x \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

et la variable c_{eq} est inchangée. Le vecteur \mathbf{x} résultant de l'optimisation avec fmincon est

$$\mathbf{x} = \left[28.5598 \quad 27.0391 \quad 28.5441 \quad 36.256 \quad 31.75 \quad -89.5116 \quad -6.6235 \right]^T \quad (5.49)$$

et les propriétés du préhenseur résultantes sont présentées au tableau 5.3. À la figure 5.5 est

f_{xmin} (N)	ℓ_{cmax} (mm)	α_{design} (deg)	ζ_{const} (deg)
8.9184	139.1116	89.9998	-5.2907

Tableau 5.3 – Paramètres de performance du mécanisme.

montré le schéma du mécanisme avec les propriétés obtenues. Bien que la valeur de ℓ_{cmax}

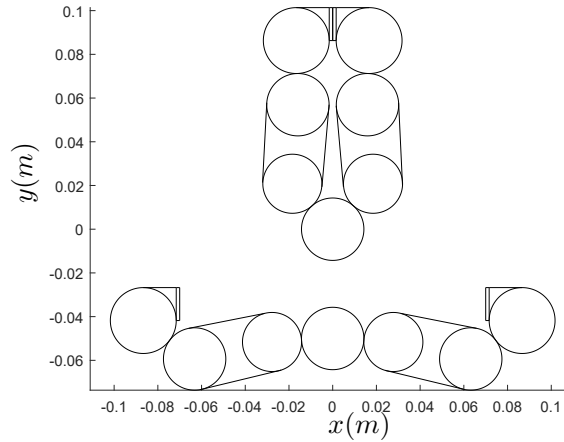


FIGURE 5.5 – Design obtenu avec la procédure 2.

de 139,11 soit intéressante par rapport à l'ouverture maximale de 140 mm, l'angle d'attaque α_{design} est très désavantageux. Cela rend l'insertion du pouce difficile, car le bout du pouce est à un angle de 89,99 degrés.

5.5.3 Minimisation de l'angle d'attaque du pouce α_{design}

Dans le but de réduire l'angle d'attaque α_{design} , le critère d'optimisation est changé pour

$$f(\mathbf{x}) = \alpha_{design} \quad (5.50)$$

et la contrainte $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ est

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0.125 - \ell_{cmax} \\ 8.9182 - f_x(\theta_{fmin}) \\ r_2 + \ell_{pad} - (r_1 + r_2) \sin(\theta_{1i}) \leq 0 \\ r_3 + \ell_{pad} - \mathbf{p}_0^T(\theta_{1i}) \mathbf{e}_x \leq 0 \end{bmatrix}, \quad (5.51)$$

où le premier élément contraint le design à une distance de ramassage ℓ_{cmax} supérieure ou égale à 125 mm. Le vecteur \mathbf{x} obtenu après optimisation avec fmincon est alors

$$\mathbf{x} = \left[24.5586 \quad 28.5749 \quad 12.7001 \quad 41.4065 \quad 31.75 \quad -89.9965 \quad -6.1585 \right]^T \quad (5.52)$$

et les propriétés du mécanisme s'y rattachant sont montrées au tableau 5.4. Le design obtenu

f_{xmin} (N)	ℓ_{cmax} (mm)	α_{design} (deg)	ζ_{const} (deg)
8.9182	125.0001	33.1793	-11.458

Tableau 5.4 – Paramètres de performance du mécanisme.

avec les propriétés exprimées par le vecteur \mathbf{x} de l'équation (5.52) est présenté à la figure 5.6.

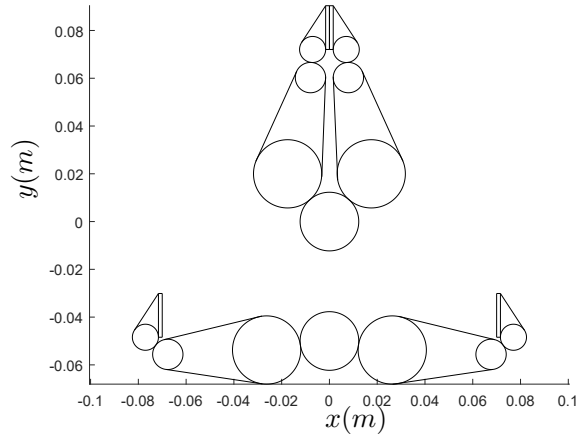


FIGURE 5.6 – Design obtenu avec la procédure 3.

5.5.4 Prescription de la taille des engrenages choisis

La procédure utilisée dans les sections précédentes supposait que les variables étaient continues. Par contre, lorsque vient le temps de sélectionner les pièces, plus précisément les engrenages, ceux-ci ne peuvent prendre que des valeurs discrètes. Pour cette raison, des conclusions sur la taille nécessaire des engrenages sont tirées du design obtenu à la section 5.5.3.

La première observation tirée est que l'optimisation de la section 5.5.3 tend à maximiser la taille de r_2 et à minimiser la taille de r_4 . La deuxième observation est que la taille de r_1 et r_2 est semblable, tout comme celle de r_2 et r_4 . À la suite des observations et dans le but de

réutiliser le plus de pièces possible, les contraintes $r_1 = r_2$ et $r_3 = r_4$ sont ajoutées. De plus, la taille de r_2 est arrondie vers le haut pour obtenir $r_2 = 28,575$ et la taille de r_3 est arrondie vers le bas pour obtenir $r_3 = 28,575$, qui sont des valeurs limites contenues dans \mathbf{x}_l et \mathbf{x}_u . Ces contraintes se reflètent dans le vecteur $\mathbf{c}(\mathbf{x})$ avec

$$\mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 2\mathbf{p}^T(\theta_{1f})\mathbf{e}_x - 140 \\ r_1 - 28.5750 \\ r_2 - 28.5750 \\ r_3 - 12.7 \\ r_4 - 12.7 \end{bmatrix}. \quad (5.53)$$

Le fait d'ajuster la valeur des engrenages vient cependant modifier le design et ne garantit pas que les contraintes seront respectées. Les étapes des sections précédentes ont ainsi servi à sélectionner deux paires d'engrenages qui se trouvent couramment sur le marché et les étapes des sections 5.5.1 à 5.5.3 sont répétées avec le vecteur $\mathbf{c}_{eq}(\mathbf{x})$ de l'équation (5.53). L'étape finale est présentée dans cette section, où la fonction de coût est

$$f(\mathbf{x}) = \alpha_{design} \quad (5.54)$$

et où les contraintes sur les propriétés du mécanisme sont

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0.120 - \ell_{cmax} \\ 8.9182 - f_x(\theta_{fmin}) \\ r_2 + \ell_{pad} - (r_1 + r_2) \sin(\theta_{1i}) \\ r_3 + \ell_{pad} - \mathbf{p}_0^T(\theta_{1i})\mathbf{e}_x \end{bmatrix}. \quad (5.55)$$

À partir des contraintes de l'équation (5.53), il est facile de déduire qu'après avoir imposé la taille des engrenages, les propriétés obtenues à la section 5.5.3 n'ont pu être maintenues. En effet, la contrainte $0,120 - \ell_c \leq 0$ a été utilisée, car une distance d'ouverture de ramassage de 125 mm n'était pas atteignable.

Le vecteur \mathbf{x} final obtenu pour le design du préhenseur est donc

$$\mathbf{x} = \left[28.575 \quad 28.575 \quad 12.70 \quad 44.2373 \quad 31.75 \quad -71.1877 \quad 44.9104 \right]^T \quad (5.56)$$

et les propriétés s'y rattachant sont données au tableau 5.5. À la figure 5.7 est présenté le

f_{xmin} (N)	ℓ_{cmax} (mm)	α_{design} (deg)	ζ_{const} (deg)
9.006	120.0004	28.3541	-15.8308

Tableau 5.5 – Paramètres de performance du mécanisme.

schéma du design proposé.

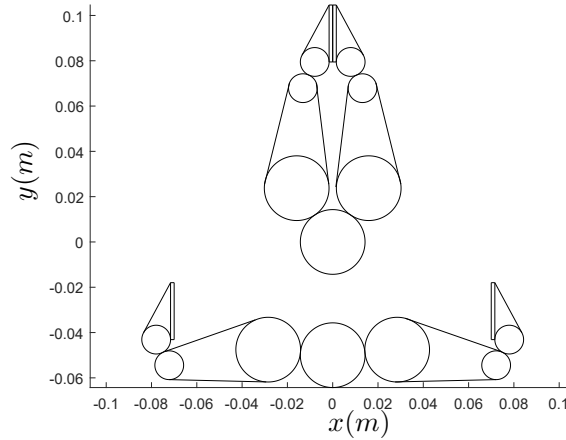


FIGURE 5.7 – Design obtenu avec la procédure finale.

