



Prise autonome d'objets divers avec un robot sériel industriel, un préhenseur sous-actionné et une caméra 3D

Mémoire

François Lévesque

Maîtrise en génie mécanique
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© François Lévesque, 2016

**Prise autonome d'objets divers avec un robot sériel
industriel, un préhenseur sous-actionné
et une caméra 3D**

Mémoire

François Lévesque

Sous la direction de:

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

Résumé

Longtemps confinée à l'industrie de fabrication en série, la robotique est en train de se démocratiser et fait ses débuts dans des domaines non traditionnels comme les secteurs alimentaire et logistique. Dans ce contexte, une tâche faisant l'objet de recherches et concours est l'automatisation de l'emballage de colis dans de grands entrepôts contenant plusieurs centaines de milliers d'objets différents.

Les travaux entrepris dans le cadre de ce mémoire constituent un premier pas vers l'atteinte de cet objectif : la prise et le dépôt par un robot autonome d'une grande variété d'objets de la vie courante sans connaissance préalable de ces derniers (modèle 3D complet, etc.). Pour réaliser ce projet, un robot sériel, une pince sous-actionnée et un système de vision 3D ont été utilisés.

Deux techniques de prise d'objets furent développées pour arriver à agripper un maximum d'objets. La première est une prise par le dessus. Le point de prise utilisé y est choisi en fonction de la largeur de l'objet au point de prise, des chances de collisions avec les obstacles environnants et de la robustesse de l'équilibre statique anticipé de la prise. Pour attraper les objets trop larges ou minces pour être pris par le dessus (comme un livre), une technique de prise en pelletage fut développée. Cette dernière tire avantage du sous-actionnement de la pince utilisée pour glisser un doigt sous l'objet puis le prendre en pincée. Un mouvement analogue est celui d'un humain prenant une feuille sur un plancher.

Pour tester ces techniques, une batterie de 800 essais de prise sur 80 objets différents fut effectuée. Un taux de succès de 84 % fut obtenu, démontrant que le système forme une bonne base pour l'avenir.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Remerciements	xiii
Introduction	1
1 Prise et placement robotisé d'objets	5
1.1 Mise en contexte	6
1.1.1 Tâche	7
1.1.2 Préhenseur	7
1.1.3 Capteurs	9
1.1.4 Environnement	10
1.1.5 Connaissances sur l'objet	11
1.1.6 Planificateur	12
1.2 Algorithmes	14
1.3 Matériel	17
1.3.0.1 Programme informatique : Robot Operating System (ROS)	17
1.3.1 Robot sériel : UR5 de Universal Robots	18
1.3.2 Préhenseur : Pince C3 de Robotiq	19
1.3.2.1 Géométrie	20

1.3.2.2	Mécanisme de sous-actionnement	21
1.3.2.3	Modification des doigts pour le pelletage d'objets	22
1.3.2.4	Commande	23
1.3.3	Caméra 3D : Kinect de Microsoft	25
1.3.3.1	Matériel physique	25
1.3.3.2	Calibration	26
1.3.3.3	Détection des objets et extraction de l'information pour leur prise	28
1.3.4	Jeu d'objets	31
1.4	Conclusion	32
2	Cinématique et planification de trajectoire du robot UR5	34
2.1	Cinématique du robot UR5	35
2.1.1	Problème géométrique direct (PGD)	36
2.1.2	Problème Géométrique Inverse (PGI)	38
2.1.3	Matrice Jacobienne	44
2.1.4	Configurations interdites	45
2.1.4.1	Singularités	45
2.1.4.2	Zones d'auto-collision	47
2.2	Méthodes d'évitement des singularités	50
2.2.1	Jacobienne amortie sélectivement avec biais	51
2.3	Envoi de commandes au robot	53
2.3.1	De coordonnées cartésiennes \mathbf{T} à articulaires $\boldsymbol{\theta}$	54
2.3.2	Trajectoire articulaire optimale	56
2.3.3	Trajectoire linéaire	57
2.4	Conclusion	57
3	Prise d'objets par le dessus	59
3.1	Choix du point de prise de l'objet	60
3.1.1	Déterminer si le contour de l'objet est simple	61
3.1.1.1	Construction d'un rectangle englobant	62
3.1.2	Description du contour de l'objet avec des segments de droite et leurs normales	63
3.1.3	Génération de points de prise sur surfaces parallèles	63
3.1.4	Prise en compte de l'encombrement des doigts	65
3.1.5	Calcul de l'indice d'interférence	66
3.1.6	Calcul de l'indice de robustesse de l'équilibre statique	67

3.1.7	Choix du point de prise	68
3.1.8	Traduction de l'hypothèse de prise en position cartésienne	70
3.2	Choix de l'objet à prendre	73
3.3	Description du mouvement d'approche	75
3.4	Évaluation de la qualité de prise	76
3.5	Conclusion	79
4	Prise d'objet en pelletage	80
4.1	Mise en contexte	81
4.2	Choix du point de prise	84
4.2.1	Description du contour de l'objet avec des segments de droite et leurs normales	85
4.2.2	Génération de points de contact sur les surfaces	86
4.2.3	Filtrage des points de contact potentiels	87
4.2.4	Génération de points de contact dans les directions libres de l'environnement	88
4.2.5	Choix d'un point de prise	89
4.3	Mouvement d'approche	90
4.3.1	Définition du repère d'approche de prise \mathbf{T}_n	92
4.3.2	Étape 1 - Atteinte d'un point intermédiaire et orientation de la pince	93
4.3.3	Étape 2 - Repliement du doigt inférieur sur la table	94
4.3.4	Étape 3 - Avance vers l'objet et insertion de l'ongle sous ce dernier	95
4.3.5	Étape 4 - Pose du doigt supérieur sur l'objet	97
4.3.6	Étape 5 - Mouvement de fermeture	98
4.3.7	Étape 6 - Remontée linéaire de la pince	99
4.3.8	Remarques sur l'efficacité du mouvement de pelletage	99
4.4	Choix du mouvement de prise approprié pour un objet	100
4.4.1	Perspectives d'amélioration	101
4.5	Conclusion	103
5	Essais expérimentaux	104
5.1	Mise en contexte	105
5.2	Méthodologie	106
5.3	Résultats	107
5.4	Conclusion	112
	Conclusion	115

A	Calibration caméra-robot	127
A.1	Mise en contexte	128
A.2	Acquisition des mesures expérimentales	129
A.3	Définition des paramètres à estimer β	131
A.4	Calibration extrinsèque avec l'algorithme de Gauss-Newton et des M- Estimateurs	132
A.4.1	Algorithme de Gauss-Newton	132
A.4.2	Résiduel \mathbf{r}	133
A.4.3	Matrice de pondération du résiduel \mathbf{W}	134
A.4.4	Matrice jacobienne \mathbf{W}	135
A.4.5	Variation optimale des paramètres avec α	136
B	Plan de la base des doigts modifiés de la pince C3	139
C	Configurations possibles d'un doigt sous-actionné représenté par un mécanisme à 5 barres	141
C.1	Géométrie d'un doigt de la pince C3	142
C.2	Représentation du problème comme un mécanisme parallèle à 2 degrés de liberté	143
C.3	Position x du doigt en fonction de la hauteur h de la surface	144
D	Modèle quasi-statique du mouvement de pelletage	147
D.1	Hypothèses	148
D.2	Dimensions et variables	149
D.3	Contraintes géométriques	151
D.3.1	Relation entre β , l_2 et b	151
D.3.2	Valeurs limites de l_2	152
D.4	Diagramme de corps libre et relations statiques	153
D.5	Indice de performance	155
D.6	Simulations et résultats	155
E	Résultats expérimentaux complets	158

Liste des tableaux

1.1	Résolution et précision de la Kinect à une distance de 85 cm.	27
2.1	Paramètres DH du UR5.	36
5.1	Causes d'échec de prise lors des essais expérimentaux. L'échec de la prise d'un objet peut être causé par la combinaison de plusieurs des causes détaillées dans ce tableau, mais un échec particulier n'est assigné qu'à sa cause d'échec principale.	114
D.1	Dimensions nécessaires à la description du mouvement de pelletage modélisé.	150

Liste des figures

1	Exemples de tâches de robots industriels.	1
2	Amazon Picking Challenge et images d' un entrepôt d'Amazon.com. . .	2
3	Vue d'ensemble du montage expérimental et de ses différents éléments.	3
1.1	Facteurs influençant le mouvement de prise d'un objet (adapté de [7]). .	6
1.2	Types de préhenseurs (adapté de [39]).	8
1.3	Planification de prise dans un environnement encombré (adapté de [17]). Le robot illustré doit passer du point A au point B sans entrer en collision avec l'obstacle en gris. Une fois la position de cet obstacle traduit dans le repère du robot, on voit qu'il est impossible d'accomplir cette tâche.	11
1.4	Rectangle de prise indiquant le point de prise d'une chaussure sur une image couleur et une image de profondeur (tiré de [63]).	13
1.5	Sélection d'un point de prise stable en privilégiant les points de contact sur des surfaces parallèles se faisant face (adapté de [8]).	14
1.6	Algorithme utilisé pour la prise et le placement d'objets (<i>pick and place</i>).	15
1.7	Vue d'ensemble du montage expérimental et de ses différents éléments.	17
1.8	Vue de profil de la pince C3 de Robotiq (échelle 1 : 2).	19
1.9	Dimensions de la pince C3 (en mm sauf si indiqué). Le doigt de gauche représente la configuration d'un doigt lorsque la pince est pleinement ouverte et que le doigt n'est pas sous-actionné. Le doigt de droite est dans la configuration où le sous-actionnement est maximal.	20
1.10	Décomposition du mécanisme à 5 barres d'un doigt en 2 mécanismes à 4 barres.	21
1.11	Phalanges conçues pour la tâche de pelletage d'objet utilisées sur la pince.	22

1.12	Composantes et système d'axe de la caméra 3D Kinect de Microsoft. . .	25
1.13	Patron infrarouge utilisé par la Kinect (tirée de [44]).	26
1.14	Matrices et vecteurs de transformation entre les différents repères du montage expérimental (adapté de [27]).	27
1.15	Segmentation d'un objet du fond de l'espace de travail.	28
1.16	Principales étapes du traitement d'une image pour en isoler les objets. .	29
1.17	Algorithme de Visvalingam pour la simplification de droites. Initialement, un poids est associé à chaque sommets de la droite en calculant l'aire du triangle inscrit entre ce sommet et ses deux voisins. Lors d'un cycle de simplification, le sommet ayant le plus petit triangle inscrit est retiré et une droite est tracée entre ses deux voisins ; les aires des triangles associés sont alors recalculés. Une droite est simplifiée jusqu'à ce que son plus petit segment dépasse une certaine longueur. Ainsi, sur la figure le sommet 4 serait le premier retiré suivi dans l'ordre par les sommets 7, 2, 5, 3 et 6.	30
1.18	Échantillon du jeu de 80 objets utilisés pour tester les algorithmes. . . .	31
2.1	Robot UR5 dans sa configuration de base avec illustration de ses paramètres DH.	35
2.2	Solutions de θ_1	39
2.3	Projection simplifiée du robot sur le plan xy du repère global.	40
2.4	Solutions de θ_5	40
2.5	Solutions de θ_3	41
2.6	Solution de θ_4	42
2.7	Exemples de configurations singulières du UR5.	46
2.8	Surfaces de singularité associées à l'équation (2.35).	47
2.9	Catégories d'auto-collisions possibles du robot UR5.	48
2.10	Trajectoire polynomiale de degré 5 et ses dérivées. τ représente le ratio du temps écoulé par rapport à la durée totale du mouvement et s représente le ratio de la distance parcourue sur la distance totale de la trajectoire.	56
3.1	Algorithme de génération du point de prise par le dessus d'un objet. . .	60
3.2	Rectangle englobant (en pointillé) d'un contour.	61
3.3	Description des segments de droite du contour d'un objet par leur vecteur normal.	63
3.4	Construction d'hypothèses de prise entre surfaces parallèles.	64

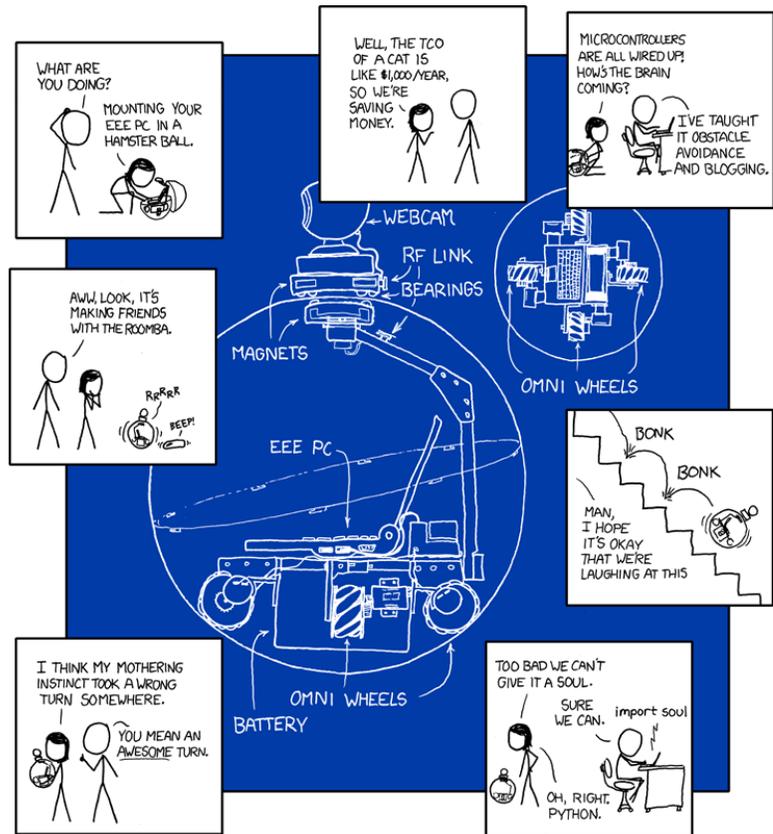
3.5	Cas possibles d'interférence au point de contact entre le doigt et l'objet. Le trait vertical du centre représente l'hypothèse de prise que le doigt tente d'atteindre.	65
3.6	Algorithme d'ajustement de la position d'un doigt pour éviter l'interférence avec l'objet.	66
3.7	Interférences au point de prise d'un objet entre les doigts de la pince, un autre objet et le contenant des objets.	67
3.8	Mesure de la qualité de différentes hypothèses de prise selon les indices de la robustesse de l'équilibre statique et de l'interférence de l'encombrement.	69
3.9	Calcul de la position $[x,y]$ du centre de l'organe terminal à partir des positions des points de contact sur l'objet.	70
3.10	Variables déterminant la hauteur z du point de prise d'un objet.	71
3.11	Sélection de l'objet à prendre dans une scène encombrée générée aléatoirement. Les chiffres au centre des contours représentent l'ordre de prise des objets.	73
3.12	Étapes du mouvement de prise par le dessus d'un objet.	75
3.13	Algorithme d'évaluation du succès de la prise à partir de seulement l'information de l'encodeur de la pince Robotiq C3.	77
4.1	Objets difficiles à prendre avec la technique de prise par le dessus.	81
4.2	Exemples de robots prenant des objets minces sur une surface plate.	82
4.3	Étapes principales du mouvement de prise en pelletage	83
4.4	Mouvement humain de prise d'un objet rigide sur une surface plane.	83
4.5	Algorithme de génération d'un point de prise en pelletage d'un objet.	84
4.6	Description des segments de droites d'un contour par leur vecteur normal.	85
4.7	Génération d'hypothèses de points de prises sur les surfaces de l'objet (représentés par les points).	86
4.8	Prise en compte de l'environnement pour filtrer les hypothèses de points de contact et génération d'un point de contact dans la direction la moins encombrée. Les croix représentent les points intermédiaires. Les hypothèses à l'extérieur du contenant (rectangle épais) sont éliminées. Les hypothèses dans le trou de l'objet ne sont pas représentées afin de clarifier la figure.	88
4.9	Étapes du mouvement de pelletage d'objet.	90
4.10	Définition du repère d'approche \mathbf{T}_n	92
4.11	Point intermédiaire \mathbf{T}_1	93

4.12	Repliement du doigt inférieur sur le sol.	94
4.13	Avance de la pince jusqu'au point de contact sur l'objet.	95
4.14	Rotation autour du point de contact pour appuyer le doigt supérieur sur l'objet.	97
4.15	Mouvement de fermeture.	98
4.16	Algorithme de choix du type de prise à utiliser pour un objet.	101
5.1	8 configurations possibles d'un objet sur le plan.	106
5.2	Nombre d'objets du jeu expérimental de 80 objets ayant atteint un taux de succès donné.	107
A.1	Matrices et vecteurs de transformation entre les différents repères du montage expérimental (adapté de [27]).	128
A.2	Segmentation par la caméra du marqueur de position fixe sur le robot.	130
A.3	Représentation de l'algorithme de recherche linéaire par nombre d'or (adapté de [60]).	137
C.1	Dimensions d'un doigt de la pince C3 de Robotiq.	142
C.2	Représentation du sous-actionnement d'un doigt comme un mécanisme parallèle à 2 degrés de liberté.	143
C.3	Configurations possibles du doigt sous-actionné à une hauteur $h = 80$ mm. Les traits au bout des doigts représentent les trajectoires suivies par ces derniers.	146
C.4	Position en x du bout du doigt en fonction de sa hauteur h dans le repère fixe du doigt.	146
D.1	Modèle quasi-statique du mouvement de prise en pelletage. Les points de contacts numérotés sur l'objet sont toujours maintenus.	148
D.2	Dimensions et variables du modèle de mouvement de pelletage.	149
D.3	Illustration de la relation entre l'angle de la pince sur l'objet β , la position du doigt sur le dessus de l'objet l_2 et la largeur de la pince b	151
D.4	Valeurs limites de la variable l_2	152
D.5	Diagramme de corps libre du modèle.	153
D.6	Distribution de la force sur l'ongle du doigt sur l'objet et force équivalente F_{N2}	153
D.7	Évolution de α , β et l_2 lors d'un mouvement optimal de pelletage.	157
D.8	Évolution de l'indice d'équilibre statique au cours d'un mouvement op- timal de pelletage.	157

Remerciements

Un des bénéfices d'une formation en science pour l'esprit curieux est qu'il devient difficile de s'ennuyer, la contemplation d'un problème l'occupant toujours (d'où les épiphanies en pleine douche). Au cours de ma maîtrise, j'ai eu la chance de tomber sur quelques-unes de ces marottes scientifiques. Je devenais alors esclave du problème intéressant pendant quelques intenses journées au terme desquelles mon projet se trouvait transformé. Malheureusement, ces épisodes ont également eu des effets secondaires : l'anthropomorphisation de mon robot (il est bon, il est stupide, il est grognon aujourd'hui, etc.) et de longues semaines d'explications du travail accompli.

Le chemin parcouru au cours de la maîtrise aura été long, parfois ardu, certainement sinueux, mais jamais ennuyant. Étant un homme de peu de mots, je ne saurais ici ex-



(Image tirée de [40])

primer adéquatement la gratitude que j'éprouve pour les différentes personnes m'ayant permis de le parcourir avec succès.

Merci tout d'abord à mes directeurs de recherche Philippe Cardou et Clément Goselin. Merci pour votre patience, particulièrement au début du projet quand la marche à suivre était incertaine et à la fin pendant l'écriture de ce mémoire. Merci également de m'avoir laissé assez de corde pour librement explorer des avenues que je trouvais intéressantes sans pour autant me pendre ; je suspecte que vous avez su subtilement suggérer certaines de mes bonnes idées. Finalement, merci de m'avoir supporté pendant les moments difficiles (quelles démonstrations!).

Merci à ma famille, qui même si elle ne comprenait pas toujours ce que je faisais m'a toujours pleinement supporté, que ce soit moralement ou alimentairement. Les mots me manquent pour vous exprimer tout l'amour et l'admiration que je vous porte.

Merci aux super professionnels de recherche du laboratoire, Simon et Thierry. Si tout avance rondement dans le laboratoire, c'est parce que vous êtes toujours prêts à donner un coup de main ou une bonne idée. Pour paraphraser Alexandre Campeau-Lecours, on ferait beaucoup moins de choses en beaucoup plus de temps sans vous.

Merci aux membres du laboratoire de robotique pour tous les bons moments et pour toutes les conversations qu'on a eues (enrichissantes comme débiles). Le réseau d'amitié et d'entraide du lab est en grande partie responsable des moments heureux de ma vie des dernières années.

Finalement, un merci tout particulier à Bruno, Clément, mon frère Laurent et ma mère d'avoir souffert au travers des versions préliminaires de ce document. Vos commentaires ont toujours été pertinents et fort appréciés. Toutes les fautes et faiblesses restantes sont les miennes.

Introduction

La mécanisation est définie comme étant l'action de remplacer à l'aide de machines le travail autrement fait à l'aide du labour humain ou animal. Vu au travers du filtre de l'histoire, ce processus d'économie du travail est souvent synonyme de progrès humain. Par exemple, les Romains se servirent de moulins à eau comme meunerie, comme scierie ou comme pompes d'irrigation, augmentant les rendements agricoles. Johannes Gutenberg perfectionna l'imprimerie en 1439, mécanisant la production de livres et permettant ainsi la diffusion économique et à grande échelle du savoir. L'invention de la machine à vapeur par James Watt en 1776 fut un des éléments clés derrière la révolution industrielle, révolution réduisant grandement à son terme le coût de production de la plupart des biens de consommation. De nos jours, la robotisation prend de plus en plus de place en industrie, remplaçant les humains dans l'exécution de tâches physiquement ardues, répétitives ou dangereuses (quelques exemples sont illustrés à la figure 1).



(a) Soudure de carrosserie automobile.



(b) Extraction d'une pièce de forge.



(c) Confection de pizzas.



(d) Emballage de pièces.

FIGURE 1 – Exemples de tâches de robots industriels.