5.6 Mécanisme d'ongle

À la section 5.4.2 a été présenté le comportement idéal d'un mécanisme d'ongle qui s'allonge et se rétracte sous l'effet d'une force externe, qui est le contact avec une surface dure. Dans cette section est présenté en détail le fonctionnement d'un nouveau mécanisme d'ongle et la méthode géométrique employée pour obtenir les paramètres de design. À la figure 5.8 est

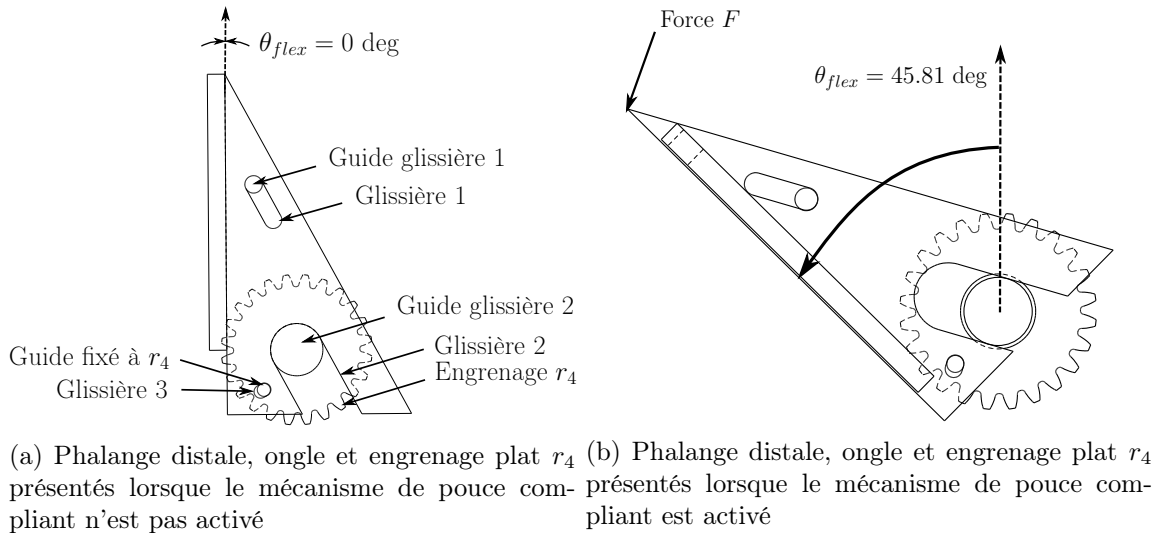


FIGURE 5.8 – Vues de côté montrant le mécanisme d'actionnement de l'ongle.

montré le comportement idéal de l'ongle où, à gauche, aucune force externe n'est appliquée, alors qu'à droite, l'ongle est allongé en raison d'une force externe F . Le mécanisme proposé est composé de trois pièces principales, dont la phalange distale, l'ongle et l'engrenage r_4 . L'engrenage r_4 est considéré comme fixe, car le mouvement de ce dernier est contraint par la chaîne cinématique du mécanisme quatre barres et des engrenages planétaires. La phalange distale est fixée sur le même arbre que l'engrenage r_4 mais peut pivoter autour de cet arbre.

Finalement, l'ongle est contraint à la phalange distale et à l'engrenage r_4 , par l'entremise des glissières 1, 2 et 3. La fonction des glissières 1 et 2 est de conserver l'ongle dans la même orientation que la phalange distale et de forcer le mouvement de l'ongle parallèlement au dos de la phalange distale. Les arbres guidant les glissières 1 et 2 sont fixés sur la phalange distale et les chemins guides sont coupés dans l'ongle. Pour ce qui est de la glissière 3, cette dernière sert de mécanisme d'actionnement de l'ongle. L'actionnement par la glissière 3 tire avantage du fait que la phalange distale et l'engrenage r_4 bougent relativement l'un à l'autre qu'en présence de $\theta_{flex} > 0$. Les figures 5.8a et 5.8b montrent que l'arbre fixé sur l'engrenage r_4 ne bouge pas dans les deux cas et que c'est le mouvement relatif entre la phalange distale et l'engrenage r_4 , θ_{flex} , qui force l'ongle à s'allonger.

Le design des glissières est obtenu géométriquement avec les cercles et les droites présentés à la figure 5.9. La méthode géométrique présentée à la figure 5.9 présente le mécanisme comme

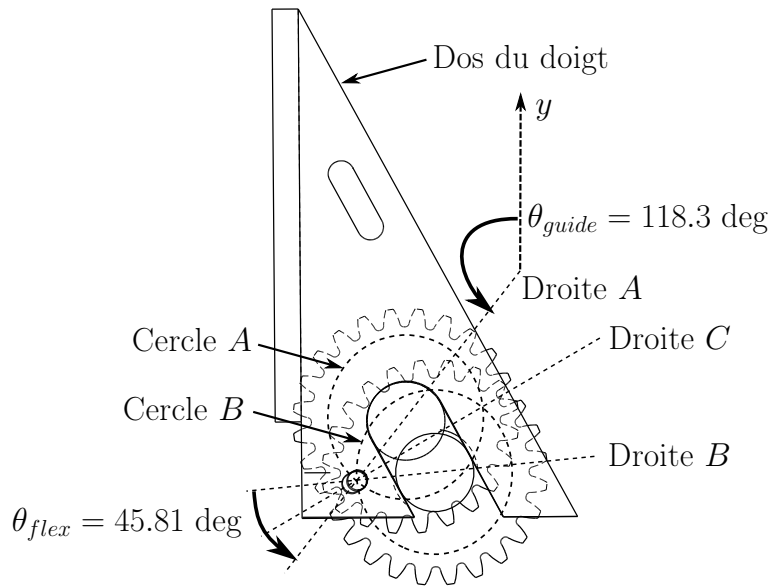


FIGURE 5.9 – Cercles et droites utilisés pour sélectionner la géométrie de la glissière d'actionnement.

si l'ongle était fixé et l'engrenage r_4 devait bouger en raison des contraintes du mécanisme. Le cercle A est le cercle centré sur l'engrenage et de diamètre qui intersecte l'arbre actionnant. La droite A est donc la droite passant par le centre du cercle A et l'arbre d'actionnement lorsque l'ongle est en position rétractée, donc l'engrenage pleinement enfoncé dans la glissière 2. Il en va de même pour le cercle B et la droite B, mais lorsque l'engrenage r_4 est en position allongée. L'angle entre les droites A et B est égal à $\theta_{flex} = 45,81$ degrés. La droite C est une droite qui passe par le centre de l'arbre actionneur pour les deux positions. La droite C est contrainte d'être perpendiculaire au dos du doigt, donc perpendiculaire à la trajectoire d'allongement de l'ongle, afin de minimiser les forces internes de contact du guide. À la suite des itérations graphiques, les dimensions qui maximisent l'allongement de l'ongle sont celles

qui superposent la position des arbres dans la figure 5.9. Le rayon des cercles A et B devant être compris dans l'engrenage r_4 , la dimension la plus grande possible a été requise et est 4,73 mm à un angle $\theta_{guide} = 118,3$ degrés lorsque la position rétractée de l'ongle est considérée. Il est important de mentionner que les contraintes de design ne font pas en sorte que le mécanisme puisse allonger l'ongle d'une longueur de $2\ell_{pad}$, mais plutôt de longueur $\ell_{pad} + 0,16$ mm qui est jugée acceptable. Cette modification a pour effet de raccourcir l'ongle et accroît l'ouverture de ramassage de 3 mm lorsque le ramassage optimal est effectué. Ce changement affecte seulement le ramassage optimal, car c'est le seul cas où l'ongle intervient. La courbe optimale reste la même, car la longueur ℓ_c est augmentée de 3 mm pour toutes les courbes.

5.7 Capteur d'efforts intégré

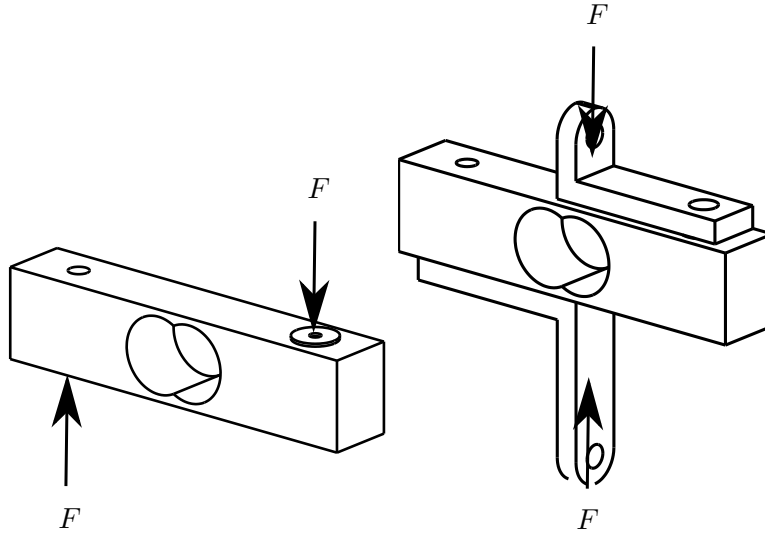
Aux chapitres 3 et 4 ont été présentés deux préhenseurs, l'un spécialisé dans le ramassage d'objets et l'autre plus général, utilisant le même bras robotisé et capteur d'efforts monté entre le préhenseur et le bras. Dans les cas précédents, le capteur était utilisé soit pour valider le contact avec la surface rigide, soit pour mesurer la force appliquée sur l'objet ou la surface. Le capteur utilisé étant capable de mesurer les trois forces selon des axes orthogonaux et les moments autour de ces axes, il était sous-utilisé dans les cas précédents. Le capteur étant aussi très précis et robuste, il est considéré comme coûteux par rapport à des capteurs qui ne mesurent qu'une seule force dans une direction.

Cette section propose d'utiliser un capteur comme jauge de déformation peu coûteuse pour remplacer le capteur six axes, qui est installé à même le préhenseur. Ce capteur a pour but de fournir une solution intégrée au préhenseur. Le but de ce dernier est premièrement, de pouvoir confirmer le contact avec la surface; deuxièmement, de mesurer les forces appliquées avec des hypothèses sur la direction des forces en environnements structurés; et, troisièmement, de donner de l'information sur les forces appliquées sur les objets lors du serrage.

5.7.1 Le capteur proposé

La jauge de déformation proposée est présentée à la figure 5.10a. Cette jauge se déforme sous l'action des forces F et est affaiblie en son centre, où le capteur est monté et où la déformation est accrue en raison de cet affaiblissement.

La force F mesurée doit être appliquée à chaque bout du capteur. Pour inclure le capteur dans le préhenseur présenté dans cette section, le capteur est muni de membrures de chaque côté pour que les forces soient colinéaires, comme montré à la figure 5.10b, et peut ainsi remplacer une membrure à deux forces dans le mécanisme.



(a) Capteur utilisé pour mesurer une force F appliquée au bout de la membrure
 (b) Assemblage proposé pour mesurer une force F appliquée au centre de la membrure

FIGURE 5.10 – Capteur de force proposé pour le préhenseur.

5.7.2 Relation entre la force appliquée au bout du doigt et la force mesurée au capteur

Comme mentionné précédemment, le capteur remplace une membrure dans le mécanisme, plus précisément la tige en compression de longueur l_5 du doigt, montrée à la figure 5.11. Le capteur positionné à la membrure l_5 étant très rigide, les déformations liées aux forces appliquées sont négligées et la longueur de la membrure l_5 est donc constante. Cette propriété est importante, car l_5 doit être de longueur constante pour que les phalanges distales du pouce et du doigt restent parallèles.

Lorsque le schéma du mécanisme utilisé dans cette section a été présenté à la section 5.3.1, il a été omis de choisir les valeurs des longueurs l_4 , l_5 , l_6 et les valeurs des angles ψ_2 , ψ_3 , ces dernières n'intervenant pas dans la cinématique des doigts. Cette section devant maximiser la plage des mesures du capteur, les valeurs de ces paramètres sont maintenant étudiées et sélectionnées.

Le modèle présenté à la figure 5.11 pour étudier la relation entre les forces exercées au bout du doigt présente plus de paramètres que nécessaire. En effet, puisque la boucle formée par les longueurs l_4 , l_5 , l_6 et l_8 doit être un parallélogramme, les contraintes

$$l_8 = l_5 \quad (5.57)$$

$$l_4 = l_6 \quad (5.58)$$

$$\theta_2 + \theta_3 + \psi_2 + \psi_3 = 0 \quad (5.59)$$

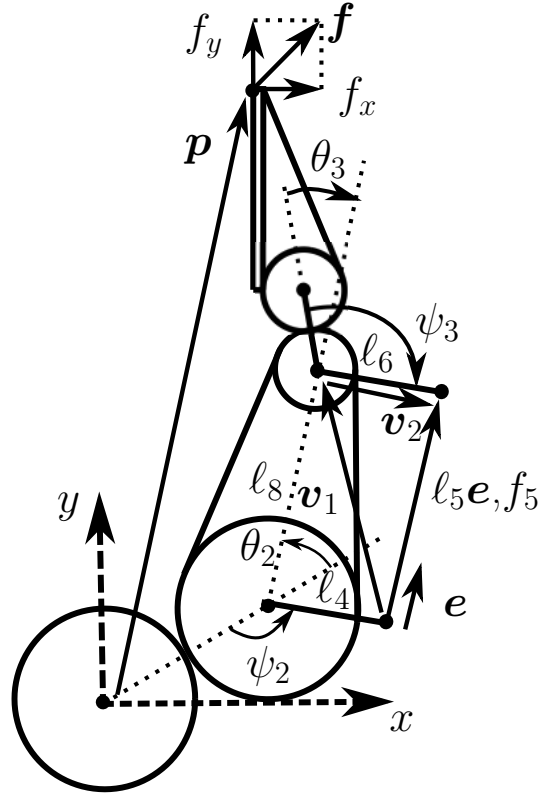


FIGURE 5.11 – Vecteurs utilisés pour étudier la force mesurée par le capteur provenant de la force au bout du doigt.

doivent être respectées. Ainsi, seulement les paramètres l_4 et ψ_2 doivent être sélectionnés, car l_8 a été sélectionné lors du design des doigts.

Pour obtenir la relation entre la force exercée sur la membrure l_5 , f_5 et la force exercée au bout des doigts, le capteur est considéré comme une liaison prismatique de longueur l_5 .

Dans le but d'utiliser le concept de travail virtuel pour déterminer les forces, l'obtention des relations de vitesse est requise. Pour ce faire, voici premièrement le vecteur de position \mathbf{p} du point d'application de la force \mathbf{f} .

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} (r_1 + r_2)s_1 + l_8s_{12} + (r_3 + r_4)s_{123} + p_x c_{1234} + p_y s_{1234} \\ (r_1 + r_2)c_1 + l_8c_{12} + (r_3 + r_4)c_{123} - p_x s_{1234} + p_y c_{1234} \end{bmatrix}, \quad (5.60)$$

où s_1 , s_{12} , s_{123} et s_{1234} sont respectivement $\sin(\theta_1)$, $\sin(\theta_1 + \theta_2)$, $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ et $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$, et de même pour c_1 , c_{12} , c_{123} et c_{1234} , qui sont $\cos(\theta_1)$, $\cos(\theta_1 + \theta_2)$, $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ et $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$. Ce vecteur est différent de (5.12), car il doit considérer le degré de liberté supplémentaire, qui est la liaison prismatique l_5 , donc il ne considère pas que les phalanges distales sont parallèles en tout temps. Tout d'abord l'équation (5.60) est dérivée par rapport

au temps, les variables étant \mathbf{p}_f et θ_3 avec la relation $\theta_4 = R_2\theta_3 + \theta_{d1}$, pour obtenir

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} (r_3 + r_4)c_{123} + (R_2 + 1)(-p_x s_{1234} + p_y c_{1234}) \\ -(r_3 + r_4)s_{123} + (R_2 + 1)(-p_x c_{1234} - p_y s_{1234}) \end{bmatrix} \dot{\theta}_3. \quad (5.61)$$

Deuxièmement, sont présentés les vecteurs

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} \ell_8 \sin(\theta_1 + \theta_2) - \ell_6 \sin(\theta_1 + \pi - \psi_2) \\ \ell_8 \cos(\theta_1 + \theta_2) - \ell_6 \cos(\theta_1 + \pi - \psi_2) \end{bmatrix} \quad (5.62)$$

$$\mathbf{v}_2 = \ell_6 \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 + \pi - \psi_2) \\ \cos(\theta_1 + \pi - \psi_2) \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

et l'équation de boucle cinématique fermée

$$\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 - \ell_5 \mathbf{e} = 0, \quad (5.64)$$

où \mathbf{e} est un vecteur unitaire défini dans la direction de la barre de longueur ℓ_5 . L'équation (5.64) est réarrangée et chaque coté est multiplié par sa transposée pour obtenir

$$(\ell_5 \mathbf{e})^T (\ell_5 \mathbf{e}) = (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2)^T (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2). \quad (5.65)$$

Le vecteur \mathbf{e} étant unitaire, le terme de gauche se simplifie pour donner

$$\ell_5^2 = \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 + \ell_6^2 + 2\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2. \quad (5.66)$$

L'équation (5.66) est dérivée par rapport au temps et les deux premiers termes du côté droit sont constants. On obtient donc

$$2\ell_5 \dot{\ell}_5 = 2\mathbf{v}_1^T \begin{bmatrix} \ell_6 \cos(\theta_1 + \pi - \psi_2) \\ -\ell_6 \sin(\theta_1 + \pi - \psi_2) \end{bmatrix} \dot{\theta}_3. \quad (5.67)$$

Les équations (5.61) et (5.67) sont combinées pour éliminer $\dot{\theta}_3$ et obtenir

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}_5 \dot{\ell}_5 \quad (5.68)$$

avec

$$\mathbf{J}_5 = \begin{bmatrix} (r_3 + r_4)c_{123} + (R_2 + 1)(-p_x s_{1234} + p_y c_{1234}) \\ -(r_3 + r_4)s_{123} + (R_2 + 1)(-p_x c_{1234} - p_y s_{1234}) \end{bmatrix} \frac{2\ell_5}{2\mathbf{v}_1^T \begin{bmatrix} \ell_6 \cos(\theta_1 + \pi - \psi_2) \\ -\ell_6 \sin(\theta_1 + \pi - \psi_2) \end{bmatrix}}. \quad (5.69)$$

L'équation (5.69) se simplifie à

$$\mathbf{J}_5 = \begin{bmatrix} (r_3 + r_4)c_{123} + (R_2 + 1)p_y \\ -(r_3 + r_4)s_{123} + (R_2 + 1)p_x \end{bmatrix} \frac{2\ell_5}{2\mathbf{v}_1^T \begin{bmatrix} \ell_6 \cos(\theta_1 + \pi - \psi_2) \\ -\ell_6 \sin(\theta_1 + \pi - \psi_2) \end{bmatrix}}, \quad (5.70)$$

car la relation est toujours évaluée à $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0$.

Si on utilise le concept du travail virtuel et que l'on remplace les vitesses par des incréments infinitésimaux, la relation (5.68) devient

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{J}_5 \delta \ell_5 \quad (5.71)$$

et le travail virtuel total exprimé avec

$$\mathbf{f}^T \delta \mathbf{p} = f_5 \delta \ell_5 \quad (5.72)$$

et finalement le résultat combiné avec l'équation (5.19) pour obtenir la relation

$$\mathbf{f}^T \mathbf{J}_5 \delta \ell_5 = f_5^T \delta \ell_5. \quad (5.73)$$

Puisque cette dernière relation doit être vérifiée pour toute les valeurs de $\delta \ell_5$, on peut tirer la conclusion

$$\mathbf{J}_5^T \mathbf{f} = f_5. \quad (5.74)$$

Si on désire le vecteur des forces appliquées en fonction de la valeur mesurée \mathbf{f} :

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{J}_5}{\mathbf{J}_5^T \mathbf{J}_5} f_5, \quad (5.75)$$

où $\mathbf{J}_5^T \mathbf{J}_5$ est un scalaire. Il est important de préciser que la force \mathbf{f} appliquée au bout du doigt est un vecteur à deux dimensions, tandis que la mesure du capteur f_5 est un scalaire. Ces propriétés font en sorte que le capteur mesure une force et que de l'information supplémentaire est nécessaire pour déterminer la grandeur et la direction de \mathbf{f} , d'où l'importance d'utiliser ce système de mesure lorsque de l'information est disponible sur les forces. Un exemple d'information est lorsqu'une force est appliquée sur une surface, la direction de cette force peut être supposée, donc la mesure fournit l'information manquante. La procédure est donc d'utiliser la valeur de force mesurée, d'utiliser (5.75) pour obtenir \mathbf{f} et, avec le vecteur unitaire de direction d'application de la force \mathbf{e}_{dir} , d'obtenir la force réelle \mathbf{f}_{reelle} avec

$$\mathbf{f}_{reelle} = \mathbf{f}^T \mathbf{e}_{dir} \mathbf{e}_{dir}. \quad (5.76)$$

Ainsi, une force appliquée \mathbf{f}_{reelle} perpendiculaire à \mathbf{f} ne peut être mesurée et constitue donc une des limitations de ce type d'arrangement. Il est ainsi important de prendre en compte la direction de la force au préalable et de n'utiliser cet arrangement pour appliquer des forces que si la direction de mesure est jugée acceptable.