Longtemps confinés à la production de grands volumes et aux opérations demandant une grande précision, les robots ont récemment commencé à se démocratiser. Ainsi, les manufacturiers ont progressivement commencé à offrir des robots et des préhenseurs de moins en moins dispendieux et de plus en plus simples à mettre en service par des gens sans formation spécialisée en robotique. Combinés à une augmentation constante de la puissance de calcul disponible, ces robots deviennent également de plus en plus autonomes, pouvant s'adapter rapidement à des changements dans leurs tâches et dans leurs environnements de travail. Tout cela permet à la robotique de commencer à s'implanter dans la petite et moyenne industrie et dans des domaines non traditionnels comme l'alimentaire et la logistique. Les tâches confiées aux robots deviennent également plus variées, allant de la soudure et peinture traditionnelle à l'usinage, l'assemblage ou la simple manipulation de pièces.



(a) Compétition du Amazon Picking Challenge. (b) Entrepôt de distribution d'Amazon.com. (c) Tâche d'emballage de produit.

FIGURE 2 – Amazon Picking Challenge et images d'un entrepôt d'Amazon.com.

Il reste cependant du chemin à parcourir avant de pleinement automatiser le secteur logistique, comme démontré par l'Amazon Picking Challenge (une compétition d'envergure organisée par Amazon.com consistant à utiliser des robots autonomes pour sélectionner et prendre des objets divers placés dans des casiers comme ceux de la figure 2). Un des objectifs à moyen terme de la robotique de ce secteur est de créer un montage autonome aux capacités égales à celles d'un humain. Par exemple, il est attendu d'un employé d'un entrepôt de distribution d'Amazon.com assigné à la tâche d'emballage des colis sortants qu'il manipule au moins 140 objets par heure [4]. Cette tâche implique la réception d'une caisse remplie de quelques-uns des 12,2 millions d'objets physiques vendus directement par Amazon.com [1], la prise des objets destinés à un colis particulier, le choix d'une boîte de taille appropriée et le dépôt des objets dans cette dernière.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est composé de 5 chapitres. Le premier présente d’abord l’algorithme utilisé pour commander la prise et le dépôt autonome d’objets par le montage expérimental. La seconde partie du chapitre 1 présente quant à elle les différents éléments du montage expérimental utilisé. Sont ainsi détaillés le robot sériel et la pince sous-actionnée permettant de manipuler les objets, le système de vision 3D permettant de les percevoir dans l’espace de travail du robot et finalement la série de 80 objets de la vie courante utilisée pour tester le tout.

Le 2^e chapitre présente en détail le robot sériel UR5 de Universal Robots, cet équipement étant la pièce centrale du montage expérimental. Le paquet (*package*) ROS utilisé pour commander le robot étant limité, il fut nécessaire de créer de toutes pièces un planificateur de trajectoire adapté au robot. Ce chapitre présente donc d’abord la cinématique du UR5 (la résolution des problèmes géométriques direct (PGD) et inverse (PGI) ainsi que les singularités et zones d’auto-collisions du robot). Le planificateur de trajectoire et la méthode pour commander l’exécution des trajectoires produites sont ensuite détaillés.

Le 3^e chapitre s’intéresse à la première technique de prise d’objets étudiée, la prise par le dessus. Le choix du point de prise sur l’objet et le mouvement du robot nécessaire pour s’y rendre y sont décrits. Une méthode d’évaluation de la qualité des prises d’objet y est également présentée.

Le 4^e chapitre présente quant à lui la technique de prise en pelletage développée pour prendre les objets minces ou larges sur une surface plate. Tout comme au chapitre 3, le choix du point de prise sur l’objet et le mouvement de prise y sont décrits. Ce chapitre se termine par une section décrivant l’algorithme permettant de choisir quelle technique de prise est à utiliser pour un objet particulier.

Le 5^e et dernier chapitre présente les essais expérimentaux menés pour évaluer l’efficacité des techniques de prise détaillées aux chapitres précédents. En plus de la méthodologie des essais et des résultats bruts obtenus, ce chapitre présente une analyse des causes d’erreurs principales et propose des pistes de solutions pour y pallier.

Chapitre 1

Prise et placement robotisé d'objets

Pour une application particulière, l'implémentation d'une tâche de prise et placement autonome dépend principalement de deux facteurs : l'algorithme prenant les décisions sur les actions à entreprendre et le montage physique les exécutant. Ce chapitre présente d'abord l'algorithme de type Détection-Planification-Exécution. Tel que son nom l'indique, ce dernier commande séquentiellement au système de percevoir ce qui se trouve dans son espace de travail, prendre un objet, évaluer la qualité de la prise, transporter l'objet jusqu'à son point de dépôt puis de se mettre en mode d'attente. Dans le cadre de ce mémoire, cette section sert d'épine dorsale, le contenu des différents chapitres suivants s'y rattachant. La deuxième partie du chapitre présente quant à elle les différents capteurs et actionneurs du montage expérimental utilisé. Y sont décrits le robot sériel UR5 de Universal Robots, la pince sous-actionnée C3 de Robotiq servant de préhenseur, le système de vision utilisant les données produites par une caméra 3D Kinect de Microsoft et finalement la série d'objets utilisée pour tester l'efficacité du système.

1.1 Mise en contexte

La prise d'objet est une tâche essentielle à plusieurs des applications de la robotique moderne. Ainsi, tout ce qui demande une manipulation d'objets (utilisation d'outils non intégrés au robot, emballage, déplacement d'objets, etc.) y fait appel sous une forme ou une autre. Pour une application particulière, la technique de prise employée dépend d'une variété de facteurs, les 6 plus importants d'entre eux sont illustrés à la figure 1.1 et décrits plus en détail dans les sous-sections ci-dessous. Finalement, il est à noter que toutes les techniques et articles cités dans le cadre de cette section sont compatibles avec le montage expérimental utilisé dans ces travaux et décrit en détail à la section 1.3.

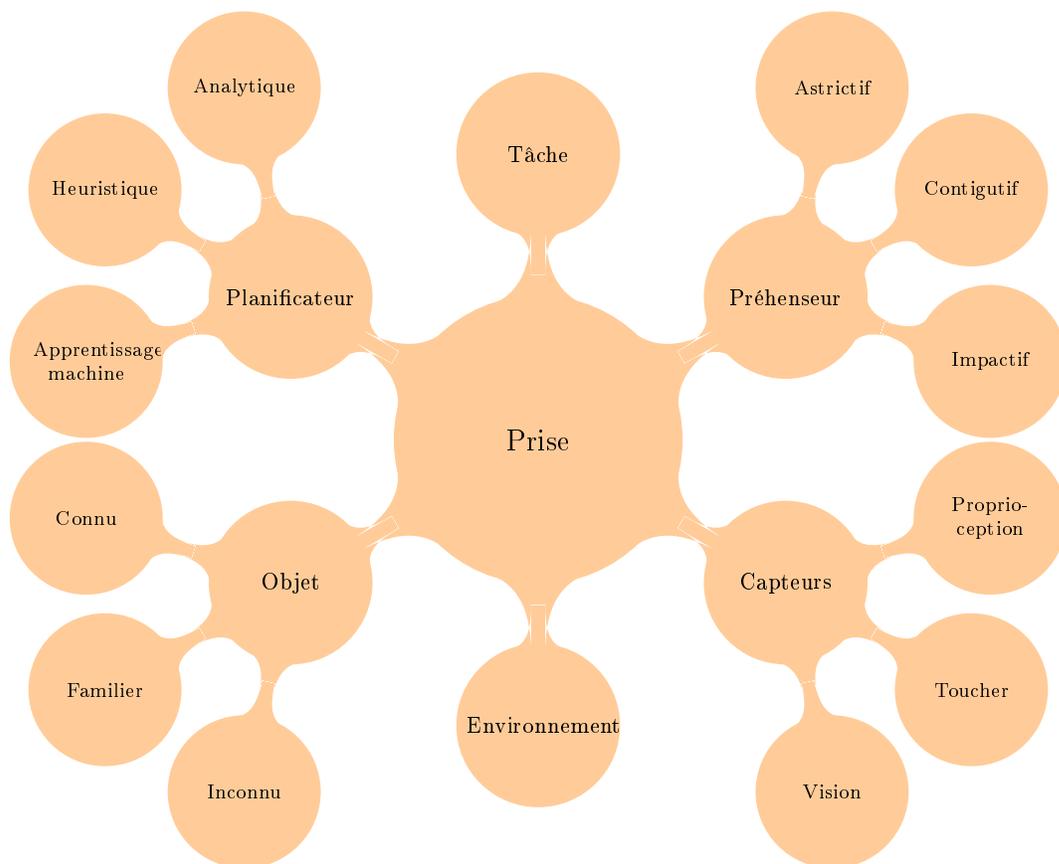


FIGURE 1.1 – Facteurs influençant le mouvement de prise d'un objet (adapté de [7]).

1.1.1 Tâche

La tâche à effectuer avec l'objet à prendre influence grandement la manière dont ce dernier doit être saisi. Par exemple, il est possible de prendre de manière quelconque un marteau si on ne veut que le transporter d'un point à l'autre ; il n'existe cependant qu'une seule prise acceptable si on veut s'en servir pour enfoncer des clous.

En robotique, le choix d'une prise appropriée à une tâche se fait généralement à l'aide d'un critère de performance propre à cette dernière ; la manière de déterminer ce critère varie de technique en technique. Le défi est donc d'identifier l'objet, d'identifier la tâche à faire avec ce dernier et finalement d'identifier un critère de performance permettant de choisir correctement le point de prise. Une manière de le relever est d'utiliser des techniques d'apprentissage machine ; par exemple, Bekiroglu [5] utilise un humain pour démontrer les tâches à son système. L'utilisation d'heuristiques peut également convenir. Par exemple, Prats et collab. [47] y sont parvenus en programmant une vingtaine de configurations de préhenseur (*pregrasps*) et en utilisant un algorithme simple pour les associer à une tâche particulière.

Lorsqu'il est impossible de prendre directement un objet de la manière requise pour une tâche particulière, sa manipulation peut être nécessaire. Le repositionnement fin de l'objet peut être tenté seulement dans le préhenseur (Bicchi [6] propose une bonne revue de littérature sur le sujet allant jusqu'à l'an 2000) ; le défaut de cette approche est qu'un préhenseur dextre est requis. En opposition, Daffle et collab. [14] proposent une liste des méthodes pour repositionner un objet dans un préhenseur simple en s'aidant de l'environnement (un coin de table, un mur, la gravité, etc.).

1.1.2 Préhenseur

Le préhenseur utilisé influence la manière dont les objets sont pris. Ainsi, saisir un objet en l'éperonnant à l'aide d'une aiguille ne demande pas la même trajectoire qu'une prise avec une ventouse conventionnelle. En pratique, le choix d'un préhenseur est généralement dicté par l'application visée : par exemple, les ventouses sont communes dans les tâches de transport de boîtes ou de pièces électroniques. Pour classer les centaines de types de préhenseurs sur le marché et dans la littérature, le livre *Robot Grippers* de

Monkman et collab. [39] propose quatre grandes catégories : les préhenseurs impactifs, ingressifs, contigutifs et astrictifs (illustrés à la figure 1.2).

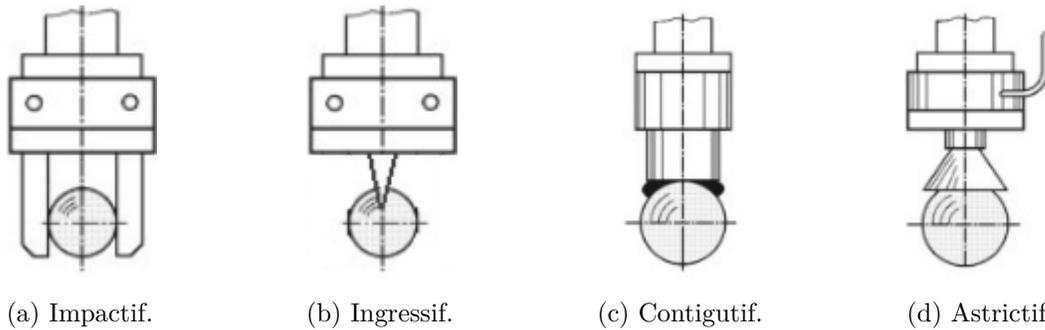


FIGURE 1.2 – Types de préhenseurs (adapté de [39]).

- Les préhenseurs impactifs retiennent les objets à l’aide d’une « pince » appliquant une force sur les côtés de l’objet. Cette catégorie comprend les pinces parallèles classiques, mais également les mains sous-actionnées (par exemple la main Barrett [57] ou les mains de Robotiq [49]) et d’autres préhenseurs à la forme plus exotique (le ballon d’eau déformable englobant les objets de Zhu et collab. [66] par exemple). Généralement, ces préhenseurs sont utilisés dans les tâches demandant une grande rigidité de l’objet dans la main ou pour la prise d’objets à la forme complexe. Les objets qu’il est possible de prendre sont toutefois limités par la taille du préhenseur.
- Les préhenseurs ingressifs agrippent les objets en déformant mécaniquement leurs surfaces. Cette catégorie comprend les surfaces velcro ainsi que les aiguilles transperçantes. Tout comme les préhenseurs contigutifs et astrictifs, ce type de préhenseur n’a théoriquement besoin que d’un seul point de contact sur l’objet pour l’agripper ; la taille des objets qu’il peut prendre n’est donc pas directement limitée par sa propre taille.
- Les préhenseurs contigutifs exercent une force de rétention sur les objets à l’aide d’un matériel adhésif se glissant entre la surface du préhenseur et celle de l’objet. Cette force de retenue peut provenir d’un liant chimique (colle), d’une forte surface de tension (de l’eau à petite échelle par exemple) ou bien d’une adhésion thermique (une légère fusion d’une surface en plastique par exemple).
- Les préhenseur astrictifs agissent par l’intermédiaire de champs de forces ; ils n’ont donc théoriquement pas besoin d’entrer en contact avec un objet pour le prendre. Cette catégorie inclut les ventouses (création d’un vide mécanique) ainsi que les préhenseurs magnétiques et électrostatiques.

1.1.3 Capteurs

Dans une cellule robotisée, l'information acquise par les capteurs utilisés sur l'objet à prendre, son environnement et sur le mécanisme le prenant avant, pendant et après la prise est un facteur d'importance pour le choix d'une stratégie de prise. Chez l'humain par exemple, la vue permet de détecter la présence d'un objet, une combinaison de la vue et de la proprioception (détection de la position dans l'espace) du bras permet d'approcher cet objet et finalement le toucher s'ajoute à ces sens pour affiner le positionnement final de la main lors de la prise et pour confirmer le succès de cette dernière ; retirer une de ces sources d'information complique grandement la tâche. Les trois sens décrits dans cet exemple (la vue, le toucher et la proprioception) sont les principaux utilisés en robotique industrielle et peuvent être générés sous une forme ou une autre par une variété de capteurs.

L'utilisation de données visuelles pour percevoir l'environnement du robot peut sembler aller de soi pour les humains, cette capacité leur étant naturelle. Le domaine de la vision numérique faisant l'objet de recherche depuis 1966 (il était alors estimé que le problème serait résolu en un été [43]), il est possible d'affirmer que la vision représente en robotique une riche mine d'informations difficilement exploitable. De nos jours, la perception à distance de l'environnement peut se faire à l'aide d'une variété de capteurs. Les plus simples d'entre eux sont les sonars et radars, ces derniers indiquant la distance de la surface réflective la plus proche du capteur dans son cône de perception. Des caméras classiques sont également communes dans l'industrie. En fonction de l'application visée, plusieurs types de spectres lumineux (noir et blanc, couleur, infrarouge, etc.) peuvent être sondés par ces caméras ; la résolution des images produites varie également en fonction du capteur employé. Un problème avec l'utilisation d'une caméra unique fixe dans l'espace est qu'il est impossible de percevoir la distance des objets observés. Bien qu'il soit possible de contourner cette difficulté, par exemple en connaissant sommairement les objets observés [54], il est souvent plus robuste d'employer un système de caméras permettant de percevoir la 3D. Trois techniques sont communes pour ce faire. La première consiste à utiliser deux caméras pour produire une image stéréoscopique : en connaissant la relation spatiale entre ces deux caméras et en trouvant un point de correspondance dans les images produites, il est possible de déterminer la distance de ce dernier en mesurant la différence de position de ce point dans les deux images. Les caméras Bumblebee de Point Grey [20] utilisent cette technique. La deuxième technique commune est celle du temps de vol : un émetteur

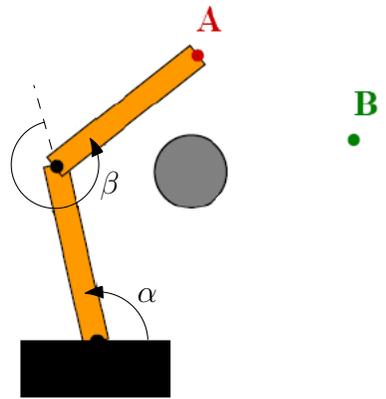
envoie une onde à un point dans l'environnement et un capteur (la caméra) calcule sa distance en mesurant le temps de vol de l'onde ou bien sa différence de phase (ondes très longues). La Kinect 2 de Microsoft [35] utilise ce principe. Finalement, la troisième technique employée consiste à projeter un patron lumineux connu sur l'environnement ; en mesurant sa déformation à l'aide d'une caméra, il est possible d'avoir une image de la profondeur de la scène. C'est cette technique qu'utilise la populaire Kinect de Microsoft [37].

Le sens du toucher peut être conféré avec plus ou moins de précision au robot par une variété de capteurs. Ainsi, il existe une panoplie de capteurs tactiles allant d'une « peau » recouvrant tout un robot sériel [34] à des capteurs tactiles de précision déposés sur le bout des doigts d'un préhenseur [48]. La force appliquée sur le robot peut également être détectée grâce à des capteurs d'efforts dédiés ou bien par la surveillance du courant passant par les moteurs des articulations du robot.

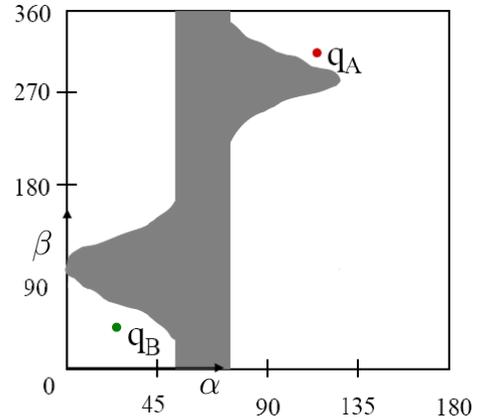
Le sens du positionnement spatial du robot (sa proprioception) s'obtient généralement grâce à des encodeurs placés sur les articulations du robot. Couplé au fait que la plupart des robots sériels utilisent des réducteurs à leur moteur et sont naturellement raides, ces derniers deviennent très précis. Par exemple, le robot UR5 de Universal robots affiche une répétabilité à l'effecteur de 0,1 mm.

1.1.4 Environnement

Alors que le robot est libre de faire un mouvement de prise optimal lorsqu'il se trouve dans un espace libre, la présence d'obstacles dans son environnement vient naturellement compliquer la tâche. En effet, l'objet à prendre peut ne pas être accessible dans toutes les directions, soit directement (un point de prise encastré par un contenant par exemple) ou indirectement (l'approche d'un point de prise peut être bloquée). Si identifier un encastrement est relativement simple, trouver des trajectoires sans collisions dans un environnement encombré peut être problématique. Une stratégie commune dans ces situations consiste à projeter la position des obstacles dans l'espace des configurations du robot (illustrée à la figure 1.3) ; la planification de trajectoire devient alors semblable à la navigation d'un robot mobile dans cet espace, un problème bien étudié.



(a) Modèle physique de la scène.



(b) Espace de configuration du robot.

FIGURE 1.3 – Planification de prise dans un environnement encombré (adapté de [17]). Le robot illustré doit passer du point A au point B sans entrer en collision avec l’obstacle en gris. Une fois la position de cet obstacle traduit dans le repère du robot, on voit qu’il est impossible d’accomplir cette tâche.

1.1.5 Connaissances sur l’objet

Le niveau de connaissance du système sur les objets qu’il lui est demandé de prendre influence grandement les techniques de prise qui seront tentées, la répétabilité des résultats et le temps de calcul nécessaire pour générer un point de prise viable. D’après une revue de littérature sur les techniques de prise réalisée par Bogh en 2014 [7], trois niveaux de connaissance sur l’objet existent : un objet connu, familier ou bien inconnu.

Les objets connus sont ceux dont le système connaît parfaitement la géométrie. Cette connaissance peut provenir d’un plan 3D de la pièce (CAD) ou bien d’un scan de cette dernière. Connaissant la pièce, il est possible de générer une librairie de points de prise possible avant même de la rencontrer en conditions réelles. En opération, le système prend des décisions en reconnaissant la pièce et son orientation puis en trouvant la prise désignée pour cette situation. Une populaire méthode de prise d’objet, le simulateur GraspIt! [38], repose sur ce niveau de connaissance des objets à prendre.

Les objets familiers désignent les objets dont certaines caractéristiques sont reconnues par le système. Par exemple, bien qu’il existe une multitude de types de tasses, un point commun entre elles est qu’elles possèdent toutes une anse ; si le système apprend à reconnaître et prendre cette géométrie, il peut prendre toutes les tasses. L’apprentissage

de ces points communs peut être fait à l'aide d'apprentissage machine ou d'heuristiques, techniques décrites à la sous-section suivante.

Finalement, les objets inconnus sont ceux sur lesquels le système n'a aucune information préalable et qu'il ne fait pas de reconnaissance de géométrie particulière; le système travaille donc sur l'ensemble de la géométrie retournée par son système de vision au moment de faire l'acquisition de données. Cette manière de faire présente l'avantage de conduire à la solution de qualité optimale pour l'objet se trouvant réellement dans l'espace de travail, mais est nettement plus lente que pour les techniques basées sur des objets connus ou familiers.

1.1.6 Planificateur

Finalement, le processus par lequel la prise de décision du point de prise se fait peut également grandement varier. La revue de littérature de Bogh [7] citée précédemment identifie trois grandes catégories de planificateur de prise : les approches analytique, heuristique et par apprentissage machine.