5.7.3 Optimisation des paramètres du capteur

Pour que la plage des valeurs mesurées du capteur soit utilisée au maximum, une optimisation des paramètres ℓ_4 et ψ_2 est effectuée. Avec les équations (5.75) et (5.76), il est possible d'obtenir

une expression de la force selon l'axe x en fonction de la position de θ_1 , car \mathbf{J}_5 dépend de θ_1 , et de la force mesurée du capteur f_5 , ce qui donne

$$f_{x2}(\theta_1, f_5) = \frac{\mathbf{J}_5^T}{\mathbf{J}_5^T \mathbf{J}_5} f_5 e_x. \quad (5.77)$$

Avec ce résultat est trouvée la plus petite valeur mesurable par le capteur à une configuration donnée θ_1 pour la valeur maximale mesurable du capteur f_5 :

$$\begin{aligned} & \underset{\theta_{1c}}{\text{minimiser}} && f_{x2}(\theta_{1c}, f_5) \\ & \text{sujet à} && f_5 = 49.05N \end{aligned}, \quad (5.78)$$

où la force prescrite correspond au poids d'une masse de 5 kg. Finalement, l'optimisation est formulée avec

$$\begin{aligned} & \underset{\ell_4, \psi_2}{\text{minimiser}} && -f_x(\theta_{1c}, 49.05) \\ & \text{sujet à} && 0 \leq \ell_4 \leq 100, \\ & && 0 \leq \psi_2 \leq 19.17, \end{aligned} \quad (5.79)$$

où ℓ_4 est exprimé en millimètres et ψ_2 en degrés. Le résultat obtenu après optimisation est

$$\begin{aligned} \ell_4 &= 100 \text{ deg} \\ \psi_2 &= 19.17 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (5.80)$$

Avec ce résultat, la figure 5.12 montre la valeur de la force en x appliquée, obtenue avec

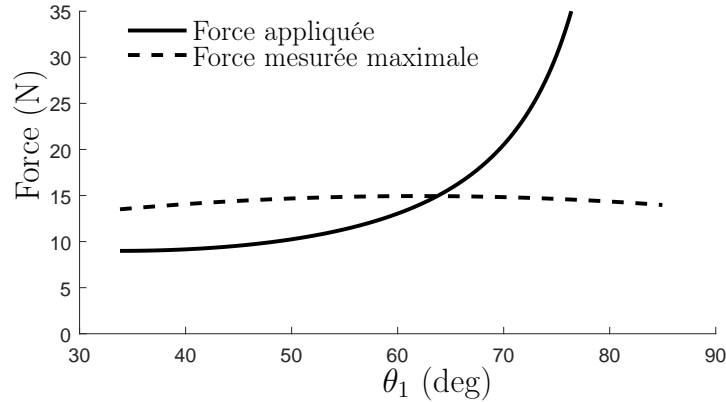


FIGURE 5.12 – Force appliquée en x (l'équation (5.23)) et force mesurée en x (l'équation (5.77)) en fonction de l'angle θ_1 .

l'équation (5.23), et la force en x mesurée avec l'équation (5.77) en fonction de la configuration θ_1 du doigt. Il est mentionné que lorsque des petits objets seront pris, c'est-à-dire lorsque θ_1 tend vers θ_{1i} , la pression maximale pourra être mesurée, tandis que pour des grands objets, c'est-à-dire lorsque θ_1 tend vers θ_{1f} , la mesure sera saturée, donc l'utilisation des valeurs de courants sera plus appropriée.

5.8 Design proposé

Les sections précédentes présentent l'architecture du préhenseur, le processus par lequel les dimensions sont sélectionnées en fonction des pièces disponibles et l'implantation du capteur intégré dans le but d'avoir une solution complète. Les dimensions importantes étant connues, cette section propose un arrangement des pièces dans le but de montrer une géométrie générale. Le design obtenu est présenté à la figure 5.13. Les figures 5.13a et 5.13b présentent le préhenseur

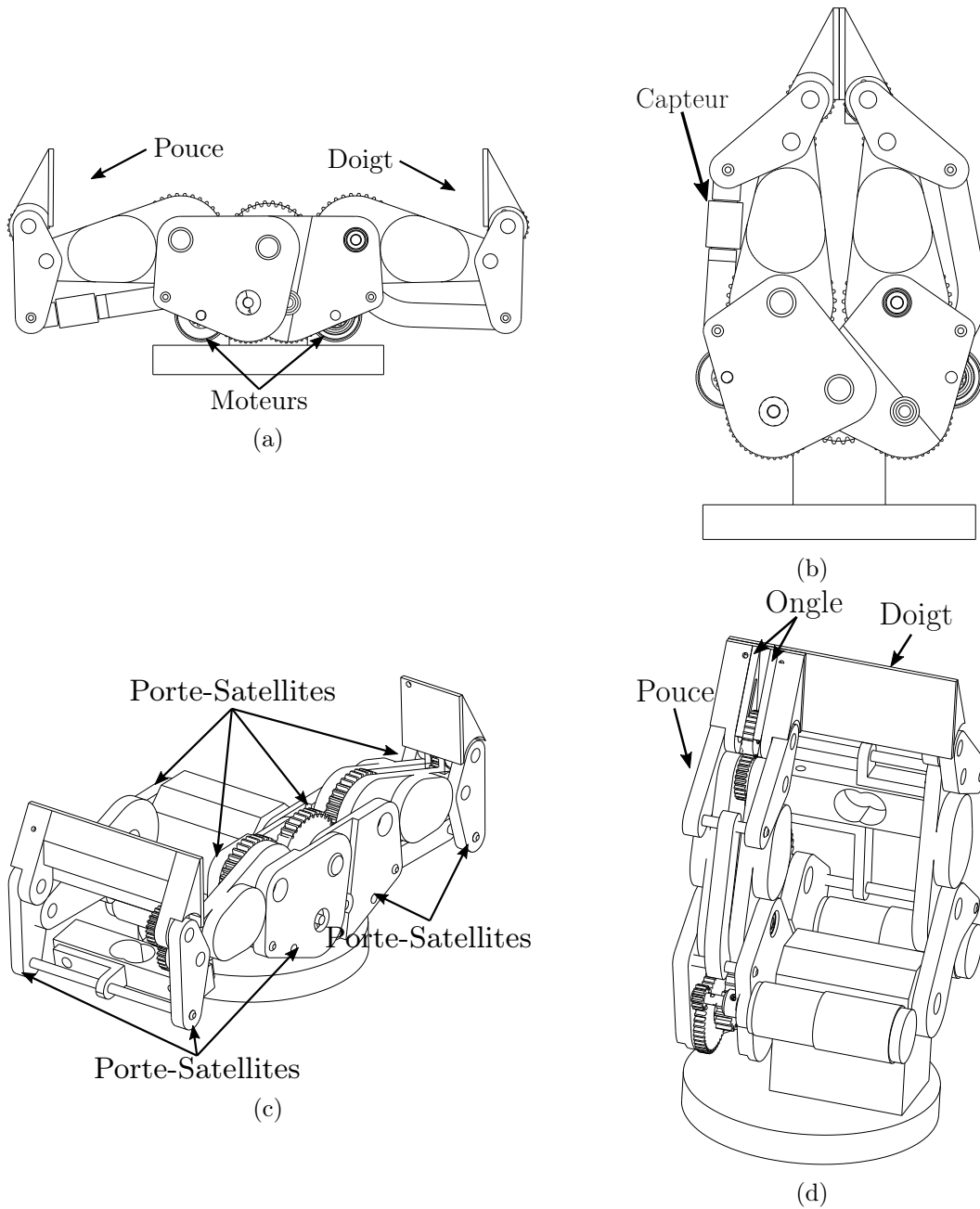


FIGURE 5.13 – Modèle 3D du design obtenu dans ce chapitre.

respectivement dans la configuration ouverte ($\theta_1 = \theta_{1f}$) et la configuration fermée ($\theta_1 = \theta_{1i}$). La position du capteur est montrée dans la figure 5.13b. Il est aussi possible d’observer que la main est une main gauche, contrairement au prototype du chapitre 4. Une attention particulière a été portée à la position des porte-satellites à l’extérieur des phalanges dans le but de prévenir la potentielle insertion d’un objet entre les engrenages. Les porte-satellites sont présentés à la figure 5.13c. La figure 5.13d montre la main de dos, où le pouce est clairement moins large que le doigt, comme dans le design du préhenseur du chapitre 4. Le préhenseur est donc muni d’un doigt large pouvant mieux supporter des objets. À la figure 5.14 est présentée

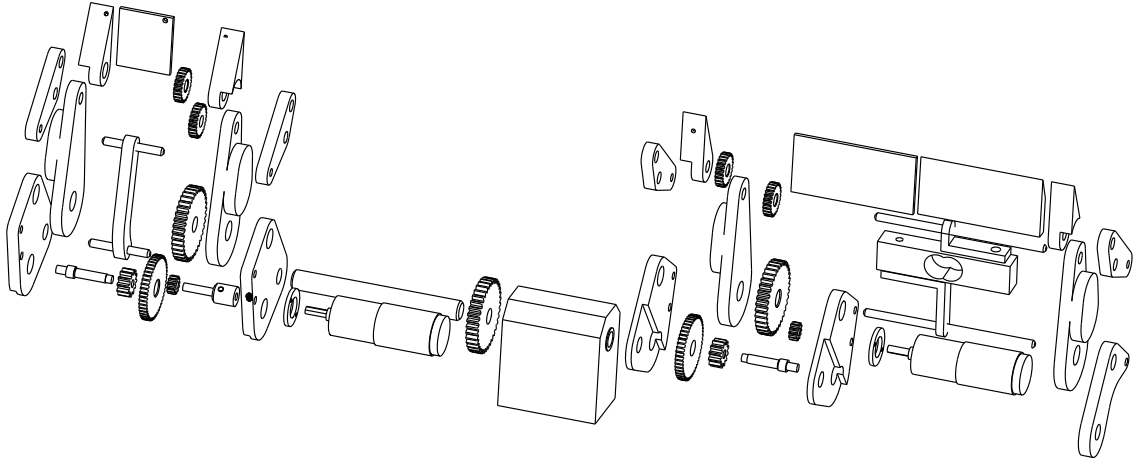


FIGURE 5.14 – Vue explosée du préhenseur.

une vue explosée du mécanisme pour montrer le nombre de pièces utilisées. Une attention particulière a été portée pour concevoir des pièces pouvant être usinées directement avec des machines 3 axes, c’est-à-dire de l’usinage cartésien. Cette propriété de la majorité des pièces permet de réduire les coûts de production et, par le fait même, rend les pièces réalisables par des méthodes d’impression additive. Cela rend le design plus accessible pour différents utilisateurs. Le design, utilisant des engrenages standards, donne ainsi la possibilité de les acheter ou de les imprimer. À la figure 5.15 sont montrées les pièces uniques du design. En effet, le design réutilise beaucoup des pièces, réduisant encore le nombre de pièces uniques à usiner et donc l’accessibilité à des pièces de réparation. Finalement, la figure 5.15 montre le nombre de fois qu’une pièce est réutilisée et, dans le cas des engrenages achetés, quelles pièces sont achetées et lesquelles sont usinées. Les pièces usinables directement sont considérées comme pouvant l’être en une étape à partir d’une pièce de métal. Les pièces usinables en deux étapes doivent être repositionnées pour être percées. La dernière section de la figure 5.15 montre les pièces achetées, comme le capteur, les moteurs et les engrenages.