L'approche analytique consiste à choisir un point de prise en optimisant un critère de performance basé sur la physique mécanique classique. Cette approche est souvent employée avec les mains robotiques adroites (*dextrous*), permettant de positionner chaque doigt en calculant l'effet de chaque point de contact sur l'objet. Plusieurs indices de performance existent dans la littérature; ils peuvent être basés sur la stabilité prédite de l'objet pris, son équilibre ou son comportement dynamique. Par exemple, un indice populaire est la manipulabilité de Yoshikawa [62], soit le volume d'une sphère unitaire transformée en ellipsoïde par la matrice jacobienne du mécanisme. Physiquement, cet indice représente la valeur moyenne de la sensibilité cinématique du mécanisme. Un autre indice commun est la dextérité de Salisbury et Craig [52], soit la mesure de la distorsion de l'ellipsoïde de l'indice de manipulabilité. Le critère utilisé dans ces travaux est l'indice de robustesse de l'équilibre statique de Guay, Cardou et collab. [21]. Ce dernier correspond à la force minimale nécessaire pour éjecter un objet maintenu à l'équilibre par un manipulateur.

En opposition à la méthode analytique, l’approche empirique utilise un critère conçu par l’accumulation de données d’essais de prise (apprentissage machine) ou bien par l’expérience d’un concepteur humain (heuristique). Les méthodes d’apprentissage machine varient principalement en fonction de la méthode d’acquisition de données expérimentales : démonstrations par un humain, essais par le robot dont les résultats sont supervisés par un humain ou bien apprentissage autonome du robot par essai-erreur.

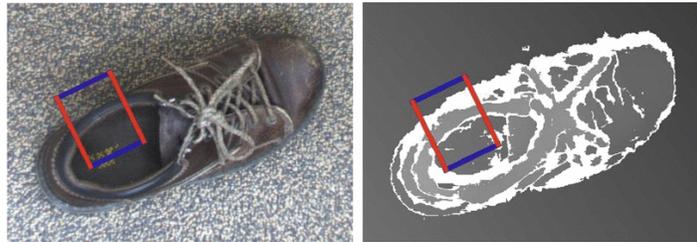


FIGURE 1.4 – Rectangle de prise indiquant le point de prise d’une chaussure sur une image couleur et une image de profondeur (tiré de [63]).

Dans ce contexte, une technique d’apprentissage machine populaire utilisant des images 3D couleur est celle des rectangles de prise (*Grasping Rectangles*) de Jiang [63], illustrée à la figure 1.4. Pour générer un modèle de ce qu’est un bon point de prise, un humain trace sur un jeu d’entraînement d’images d’objets des rectangles représentant les points de prise appropriés. En travaillant dans les mêmes conditions que celles qui sont en vigueur lors de la génération du jeu d’entraînement et sur des objets semblables, cette technique atteint un taux de succès de prise de 87 %.

Les heuristiques (méthodes rapides mais peut-être non-optimales d’obtenir un résultat) pour le choix d’un point de prise varient beaucoup en fonction de l’information disponible sur l’objet. Dans le cas présent, seuls le contour de l’objet vu par son dessus et la hauteur en son centre sont disponibles. Avec ces informations, l’approche la plus simple consiste à prendre l’objet par son centre et par sa largeur. Par exemple, Hsiao [25] combine cette technique avec d’autres heuristiques simples comme la prise par le côté et la prise du point le plus haut pour générer un comportement de prise polyvalent. La méthode de Kehoe [32] cherche à trouver le point de prise le plus robuste face aux imprécisions des capteurs et du robot. Pour ce faire, une série de contours aléatoirement modifiés en fonction de l’imprécision des capteurs est générée. En calculant le score moyen de chaque hypothèse de prise sur ces contours, l’hypothèse la plus robuste est identifiée. Finalement, la méthode de Bone [8] consiste à privilégier les points de prise où les surfaces de contact sont parallèles et se font face (tel qu’illustré à la figure 1.5). La prise sélectionnée est celle où l’aire partagée entre les surfaces est la plus grande.

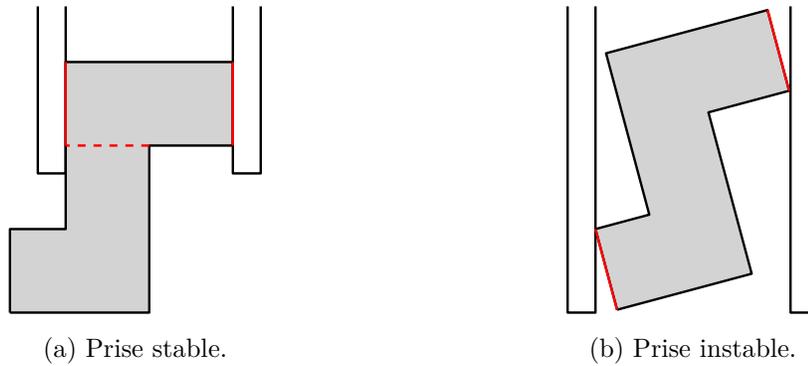


FIGURE 1.5 – Sélection d’un point de prise stable en privilégiant les points de contact sur des surfaces parallèles se faisant face (adapté de [8]).

1.2 Algorithme

Au travers de l’histoire de la robotique, plusieurs types d’architectures logicielles ont été développées pour exécuter des tâches plus ou moins complexes. Le Springer’s Handbook of Robotics [55] en détaille trois : les algorithmes *Sense-Plan-Act* (Détection-Planification-Exécution) développés initialement pour le robot Shakey de Stanford en 1969 [41], les algorithmes comportementaux de Brooks [10] en 1986 et les algorithmes étagés de la thèse de Firby [16] en 1989. Un algorithme de type *Sense-Plan-Act* en est un où le robot effectue ses tâches de manière séquentielle : il utilise d’abord ses capteurs pour percevoir le monde, planifie une action puis l’exécute en boucle ouverte. Pour pallier le peu de réactivité de ce type d’algorithme en situation dynamique (changements fréquents dans l’environnement du robot), les algorithmes comportementaux ont été développés. Ces derniers fonctionnent en créant des « comportements » reliant directement les lectures de capteurs à des actionneurs pour effectuer une tâche précise. L’architecture du programme est constituée de plusieurs comportements indépendants interagissant entre eux pour déterminer lesquels s’expriment à un instant donné. Le comportement résultant du robot pouvant être difficile à interpréter ou prédire, l’architecture étagée fut développée. Telle qu’imaginée par Firby, cette dernière consiste en trois étages de comportements : le niveau « comportemental » responsable de la gestion des capteurs et des actionneurs, le niveau « exécutif » gérant les objectifs à court terme du robot (par exemple, éviter une personne dans une foule) et finalement le niveau « politique » gérant les objectifs à long terme du robot (par exemple, traverser la foule pour aller à un endroit précis). Le résultat est un robot étant « naturellement » flexible dans l’atteinte de ses objectifs pour répondre à un environnement changeant.

Afin de simplifier la conception, l'implémentation et le maintien de l'algorithme de prise et placement d'objet décrits dans ces travaux, il a été décidé d'utiliser un algorithme de type *Sense-Plan-Act*. Ce choix est justifié par la simplicité relative du comportement attendu du robot : ce dernier n'a qu'une tâche à accomplir et son environnement est presque statique (seul l'objet à prendre est appelé à changer). L'algorithme résultant est illustré à la figure 1.6. Ce dernier est composé des 6 étapes séquentielles présentées ci-dessous :

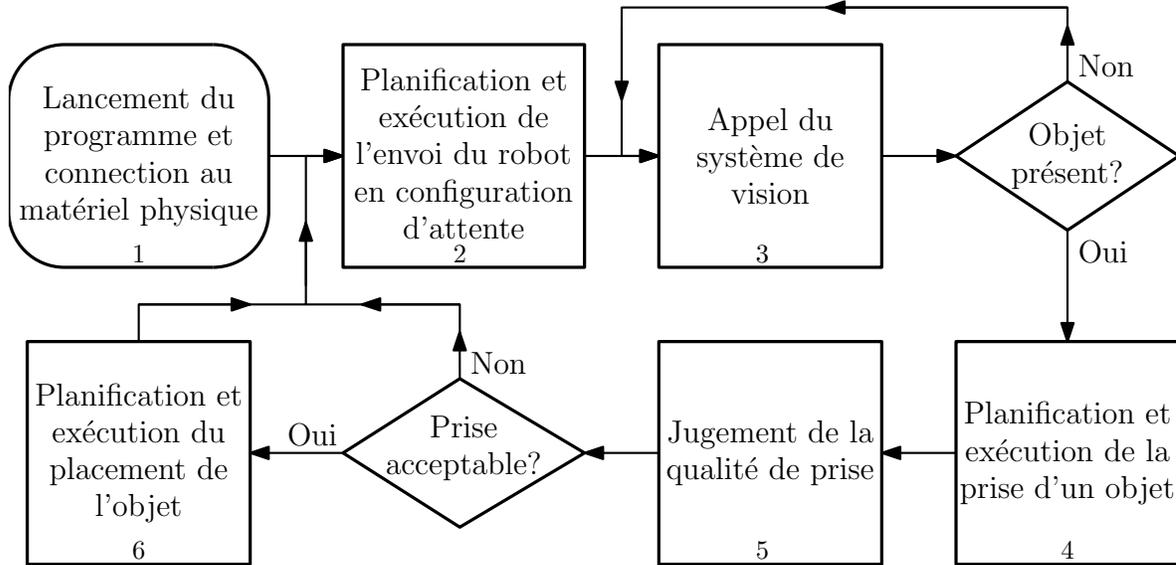


FIGURE 1.6 – Algorithme utilisé pour la prise et le placement d'objets (*pick and place*).

1. L'étape initiale consiste à lancer le programme gérant le processus de prise et placement d'objets puis à le connecter au matériel physique du montage expérimental (le robot, son préhenseur, la caméra et les objets, tous décrits à la section 1.3). Une fois le lancement de ce programme complété, ce dernier amorce un cycle infini de prise et placement d'objet.
2. La première étape du cycle de prise et placement consiste à positionner le robot dans une configuration où ce dernier n'obstrue pas le champ de vision de la caméra tout en restant près de l'espace de travail du montage. Dans le cadre de ces travaux, cette configuration est déterminée en déplaçant manuellement le robot sériel UR5 d'Universal Robots utilisé (voir section 1.3.1) vers un endroit répondant aux critères énoncés puis en prenant en note l'angle de ses articulations. Cette configuration est alors répliquée à tous les cycles de prise.
3. L'étape suivante consiste à détecter la présence d'objets dans l'espace de travail du robot et à décrire leur position dans le repère de ce dernier. Pour ce faire, une

caméra 3D Kinect de Microsoft est ici utilisée. Ce capteur ainsi que la méthode de détection d'objet employée sont décrits à la section 1.3.3. Il est à noter que l'utilisation du système de vision demande beaucoup de puissance de calcul (jusqu'à 95 % de celle de l'ordinateur utilisé). Pour limiter l'influence de cet appétit sur le temps de cycle de prise d'objet, la caméra est en pratique utilisée comme un appareil photo 3D, produisant une seule image lors de cette étape.

4. Si des objets sont présents dans l'espace de travail, l'étape suivante consiste à les saisir. Le détail de cette étape dépend grandement du préhenseur utilisé ; dans le cadre de ces travaux, il s'agit d'une pince aux doigts sous-actionnés C3 de Robotiq (voir la section 1.3.2). Afin de pouvoir prendre le maximum d'objets avec cette dernière, deux mouvements de prises ont été développés autour de ses capacités. Le premier est la prise par le dessus décrite au chapitre 3. Simple et efficace, ce type de prise est toutefois difficile lorsque l'objet est mince ou trop large pour le préhenseur. Le second mouvement de prise, la prise en pelletage décrite au chapitre 4, a été développé pour répondre à ces lacunes. La méthode employée pour choisir lequel de ces mouvements doit être utilisé pour prendre un objet particulier est décrite à la section 4.4.
5. Une fois la prise complétée, il est possible d'évaluer la qualité de cette dernière à l'aide de capteurs externes. Pour accomplir cela, l'encodeur de la pince C3 indiquant le niveau de fermeture de ses doigts est ici utilisé grâce à la technique décrite à la section 3.4
6. Finalement, s'il est déterminé qu'un objet est dans la pince, l'opération de dépôt est lancée. Dans le cadre de ces travaux, cette opération est simplifiée en déposant toujours les objets à des endroits prédéterminés fixes. Une façon simple de faire apprendre à l'algorithme une telle position est de l'atteindre en y menant manuellement le robot puis en prenant en note les angles de ses articulations. Au terme de ce mouvement, le cycle de prise et placement d'objet est complété ; un nouveau cycle est alors immédiatement lancé à partir de l'étape 2. Pour simplifier les essais expérimentaux, si aucun objet n'est présent dans l'espace de travail lors d'un nouveau cycle, un délai de 5 s est accordé lorsque la caméra perçoit un nouvel objet. Comme ce dernier est probablement tenu par la main de l'expérimentateur, cette mesure permet de le déposer en toute sécurité. Une approche plus polyvalente consisterait à enseigner au système la détection d'humains dans son espace de travail.

1.3 Matériel

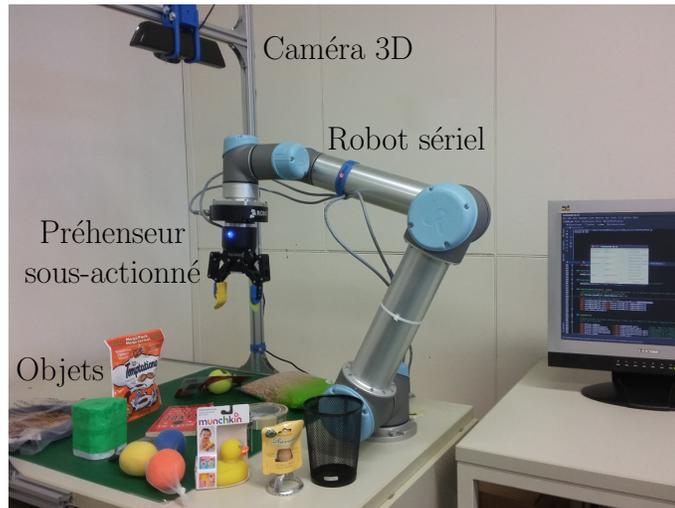


FIGURE 1.7 – Vue d’ensemble du montage expérimental et de ses différents éléments.

Le montage expérimental utilisé est illustré à la figure 1.7. Ce dernier est composé d’un robot sériel couplé à une pince sous-actionnée pour manipuler les objets, d’une caméra 3D pour percevoir ces derniers dans l’espace de travail, d’un programme informatique permettant de commander le robot sur la base des données produites par la vision et finalement d’un jeu de 80 objets de la vie courante pour tester le tout. Ces différentes composantes sont présentées plus en détail dans les sous-sections suivantes (et au chapitre 2 dans le cas du robot).

1.3.0.1 Programme informatique : Robot Operating System (ROS)

Dans le cadre de ces travaux, la communication avec les différents éléments du montage expérimental se fait à l’aide du *Robot Operating System* (ROS) conçu par Willow Garage. ROS est une collection d’outils, de conventions d’écriture et de bibliothèques Python et C++ permettant faire du contrôle de bas niveau d’équipements et de programmer en abstraction du matériel physique sur lequel le programme tourne. Pratiquement, ROS permet d’écrire, tester et utiliser selon un même standard des programmes faisant fonctionner des équipements très différents.

La communauté d’utilisateur de ce programme est un atout. En effet, de nombreuses tierces parties telles des universités et des entreprises ont créé des paquets (*packages*) librement accessibles ajoutant des fonctionnalités au programme ROS de base. Par

exemple, le paquet ROS de Robotiq [50] permet entre autres de se connecter à une pince C3, de lui envoyer des commandes et de recevoir de l'information sur son état. Le code source de ce paquet étant disponible, il est également possible d'en tirer des exemples de code ou de le modifier.

Tous les éléments du montage expérimental font l'objet de paquets permettant de les utiliser avec ROS. Grâce à ces derniers, il est possible de tout commander à partir d'un ordinateur central. Sur ce dernier, un programme principal implémente l'algorithme de la section 1.2, décidant quelle action entreprendre à chaque instant et maintenant la communication avec l'équipement. Les différents programmes mettant en oeuvre les techniques décrites dans ce document sont tous rattachés à ce programme central. Finalement, il est à noter que tous ces programmes maison furent développés en Python, ce langage étant, selon l'auteur, d'usage plus convivial que le C++ (l'autre langage supporté par ROS).

1.3.1 Robot sériel : UR5 de Universal Robots

Le manipulateur utilisé dans le cadre de ces travaux est un robot UR5 de la compagnie Universal Robots. Il s'agit d'un robot sériel à 6 degrés de liberté pouvant transporter une charge maximale de 5 kg jusqu'à sa portée maximale de 850 mm. Les articulations du robot ont nominalement toutes les mêmes capacités : elles ont un débattement de $\pm 2\pi$, une vitesse angulaire maximale de 3,2 rad/s et une accélération angulaire maximale de 25 rad/s². La boîte de contrôle du robot dispose de plusieurs entrées et sorties (16 entrées/sorties digitales, 2 entrées analogiques et 2 sorties analogiques) pour permettre de facilement y brancher des équipements comme un préhenseur ou des interrupteurs. Ces équipements peuvent ensuite être contrôlés directement à partir du programme d'exploitation du robot, Polyscope. Ce programme a été conçu pour faciliter l'implantation du robot en industrie, l'enseignement de trajectoires se faisant très facilement. Ainsi, une trajectoire est générée en déplaçant manuellement le robot dans la configuration désirée; le robot se charge alors de générer la trajectoire pour s'y rendre. Lors de leur exécutions, ces trajectoires sont décomposées en une série de positions articulaires à atteindre à toute les 0,008 s; la fréquence de commande du contrôleur du robot est donc de 125 Hz. Finalement, la sécurité du robot (et de l'utilisateur) est assurée par une surveillance du courant consommé par les moteurs : si

une collision se produit, un pic de consommation se produit et les freins physiques des articulations sont enclenchés.

Comme le programme fourni par le manufacturier du robot ne lui permet pas d'atteindre la flexibilité de programmation nécessaire pour réaliser l'opération de prise et placement d'objets autonome, il est nécessaire de commander le robot à l'aide d'un programme externe : ROS. Comme le paquet ROS d'Universal Robots ne permet que de demander au robot d'atteindre une certaine configuration articulaire en un temps donné, il fut nécessaire de créer de toute pièce un générateur de trajectoire lui étant adapté. Ces travaux font l'objet du chapitre 2.

1.3.2 Préhenseur : Pince C3 de Robotiq

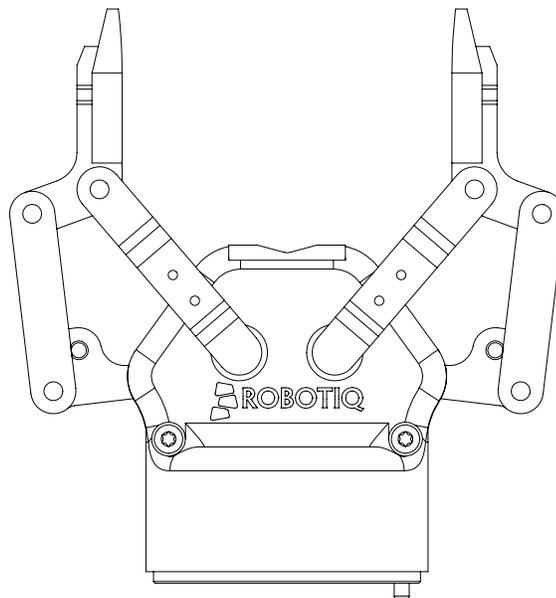


FIGURE 1.8 – Vue de profil de la pince C3 de Robotiq (échelle 1 : 2).

Apposé au bout du robot, l'outil utilisé pour prendre et manipuler les objets est une pince C3 de la compagnie Robotiq (illustrée à la figure 1.8). Pleinement ouverte, cette pince a une ouverture de 85 mm. Lors de sa fermeture, elle peut appliquer une force allant de 15 N jusqu'à 220 N, ce qui est normalement suffisant pour soulever des objets ayant une masse de 5 kg. Un avantage non négligeable de ce modèle de pince est l'utilisation de deux doigts sous-actionnés permettant à la pince de s'adapter passivement à la forme des objets et de l'environnement. Cette pince ne possédant qu'un

moteur pour actionner les deux doigts, sa commande est très simple pour l'utilisateur. Lors d'une commande de fermeture de la pince, cette dernière se referme jusqu'à ce que la force de réaction entre les doigts et l'objet dépasse un certain seuil. Sauf dans son mode pour les objets fragiles, la pince recommencera à se refermer si l'objet glisse après l'atteinte de ce premier seuil de résistance.

Les sections suivantes présentent plus en détail la géométrie de la pince et la manière dont elle est commandée.

1.3.2.1 Géométrie

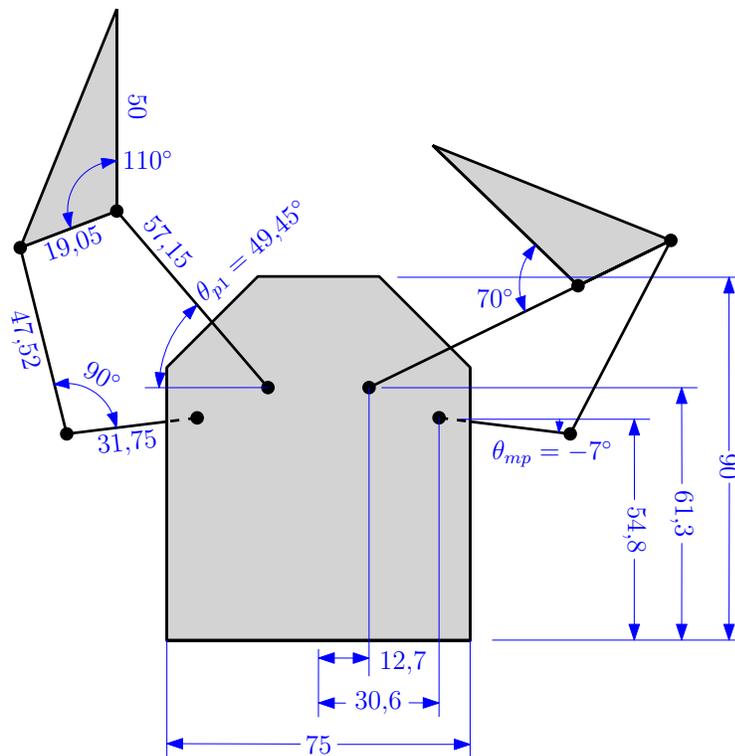


FIGURE 1.9 – Dimensions de la pince C3 (en mm sauf si indiqué). Le doigt de gauche représente la configuration d'un doigt lorsque la pince est pleinement ouverte et que le doigt n'est pas sous-actionné. Le doigt de droite est dans la configuration où le sous-actionnement est maximal.