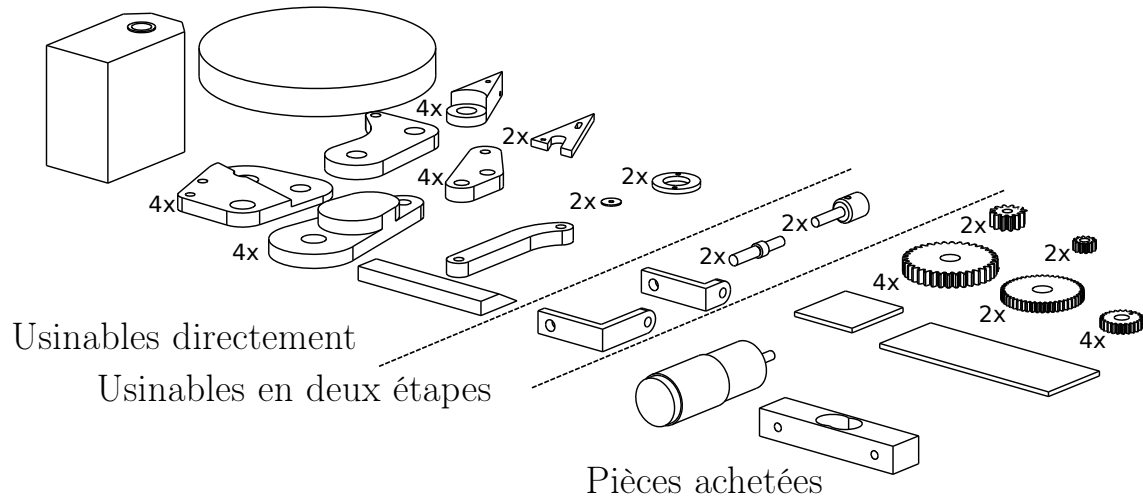


FIGURE 5.15 – Présentation des pièces uniques utilisées dans le préhenseur.

5.9 Courbes d'utilisation du design proposé

Cette section présente explicitement les courbes d'utilisation du préhenseur pour la prise parallèle et le ramassage des objets sur des surfaces rigides.

5.9.1 Procédure de prise parallèle

L'utilisation la plus simple des préhenseurs est habituellement l'arrivée de ce dernier au-dessus d'un objet, la descente et la fermeture de la pince pour saisir l'objet. La relation entre la distance entre les phalanges et la position des entrées est présentée à la figure 5.16a. Les

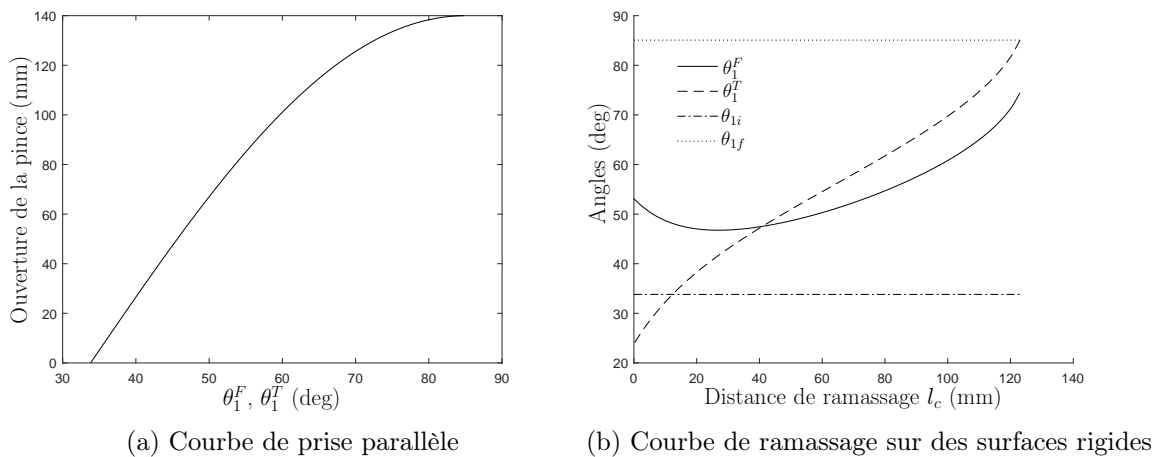


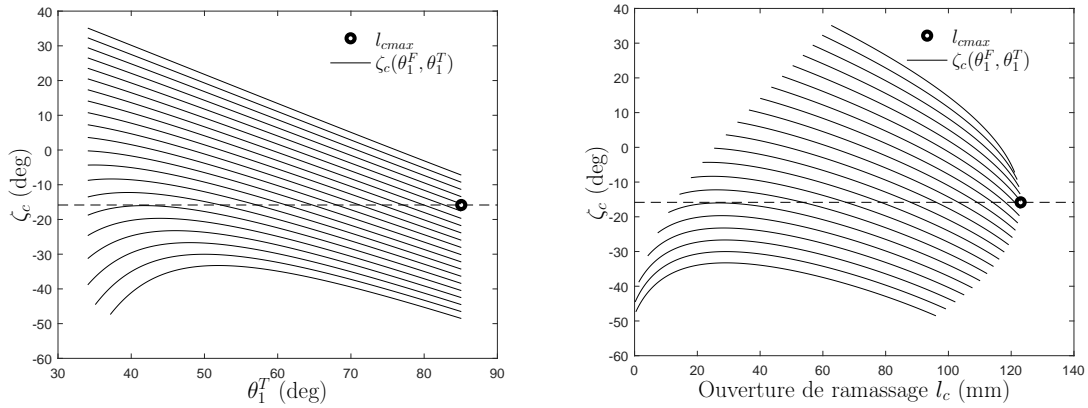
FIGURE 5.16 – Courbes d'utilisation du préhenseur.

courbes étant les mêmes pour le doigt et le pouce, une seule est présentée.

5.9.2 Courbes de ramassage à angle constant

Le ramassage d'objet optimal ayant été présenté au chapitre 4, la procédure n'a pas été représentée complètement. Cependant, cette section ajoute une nouvelle composante à la méthode, soit la possibilité d'effectuer le ramassage optimal, c'est-à-dire que l'angle d'attaque du pouce est optimal pour toute la procédure, mais dans le cas présent, tout en gardant l'orientation du préhenseur constant, mais en ayant le manipulateur mobile. La procédure est comme suit : le préhenseur est orienté à un angle $\zeta_{const} = -15,83$ degrés, une distance de ramassage ℓ_c est choisie en fonction de la longueur de l'objet et les angles des doigts sont ajustés en fonction des angles θ_1^F et θ_1^T correspondants de la figure 5.16b. La prise correspondant à la fermeture de la pince, la trajectoire des entrées θ_1^F et θ_1^T est celle des courbes de la figure 5.16b en réduisant ℓ_c .

Les courbes obtenues à la figure 5.16b sont celles qui sont associées à la valeur ℓ_{cmax} du tableau 5.5 pour une orientation constante. Pour montrer comment ces courbes ont été obtenues, la figure 5.17 montre les courbes d'orientation de ramassage optimales du préhenseur. Aux fi-



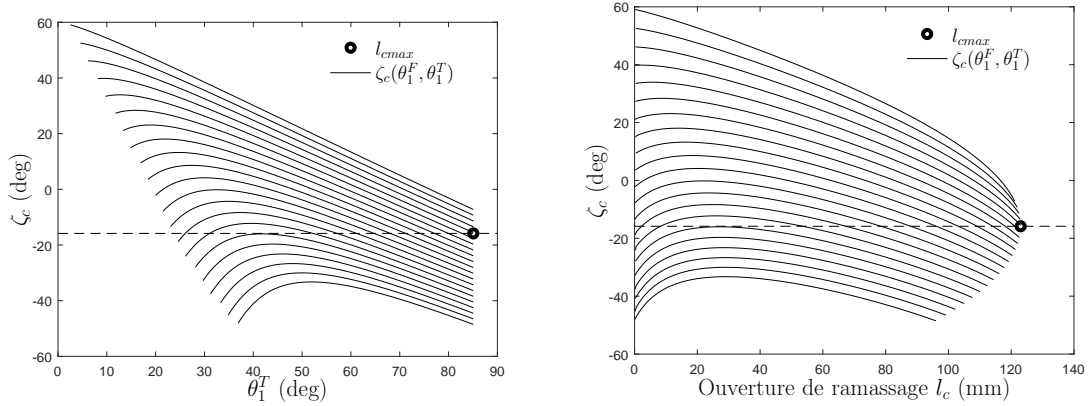
(a) Orientation du préhenseur en fonction de θ_1^T pour différentes valeurs de θ_1^F (b) Orientation du préhenseur en fonction de ℓ_c pour différentes valeurs de θ_1^F

FIGURE 5.17 – Courbes de ramassage optimal ζ_c du préhenseur pour des valeurs de θ_1^F allant de θ_{1i} (courbe du bas) jusqu'à θ_{1f} (courbe du haut) pour des incréments constants.

gures 5.17a et 5.17b est aussi montré à quelle courbe de θ_1^F et à quelle valeur de θ_1^T correspond l'ouverture maximale de ramassage ℓ_{max} . Une droite est tracée pour montrer qu'à orientation constante, une trajectoire de θ_1^F , θ_1^T existe pour toute la plage de mouvement de θ_1^T . Toutefois, en observant la figure 5.17b, on remarque que cette plage ne comprend pas les objets de petite taille, c'est-à-dire que lorsque l'entrée du pouce aura atteint θ_{1i} , un espace sera présent entre le bout des phalanges distales. Donc, ramasser des objets de très petite taille sera impossible.

Pour remédier à ce problème, on étend la plage de mouvement du pouce pour lui permettre d'atteindre des valeurs plus petites que θ_{1i} . Ceci est possible en raison de la nature du mécanisme de transmission, qui peut tourner autour de son axe à l'infini, et du mécanisme de doigt,

qui est muni d'une grande plage de mouvement dont les limites de la plage actuelle ne sont pas atteintes. À la figure 5.18 sont présentées les courbes de ramassage, mais en permettant



(a) Orientation du préhenseur en fonction de θ_1^T pour différentes valeurs de θ_1^F avec hyper-extension du pouce. (b) Orientation du préhenseur en fonction de l'ouverture de ramassage l_c pour différentes valeurs de θ_1^F avec hyper-extension du pouce.

FIGURE 5.18 – Courbes de ramassage optimal du préhenseur avec hyperextension du pouce.

au pouce de réduire son entrée jusqu'à ce que le bout des phalanges distales soient en contact, c'est-à-dire $l_c = 0$. Finalement, les courbes de la figure 5.16b sont les trajectoires de θ_1 pour le pouce et le doigt, qui sont sur la droite d'orientation constante ζ_c correspondant à l_{cmax} .

5.10 Conclusion

Dans ce chapitre a été présentée une nouvelle version d'un mécanisme de transmission utilisé pour actionner un doigt d'un préhenseur. Le mécanisme a été utilisé pour sa simplicité, sa possibilité d'actionnement passif et sa linéarité, ce qui le rend très polyvalent lors du design d'un préhenseur. L'architecture de doigt utilisant des mécanismes planétaires a été réutilisée et les paramètres et contraintes nécessaires à l'optimisation ont été présentés. Une procédure en étapes a été proposée et réalisée pour optimiser les propriétés du mécanisme et les valeurs optimales présentées. Une nouvelle version du mécanisme d'ongle, qui n'est pas susceptible au blocage par la friction, a été présentée, en plus du processus de design graphique afin d'obtenir un ongle complètement rétracté au repos, qui est ainsi plus sécuritaire, car ce dernier est pointu. L'utilisation d'un capteur peu coûteux a été justifiée et l'optimisation de son placement dans le préhenseur a été présentée. Finalement, les courbes d'utilisation du préhenseur ont été présentées en plus de la méthode avec laquelle ont été obtenues ces courbes.

Conclusion et travaux futurs

La contribution principale de cette thèse est l'introduction d'une méthode pour saisir les objets minces de petite et de grande taille reposant sur des surfaces dures. Elle est aussi la présentation de mécanismes permettant de mettre en oeuvre la méthode proposée en modifiant des préhenseurs existants ou en construisant des mains complètes.

Au moment de la rédaction de la thèse et à la connaissance de l'auteur, les travaux présentés sont de nouvelles contributions dans le domaine de l'étude de la préhension et ont mené à la publication d'un article de conférence (Babin *et al.*, 2014) et de deux articles de journaux (Babin et Gosselin, 2018; Babin *et al.*, 2019). De plus, les contributions présentées au chapitre 6 feront l'objet de publications ultérieures.

Conclusion

Au chapitre 1 est présentée une méthode qui vise à faciliter la préhension d'objets plats reposant sur des surfaces rigides. La méthode suppose que pousser les objets au bord de la surface endommagerait ces derniers ou n'est pas acceptable pour d'autres raisons, que les méthodes magnétiques ne fonctionnent que sur les objets métalliques et que les méthodes par succion sont mal adaptées aux objets poreux. Elle est donc présentée comme une solution mécanique qui ne nécessite que des phalanges solides et dont le préhenseur doit être en mesure de pencher le pouce et de fournir une grande ouverture de prise. La méthode est présentée pour des objets pouvant et ne pouvant pas être contenus dans l'ouverture du préhenseur. Les conclusions quant aux propriétés favorisant le succès des méthodes sont les mêmes dans les deux cas et sont donc prises en considération dans les designs des chapitres suivants.

Au chapitre 2 ont été présentés les mécanismes planétaires qui ont été au centre des mécanismes utilisés dans les préhenseurs proposés. Le but de ce chapitre étant de généraliser les concepts des planétaires utilisés comme articulation entre deux membrures, toutes les configurations possibles ont été présentées et un arrangement à deux degrés de liberté qui améliore les propriétés cinématiques d'une articulation de robot a été construit et testé dans le but de valider les designs proposés.

Le chapitre 3 propose de modifier un des doigts d'un robot commercial dans le but de le

rendre capable d'effectuer le ramassage de petits et de grands objets. Dans le but de fournir une grande ouverture au préhenseur, une articulation planétaire est utilisée entre la base et la première phalange du doigt proposé. Dans le but de garantir le contact entre la surface et le bout du pouce, c'est-à-dire la phalange distale du mécanisme, une articulation passive en rotation est proposée, qui se replie vers l'intérieur sous l'effet du contact, mais qui, en raison d'un ressort, tente de se déplier et garantit ainsi le contact. Les instruments de mesure utilisés pour la prise, soit un potentiomètre à l'articulation passive et un capteur de force six axes au poignet, ont été présentés et leur utilisation décrite. Finalement, la procédure proposée a été démontrée avec succès dans un essai qui effectue en boucle le ramassage de petits et de grands objets sur une surface dure, pour plusieurs objets de tailles et de poids différents. Les suggestions du chapitre 1 ayant mené à un design fonctionnel, elles sont donc jugées importantes pour le prochain design.

Au chapitre 4 a été présenté le design d'un préhenseur complet considérant les propriétés nécessaires pour effectuer le ramassage d'objets. Une distinction est faite entre le doigt et le pouce du préhenseur, qui ont des propriétés différentes. L'arrangement des pièces est présenté ainsi que des vues de coupe avec des modèles 3D dans le but d'expliquer le fonctionnement du préhenseur. L'utilisation d'un mécanisme à quatre barres pour obtenir une prise parallèle est justifiée dans le mécanisme, en la comparant à son utilisation dans des préhenseurs dans la littérature et en montrant que son utilisation avec des engrenages planétaires donne un meilleur angle de transmission, même pour une plus grande plage de mouvement des doigts. La cinématique du doigt complet est présentée ainsi que la cinématique du mécanisme d'actionnement liant le moteur à l'entrée du doigt. Un mécanisme d'ongle est proposé pour accroître la performance du ramassage d'objets ainsi que les propriétés de retenue des objets une fois le ramassage terminé. Les dimensions d'un prototype sont présentées et les trajectoires des actionneurs du préhenseur lors du serrage sont étudiées pour appliquer les plus grandes forces possibles. Trois méthodes de ramassage sont présentées : la première dans le but de présenter la procédure, mais ayant un faible taux de réussite ; la deuxième étant la méthode obéissant au ramassage effectué avec des trajectoires optimales, mais exigeante en accessoires de mesure et en précision des trajectoires effectuées par le robot ; la troisième variation de la méthode présente une version qui ne requiert qu'une validation du contact et une position statique du robot à la suite de ce contact. Cette dernière méthode a été la contribution principale de ce chapitre, car elle paraît intéressante à implémenter en industrie en raison de sa simplicité. Une variation du ramassage qui peut être utilisée pour prendre un objet accroché à la verticale sur un clou a été présentée ainsi que des vidéos des méthodes. Finalement, des conclusions ont été énoncées sur les propriétés du préhenseur qui ont été considérées optimales et sur celles qui devaient être améliorées dans un futur design.

Au chapitre 5 sont présentés les travaux de recherche sur les mécanismes d'interaction avec les humains et les environnements, d'où sont tirées des lignes directrices dans le but de concevoir

des mécanismes sécuritaires compliants et plus durables. Tout d'abord est proposé un mécanisme de transmission simple, mais réversible, qui vise à rendre le design plus sécuritaire dans l'éventualité de travail avec des humains et qui génère de moins grandes forces lors des contacts avec l'environnement. Par la suite sont présentées les équations décrivant les propriétés du préhenseur en ce qui a trait à la force de serrage, à l'ouverture maximale, et à l'angle d'attaque minimal du pouce. Les propriétés formulées ont été utilisées pour effectuer une optimisation en étapes des dimensions du mécanisme. Des engrenages standards ont été sélectionnés et le processus d'optimisation effectué à nouveau dans le but de les considérer. Un mécanisme d'ongle révisé a été proposé dans le but de rendre celui-ci complètement rétracté lorsque au repos. Cette propriété permet d'utiliser un ongle plus effilé pour le ramassage d'objets tout en protégeant un utilisateur de la pointe de l'ongle le reste du temps. Un capteur d'efforts et son intégration au préhenseur ont été présentés dans le but d'obtenir un design complet pouvant être monté sur n'importe quel bras robotisé, car il comprend toutes les solutions de capture d'information. Un design est proposé incluant tous les concepts de ce chapitre et les suggestions des précédents. Ce design propose d'utiliser des pièces qui peuvent être usinées directement par des procédés de fabrication simples et utilisant des pièces offertes commercialement. Finalement sont présentées les courbes d'utilisation du préhenseur ainsi qu'une version améliorée du ramassage statique, qui requiert peu de mouvements du robot.

Travaux futurs

Des travaux futurs sont suggérés pour continuer les travaux présentés dans cette thèse.

La construction du préhenseur proposé au chapitre 5 est nécessaire pour confirmer l'utilité et la simplicité d'utilisation du nouveau design. De plus, il serait intéressant de trouver des tâches étant déjà effectuées par des robots et de valider si l'utilisation du ramassage d'objets améliore l'exécution de ces dernières ou rend possible l'exécution de nouvelles tâches par un robot. Par ailleurs, il y aurait lieu d'étudier d'un point de vue un peu plus théorique la validité de l'optimisation par étapes présentée au chapitre 6.

Des travaux pour quantifier la robustesse des méthodes appliquées avec ces préhenseurs seront requis. En effet, les prises présentées étaient réussies, mais le taux de succès en présence des imperfections de l'environnement pourrait être quantifié.