La figure 1.9 présente un profil simplifié de la pince C3 lorsque cette dernière est pleinement ouverte. Les différentes dimensions nécessaires à la réalisation des calculs décrits aux chapitres 3 et 4 y sont notées.

En complément à cette figure, voici quelques informations utilisées dans les prochains chapitres. Dans la configuration pleinement ouverte de la pince, $\theta_{mp} = -7^\circ$ et $\theta_{p1} = 49,45^\circ$; la pince a alors une largeur externe de 145 mm. Lorsque la pince est fermée, $\theta_{mp} = 139,5^\circ$ et $\theta_{p1} = 96,7^\circ$. Les deuxièmes phalanges des doigts ont été conçues et fabriquées au cours de ce projet pour les raisons détaillées à la section 1.3.2.3; leurs dimensions peuvent être consultées à l'annexe B. Finalement, les barres du mécanisme d'un doigt ont une largeur de 12 mm lorsque la pince est vue de face (comme à la figure 1.9).

1.3.2.2 Mécanisme de sous-actionnement

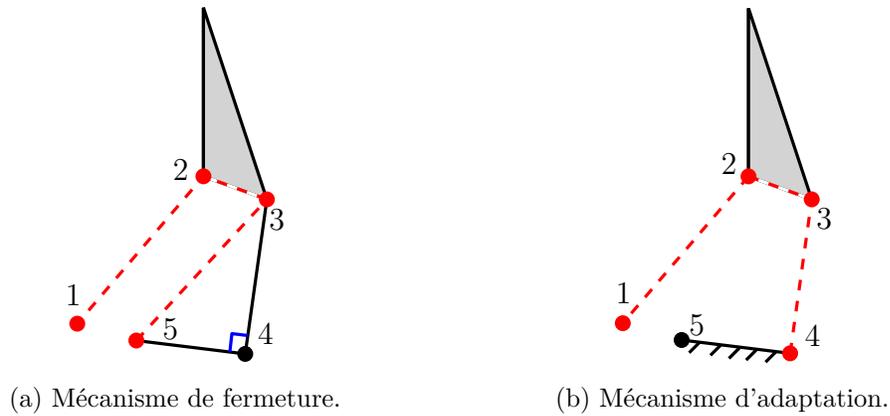


FIGURE 1.10 – Décomposition du mécanisme à 5 barres d'un doigt en 2 mécanismes à 4 barres.

L'architecture des doigts de la pince C3 est celle d'un mécanisme à 5 barres contraint d'adopter la configuration affichée à la figure 1.8 lorsqu'aucune contrainte extérieure n'est appliquée. Pour obtenir cet effet, des ressorts et des butées sont utilisés sur certaines articulations du doigt. L'effet net de ces contraintes est que sans perturbations externes, la trajectoire de la deuxième phalange du doigt lors de la fermeture de la pince est équivalente à celle d'un mécanisme à 4 barres de type parallélogramme. À l'opposé, la trajectoire suivie par la deuxième phalange s'adaptant face à des perturbations peut être décrite par un autre mécanisme à 4 barres. Ces deux mécanismes sont illustrés à la figure 1.10.

Le mécanisme de fermeture de la pince (figure 1.10a) est constitué des articulations 1, 2, 3 et 5 du doigt. Le moteur est relié à l'articulation 5, ce qui vient dicter la position de l'articulation 4. Si le sous-actionnement du doigt n'est pas nécessaire,

l'angle de l'articulation 4 est fixe en raison des ressorts et butées du mécanisme. Cette articulation peut alors être ignorée pour le calcul de la trajectoire de la 2^e phalange. Une particularité du mécanisme est que le segment 1-2 est de même longueur que le segment 3-5, transformant le mécanisme en parallélogramme. L'effet net de cet agencement est que la deuxième phalange reste parallèle à son homologue du doigt opposé et perpendiculaire à la paume de la pince tout au long de la fermeture.

Le mécanisme d'adaptation des doigts (figure 1.10b) est constitué des articulations 1, 2, 3 et 4 du doigt. Comme mentionné précédemment, la position de l'articulation 4 est dictée par la position du moteur de la pince θ_{mp} . Lorsque le doigt rencontre un obstacle, ce dernier se replie passivement vers l'avant pour s'adapter à cet obstacle. Le doigt droit de la figure 1.9 présente la configuration du doigt replié au maximum. Une méthode pour calculer la position du bout du doigt ainsi que l'angle de la 2^e phalange du doigt est détaillée à l'annexe C.

1.3.2.3 Modification des doigts pour le pelletage d'objets

Bien qu'il soit possible de le faire avec les doigts originaux de la pince, la prise d'objets à l'aide du mouvement de pelletage décrit au chapitre 4 est facilitée par quelques modifications mineures de la pince. Dans le cadre de ces travaux, les deux dernières phalanges originales de la pince ont été remplacées par celles illustrées à la figure 1.11.



(a) Doigt du dessus - Sugru (caoutchouc) sur feuille de plastique semi-rigide.

(b) Doigt du dessous - Feuille de plastique semi-rigide.

FIGURE 1.11 – Phalanges conçues pour la tâche de pelletage d'objet utilisées sur la pince.

La phalange du doigt du dessus a été conçue pour exploiter le fait que l'application d'une force normale et de friction sur le dessus d'un objet améliore la stabilité de sa

prise en pelletage. Le résultat est l'utilisation d'un ongle flexible fait d'une feuille de plastique semi-rigide recouvert de Sugru (caoutchouc formable à la main). Cet ongle agit lors d'une prise comme un ressort en torsion distribuant une force normale sur le dessus de l'objet ; le caoutchouc assure alors une bonne force de friction pour retenir l'objet. Cet ongle est posé sur une base en plastique ABS imprimée de manière à pouvoir être interchangeable avec les phalanges originales. Le plan de cette base peut être consulté à l'annexe B.

La phalange du doigt du dessous est munie d'un ongle flexible et glissant. Cela lui permet de se glisser facilement sous les objets, la tâche la plus cruciale du mouvement de pelletage. Le doigt est constitué de la même base que le doigt du dessus surmontée d'un ongle formé d'une feuille de plastique semi-rigide. Le plastique est effilé au bout de l'ongle et poli sur toute sa longueur.

Un concept alternatif d'ongle lisse pour le doigt du dessous a été testé puis abandonné en raison de moins bonnes performances. Ce dernier consistait à ajouter une couche de caoutchouc à une certaine distance du bord de l'ongle dans l'espoir « d'accrocher » les objets une fois l'ongle inséré et d'aider le doigt dans les tâches de prise par le dessus. La cause d'erreur majeure avec ce concept était la zone de transition entre le plastique et le caoutchouc, l'aspérité formée par le caoutchouc plus épais empêchant l'objet d'avancer dans la pince. Le recouvrement intégral de l'ongle d'un matériel glissant seulement dans la direction d'insertion du doigt sous les objets permettrait probablement d'améliorer ce concept.

1.3.2.4 Commande

De base, la pince est commandée en envoyant à son contrôleur une consigne de position à atteindre par le moteur ainsi que des seuils de vitesse et de force maximale. Ce nombre restreint de variables s'explique par le fait que les doigts ne sont actionnés que par un seul moteur et que le seul capteur externe au moteur est un encodeur mesurant sa position. En plus des consignes au moteur, l'utilisateur dispose de commandes de sécurité permettant d'ouvrir ou fermer la pince lentement en cas d'arrêt d'urgence. Finalement, une commande est disponible pour mettre la pince en marche au début des opérations.

En rétroaction aux commandes, la pince fournit les informations suivantes à l'utilisateur. Premièrement, la pince indique si elle est activée, si une erreur est détectée et quelle est l'étape actuelle de son initialisation. Après la réception d'une commande, la pince indique également qu'elle est en mouvement, la consigne de position reçue, la position actuelle du moteur et finalement le courant consommé par le moteur. Lorsque les doigts cessent leur mouvement, la pince indique finalement si la consigne de position a été atteinte ou si les doigts se sont arrêtés prématurément.

Pour communiquer avec la pince, toutes ces informations sont représentées sous la forme d'entiers entre 0 et 255 (un entier de 8 bits). Les consignes de position, de vitesse et de force utilisent cette plage pour représenter leur plage d'opération. Les autres variables utilisent des valeurs précises pour fournir de l'information ; ces dernières peuvent être consultées dans le manuel d'opération de la pince [49].

Une tâche commune étant la fermeture partielle de la pince pour s'adapter à la forme de l'objet à prendre, il est nécessaire de pouvoir traduire une distance cartésienne d entre les doigts de la pince en consigne pour le moteur c_{mp} . Pour ce faire, la relation suivante a été déterminée par l'auteur de ces lignes à partir de données expérimentales et de la géométrie de la pince :

$$c_{mp} = \frac{179}{38^\circ} \left(\cos^{-1} \left(\frac{d/2 - 12,7 \text{ mm} + 6 \text{ mm}}{57,15 \text{ mm}} \right) - 49,45^\circ \right) \quad (1.1)$$

où d est exprimée en mm.

L'envoi de commandes à la pince se fait par l'entremise du paquet ROS de Robotiq [50]. Ce dernier permet de se connecter à la pince par l'entremise d'un port USB (protocole modbus-RTU). La fréquence d'envoi de commande et de réception d'information est de 2,5 Hz. Lorsqu'une commande est envoyée, le moteur avance ou recule les doigts jusqu'à ce que le moteur atteigne la consigne de position ou bien que la force appliquée par les doigts corresponde au seuil de force spécifié. La pince possède deux modes pour gérer ce qui se produit lorsque cette deuxième condition est atteinte. Si le seuil de force est à son minimum, la pince se bloque en place et attend une nouvelle instruction. Au contraire, si le seuil de force commandé est plus élevée, la pince tente continuellement de se remettre en mouvement pour atteindre la consigne de position spécifiée. L'effet net de ce mode est de permettre à la pince de s'adapter à un mouvement de l'objet.

1.3.3 Caméra 3D : Kinect de Microsoft

Le système de vision utilisé emploie une caméra couleur 3D positionnée directement au-dessus de l'espace de travail de manière obtenir des images 2D du dessus des objets. La caméra retenue pour ce rôle est la Kinect de Microsoft, étant peu dispendieuse et bénéficiant d'une intégration facile à ROS, le programme utilisé pour faire communiquer entre eux les différentes composantes du montage expérimental. La prochaine sous-section présente les caractéristiques de la caméra ainsi que son positionnement dans le montage expérimental. La section suivante présente les opérations de calibration faites pour améliorer la précision de la Kinect et pour traduire les données produites dans le repère du montage expérimental. La dernière sous-section détaille quant à elle la procédure employée pour extraire des images produites par la caméra la position et la géométrie des objets présents dans l'espace de travail du robot.

1.3.3.1 Matériel physique

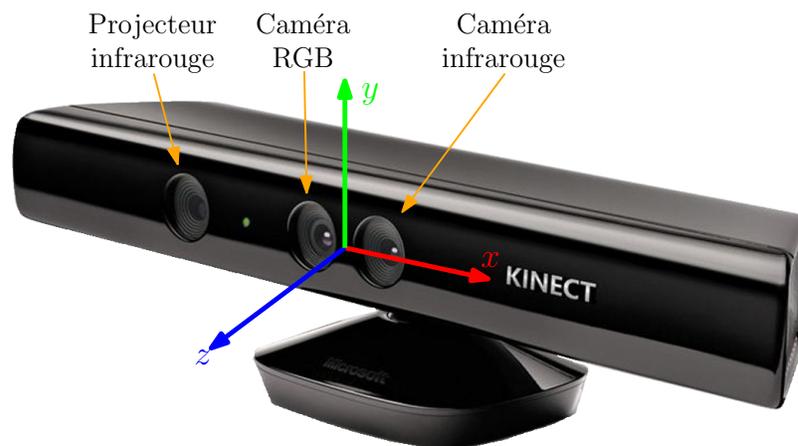


FIGURE 1.12 – Composantes et système d'axe de la caméra 3D Kinect de Microsoft.

La caméra 3D utilisée est une Kinect de Microsoft [37], capteur illustré à la figure 1.12. Cette dernière est en réalité composée de deux systèmes de vision produisant chacun des images à une fréquence de 30 Hz puis les combinant en un nuage de points. Le premier est une caméra couleur conventionnelle ayant une résolution de 1280×960 px. Le second est un système stéréoscopique actif permettant de percevoir les distances dans un champ de vision de 43° en hauteur et de 57° en largeur avec une résolution de 640×480 px. Ce système fonctionne en projetant un patron infrarouge sur l'environnement (illustré à la figure 1.13 et bien expliqué par Khoshelham et Elberink [33])

puis en mesurant la réfraction de ce patron grâce à un capteur infrarouge. La précision spatiale de ce système est relativement faible : à une distance de 2 m, la précision est de 3 mm selon les axes x et y de la caméra et de 10 mm dans l'axe z . De plus, d'après le fabricant ce système n'arrive à percevoir la distance des objets que dans une plage de distance entre 0,8 m et 4 m du capteur.



FIGURE 1.13 – Patron infrarouge utilisé par la Kinect (tirée de [44]).

Dans le montage expérimental utilisé, la Kinect est fixée à une potence à une hauteur de 85 cm au-dessus de la surface de travail. Cette hauteur a été choisie afin de maximiser la précision spatiale des pixels de la caméra infrarouge tout en respectant les limites de sa plage d'opération. La caméra est orientée de manière à produire des images du dessus des objets ; son axe z est perpendiculaire à la surface de travail. Les opérations de description des objets supposent que cette orientation est parfaite. Bien que généralement valide, cette hypothèse simplificatrice pose parfois problème lorsque les objets sont suffisamment hauts pour causer des erreurs de parallaxe, produisant des contours rendus fautifs par la perception des côtés de l'objet.

1.3.3.2 Calibration

Avant d'utiliser la Kinect, il est nécessaire de faire dans l'ordre la calibration intrinsèque puis extrinsèque des caméras couleur et infrarouge. La calibration intrinsèque consiste à rectifier les images produites en mesurant expérimentalement certains paramètres de la caméra, tels la distance focale et les coefficients de distorsion des lentilles. Grâce à cette calibration, la précision et la justesse du nuage de points généré par la Kinect sont améliorées. La méthode employée pour cette calibration intrinsèque est celle proposée par le paquet ROS de calibration de caméra [9]. En se basant sur l'article de Khoshelham et Elberink [33], les résolutions et précisions des mesures contenues au tableau 1.1 sont obtenues au terme de cette calibration. Il est à noter toutefois que

cette précision intrinsèque n'est valide que dans des conditions idéales ; par exemple, la présence d'un coin réfractant le patron infrarouge viendra fausser les données.

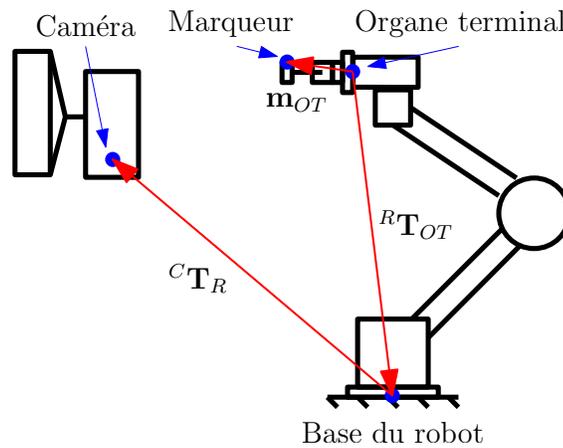


FIGURE 1.14 – Matrices et vecteurs de transformation entre les différents repères du montage expérimental (adapté de [27]).

La calibration extrinsèque d'un capteur est une opération établissant la relation entre deux repères. Dans le cas présent (illustré à la figure 1.14), cette opération consiste à trouver la matrice homogène ${}^C\mathbf{T}_R$ traduisant l'expression des objets perçus dans le repère cartésien local de la caméra vers le repère de la base du robot. La méthode de calibration utilisée dans le cadre de ces travaux est basée sur un article d'Ilonen et Kyrki [27]. Cette dernière consiste principalement à poser un marqueur fixe sur le robot puis à faire un estimé de ${}^C\mathbf{T}_R$ avec l'algorithme de Gauss-Newton et d'une vingtaine de mesures de la position du marqueur par la Kinect. Le détail de cette méthode peut être consulté à l'annexe A. Au terme de la calibration, les écarts types du résiduel entre les mesures prédites avec la matrice ${}^C\mathbf{T}_R$ produite et les mesures réelles sont calculés pour les différents axes de la caméra ; ces valeurs peuvent être consultées au tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Résolution et précision de la Kinect à une distance de 85 cm.

Axe	Résolution (mm)	Précision intrinsèque (mm)	Précision extrinsèque (mm)
X	1,3	0,7	3,3
Y	1,3	0,7	1,6
Z	2,0	1,0	2,6

1.3.3.3 Détection des objets et extraction de l'information pour leur prise

La caméra Kinect est utilisée dans le cadre de ces travaux comme le capteur principal permettant d'obtenir de l'information sur les objets à prendre. Pour ce faire, ce capteur est placé directement au-dessus de la surface de travail de manière à générer des images couleur 2D et un nuage de point 3D du dessus de l'espace de travail du robot. Afin de pouvoir extraire de l'information utile sur la position et la géométrie des objets, il est d'abord nécessaire de les distinguer de l'environnement. Pour faciliter cette tâche, un fond d'une couleur unie est employé (tel qu'illustré à la figure 1.15).

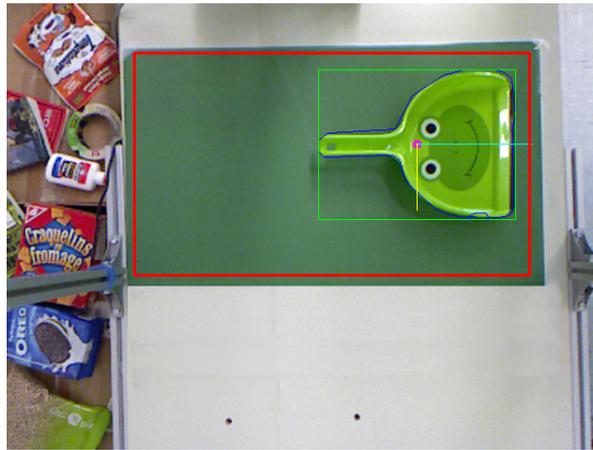


FIGURE 1.15 – Segmentation d'un objet du fond de l'espace de travail.

La procédure illustrée à la figure 1.16 permet de traiter les images couleurs produites par la Kinect pour y segmenter les objets du fond uni qu'est la surface de travail. Premièrement, lorsque commandée par l'algorithme, la caméra produit une image en couleur et en profondeur et envoie ces informations à l'ordinateur du montage expérimental par l'entremise de ROS. Ensuite, grâce à la librairie de traitement d'image OpenCV, la couleur dominante de l'espace de travail (délimité par le grand rectangle sur la figure 1.15) est déterminée. L'image est ensuite filtrée : tout ce qui est près de la couleur dominante est retiré. Les contours des zones restantes sont alors considérés comme des objets ; si une zone vide est entourée par une zone de couleur, cette dernière est considérée comme un trou de l'objet le délimitant. Il est à noter que cette méthode de segmentation n'est pas parfaite. Son principal problème est sa tendance à sous-segmenter les objets, c'est-à-dire de considérer que plusieurs objets n'en forme qu'un s'ils sont près les uns des autres. Pour pallier ce problème, certaines techniques de segmentation plus avancées pourraient être explorées.

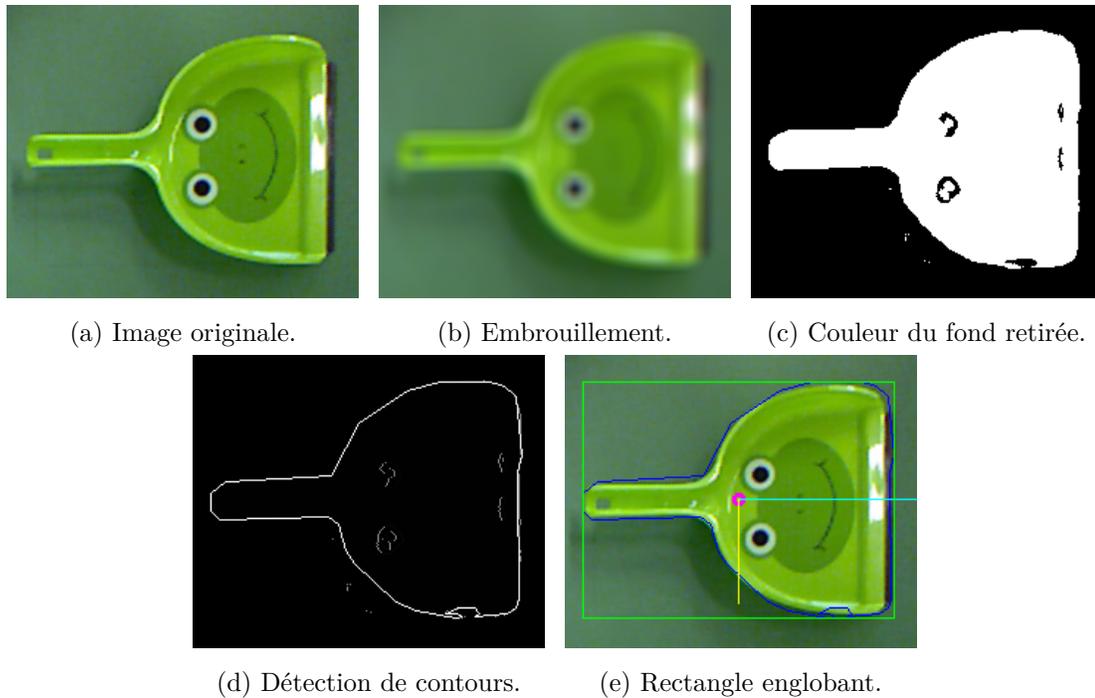


FIGURE 1.16 – Principales étapes du traitement d’une image pour en isoler les objets.