Finalement, des méthodes d'optimisation de trajectoires pourraient être appliquées à la prise dans le but de comparer la prise effectuée par des méthodes classiques à la prise effectuée par le ramassage et de tirer des conclusions quant au temps d'exécution dans le cas où l'option de la méthode de prise se présente.

Bibliographie

- J.-F. ALLAN, G. LAMBERT, et S. REIHER : Manipulator with integrated electronics applied to the underground distribution network. *Proc. of the 39th International Symposium on Robotics (ISR), WEC 1-5*, pages 76–80, 2008.
- J.-F. ALLAN, S. REIHER, G. LAMBERT et S. LAVOIE : Field tests of a robot system prototype for the underground distribution lines. *Proc. of the 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pages 1–5, 2010.
- John R AMEND, Eric BROWN, Nicholas RODENBERG, Heinrich M JAEGER et Hod LIPSON : A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2):341–350, 2012.
- Marcin ANDRYCHOWICZ, Bowen BAKER, Maciek CHOCIEJ, Rafal JOZEFOWICZ, Bob MCGREW, Jakub PACHOCKI, Arthur PETRON, Matthias PLAPPERT, Glenn POWELL, Alex RAY *et al.* : Learning dexterous in-hand manipulation. *arXiv preprint arXiv :1808.00177*, 2018.
- Alejandro F AZOCAR, Luke M MOONEY, Levi J HARGROVE et Elliott J ROUSE : Design and characterization of an open-source robotic leg prosthesis. *In 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (Biorob)*, pages 111–118. IEEE, 2018.
- Vincent BABIN et Clément GOSSELIN : Picking, grasping, or scooping small objects lying on flat surfaces : A design approach. *The International Journal of Robotics Research*, 37(12):1484–1499, 2018.
- Vincent BABIN, Clément GOSSELIN et Jean-François ALLAN : A dual-motor robot joint mechanism with epicyclic gear train. *In 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 472–477, 2014.
- Vincent BABIN, David ST-ONGE et Clément GOSSELIN : Stable and repeatable grasping of flat objects on hard surfaces using passive and epicyclic mechanisms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55:1–10, 2019.

- Mathieu BARIL, Thierry LALIBERTÉ, Clément GOSSELIN et François ROUTHIER : On the design of a mechanically programmable underactuated anthropomorphic prosthetic gripper. *Journal of Mechanical Design*, 135(12):121008, 2013.
- S.J. BARTHOLET : Reconfigurable end effector, avril 28 1992. US Patent 5,108,140.
- Dmitry BERENSON, Rosen DIANKOV, Koichi NISHIWAKI, Satoshi KAGAMI et James KUFFNER : Grasp planning in complex scenes. *In Humanoid Robots, 2007 7th IEEE-RAS International Conference on*, pages 42–48. IEEE, 2007.
- Antonio BICCHI, Marco GABICINI et Marco SANTELLO : Modelling natural and artificial hands with synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 366(1581):3153–3161, 2011.
- Lionel BIRGLEN, Thierry LALIBERTÉ et Clément M GOSSELIN : *Underactuated robotic hands*, volume 40. Springer, 2007.
- Mohit BORTHAKUR, Anagha LATNE et Pooja KULKARNI : A comparative study of automated pcb defect detection algorithms and to propose an optimal approach to improve the technique. *International Journal of Computer Applications*, 114(6), 2015.
- Jennifer CASPER et Robin R. MURPHY : Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the world trade center. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 33(3):367–385, 2003.
- Manuel G CATALANO, Giorgio GRIOLI, Edoardo FARNIOLI, Alessandro SERIO, Cristina PIAZZA et Antonio BICCHI : Adaptive synergies for the design and control of the Pisa/IIT soft-hand. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5):768–782, 2014.
- Marco CECCARELLI : *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*, volume 27. Springer Science & Business Media, 2013.
- Dong Hoon CHA, Dong Yeop KIM, Tae-Keun KIM, Seung Hwan LIM, Jongsu YOON et Bongseok KIM : Modular joint unit design for arm exoskeleton robot. *Proc. of the 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, pages 55–57, 2012.
- Matei CIOCARLIE, Fernando Mier HICKS, Robert HOLMBERG, Jeffrey HAWKE, Michael SCHLICHT, Jeff GEE, Scott STANFORD et Ryan BAHADUR : The velo gripper : A versatile single-actuator design for enveloping, parallel and fingertip grasps. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5):753–767, 2014.
- ASM International. Handbook COMMITTEE : *ASM handbook : Friction, lubrication, and wear technology*, volume 18. ASM International, 1992.

- Mark R CUTKOSKY : On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 5(3):269–279, 1989.
- Nikhil Chavan DAFLE, Alberto RODRIGUEZ, Robert PAOLINI, Bowei TANG, Siddhartha S SRINIVASA, Michael ERDMANN, Matthew T MASON, Ivan LUNDBERG, Harald STAAB et Thomas FUHLBRIGGE : Extrinsic dexterity : In-hand manipulation with external forces. *In Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, pages 1578–1585. IEEE, 2014.
- S DAVIS, JO GRAY et Darwin G CALDWELL : An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2):249–257, 2008.
- Cosimo DELLA SANTINA, Cristina PIAZZA, Giorgio GRIOLI, Manuel G CATALANO et Antonio BICCHI : Toward dexterous manipulation with augmented adaptive synergies : The pisa/iit soft-hand 2. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(5):1–16, 2018.
- Louis-Alexis Allen DEMERS et Clément GOSSELIN : Kinematic design of a planar and spherical mechanism for the abduction of the fingers of an anthropomorphic robotic hand. *In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 5350–5356. IEEE, 2011.
- Munjal DESAI, Poornima KANIARASU, Mikhail MEDVEDEV, Aaron STEINFELD et Holly YANCO : Impact of robot failures and feedback on real-time trust. *In Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, pages 251–258. IEEE Press, 2013.
- Mehmet R DOGAR et Siddhartha S SRINIVASA : Push-grasping with dexterous hands : Mechanics and a method. *In International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ*, pages 2123–2130, 2010.
- Clemens EPPNER, Raphael DEIMEL, José ÁLVAREZ-RUIZ, Marianne MAERTENS et Oliver BROCK : Exploitation of environmental constraints in human and robotic grasping. *The International Journal of Robotics Research*, page 0278364914559753, 2015.
- Thomas FEIX, Javier ROMERO, Heinz-Bodo SCHMIEDMAYER, Aaron M DOLLAR et Danica KRAGIC : The grasp taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1):66–77, 2016.
- Federico GAETANI, Giovanni Antonio ZAPPATORE, Paolo VISCONTI et Patrizio PRIMICERI : Design of an arduino-based platform interfaced by bluetooth low energy with myo armband for controlling an under-actuated transradial prosthesis. *In 2018 International Conference on IC Design & Technology (ICICDT)*, pages 185–188. IEEE, 2018.

- S GARRIDO-JURADO, R MUÑOZ-SALINAS, FJ MADRID-CUEVAS et R MEDINA-CARNICER : Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming. *Pattern Recognition*, 51:481–491, 2016.
- S GARRIDO-JURADO, Rafael MUÑOZ-SALINAS, Francisco José MADRID-CUEVAS et Manuel Jesús MARÍN-JIMÉNEZ : Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*, 47(6):2280–2292, 2014.
- Lucas GEREZ, Junan CHEN et Minas LIAROKAPIS : On the development of adaptive, tendon-driven, wearable exo-gloves for grasping capabilities enhancement. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):422–429, 2019.
- Martin GRENIER et Clément GOSSELIN : Kinematic optimization of a robotic joint with continuously variable transmission ratio. In *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 513–521. American Society of Mechanical Engineers, 2011.
- François GUAY, Philippe CARDOU, Ana Lucia CRUZ-RUIZ et Stéphane CARO : Measuring how well a structure supports varying external wrenches. In *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications*, pages 385–392. Springer, 2014.
- Ulrich K HENSCHKE et Hans A MAUCH : Leg prosthesis, novembre 29 1949. US Patent 2,489,291.
- Carlos HERNANDEZ, Mukunda BHARATHEESHA, Wilson KO, Hans GAISER, Jethro TAN, Kanter van DEURZEN, Maarten de VRIES, Bas VAN MIL, Jeff van EGMOND, Ruben BURGER *et al.* : Team delft’s robot winner of the amazon picking challenge 2016. In *Robot World Cup*, pages 613–624. Springer, 2016.
- M HIGUCHI et T OGASAWARA : Development of a human symbiotic assist arm pas-arm : Design of cvt. *Robot and Human Interactive Communication, 2009. ROMAN 2009. The 18th IEEE International Symposium on*, pages 539 – 545, 2009.
- Bianca S HOMBERG, Robert K KATZSCHMANN, Mehmet R DOGAR et Daniela RUS : Robust proprioceptive grasping with a soft robot hand. *Autonomous Robots*, 43(3):681–696, 2019.
- Minghui HU, Jianfeng ZENG, Shaozhi XU, Chunyun FU et Datong QIN : Efficiency study of a dual-motor coupling ev powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(6):2252–2260, 2014.
- Thea IBERALL : The nature of human prehension : Three dextrous hands in one. In *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 396–401. IEEE, 1987.

- Joseph L JONES : Robots at the tipping point : the road to irobot roomba. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(1):76–78, 2006.
- Jinhwan JUNG et Kwanghee NAM : A dynamic decoupling control scheme for high-speed operation of induction motors. *IEEE/ASME Transactions on industrial electronics*, 46:100–110, 1999.
- Zachary A KAPLAN : R2d2 or irobot : Can armed robots be a friend to police without being a foe to the public. *Notre Dame JL Ethics & Pub. Pol’y*, 32:603, 2018.
- Daniel KAPPLER, Lillian Y. CHANG, Nancy S. POLLARD, Tamim ASFOUR et Rüdiger DILLMANN : Templates for pre-grasp sliding interactions. *Robotics and Autonomous Systems 2011.*, 2011. ISSN 09218890.
- A KARAKEREZIS, Z DOULGERI et V PETRIDIS : A gripper for handling flat non-rigid materials. *Automation and Robotics in Construction IX*, pages 593–601, 1994.
- Moslem KAZEMI, Jean-Sebastien VALOIS, J Andrew BAGNELL et Nancy POLLARD : Human-inspired force compliant grasping primitives. *Autonomous Robots*, 37(2):209–225, 2014.
- Key Technology Website. *ADR Module*. <https://www.key.net/en/products/adr-module/>, 2019. Accessed : 2019-08-03.
- B.-S. KIM, J.-J PARK et J.-B. SONG : Double actuator unit with planetary gear train for a safe manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*,, pages 1146–1151, 2007.
- Koichi KOGANEZAWA et Yasutaka ISHIZUKA : Novel mechanism of artificial finger using double planetary gear system. *In Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3184–3191. IEEE, 2008.
- R. KOLLURU, K. P. VALAVANIS et T. M. HEBERT : Modeling, analysis, and performance evaluation of a robotic gripper system for limp material handling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 28(3):480–486, Jun 1998. ISSN 1083-4419.
- K. KOSUGE, J. LEE, J. ICHINOSE et Y. HIRATA : A novel grasping mechanism for flat-shaped objects inspired by lateral grasp. *In 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pages 282–288, Oct 2008.
- Pascal D LABRECQUE et Clement GOSSELIN : Performance optimization of a multi-dof bilateral robot force amplification using complementary stability. *In 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 519–526. IEEE, 2015.