Comme l’image couleur produite par la caméra est bruitée par une variété de phénomènes (différences d’éclairages, ombres, couleur de l’objet près de celle du fond, etc.), les contours d’objets sont lissés à l’aide d’une variété de techniques. La première étape de ce processus consiste à appliquer un filtre gaussien de 3 px à l’image de contours. À la suite de ce traitement, il subsiste souvent plusieurs contours d’aires inférieures à 100 px^2 (ou 169 mm^2 , l’équivalent d’un disque de 14,5 mm de diamètre) ; comme il est improbable qu’ils soient des objets, ces derniers sont retirés. Ensuite, il est tenté de simplifier les contours restants en les décrivant à l’aide de rectangles englobants (*bounding box*). Si la différence entre l’aire d’un de ces rectangle et celle du contour l’ayant généré est inférieure à 5 %, le contour rapporté de l’objet est celui de son rectangle englobant ; autrement le contour de l’objet rapporté est celui isolé à l’étape précédente. L’étape finale consiste à simplifier les contours non idéaux grâce à l’algorithme de Visvalingam [59](illustré à la figure 1.17). Ce dernier consiste à assigner une importance à chaque sommet du contour proportionnelle à l’aire du triangle formé avec ses deux voisins puis à retirer le point le plus faible. L’algorithme continue jusqu’à ce que la plus petite droite du contour soit plus longue qu’un certain seuil (ici 17 mm, soit la demi-largeur des doigts du préhenseur).

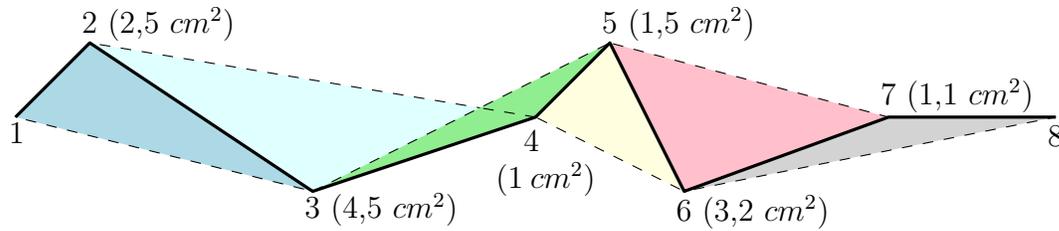


FIGURE 1.17 – Algorithme de Visvalingam pour la simplification de droites. Initialement, un poids est associé à chaque sommets de la droite en calculant l’aire du triangle inscrit entre ce sommet et ses deux voisins. Lors d’un cycle de simplification, le sommet ayant le plus petit triangle inscrit est retiré et une droite est tracée entre ses deux voisins ; les aires des triangles associés sont alors recalculés. Une droite est simplifiée jusqu’à ce que son plus petit segment dépasse une certaine longueur. Ainsi, sur la figure le sommet 4 serait le premier retiré suivi dans l’ordre par les sommets 7, 2, 5, 3 et 6.

Les informations provenant du système de vision utilisé par les planificateurs de prise par le dessus et en pelletage sont les mêmes : le contour de l’objet dans le repère de base du robot, son centre géométrique et sa hauteur. L’obtention du contour d’un objet se fait en deux étapes. La première consiste à trouver les points correspondant aux sommets du contour généré sur l’image couleur dans le nuage de points spatiaux générés par le capteur infrarouge. Pour une variété de raisons (diffraction ou réfraction du patron infrarouge, imprécision du contour généré, etc.), il se peut que certains de ces points spatiaux n’existent pas ou soient aberrants. Contenant des coordonnées rapportées par le système comme des *NaN* (*Not a Number*), ces points problématiques sont alors facilement retirés des points décrivant le contour. L’étape suivante consiste à exprimer ces points dans le repère de la base du robot à l’aide de la matrice ${}^C\mathbf{T}_R$ définie lors de la calibration extrinsèque de la caméra (section 1.3.3.2). La position du centre géométrique du contour est ensuite calculée à partir de ce contour spatial.

Finalement, la hauteur de l’objet est trouvée en trouvant le point du nuage de point spatial correspondant au centre géométrique de l’objet puis en le transformant dans le repère de la base du robot ; la hauteur z de ce point est alors supposée être équivalente à la hauteur de l’objet. Il est à noter que bien qu’il soit possible d’utiliser une moyenne de la hauteur des points du contour de l’objet pour réaliser cette même estimation, une telle mesure est en pratique imprécise. En effet, pour une variété de raison (imprécision de la caméra, diffraction de la projection infrarouge sur les bords, etc.), ces points se trouvent souvent près du contour de l’objet réel mais sur le sol. Une moyenne de ces points mène donc souvent à une hauteur estimée de l’objet se trouvant entre le sol et le dessus de ce dernier.

1.3.4 Jeu d’objets



FIGURE 1.18 – Échantillon du jeu de 80 objets utilisés pour tester les algorithmes.

Afin de tester les méthodes de prise d’objet développées dans le cadre de ces travaux, un jeu de 80 objets a été assemblé. Une partie de ces objets peuvent être vus à la figure 1.18 ; une liste complète est disponible à l’annexe E détaillant les résultats expérimentaux par objet. Au moment de l’élaboration des expériences, il ne semblait pas exister de consensus dans la littérature sur un jeu d’objets standard à utiliser pour tester les méthodes de prise d’objet ; les différents articles parlant de prise d’objets cités dans ce mémoire ([28][29][53][65]) utilisent tous des jeux d’objets différents. À défaut de cela, les 27 objets du Amazon Picking Challenge (une compétition d’envergure de prise autonome d’objet par des robots en contexte d’entrepôt) ont servi de base pour constituer la liste. L’objectif étant d’arriver à générer une méthode de prise générale d’objets de taille et de poids manipulable pour un humain, d’autres objets présentant de la variété selon les 8 qualificatifs d’objets décrits ci-dessous ont été ajoutés à cette base. Les seules contraintes lors du choix d’un objet étaient qu’il puisse être pris d’une quelconque manière par la pince utilisée et que sa masse soit inférieure à 3,4 kg (la charge que peut prendre le robot moins la masse de la pince).

D’après l’auteur de ces lignes, il existe une série de 8 qualificatifs pouvant décrire un objet et ses chances de succès de prise par le système :

- **La rigidité** - L'objet peut être rigide comme une planche à découper, semi-rigide comme du carton, souple comme un livre de poche ou bien déformable comme un sac de pois.
- **Le fini de surface** - La surface de l'objet en contact avec le préhenseur a un effet sur la friction des points de contact et la stabilité de prise.
- **La visibilité par la Kinect** - L'objet peut être transparent pour la caméra couleur (donc invisible lors de l'opération de segmentation), être grillagé (pratiquement invisible car produit assez de diffraction du patron infrarouge utilisé pour percevoir la profondeur), réfléchif ou bien pleinement visible.
- **La masse** - La masse d'un objet et sa distribution affecte la stabilité de prise. Les algorithmes supposent une masse uniformément répartie de 1 kg ; une masse plus élevée ou excentrée produit des prises moins stables que prévu.
- **Les dimensions hors-tout** - Les dimensions de l'objet viennent affecter la technique de prise utilisée : un objet large et mince est pris en pelletage, sinon il est pris par le dessus.
- **Le contour 2D de l'objet vu de dessus** - L'objet peut être simple comme un rectangle ou bien complexe comme un porte-poussière, affectant le point de prise lors d'une prise par le dessus.
- **La fragilité** - La force de prise est à adapter lorsque l'objet est fragile. Par exemple, une boîte de carton vide est à prendre plus délicatement qu'un cylindre d'acier.
- **Le profil 3D du dessus de l'objet** - Si l'objet présente des trous, des bords qu'il est possible de pincer ou bien des obstacles en hauteur, la stratégie de prise devrait le refléter.

1.4 Conclusion

Pour un robot industriel, la capacité de faire la prise et le placement autonome d'objets (*pick and place*) dépend principalement de deux composantes : son algorithme décidant quelles actions entreprendre à un instant donné et le montage physique exécutant ces actions.

La première partie de ce chapitre a porté sur l’algorithme décisionnel utilisé pour effectuer un cycle de prise et de placement d’objet. Ce dernier est relativement simple : après son initialisation, le système commence par prendre une image de son espace de travail pour y détecter des objets. Si des objets sont présents, une étape de planification s’ensuit : décider quel type de prise tenter puis planifier le mouvement approprié. La trajectoire obtenue au terme de cette étape est ensuite effectuée par le robot. La qualité de la prise est ensuite évaluée, menant au choix de la prochaine action à entreprendre. Si la prise est bonne, l’objet est alors transporté jusqu’à son point de dépôt puis relâché. Cette étape complétée, un nouveau cycle est amorcé.

La seconde partie de ce chapitre présentait les différentes composantes du montage expérimental utilisé. Ce dernier a 4 composantes : le robot, le préhenseur, le système de vision et le jeu d’objets à prendre. Les capacités du UR5 de Universal Robots, le robot sériel utilisé, ont été présentées brièvement ; la cinématique de ce dernier et la planification de trajectoire en découlant font l’objet du chapitre 2. Le préhenseur retenu est une pince sous-actionnée C3 de Robotiq ; ses spécifications ont été présentées en plus de sa géométrie, des modifications apportées à ses doigts et de la méthode employée pour la commander. Le système de vision employé consiste à traiter les images 3D produites par une caméra Kinect de Microsoft. En plus de la caméra en elle-même, la méthode employée pour extraire la position et la géométrie des objets dans son champ de vision a été présentée. Finalement, les principes derrière la sélection des 80 objets utilisés pour tester les capacités du système ont été présentés. La liste complète des objets retenus peut être consultée à l’annexe E.

Chapitre 2

Cinématique et planification de trajectoire du robot UR5

Le robot sériel UR5 employé dans ces travaux est un robot sériel à 6 degrés de liberté. Ce dernier est conçu pour être facilement programmable en industrie ; il est moins fréquemment utilisé en recherche. Afin d'atteindre la flexibilité de programmation nécessaire pour générer des trajectoires à partir des données du système de vision, le robot est commandé par l'intermédiaire du paquet ROS d'Universal Robots [3][51]. Ce dernier ne peut envoyer au robot que des commandes sous la forme de positions articulaires à atteindre en un temps choisi par l'utilisateur. Il est donc nécessaire de créer un générateur de trajectoires adapté au robot. La première section de ce chapitre porte sur la cinématique du UR5, de la résolution du problème géométrique direct (PGD) à celle du problème géométrique inverse (PGI) en passant par la détermination des singularités. La deuxième section présente une méthode d'évitement des singularités lors de la génération de trajectoire. Finalement, la troisième section porte sur la génération de différents types de trajectoires articulaires et cartésiennes.

2.1 Cinématique du robot UR5

Le bras robotique UR5 (figure 2.1) est un robot sériel à 6 degrés de liberté (ddl) composés de 6 articulations rotatives ayant chacune un débattement de $\pm 2\pi$. Ayant 6 degrés de liberté, le robot est capable d'atteindre un point cartésien $[x,y,z]$ avec une orientation donnée $[\psi,\theta,\phi]$ (ici exprimée grâce à un trio d'angles d'Euler) dans son espace de travail. Le repère fixe à la base du robot (noté comme « repère de base ») se situe à l'intersection de sa base et de l'axe z_1 de la première articulation ; l'axe z_1 pointe vers le haut et l'axe y_1 pointe vers le fil d'alimentation du robot.

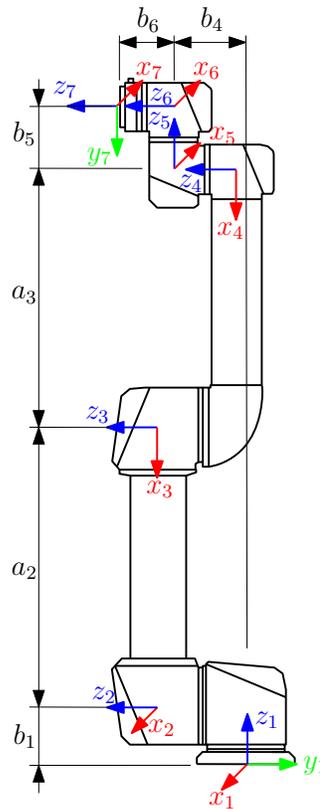


FIGURE 2.1 – Robot UR5 dans sa configuration de base avec illustration de ses paramètres DH.

La géométrie du robot est décrite au tableau 2.1 grâce à la notation de Denavit-Hartenberg (DH). Il est à noter que les paramètres utilisés ne suivent pas la convention dictant la direction des axes x des articulations. Il est supposé que ce choix de notation a été fait par les concepteurs du robot afin de minimiser les angles de ses articulations dans sa configuration de base θ_{home} .

Tableau 2.1 – Paramètres DH du UR5.

#	a (mm)	b (mm)	α (rad)	θ_{home} (rad)
1	0	89,159	$\pi/2$	0
2	-425	0	0	$-\pi/2$
3	-392,25	0	0	0
4	0	109,15	$\pi/2$	$-\pi/2$
5	0	94,65	$-\pi/2$	0
6	0	82,3	0	0

La position et l'orientation cartésiennes de l'organe terminal du robot dans sa configuration de base sont décrites par la matrice homogène \mathbf{T}_{home} ci-dessous. Cette matrice est composée de deux éléments : la matrice \mathbf{Q} , représentant l'orientation du repère de l'effecteur du manipulateur (repère 7) par rapport au repère de base, et le vecteur \mathbf{p} , représentant la position de l'origine du repère 7 dans le repère de base.

$$\mathbf{T}_{home} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{(3 \times 3)} & \mathbf{p}_{(3 \times 1)} \\ \mathbf{0}_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -0.1915 \\ 0 & -1 & 0 & 1.0011 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.1.1 Problème géométrique direct (PGD)

La résolution du problème géométrique direct (PGD) d'un robot consiste à déterminer la position et l'orientation de son organe terminal par rapport à son repère de base en utilisant la mesure de la position de ses articulations (ici de θ_1 à θ_6). Cette information est présentée sous la forme d'une matrice homogène \mathbf{T} permettant de passer du repère de l'outil du robot (indice 7) au repère de sa base (indice 1). Pour résoudre ce problème, le principe est de trouver les transformations intermédiaires \mathbf{T}_i permettant de passer du repère d'une articulation à la suivante. En multipliant ces matrices entre elles, il est possible de remonter la chaîne des repères d'articulations et trouver l'expression de \mathbf{T} . Le calcul des parties constituantes de cette matrice (\mathbf{Q} et \mathbf{p}) est présenté ci-dessous.

La matrice \mathbf{Q} contient l'information sur l'orientation de l'outil dans le repère global. Elle est obtenue en multipliant successivement toutes les matrices \mathbf{Q}_i permettant de passer du repère local d'une articulation à la suivante. L'utilisation des paramètres DH formalise l'expression de ces matrices de transformation comme :

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (2.2)$$

Le produit matriciel de telles matrices permet de trouver la transformation entre des repères d'articulations non adjacentes. Ainsi, en utilisant les paramètres DH du tableau 2.1 dans l'équation (2.2), l'expression de \mathbf{Q} permettant de passer du repère 1 au repère 7 est calculée :

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_6 & (2.3) \\ &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 \\ s_4 & 0 & -c_4 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_5 & 0 & -s_5 \\ s_5 & 0 & c_5 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_6(c_1c_{234}c_5 + s_1s_5) + s_6(-c_1s_{234}) & -s_6(c_1c_{234}c_5 + s_1s_5) + c_6(-c_1s_{234}) & -c_1c_{234}s_5 + s_1c_5 \\ c_6(s_1c_{234}c_5 - c_1s_5) + s_6(-s_1s_{234}) & -s_6(s_1c_{234}c_5 - c_1s_5) + c_6(-s_1s_{234}) & -s_1c_{234}s_5 - c_1c_5 \\ c_6(s_{234}c_5) + s_6(c_{234}) & -s_6(s_{234}c_5) + c_6(c_{234}) & -s_{234}s_5 \end{bmatrix} & (2.4) \end{aligned}$$

où c_i , s_i et c_{ijk} représentent respectivement $\cos \theta_i$, $\sin \theta_i$ et $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$.

Le vecteur \mathbf{p} contenant la position de l'organe terminal du robot est quant à lui obtenu par la sommation des positions des origines des repères rattachés aux articulations du robot. En utilisant les paramètres DH, l'expression décrivant la position d'une articulation dans le repère de l'articulation précédente \mathbf{a}_i est :

$$\mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_i \cos \theta_i \\ a_i \sin \theta_i \\ b_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, 6. \quad (2.5)$$

Ces positions locales \mathbf{a}_i sont exprimées dans le repère de base grâce au produit des matrices $\mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_{i-1}$. La somme de ces positions permet de trouver la position de l'outil :

$$\begin{aligned}
\mathbf{p} &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{a}_1 + \mathbf{Q}_1 \mathbf{a}_2 + (\dots) + \mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_5 \mathbf{a}_6 & (2.6) \\
&= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_2 c_1 c_2 \\ a_2 s_1 c_2 \\ a_2 s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_3 c_1 c_{23} \\ a_3 s_1 c_{23} \\ a_3 s_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_4 s_1 \\ -b_4 c_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_5 c_1 c_{234} \\ b_5 s_1 s_{234} \\ -b_5 c_{234} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_6 (-c_1 c_{234} s_5 + s_1 c_5) \\ b_6 (-s_1 c_{234} s_5 - c_1 c_5) \\ -b_6 s_{234} s_5 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} a_2 c_1 c_2 + a_3 c_1 c_{23} + b_4 s_1 + b_5 c_1 c_{234} + b_6 (-c_1 c_{234} s_5 + s_1 c_5) \\ a_2 s_1 c_2 + a_3 s_1 c_{23} - b_4 c_1 + b_5 s_1 s_{234} + b_6 (-s_1 c_{234} s_5 - c_1 c_5) \\ b_1 + a_2 s_2 + a_3 s_{23} - b_5 c_{234} - b_6 s_{234} s_5 \end{bmatrix}. & (2.7)
\end{aligned}$$

Grâce à l'équation (2.4) et l'équation (2.7), toute l'information nécessaire pour connaître la position et l'orientation cartésienne de l'effecteur du robot est connue. Ces deux équations constituent donc la solution à son problème géométrique direct.

2.1.2 Problème Géométrique Inverse (PGI)

Le problème géométrique inverse d'un robot consiste à trouver la ou les configurations possibles de ses articulations permettant d'amener son organe terminal à une position cartésienne donnée (exprimée par une matrice homogène \mathbf{T}). Dans le cas du UR5, il est possible d'obtenir analytiquement au maximum 8 séries d'angles articulaires $\boldsymbol{\theta}$ pour une telle position cartésienne. Cette section détaille la procédure à suivre pour obtenir ces solutions.

1. Angle de la base θ_1 - 2 solutions

Tout d'abord, le vecteur position de l'origine du repère 6 dans le repère de base (\mathbf{p}_6) est calculée. Comme la position et l'orientation désirée de l'outil sont connues, il suffit pour ce faire de retirer à la position de l'organe terminal \mathbf{p} le vecteur \mathbf{a}_6 reliant le repère 6 au repère 7. Il est ainsi possible d'exprimer \mathbf{p}_6 comme :

$$\mathbf{p}_6 = \mathbf{p} - \mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_5 \mathbf{a}_6 = \mathbf{p} - \mathbf{Q} \mathbf{Q}_6^T \mathbf{a}_6. \quad (2.8)$$

Cette équation peut être simplifiée, la géométrie du 6^e membre du robot faisant en sorte que \mathbf{Q}_6 n'a pas d'effet sur la position de l'effecteur. Ainsi :

$$\begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix} = \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{a}_6 = \begin{bmatrix} x - q_{1,3}b_6 \\ y - q_{2,3}b_6 \\ z - q_{3,3}b_6 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

où $q_{i,j}$ représente l'élément (i,j) de la matrice \mathbf{Q} .

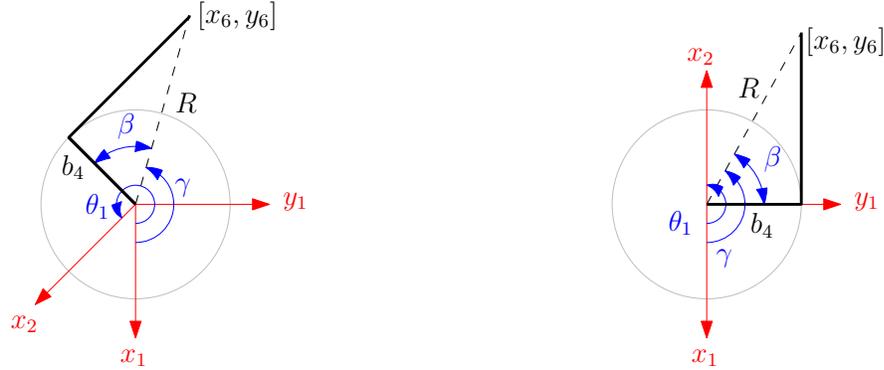


FIGURE 2.2 – Solutions de θ_1 .

Avec cette information, il est possible de tracer sur le plan xy du repère de base deux triangles rectangles formés par la droite R entre l'origine du repère de base du robot et l'origine du repère 6, le décalage entre la base du robot et le reste du bras b_4 et une droite représentant la projection des distances a_2 et a_3 sur le plan (voir la figure 2.2). θ_1 est l'angle entre les axes x_1 et x_0 , mesuré selon la direction positive de l'axe z_0 . Physiquement, cet angle représente l'angle de la droite b_4 incrémenté de $\pi/2$ (le décalage de x_1 par rapport à cette droite). L'angle γ représente l'angle de la droite R par rapport au repère de la base du robot et est exprimé comme :

$$\gamma = \text{atan2}\left(\frac{y_6}{x_6}\right). \quad (2.10)$$

L'angle interne du triangle est quant à lui noté β et équivaut à :

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{b_4}{\sqrt{x_6^2 + y_6^2}}\right). \quad (2.11)$$

En observant les deux solutions possibles illustrées à la figure 2.2, il est déterminé que les expressions possibles de θ_1 sont :

$$\begin{aligned} \theta_{1,1} &= \gamma + \beta + \pi/2 \\ \theta_{1,2} &= \gamma - \beta + \pi/2. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Finalement, il n'existe aucune solution valide de θ_1 (et par extension au PGI) si la position $[x_6, y_6]$ se trouve à l'intérieur d'un cercle de rayon b_4 centré à l'origine du robot.

2. 2^e angle du poignet θ_5 - 2 solutions

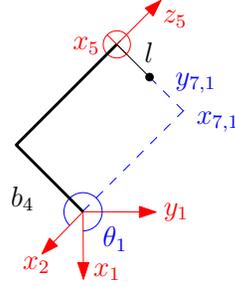


FIGURE 2.3 – Projection simplifiée du robot sur le plan xy du repère global.



FIGURE 2.4 – Solutions de θ_5 .

L'étape suivante est le calcul de θ_5 . Ce calcul est basé sur l'information tirée de la projection l du segment b_6 du robot dans le repère 2, seul l'angle de la 5^e articulation affectant alors sa longueur (phénomène illustré à la figure 2.3). Premièrement, l est calculée en se basant sur le fait que sa direction est toujours perpendiculaire à x_2 :

$$[\mathbf{p}]_2 = \mathbf{Q}_1^T \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_{2x} \\ p_{2y} \\ p_{2z} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$l = p_{2y} + b_4. \quad (2.14)$$

En observant la situation à partir du repère de la 5^e articulation (figure 2.4), il est possible de déterminer qu'il existe normalement deux positions de b_6 pouvant générer la projection illustrée à la figure 2.3. Sachant que l'axe x_5 est décalé de $\pi/2$ par rapport à b_6 , les valeurs acceptables de θ_5 sont alors :

$$\begin{aligned} \theta_{5,1} &= \frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(l/b_6) \\ \theta_{5,2} &= \frac{3\pi}{2} - \sin^{-1}(l/b_6). \end{aligned} \quad (2.15)$$

3. 3^e angle du poignet θ_6 - 1 solution

Pour trouver l'expression de l'angle de la 6^e articulation, une astuce mathématique est utilisée pour isoler des termes dans la matrice de rotation \mathbf{Q} ne dépendant que des angles θ_1 , θ_5 et θ_6 :

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} c_{234}c_5c_6 - s_{234}s_6 & -s_5c_6 & s_{234}c_5c_6 + c_{234}s_6 \\ -c_{234}c_5s_6 - s_{234}c_6 & s_5s_6 & -s_{234}c_5s_6 + c_{234}c_6 \\ -c_{234}s_5 & -c_5 & -s_{234}s_5 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

En observant les éléments (1,2) et (2,2) de cette matrice (respectivement notés comme $u_{1,2}$ et $u_{2,2}$), on remarque qu'il est possible d'en tirer l'unique valeur possible de θ_6 :

$$\theta_6 = \text{sgn}(s_5) \text{atan2} \left(\frac{s_6}{c_6} \right) = \text{sgn}(s_5) \text{atan2} \left(\frac{u_{2,2}}{-u_{1,2}} \right). \quad (2.17)$$

Finalement, si $\theta_5 = \{0, \pi\}$ les éléments $u_{1,2}$ et $u_{2,2}$ sont nuls. Le robot est alors dans une configuration singulière où θ_6 peut prendre n'importe quelle valeur sans affecter le résultat final.

4. Angle du coude θ_3 - 2 solutions

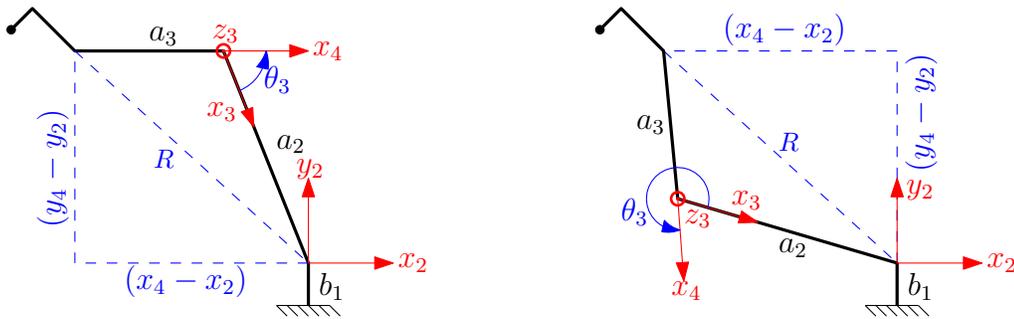


FIGURE 2.5 – Solutions de θ_3 .

Les positions possibles de la 3^e articulation du robot (le coude) illustrées à la figure 2.5 correspondent aux points d'intersection entre deux cercles formés autour des articulation 2 et 4 par les segments a_2 et a_3 sur le plan x_2, y_2 . La première étape pour trouver ces dernières consiste à trouver la position des articulations 2 et 4 sur ce plan.

Pour simplifier les calculs, l'origine utilisée est celle du repère 2, de telle sorte que :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix}_2 = \mathbf{Q}_1^T (\mathbf{p} - \mathbf{Q}_6^T \mathbf{Q} \mathbf{a}_6 - \mathbf{Q}_5^T \mathbf{Q}_6^T \mathbf{Q} \mathbf{a}_5 - \mathbf{a}_1). \quad (2.19)$$

Connaissant la position de ces articulations, la longueur R du segment reliant les articulations 2 et 4 et formant l'hypoténuse d'un triangle complété par les segments a_2 et a_3 est calculée :

$$R = \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}. \quad (2.20)$$

Finalement, en utilisant la loi des cosinus et en connaissant la configuration relative des repères des articulations 3 et 4, il est possible d'obtenir les deux expressions possibles de θ_3 :

$$\begin{aligned} \theta_{3,1} &= \pi - \cos^{-1} \left(\frac{R^2 - a_2^2 - a_3^2}{-2a_2a_3} \right) \\ \theta_{3,2} &= \pi + \cos^{-1} \left(\frac{R^2 - a_2^2 - a_3^2}{-2a_2a_3} \right). \end{aligned} \quad (2.21)$$

5. Angle de l'épaule θ_2 - 1 solution

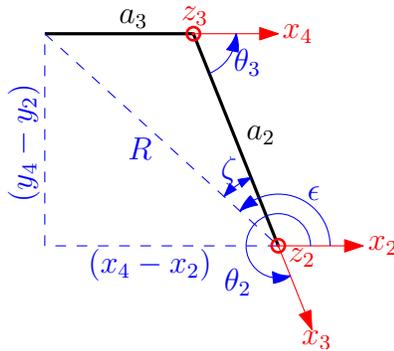


FIGURE 2.6 – Solution de θ_4 .

Connaissant la position cartésienne des articulations 2 et 4, l'angle θ_3 et la configuration des repères des articulations 2 et 3, il est possible de déterminer la valeur de θ_2

(illustrée à la figure 2.6. La première étape consiste à déterminer l'angle ϵ de la droite reliant les articulations 2 et 4 dans le repère 2 :

$$\epsilon = \text{atan2} \left(\frac{z_4 - z_2}{x_4 - x_2} \right). \quad (2.22)$$

L'angle interne ζ du triangle est quant à lui obtenu en utilisant la loi des sinus :

$$\zeta = \sin^{-1} \left(\frac{a_3 \sin(\pi - \theta_3)}{R} \right). \quad (2.23)$$

Finalement, θ_2 est calculé avec :

$$\theta_2 = \epsilon - \text{sgn}(s_3)\zeta + \pi. \quad (2.24)$$

6. Premier angle du poignet θ_4 - 1 solution

Comme les valeurs des 5 autres articulations constituant le robot sont connues, il est possible d'extraire la valeur de θ_4 à partir de la définition de la matrice \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5 \mathbf{Q}_6 \quad (2.25)$$

d'où il est déduit que :

$$\mathbf{Q}_4 = \mathbf{Q}_6^T \mathbf{Q}_5^T \mathbf{Q} \mathbf{Q}_1^T \mathbf{Q}_2^T \mathbf{Q}_3^T \quad (2.26)$$

en sachant que la matrice \mathbf{Q}_4 prend la forme de :

$$\mathbf{Q}_4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 \\ s_4 & 0 & -c_4 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

En notant $w_{1,1}$ et $w_{2,1}$ les éléments (1,1) et (2,1) de la matrice \mathbf{Q}_4 obtenue avec l'équation (2.26), l'expression de θ_4 est obtenue avec :

$$\theta_4 = \text{atan2}(w_{2,1}/w_{1,1}). \quad (2.28)$$

Globalement, le PGI du robot UR5 possède donc bien 8 solutions. Ces dernières peuvent être déterminées analytiquement à l'aide des expressions données ci-haut.

2.1.4 Configurations interdites

Les limites de l'espace de travail du robot peuvent souvent être décrites de façon simplifiée comme étant l'étendue des configurations atteignables par le robot pleinement étendu. Il est cependant nécessaire pour des fins de planification de trajectoire de connaître les zones non atteignables dans cet espace. Dans la section suivante, deux catégories de configurations impossibles à atteindre par le UR5 sont étudiées : les singularités et les auto-collisions. Les causes environnementales comme un plancher ou un mur ne sont pas abordées, ces dernières variant selon le montage expérimental utilisé.

2.1.4.1 Singularités

Un robot sériel est dit être dans une configuration singulière lorsqu'il lui est impossible de générer une vitesse cartésienne dans une certaine direction ; il y a donc une perte locale d'un ou plusieurs degrés de liberté. L'approche de ces singularités cause d'importants problèmes au robot et à la planification de trajectoire. Par exemple, de grandes vitesses articulaires sont requises pour générer de petits déplacements à l'approche d'une singularité. Un autre problème se présente si l'inverse de la matrice Jacobienne \mathbf{J}^{-1} est utilisée pour estimer numériquement une solution au PGI . En effet, \mathbf{J}^{-1} devient alors mal conditionnée et produit des solutions instables. Finalement, il est possible de coincer physiquement le robot dans une telle position.

Afin d'identifier les zones de singularités d'un robot, une étude de la forme du déterminant de sa matrice Jacobienne \mathbf{J} (exprimée à l'équation (2.31)) est menée, ce dernier étant nul dans une configuration singulière. Ainsi :

$$\det(\mathbf{J}) = -a_2 a_3 s_3 s_5 (a_2 c_2 + a_3 c_{23} + b_5 s_{234}). \quad (2.32)$$

Le UR5 est en singularité si $\det(\mathbf{J}) = 0$, donc lorsque :

$$\theta_3 = \{0, \pi\} \quad (2.33)$$

$$\theta_5 = \{0, \pi\} \quad (2.34)$$

$$0 = a_2 c_2 + a_3 c_{23} + b_5 s_{234}. \quad (2.35)$$

La figure 2.7 présente des exemples de configurations du robot correspondant à ces singularités. Les degrés de libertés bloqués dans ces configurations y sont également illustrés.

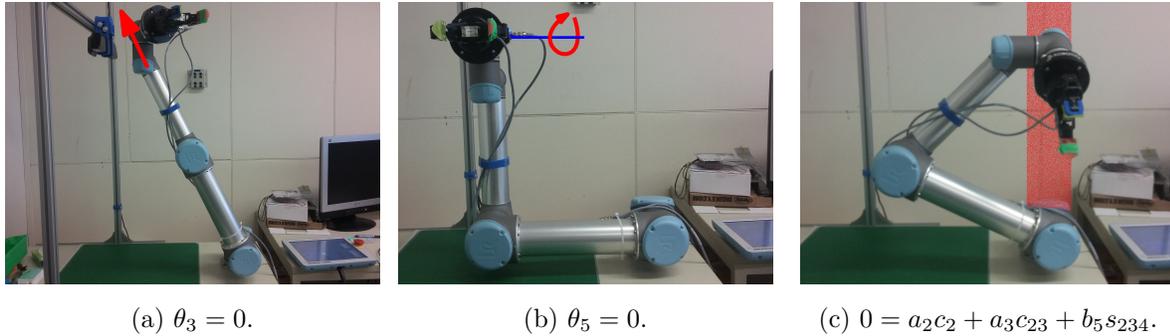


FIGURE 2.7 – Exemples de configurations singulières du UR5.

Physiquement, le premier cas de singularité, $\theta_3 = \{0, \pi\}$, se produit lorsque le « bras » du robot est complètement étendu. Dans cette configuration, il est impossible au robot de produire une vitesse dans l'axe du bras tout en maintenant l'orientation de l'effecteur.

Le deuxième cas de singularité, $\theta_5 = \{0, \pi\}$, correspond à l'alignement de tous axes de rotation des articulations du robot sur seulement deux axes. Dans cette situation, il est impossible pour le robot de générer une rotation autour de l'axe manquant.

Le dernier cas de singularité, $0 = a_2c_2 + a_3c_{23} + b_5s_{234}$, correspond aux limites internes de l'espace atteignable du robot. Telle que définie à la première étape de la résolution du PGI de la section 2.1.2, cette zone interdite correspond à un cylindre de rayon b_4 et aligné sur l'axe z_1 qu'il est impossible de traverser par l'origine de la 6^e articulation, $[x_6, y_6]$.

Finalement, la figure 2.8 présente les surfaces obtenues par résolution de l'équation implicite (2.35). À partir de la figure 2.8b, il est approximé que le robot est en configuration singulière lorsque $\theta_3 \approx \{-2,15(\theta_2 - \pi/2), -2,15(\theta_2 + \pi/2)\}$.

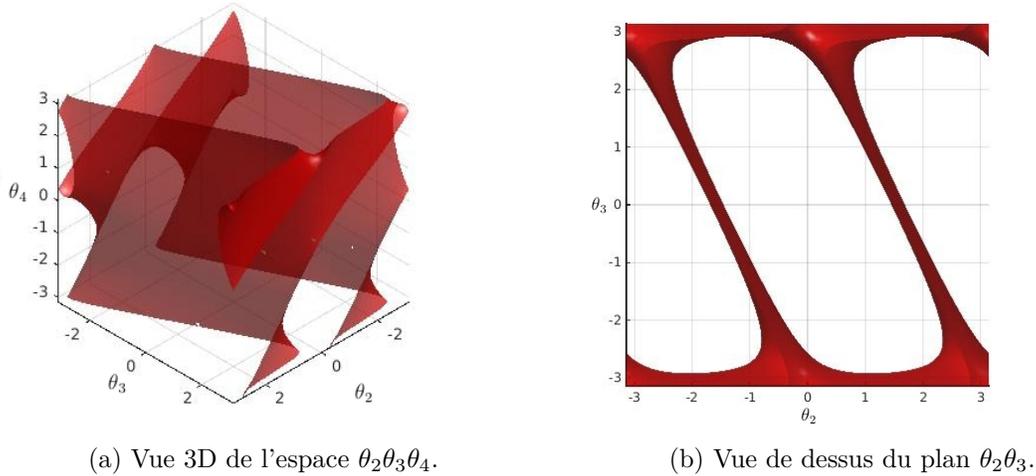


FIGURE 2.8 – Surfaces de singularité associées à l'équation (2.35).

2.1.4.2 Zones d'auto-collision

La géométrie du robot UR5 et le débattement angulaire possible de ses articulations rendent possibles des collisions du robot avec lui-même dans certaines configurations. Tel que fourni par le manufacturier, le robot se protège contre ces accidents en surveillant le courant utilisé par ses moteurs : une montée en flèche indique une collision avec quelque chose (le robot, un obstacle, un humain, etc.) et l'arrêt d'urgence est enclenché. Cette opération est brutale : elle peut causer des dommages durant l'instant nécessaire pour détecter la collision et arrête l'exécution du programme en cours.

Pour éviter ces problèmes, une méthode de génération de trajectoire sécuritaire prenant en compte ces zones d'auto-collision du robot est jugée importante. Pour la génération de trajectoires à partir d'une solution au PGI analytique (utilisée dans ces travaux et décrite à la section 2.3), les zones d'auto-collision sont utilisées comme un filtre. Par exemple, pour atteindre une certaine position cartésienne avec un mouvement articulaire (chaque moteur du robot suit une trajectoire linéaire dans son repère), 8 trajectoires sont proposées (chacune correspondant à une des 8 branches de solutions du PGI de la position finale). Pour chacune de ces possibilités, 5 positions intermédiaires de la trajectoire sont sondées ; si le robot est en auto-collision à l'une d'elle, la branche de solution du PGI ayant généré cette configuration est disqualifiée.

La découverte des zones d'auto-collision fut faite à l'aide d'une combinaison d'essais empiriques où le robot a doucement été forcé d'entrer en contact avec lui-même et de

calculs similaires à ceux de la section 2.1.1. Grâce à cette méthode, les 3 cas de collisions détaillées à la figure 2.9 ont pu être identifiés. Il est à noter que comme ces zones sont tributaires de la géométrie du robot, ces calculs sont à refaire à chaque fois qu'une modification lui est apportée (la plus commune est l'utilisation d'un nouvel outil).

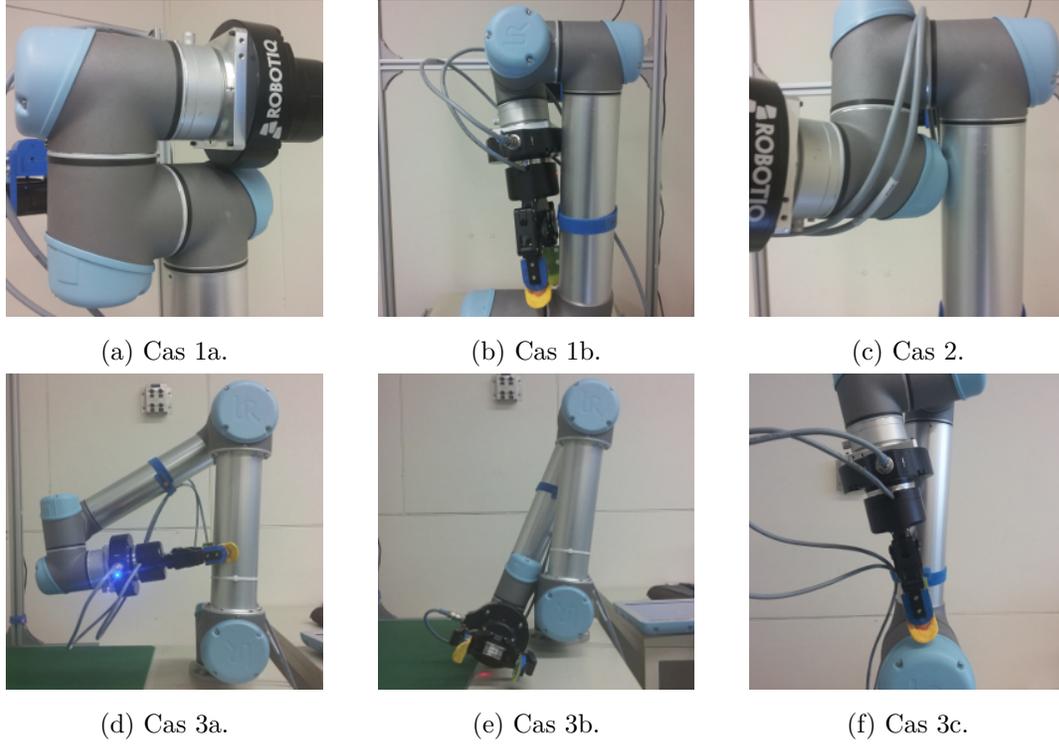


FIGURE 2.9 – Catégories d'auto-collisions possibles du robot UR5.

Cas 1 - Collision du capteur d'effort sur l'avant-bras

Ce type de collision se produit lorsque la position du centre du capteur d'effort entre dans un cercle de rayon de 10 cm centré à l'origine de la 4^e articulation sur son plan y_4z_4 . Il est à noter que cette origine diffère de celle définie par les paramètres DH du robot ; un vecteur \mathbf{c} est utilisé pour recentrer le tout sur le centre de l'articulation. Pour arriver à obtenir une expression mathématique décrivant le phénomène, la position du centre du capteur d'effort est d'abord exprimée dans le repère 4 :

$$[\mathbf{p}]_4 = \mathbf{c} + \mathbf{a}_4 + \mathbf{Q}_4 \mathbf{a}_5 + \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5 \mathbf{a}_6 \quad (2.36)$$

$$= \begin{bmatrix} p_{4x} \\ p_{4y} \\ p_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_4 b_5 \\ -c_4 b_5 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_4 s_5 (b_6^*) \\ s_4 s_5 (b_6^*) \\ c_5 (b_6^*) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

où Δz_4 est le décalage entre le centre de la 4^e articulation et son repère DH dans la direction z_4 (4 cm) et b_6^* représente le paramètre DH b_6 adapté pour prendre en compte la distance du centre du capteur d'effort (12 cm). Avec cette information, il est possible d'affirmer qu'une collision se produit lorsque :

$$r_{tube} + r_{capteur} \geq \sqrt{p_{4y}^2 + p_{4z}^2} \quad (2.38)$$

où r_{tube} , le rayon du tube de l'avant-bras, est de 3,5 cm et le rayon du capteur d'effort $r_{capteur}$ mesure 6,5 cm.

Finalement, il est à noter que la technique employée dans cette section et les suivantes est une simplification conservatrice des conditions causant une collision. En effet, il est ici supposé que le capteur d'effort occupe toujours l'espace maximal possible sur le plan yz du repère 4, soit un cercle de 6,5 cm de rayon. Toutefois, en fonction des angles θ_4 et θ_5 , le profil du capteur sur le plan peut prendre la forme d'un cercle, d'une ellipse ou bien d'une droite. Une méthode plus complète consisterait donc à tester la collision entre deux coniques : la projection du profil du capteur d'effort et le cercle du tube de l'avant-bras. Comme le gain potentiel en espace de travail est petit, cette méthode n'a toutefois pas été approfondie.