- Pascal D LABRECQUE, Jacques-Michel HACHÉ, Muhammad ABDALLAH et Clément GOSSELIN : Low-impedance physical human-robot interaction using an active-passive dynamics decoupling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(2):938–945, 2016.
- Pascal D LABRECQUE, Thierry LALIBERTÉ, Simon FOUCAULT, Muhammad E ABDALLAH et Clément GOSSELIN : uman : A low-impedance manipulator for human-robot cooperation based on underactuated redundancy. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(3):1401–1411, 2017.
- Thierry LALIBERTÉ, Lionel BIRGLEN et Clément GOSSELIN : Underactuation in robotic grasping hands. *Machine Intelligence & Robotic Control*, 4(3):1–11, 2002.
- Hoyul LEE et Youngjin CHOI : A new actuator system using dual-motors and a planetary gear. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 17:192–197, 2012.
- Jia-Wei LI, Hong LIU et He-Gao CAI : On computing three-finger force-closure grasps of 2-D and 3-D objects. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(1):155–161, 2003.
- Peter P LING, Reza EHSANI, Kuan Chong TING, Yu-Tseh CHI, Nagarajan RAMALINGAM, Michael H KLINGMAN et Craig DRAPER : Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester. In *2004 ASAE Annual Meeting*, page 1. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2004.
- Shuo LIU et Stefano CARPIN : A fast algorithm for grasp quality evaluation using the object wrench space. In *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 558–563. IEEE, 2015.
- Hui-Min MA, Guang-Da SU, Jun-Yan WANG et Zheng NI : A glass bottle defect detection system without touching. In *Proceedings. International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volume 2, pages 628–632. IEEE, 2002.
- Andrew T MILLER, Steffen KNOOP, Henrik I CHRISTENSEN et Peter K ALLEN : Automatic grasp planning using shape primitives. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1824–1829. IEEE, 2003.
- Gareth J MONKMAN, Stefan HESSE, Ralf STEINMANN et Henrik SCHUNK : *Robot grippers*. John Wiley & Sons, 2007.
- David H. MYZKA : *Machines and Mechanisms Applied Kinematics Analysis*. Pearson Education, Inc., New Jersey, United States, third édition, 2005.
- V-D NGUYEN : The synthesis of stable grasps in the plane. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings, 1986*, volume 3, pages 884–889, 1986.

- L. U. ODHNER, R. R. MA et A. M. DOLLAR : Precision grasping and manipulation of small objects from flat surfaces using underactuated fingers. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2830–2835, May 2012.
- Nicolò PEDEMONTE, Thierry LALIBERTÉ et Clément GOSSELIN : Design, control, and experimental validation of a handshaking reactive robotic interface. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 8(1):011020, 2016.
- M PESHKIN, J COLGATE, W WANNASUPHOPRASIT, C MOORE, R GILLESPIE et P AKELLA : Cobot architecture. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 17:377–390, 2001.
- Morgan QUIGLEY, Curt SALISBURY, Andrew Y NG et J Kenneth SALISBURY : Mechatronic design of an integrated robotic hand. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5):706–720, 2014.
- Deirdre QUILLEN, Eric JANG, Ofir NACHUM, Chelsea FINN, Julian IBARZ et Sergey LEVINE : Deep reinforcement learning for vision-based robotic grasping : A simulated comparative evaluation of off-policy methods. *In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 6284–6291. IEEE, 2018.
- D RABINDRAN et D TESAR : Power flow analysis in parallel force/velocity actuators (PFVA) : Theory and simulations. *Proceedings of the ASME, Vol. 2, 32nd Mechanisms and Robotics Conference*, pages 983–992, 2008.
- Franz REULEAUX et Eugene S FERGUSON : *Kinematics of machinery : outlines of a theory of machines*. Courier Corporation, 2012.
- Elon RIMON et Joel W BURDICK : Mobility of bodies in contact. I. a 2nd-order mobility index for multiple-finger grasps. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14(5):696–708, 1998.
- Máximo A ROA et Raúl SUÁREZ : Finding locally optimum force-closure grasps. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(3):536–544, 2009.
- Robotiq Company Website. *3-finger-adaptive-robot-gripper*. <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>, 2019. Accessed : 2019-08-03.
- Rocco Antonio ROMEO, Francesca CORDELLA, Angelo DAVALLI, Rinaldo SACCHETTI, Eugenio GUGLIELMELLI et Loredana ZOLLO : An instrumented object for studying human grasping. *In 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 1031–1036. IEEE, 2017.
- Karol SEWERYN, Kamil GRASSMANN, Monika CIESIELSKA, Tomasz RYBUS et Michal TUREK : Optimization of the robotic joint equipped with epicycloidal gear and direct drive for

- space applications. *Proc. of the 15th European Space Mechanisms & Tribology Symposium (ESMATS)*, 2013.
- Shadow Hand Company Website. *Shadow Hand*. <https://www.shadowrobot.com>, 2019. Accessed : 2019-08-03.
- Young June SHIN, Ho Ju LEE, Kyung-Soo KIM et Soohyun KIM : A robot finger design using a dual-mode twisting mechanism to achieve high-speed motion and large grasping force. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(6):1398–1405, 2012.
- Jun SHINTAKE, Samuel ROSSET, Bryan SCHUBERT, Dario FLOREANO et Herbert SHEA : Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. *Advanced Materials*, 28(2):231–238, 2016.
- Avishai SINTOV et Amir SHAPIRO : Dynamic regrasping by in-hand orienting of grasped objects using non-dexterous robotic grippers. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 50:114–131, 2018.
- Gerwin SMIT et Dick H PLETTENBURG : Efficiency of voluntary closing hand and hook prostheses. *Prosthetics and orthotics international*, 34(4):411–427, 2010.
- Stefan AJ SPANJER, Ravi BALASUBRAMANIAN, Just L HERDER et Aaron M DOLLAR : Improved grasp robustness through variable transmission ratios in underactuated fingers. *In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2289–2294. IEEE, 2012.
- Kenjiro TADAKUMA, Riichiro TADAKUMA, Mitsuru HIGASHIMORI et Makoto KANEKO : Robotic finger mechanism equipped omnidirectional driving roller with two active rotational axes. *In Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 3523–3524. IEEE, 2012.
- Takeshi TAKAKI et Toru OMATA : High-performance anthropomorphic robot hand with grasping-force-magnification mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(3):583–591, 2011.
- Toshio TAKAYAMA, Yoshinori CHIBA et Toru OMATA : Tokyo-tech 100 n hand : Three-fingered eight-dof hand with a force-magnification mechanism. *In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, pages 593–598. IEEE, 2009.
- Jian M TAO, JYS LUH et Yuan F ZHENG : Compliant coordination control of two moving industrial robots. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 6(3):322–330, 1990.
- Jr Garnet R TUREMAN : Artificial hand, février 10 1948. US Patent 2,435,614.

- Milos VASIC et Aude BILLARD : Safety issues in human-robot interactions. *In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 197–204. IEEE, 2013.
- Catherine VÉRONNEAU, Jean-Philippe Lucking BIGUÉ, Alexis LUSSIER-DESBIENS et Jean-Sébastien PLANTE : A high-bandwidth back-drivable hydrostatic power distribution system for exoskeletons based on magnetorheological clutches. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):2592–2599, 2018.
- Volker WALDEMAR : Device for the augmentation of human swimming performances, juin 29 1926. US Patent 1,590,484.
- Guowu WEI, Vahid AMINZADEH et Jian S DAI : Prehension analysis and manipulability of an anthropomorphic metamorphic hand with a reconfigurable palm. *In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1116–1121. IEEE, 2011.
- Cai-Hua XIONG, Wen-Rui CHEN, Bai-Yang SUN, Ming-Jin LIU, Shi-Gang YUE et Wen-Bin CHEN : Design and implementation of an anthropomorphic hand for replicating human grasping functions. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(3):652–671, 2016.
- Zhe XU, Travis DEYLE et Charles C KEMP : 1000 trials : An empirically validated end effector that robustly grasps objects from the floor. *In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, pages 2160–2167. IEEE, 2009.
- Zhe XU et Emanuel TODOROV : Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. *In 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3485–3492. IEEE, 2016.
- Jingtao XUE, Xiaopeng CHEN, Ye Tianand Zhanguo YU, Fei MENG et Qiang HUANG : A dual-motor joint model for humanoid robots. *Proc. of the 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, pages 2621–2625, 2013.
- Kengo YAMAGUCHI, Yasuhisa HIRATA et Kazuhiro KOSUGE : Development of robot hand with suction mechanism for robust and dexterous grasping. *In 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5500–5505. IEEE, 2013.
- Andy ZENG, Shuran SONG, Kuan-Ting YU, Elliott DONLON, Francois R HOGAN, Maria BAUZA, Daolin MA, Orion TAYLOR, Melody LIU, Eudald ROMO *et al.* : Robotic pick-and-place of novel objects in clutter with multi-affordance grasping and cross-domain image matching. *In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1–8. IEEE, 2018.
- Shuai ZHENG, Jun HONG, Kang ZHANG, Baotong LI et Xin LI : A multi-frame graph matching algorithm for low-bandwidth rgb-d slam. *Computer-Aided Design*, 78:107–117, 2016.