Cas 2 - Collision de l'arrière de la 6^e articulation sur l'avant-bras

Ce cas de collision se produit lorsque l'arrière de la 6^e articulation du robot se trouve sous la 4^e ($x_4 > 0$) et dans un cercle de 6 cm de rayon de cette dernière sur son plan y_4z_4 . Le calcul permettant d'obtenir une expression mathématique pour cette condition est presque identique à celui exposé pour le premier cas de collision, à la différence qu'il faut remplacer la valeur de la distance du capteur d'effort b_6^* par la distance de l'arrière de la 6^e articulation (-6 cm).

Cas 3 - Collision de l'organe terminal sur le bras

Ce cas de collision se produit lorsque deux conditions sont vraies. La première condition est que l'organe terminal doit se trouver sous le dessus du moteur de la 3^e articulation ($r_{mot} \geq p_{3x}$). Ce moteur a un rayon de 6 cm. L'autre condition est qu'il faut que l'organe terminal se trouve dans un cercle de rayon de 12,5 cm sur le plan y_3z_3 de la 3^e articulation (ce cercle représente l'empattement combiné du tube du bras r_{tube} et de l'organe terminal r_{ot}).

Pour trouver l'expression mathématique de ce cas de collision, la position de l'organe terminal est calculée dans le repère 3 (recentrée par rapport au repère 3 défini par DH avec le vecteur \mathbf{c}). Finalement, pour prendre en compte la présence de la pince, le paramètre b_6 est remplacé par b_6^* (30,5 cm). Ainsi :

$$[\mathbf{p}]_3 = \begin{bmatrix} p_{3x} \\ p_{3y} \\ p_{3z} \end{bmatrix} = \mathbf{c} + \mathbf{a}_3 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{a}_4 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{a}_5 + \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5 \mathbf{a}_6 \quad (2.39)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.11 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_3 c_3 \\ a_3 s_3 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -s_{34} b_5 \\ c_{34} b_5 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_{34} s_5 (b_6^*) \\ -s_{34} s_5 (b_6^*) \\ c_5 (b_6^*) \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Avec cette information, il est possible d'affirmer qu'une collision se produit lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

$$r_{tube} + r_{ot} \geq \sqrt{p_{3y}^2 + p_{3z}^2} \quad (2.41)$$

$$r_{mot} \geq x_3. \quad (2.42)$$

2.2 Méthodes d'évitement des singularités

Une singularité représente pour un robot sériel une configuration dans laquelle il est impossible de générer une vitesse dans une ou plusieurs directions cartésiennes. L'effet pratique d'une telle configuration est de bloquer tout mouvement linéaire du robot ou bien de le faire violemment osciller. De plus, si pour générer la trajectoire du robot la méthode d'estimation numérique du PGI avec le calcul de \mathbf{J}^{-1} est utilisée, la solution générée à l'approche des singularités se détériore (le déterminant de \mathbf{J} tend alors vers zéro et plusieurs des termes de \mathbf{J}^{-1} tendent vers l'infini). Cette technique étant utilisée pour générer des trajectoires linéaires (voir 2.3.3, une méthode de contournement des configurations singulières du robot est souhaitée).

Une brève revue de littérature permet de distinguer trois stratégies pour solutionner ce problème. La première, proposée par Choi et collab. [12] et Ha et Lee [22], est de « sacrifier » momentanément le contrôle d'un degré de liberté du robot pour l'utiliser

comme un manipulateur redondant. Ces articles proposent alors d’optimiser la trajectoire de ce dernier en minimisant la norme infinie du vecteur des vitesses articulaires du robot ($\min \|\dot{\boldsymbol{\theta}}\|_\infty$).

Une autre méthode fréquemment suggérée est « d’amortir » \mathbf{J} en modifiant ses valeurs propres, la valeur des facteurs d’amortissement variant d’article en article. Par exemple, Buss [11] amortit plus sévèrement les articulations dont le mouvement produit un déplacement en direction opposée de celui désiré (en oscillant par exemple). Phuoc et collab. [45] ajustent quant à eux les facteurs avec un algorithme génétique pour produire la trajectoire la plus lisse possible. Finalement, Sugihara [56] amortit les articulations bougeant plus rapidement que les autres pour réduire les oscillations.

La dernière méthode explorée proposée par Choi et collab. [12] et Phoc et collab. [45] est de combiner plusieurs solutions à ce problème. Par exemple, à l’approche d’une singularité, il peut être bénéfique de progressivement passer d’une solution de manipulateur redondant (généralement plus rapide que les autres méthodes mais instable près des singularités) à une solution amortie.

Dans le cadre de ces travaux, la méthode proposée par Sugihara [56] est utilisée, cette dernière étant simple d’implémentation, rapide à calculer et produisant des mouvements stables près des singularités. La section qui suit détaille brièvement le principe derrière cette méthode.

2.2.1 Jacobienne amortie sélectivement avec biais

La méthode de pseudo-inverse amortie d’une matrice minimisant la norme euclidienne de la solution (*Damped Least Squares*), ou méthode de Levenberg-Marquardt, est une technique d’inversion de matrice donnant des résultats très semblables à la pseudo-inverse « classique » de Moore-Penrose tout en étant plus robuste face aux singularités. L’expression de cette pseudo-inverse amortie est :

$$\mathbf{J}^I = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda\mathbf{1})^{-1} \quad (2.43)$$

où λ est un facteur d’amortissement choisi de manière à assurer la stabilité du système sans trop affecter ses performances.

Une façon de voir concrètement l'effet du facteur d'amortissement tirée d'un article de Buss [11] est de faire la décomposition en valeurs singulières de la matrice $\mathbf{J}_{m \times n}$:

$$\mathbf{J} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^m \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (2.44)$$

où $\mathbf{\Sigma}$ est une matrice diagonale dont les éléments σ_i sont les valeurs singulières de la matrice classées en ordre décroissant ($\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$) et où les vecteurs propres de la matrice \mathbf{u}_i et \mathbf{v}_i (associés à une valeur propre σ_i) sont les colonnes des matrices \mathbf{U} et \mathbf{V} respectivement.

En introduisant l'équation (2.44) dans l'équation (2.43), cette dernière prend la forme de :

$$\mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda \mathbf{1})^{-1} = \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T. \quad (2.45)$$

L'effet du facteur d'amortissement λ est alors clair. Sans λ , le système devient instable près d'une singularité car $\sigma_m \rightarrow 0$ et donc $\sigma_m/\sigma_m^2 \rightarrow \infty$. Dans la même situation avec λ , le système reste stable car l'effet de la plus petite valeur propre est négligé : $\sigma_m/(\sigma_m^2 + \lambda) \rightarrow 0$.

Une méthode simple pour trouver des facteurs d'amortissement λ s'ajustant à la configuration du robot est celle proposée par Sugihara [56]. L'amortissement \mathbf{W}_N des articulations grandit en fonction de leurs vitesses (comportement pessimiste) tout en conservant un certain biais pour s'assurer de la robustesse de la méthode à basse vitesse. La pseudo-inverse de \mathbf{J} prend alors la forme de :

$$\mathbf{J}^I = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \mathbf{W}_N)^{-1} \quad (2.46)$$

$$\mathbf{W}_N = E_k \mathbf{1} + \overline{\mathbf{W}}_N \quad (2.47)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \dot{\mathbf{x}} \quad (2.48)$$

$$\overline{\mathbf{W}}_N = \text{diag}(\overline{w}_N) \quad (2.49)$$

où $\dot{\mathbf{x}}$ est le vecteur de la vitesse du robot dans les différentes directions cartésiennes et $\overline{\mathbf{W}}_N$ est une matrice diagonale contenant les facteurs d'amortissement de base de chaque articulation (toujours positifs).

2.3 Envoi de commandes au robot

Le UR5 utilisé dans le cadre de ces travaux est un robot commercial principalement destiné à l'industrie légère. Dans cette optique, l'interface de contrôle fournie par le fabricant de ce dernier a été conçue pour rendre le robot simple d'utilisation pour un opérateur non entraîné. Elle rend également le robot complètement autonome, n'ayant pas à communiquer avec un ordinateur externe pour fonctionner. La programmation des mouvements du robot est faite en plaçant ce dernier dans les configurations intermédiaires de la trajectoire à apprendre pour que ces dernières puissent être enregistrées. Le type de mouvement à faire pour passer d'un point à l'autre (linéaire, articulaire, circulaire, etc.) est ensuite spécifié. Pour permettre au robot de réagir à son environnement, il est possible de brancher des capteurs simples comme des interrupteurs sur les entrées analogiques et numériques de son contrôleur et d'utiliser quelques fonctions conditionnelles de base. Une fois la programmation terminée, une trajectoire lisse reliant les points appris est automatiquement générée ; sans intervention humaine, cette dernière est ensuite exécutée en boucle à l'infini. Il est impossible avec cette interface d'utiliser des capteurs complexes comme une caméra 3D et il est difficile d'implémenter des programmes complexes.

Le but de ces travaux étant de programmer un robot pour qu'il prenne de manière autonome des objets dans son espace de travail, le programme fourni par le fabricant est laissé de côté. Au lieu de tout faire sur le robot, un ordinateur externe recevant l'information des divers capteurs et planifiant les trajectoires du robot est utilisé. Pour envoyer des commandes de cet ordinateur au robot et recevoir de l'information sur son état, le paquet ROS d'Universal Robots [3][51] est utilisé. Ce dernier fonctionne en envoyant au robot un vecteur détaillant la position angulaire à atteindre en un temps donné pour chacune de ses articulations. Ayant reçu cette information, le robot compose alors lui-même une trajectoire articulaire pour se rendre à ce point dans le temps prescrit ; la poursuite des consignes alors envoyées aux différents moteurs du robot est complètement gérée par ce dernier.

Le contrôleur du robot fonctionnant à 125 Hz, les trajectoires générées par ce dernier pour le déplacer vers de nouvelles positions sont décomposées en configurations à atteindre à chaque 0.008 s. Cette fréquence est effectivement la fréquence maximale d'envoi de commande d'un ordinateur externe au robot, le contrôleur ne prenant en

compte que la dernière commande envoyée durant sa période de contrôle de 0.008 s pour planifier son prochain mouvement. Toutefois, la fréquence de commande maximale atteignable avec le paquet ROS varie selon plusieurs facteurs ; les principaux sont la puissance de calcul de l'ordinateur externe, le type de connexion utilisé pour relier l'ordinateur au robot et le format du message de commande envoyé au robot (voir le rapport technique d'Andersen [2]). Ainsi, à la suite d'expérimentations, la fréquence de commande est limitée à 25 Hz afin de s'assurer d'un flux de commandes stable. Finalement, il est à noter que la fréquence d'envoi ici abordée est un maximum ; en pratique, plusieurs types de trajectoires ne demandent que l'envoi d'une unique commande au tout début d'un mouvement d'une durée de plusieurs secondes.

De base, le paquet ROS ne permet que de générer des trajectoires articulaires pour se rendre à une position articulaire donnée (position du robot décrite seulement par l'angle de ses articulations). La durée du mouvement pour déplacer le robot dans cette configuration est choisie arbitrairement par l'utilisateur. La première des sous-sections ci-dessous décrit la méthode employée pour utiliser une position cartésienne \mathbf{T} pour générer le même type de trajectoires. La sous-section suivante décrit quant à elle une manière de calculer le temps minimal nécessaire pour effectuer ces trajectoires tout en respectant les limites des moteurs articulaires du robot. Finalement, la dernière sous-section détaille comment créer des trajectoires droites dans dans l'espace cartésien (appelées trajectoires linéaires) permettant d'effectuer des mouvements précis.

2.3.1 De coordonnées cartésiennes \mathbf{T} à articulaires $\boldsymbol{\theta}$

L'humain percevant le monde comme un espace cartésien à 6 dimensions, il est souvent plus commode de construire des trajectoires à l'aide de coordonnées cartésiennes (exprimée par une matrice homogène \mathbf{T}) à atteindre par le robot. Malheureusement, le UR5 ne peut être commandé au travers de ROS qu'en lui envoyant la liste $\boldsymbol{\theta}$ des positions angulaires à atteindre par chacune de ses articulations. Pour traduire une position cartésienne en positions articulaires, il existe typiquement deux techniques : trouver une solution approximative avec \mathbf{J}^{-1} ou une solution exacte choisie parmi la série obtenue en résolvant le problème géométrique inverse (PGI) du robot. L'utilisation de la première technique pouvant être problématique (seulement une solution proposée, problème près des singularités) et le PGI analytique du robot étant résolu, c'est cette

dernière technique qui est privilégiée.

Pour une position cartésienne \mathbf{T} donnée, le PGI du UR5 peut générer jusqu'à 8 solutions distinctes. Pour choisir laquelle sera utilisée pour générer la trajectoire, ces solutions sont filtrées pour retirer celles causant des collisions puis classées en fonction du temps de trajet nécessaire pour se rendre aux positions articulaires suggérées.

L'opération de filtrage des solutions est relativement simple. Pour chaque solution destinée à une trajectoire articulaire, une trajectoire grossière est générée en créant 5 configurations intermédiaires entre le point de départ et d'arrivée par interpolation linéaire entre les positions attendues des moteurs. Si une configuration intermédiaire indique que le robot entre en collision avec le sol, un obstacle ou lui-même (les singularités n'ont pas d'effet sur les trajectoires articulaires), la solution l'ayant générée est retirée. La génération de trajectoire linéaires est un peu différente : la trajectoire est générée comme étant une succession de points intermédiaires disposés sur une droite cartésienne et les configurations du robot sont estimées grâce à une solution numérique du PGI (utilisant \mathbf{J}^{-1}). Dans ce cas, les singularités sont évitées grâce à la technique décrite à la section 2.2 pouvant légèrement modifier la trajectoire désirée ; la présence d'auto-collision est vérifiée mais n'affecte pas la génération de trajectoire.

Après l'opération de filtrage, toutes les solutions restantes sont valides. Pour choisir parmi ces dernières, celle minimisant le temps de trajet du robot est privilégiée. Comme les moteurs du UR5 ont tous les mêmes limites de vitesse angulaires (3,2 rad/s) et d'accélération (25 rad/s²), cette tâche consiste donc à trouver la solution où la distance maximale parcourue par une articulation du robot est la plus petite, soit $\min \|\boldsymbol{\theta}_i\|_\infty$.

Toutes les solutions produites par le PGI du robot sont comprises entre 0 et 2π . Afin de minimiser le temps de trajet du robot, ces solutions sont adaptées à sa position actuelle en ajoutant ou retirant 2π à leur valeur. Les limites articulaires de $[+2\pi, -2\pi]$ sont toutefois à prendre en compte. Ainsi, pour passer de 359° à 1° , une articulation doit faire un trajet de 358° , la position 361° créant un trajet de 2° étant impossible.

2.3.2 Trajectoire articulaire optimale

La commande de base du robot est une trajectoire articulaire continue entre les positions articulaires θ_i et θ_f d'une durée choisie par l'utilisateur. Afin de retirer cette part d'arbitraire, d'accélérer le mouvement et de s'assurer du respect des limites des moteurs, une trajectoire continue d'ordre 2 pour relier ces deux mêmes points est plutôt privilégiée pour générer les trajectoires articulaires. Le détail de cette méthode peut être consulté dans un article de Gosselin et Hadj-Messaoud[18].

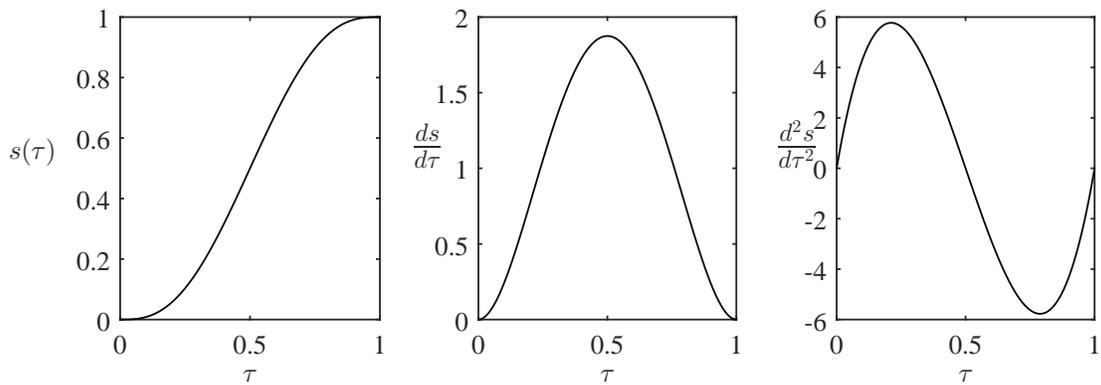


FIGURE 2.10 – Trajectoire polynomiale de degré 5 et ses dérivées. τ représente le ratio du temps écoulé par rapport à la durée totale du mouvement et s représente le ratio de la distance parcourue sur la distance totale de la trajectoire.

Grossièrement, la position d'une articulation au cours du temps d'une trajectoire continue d'ordre 2 est décrite par un polynôme de degré 5 (illustré à la figure 2.10). Cela permet à toutes les articulations de faire un mouvement où les profils dans le temps de la position θ , de la vitesse $\dot{\theta}$ et de l'accélération $\ddot{\theta}$ sont continus. La vitesse et l'accélération maximale des différentes articulations sont les facteurs déterminants du temps de trajet. Ainsi, si le trajet est suffisamment long, au moins un des moteurs du robot accélère au maximum pour atteindre sa vitesse maximale ; autrement, l'accélération maximale est le facteur limitant. Le temps de trajet global correspond au plus long des temps des trajets des moteurs ; pendant le mouvement, ce moteur fonctionne à plein régime en au moins un point de la trajectoire alors que les autres sont au ralenti.

2.3.3 Trajectoire linéaire

Pour les tâches demandant un mouvement du robot précis dans l'espace cartésien (manipulation d'objets, assemblage, etc.), il est nécessaire d'utiliser des trajectoires qui y garantissent la précision du mouvement. Les trajectoires articulaires décrites précédemment ne répondent pas à ce critère, ne garantissant la position cartésienne qu'au point de départ et d'arrivée. Des trajectoires linéaires dans l'espace cartésien sont donc privilégiées pour ce type de tâche. Pour générer une trajectoire droite, la technique employée consiste à faire atteindre par le robot une série de points intermédiaires placés sur une droite entre les points de départ et d'arrivée. La trajectoire ainsi faite est approximativement droite, le robot suivant une trajectoire articulaire entre chaque point intermédiaire ; plus ces points sont rapprochés, plus le mouvement réel approxime un mouvement linéaire.

La distance entre les points est déterminée par deux facteurs : la vitesse cartésienne du robot imposée par l'utilisateur et le rythme d'envoi des commandes au robot. Pour des raisons de robustesse du calcul de la solution, chaque point intermédiaire est généré grâce à la méthode expliquée à la sous-section 2.3.1 .

Finalement, cette méthode a un inconvénient majeur : la vitesse cartésienne du mouvement est arbitraire. Cela implique la possibilité de dépasser les limites de vitesse et d'accélération des articulations du robot si ce dernier se trouve dans une mauvaise configuration et que la vitesse cartésienne demandée est trop grande. Par extension, l'ajout d'une marge de sécurité pour éviter ce phénomène implique que le mouvement est souvent plus lent qu'il ne pourrait l'être.

2.4 Conclusion

Afin de faire interagir le robot UR5 utilisé avec les autres composantes du montage expérimental, il fut nécessaire d'employer le paquet ROS d'Universal Robots. Cependant, ce dernier ne permet que d'envoyer des commandes de positions articulaires à atteindre par le robot en un temps arbitraire donné. Afin de pouvoir facilement commander des trajectoires plus complexe au robot, il fut nécessaire de créer de toute pièce un générateur de trajectoire lui étant adapté.

La première partie du chapitre présentait une étude de la cinématique du robot UR5. Premièrement, la géométrie du robot fut décrite à l'aide des paramètres de Denavit-Hartenberg. Ensuite, le problème géométrique direct (PGD) permettant de trouver la position cartésienne de l'organe terminal du robot à partir des angles de ses articulations fut résolu. L'expression analytique des 8 configurations possibles du robot permettant de placer son organe terminal en une position et orientation cartésienne donnée fut ensuite trouvée grâce à la résolution de son problème géométrique inverse (PGI). Finalement, les configurations qu'il devrait être impossible d'atteindre par le robot ont été étudiées : les singularités du robot et les configurations causant des auto-collisions.

La deuxième partie du chapitre a premièrement présenté un bref survol de littérature des méthodes d'évitement de singularité. La méthode retenue, celle de Sugihara [56], a ensuite été présentée en plus de détail.

Finalement, la troisième partie du chapitre s'est intéressée à différentes méthodes de génération de trajectoire. Premièrement, un moyen de transformer une coordonnée cartésienne à atteindre par l'organe terminal en configuration de robot fut présentée. Ensuite, un moyen pour calculer le temps minimal requis pour effectuer une trajectoire articulaire fut décrite. Finalement, le moyen utilisé pour générer des trajectoires linéaires dans l'espace cartésien fut exposé.

Chapitre 3

Prise d'objets par le dessus

La prise d'un objet par le dessus est un mouvement efficace, polyvalent, posant peu de risques de collision avec l'environnement et rapide comparativement à des mouvements de prise plus complexes. Pour un roboticien, il s'agit également d'un mouvement simple à mettre en oeuvre. Dans le cadre de ce chapitre, les différentes opérations nécessaires pour planifier la prise par le dessus d'un objet sont présentées. La première section porte sur le choix d'un point de prise à partir du contour de l'objet vu de dessus. La section suivante présente le mouvement d'approche et de prise de l'objet. Finalement, une technique permettant de qualifier une prise de succès ou d'échec en utilisant seulement le niveau d'ouverture de la pince est présentée à la dernière section.

3.1 Choix du point de prise de l'objet

La première étape dans le processus de prise par le dessus d'un objet est de déterminer où la pince utilisée doit se refermer sur l'objet afin d'assurer une prise stable. Ce choix repose sur plusieurs facteurs, illustrés à la figure 1.1 du chapitre 1 ; tous les facteurs sur cette figures sont connus à partir de l'information contenue dans ce chapitre. La mise en contexte du chapitre 1 présente également une variété de techniques de prises par-dessus trouvées dans la littérature.

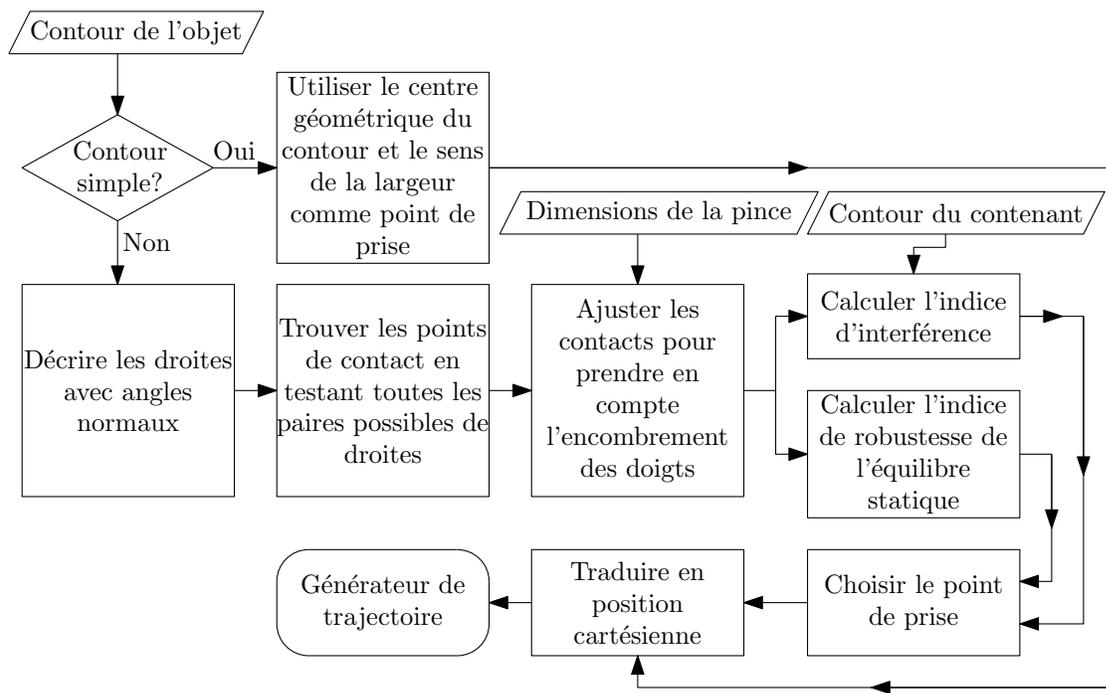


FIGURE 3.1 – Algorithme de génération du point de prise par le dessus d'un objet.

La méthode utilisée dans ces travaux pour choisir un point de prise est illustrée à la figure 3.1 ; ses différentes étapes sont détaillées aux sous-sections suivantes. Cette heuristique peut être décomposée en quatre parties. La première partie consiste à déterminer si le contour est simple ; si oui, la majeure partie de l'algorithme peut être ignorée en choisissant un point de prise au centre de l'objet. Si l'objet est complexe, la seconde étape consiste à générer plusieurs hypothèses de prise sur son contour à l'aide d'une heuristique inspirée de celle de Bone [8]. Pour choisir la meilleure hypothèse, deux indices analytiques sont combinés : l'indice de robustesse de l'équilibre statique [21] et l'indice d'interférence de l'environnement. La dernière étape consiste à transformer l'expression du point de prise sélectionné en point cartésien \mathbf{T} compatible avec le générateur de trajectoires du robot.

3.1.1 Déterminer si le contour de l'objet est simple

La première étape de l'algorithme servant à décider où exactement prendre un objet consiste à déterminer si le contour de ce dernier est simple. En effet, si le contour est simple, l'objet est promptement pris par son milieu. Autrement, le reste de l'algorithme décrit à la figure 3.1 est utilisé pour choisir un point de prise. Les critères utilisés pour qualifier la simplicité d'un contour sont eux-mêmes simples : il s'agit de savoir si l'objet vu de dessus est rectangulaire ou bien s'il est si petit que le point de prise importe peu sur les chances de succès de la prise. Si une de ces deux conditions est remplie, le contour de l'objet est déclaré simple.

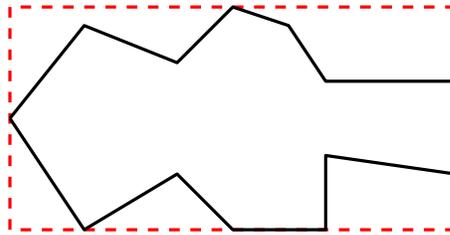


FIGURE 3.2 – Rectangle englobant (en pointillé) d'un contour.

Le premier critère consiste à déterminer si le contour de l'objet est presque un rectangle (il est peu probable en réalité de produire un rectangle parfait avec le système de vision). Pour ce faire, le rectangle englobant du contour (illustré à la figure 3.2) est dressé et son aire est comparée à celle du contour (la procédure pour construire un rectangle englobant est détaillée ci-dessous à la section 3.1.1.1). Si les deux aires sont suffisamment semblables (moins de 5 % de différence dans la mise en oeuvre proposée), le contour est déclaré rectangulaire et est donc simple.

Le deuxième critère pouvant déclarer le contour d'un objet simple est sa taille. En effet, si les côtés du rectangle englobant de l'objet sont plus courts que la largeur des doigts du préhenseur (ici 4 cm), la position du point de prise importe peu sur ses chances de succès. Un tel petit objet est alors déclaré simple.

Si un contour est déclaré simple, le point de prise est automatiquement choisi comme étant le centre géométrique de la pièce. L'orientation de la pince correspond alors au sens de la largeur de la pièce. La position du centre de l'objet est une information fournie par le système de vision au même moment que son contour. Pour ce qui est de la direction de la largeur de l'objet, cette information est obtenue lors de la construction

du rectangle englobant autour de son contour. L'étape suivante consiste à transformer ces information en une matrice \mathbf{T} compréhensible par le générateur de trajectoire, processus décrit à la section 3.1.8.

Finalement, si le contour de l'objet est déclaré comme étant complexe, le calcul du point de prise devient lui-même plus complexe. Les différentes étapes pour ce faire sont décrites dans les sections suivantes.

3.1.1.1 Construction d'un rectangle englobant

La première étape pour construire le rectangle englobant d'aire minimale autour d'un contour consiste à déterminer la direction principale de l'objet. Pour déterminer cette dernière, les n données 2D du contour sont organisées en une matrice \mathbf{M} . La matrice de covariance de cette matrice est ensuite calculée puis décomposée en valeur singulière (*SVD*) :

$$\text{Var}(\mathbf{M}_{(2 \times n)}) = \mathbf{W}_{(2 \times 2)} \boldsymbol{\sigma}_{(2 \times 1)} \quad (3.1)$$

où le vecteur $\boldsymbol{\sigma}$ contient les valeurs propres classées en ordre décroissant et où la matrice \mathbf{W} représente les directions unitaires associées à ces valeurs propres. La première colonne de \mathbf{W} représente donc la direction principale du rectangle ; en posant $w_{(i,j)}$ comme l'élément (i,j) de \mathbf{W} , il est possible de traduire cette colonne en un angle β :

$$\beta = \text{atan2}(w_{(2,1)}, w_{(1,1)}) . \quad (3.2)$$

Pour trouver les dimensions du rectangle englobant, les points extrêmes du contour dans sa direction principale (la longueur) et dans la direction perpendiculaire à cette direction (la largeur) sont trouvés. Pour ce faire, les coordonnées des sommets sont tournées grâce à la matrice \mathbf{Q} de manière à faire correspondre la direction principale du contour à l'axe des x . Le produit de cette opération est la matrice \mathbf{M}_o :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{M}_o = \mathbf{QM}. \quad (3.4)$$

En utilisant les coordonnées contenues dans \mathbf{M}_o , la longueur du rectangle correspond à $(x_{max} - x_{min})$ et sa largeur à $(y_{max} - y_{min})$.

3.1.2 Description du contour de l'objet avec des segments de droite et leurs normales

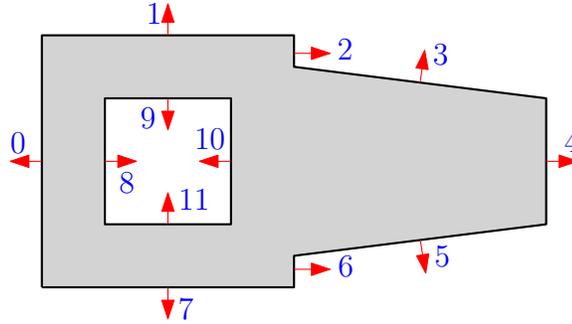


FIGURE 3.3 – Description des segments de droite du contour d'un objet par leur vecteur normal.

La première étape dans le processus de génération de points de prise pour les objets aux contours complexes consiste à décrire les différents segments de droite du contour de l'objet grâce à des vecteurs normaux pointant vers l'extérieur de ses surfaces solides (opération illustrée à la figure 3.3. Pour ce faire, les sommets du contour (dont les coordonnées sont notées $[x_i, y_i]$) sont d'abord ordonnés en sens horaire. Les angles normaux des droites sont ensuite calculés avec l'une des deux équations suivantes :

$$\psi_i = \text{atan2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) + \pi/2 \quad (\text{surface pleine}) \quad (3.5)$$

$$\psi_i = \text{atan2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) - \pi/2 \quad (\text{trou}). \quad (3.6)$$

3.1.3 Génération de points de prise sur surfaces parallèles

L'étape suivante consiste à générer des paires de points de contact physiquement réalisables sur la surface de l'objet. Plusieurs méthodes pour ce faire existent, allant d'approches « force brute » quadrillant systématiquement l'objet à des analyses fines du contour de l'objet. La méthode retenue, illustrée à la figure 3.4, consiste à générer des hypothèses de prise entre les droites parallèles du contour de l'objet. Ce choix de méthode a été motivé par l'évaluation des hypothèses de prises à l'aide de l'indice de robustesse de l'équilibre statique (discuté à la section 3.1.6). D'après cet indice, les meilleures hypothèses sont presque toujours perpendiculaires à deux surfaces parallèles.

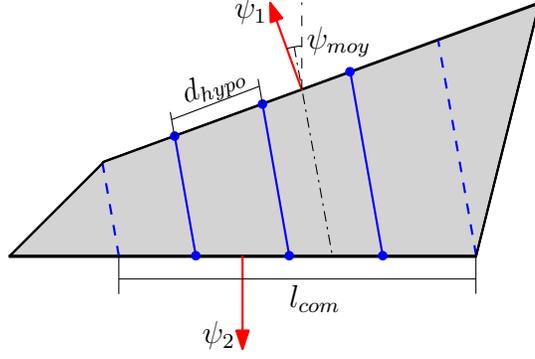


FIGURE 3.4 – Construction d’hypothèses de prise entre surfaces parallèles.

La première étape consiste à identifier les surfaces de l’objet étant presque parallèles entre elles et se faisant face. Pour ce faire, chaque paire de segments de droite possible est testée pour identifier celles répondant aux critères suivants (illustrés à la figure 3.4) :

- Des normales de surfaces ψ de sens opposé
- Une différence d’angles de pente inférieure à l’angle du cône de friction de la pince
- Une distance entre les surfaces inférieure à l’ouverture maximale de la pince
- Une surface partagée suffisamment grande pour accommoder la largeur d’un doigt de la pince (délimitée par les pointillés sur la figure 3.4)

Une fois que les paires de droites répondant à ces critères sont identifiées, les segments se faisant face sont recherchés. Pour ce faire, les droites sont projetées l’une sur l’autre et seuls les segments communs aux deux droites sont conservés. Comme les angles des deux droites peuvent différer, l’angle de projection ψ_{moy} utilisé est la moyenne des angles des deux segments de droite :

$$\psi_{moy} = \psi_1 + \frac{1}{2}((\psi_2 + \pi) - \psi_1) \quad (3.7)$$

où le résultat à chaque étape du calcul est maintenu entre 0 et 2π .

L’angle ψ_{moy} est également l’angle des hypothèses de prise générées entre les segments communs des deux droites. Une hypothèse de prise représente une paire de points de contact : un sur chaque segment de droite. Le nombre maximal d’hypothèse générés sur une paire de segments de droite N_{hypo} dépend de la longueur du segment partagé l_{com} et de la distance entre les hypothèses spécifiée par l’utilisateur d_{hypo} :

$$N_{hypo} = \left\lfloor \frac{l_{com}}{d_{hypo}} \right\rfloor. \quad (3.8)$$

Finalement, pour qu'une hypothèse soit jugée valide, il faut que la distance entre les deux points de contacts soit inférieure à l'ouverture maximale du préhenseur.

3.1.4 Prise en compte de l'encombrement des doigts

Les hypothèses de prise obtenues à la section précédente ne prennent pas en compte les dimensions physiques des doigts de la pince se refermant sur l'objet. Ce faisant, il arrive parfois que ces derniers entrent en contact avec l'objet avant d'arriver aux points de contact définis par l'hypothèse de prise testée, phénomène illustré à la figure 3.5. Pour prendre en compte ce phénomène, la position attendue des points de contact des hypothèses doit être ajustée. Le respect de la distance maximale entre les points de contact (l'ouverture maximale de la pince) est ensuite validé à partir des données ajustées.

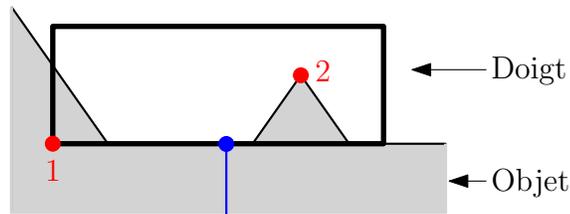


FIGURE 3.5 – Cas possibles d'interférence au point de contact entre le doigt et l'objet. Le trait vertical du centre représente l'hypothèse de prise que le doigt tente d'atteindre.

D'après la figure 3.5, il existe deux catégories d'interférence entre un doigt et la surface de l'objet. La première catégorie, illustrée par le point 1 sur cette figure, se produit lorsqu'un coin du contour du doigt se retrouve contenu dans le profil de l'objet. La deuxième catégorie, représentée par le point 2, se produit quant à elle lorsqu'un sommet du contour de l'objet est contenu dans le doigt.

Pour ajuster la position des doigts, une procédure simple (figure 3.6) est utilisée : si le doigt est en interférence avec l'objet, il est reculé d'une petite distance jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de contact. Une fois la position des deux doigts ajustée, l'hypothèse est jugée valide si la distance entre eux est toujours inférieure à l'ouverture maximale de la pince.

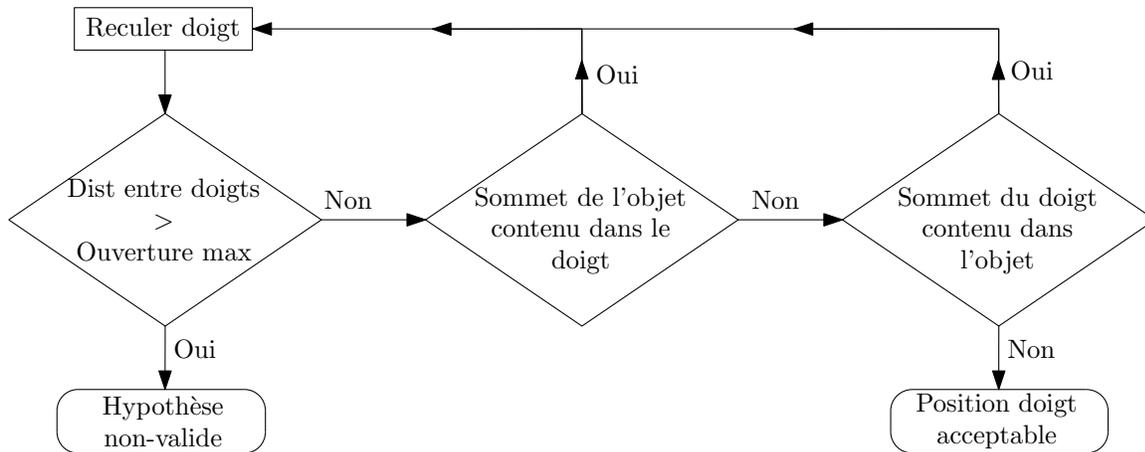


FIGURE 3.6 – Algorithme d’ajustement de la position d’un doigt pour éviter l’interférence avec l’objet.

Finalement, voici comment une hypothèse de prise est traduite en position de doigts sur l’objet. Pour une prise par le dessus, le profil d’un doigt vu de haut est approximé par un rectangle de 4 cm de largeur et de 2 cm d’épaisseur. Les côtés larges des doigts sont toujours perpendiculaires à la droite entre les deux points de contact sur l’objet ; les points de contact sont au centre des côtés larges en contact avec l’objet.

3.1.5 Calcul de l’indice d’interférence

Les hypothèses de prises calculées jusqu’à maintenant ne prennent en compte que la géométrie de l’objet pour établir les points de contact sur ce dernier. Pour améliorer le choix du point de saisie, l’environnement autour de la pièce (son contenant, les autres pièces, etc.) est à considérer. Naturellement, une bonne prise en est une où les doigts de la pince n’entrent pas en collision avec l’environnement. Il arrive cependant qu’un tel contact soit inévitable ; le point de prise minimisant l’effet négatif de l’environnement sur la qualité de prise sera alors privilégié. Pour quantifier numériquement cet effet, l’indice d’interférence détaillé ci-dessous est employé.

L’indice d’interférence de l’environnement s_{inter} est basé sur la figure 3.7. Sur cette figure, le point de prise choisi cause des interférences entre les doigts de la pince, le contenant de la pièce et une autre pièce. Pour quantifier l’influence de l’environnement sur un doigt, le ratio de l’aire du profil de ce doigt libre d’interférence (A_{libre}) par

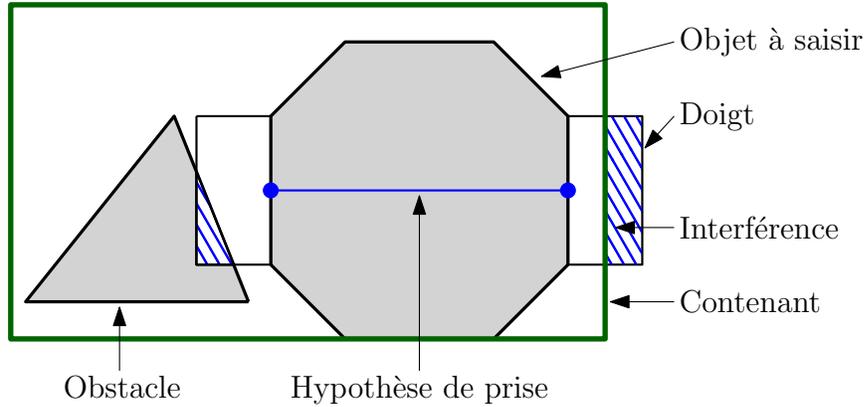


FIGURE 3.7 – Interférences au point de prise d’un objet entre les doigts de la pince, un autre objet et le contenant des objets.

rapport à son aire totale (A_{total}) est calculé. L’indice d’interférence d’une hypothèse de prise est simplement le pourcentage du doigt subissant le plus d’interférence, ce qui est conservateur. Ainsi :

$$s_{inter} = \min(A_{libre}/A_{total}). \quad (3.9)$$

3.1.6 Calcul de l’indice de robustesse de l’équilibre statique

Si l’objet à prendre est libre de toute contrainte externe et qu’il peut être pris d’une manière quelconque (aucune tâche n’est à effectuer avec ce dernier), le point de prise choisi est naturellement celui où l’objet est le plus solidement agrippé (peu de chance de bouger ou d’être échappé). Plusieurs indices de performance existent dans la littérature pour quantifier cet objectif ; deux exemples classiques sont la manipulabilité [62] et la dextérité [52]. Celui utilisé dans le cadre de ce mémoire est l’indice de robustesse de l’équilibre statique [21] (cette appellation est raccourcie dans le reste du texte comme étant l’indice de robustesse ou par la variable s_{robu}).

Cet indice représente la force de perturbation minimale nécessaire pour qu’un objet soumis à des efforts extérieurs mais contraint par des forces le maintenant en place ne soit pas à l’équilibre. Pour déterminer cette valeur, le polytope des forces maximales de maintien de l’objet est projeté dans l’espace à 6 dimensions des forces extérieures applicables sur l’objet. L’indice est la distance minimale entre ces deux enveloppes de force. Il est positif si le polytope des forces externes est contenu dans l’enveloppe

projetée des forces de maintien (donc que l'objet est en équilibre statique) ; il est négatif autrement. Plus la valeur de l'indice est élevée, plus la force de perturbation admissible est grande et donc plus l'équilibre statique de la pièce est robuste.

Lors d'une prise par le dessus, les forces de maintien comprennent les forces normales appliquées sur l'objet par la fermeture de la pince (220 N au maximum) ainsi que les forces et moments de frictions générés par ce contact (un coefficient de friction de 0,4 est assumé). Les forces de maintien agissent donc en 6 dimensions. Les forces de perturbations sont composées du poids de l'objet ainsi que de moments générés en supposant une mauvaise lecture de la position du centre de masse de l'objet de 10 %. Pour simplifier l'utilisation de cet indice dans l'algorithme, la masse de l'objet est assumée être de 1 kg, n'étant pas mesurée ou estimée. Comme la plupart des objets testés sont plus légers, les indices produits dans le cadre de ces travaux sont donc presque toujours pessimistes.

Cet indice est utilisé dans le cadre de cet algorithme afin d'évaluer la probabilité qu'une hypothèse de prise donnée permette de prendre l'objet en équilibre statique. Dans cette optique, plus l'indice est élevé, plus le niveau de confiance est grand. La mise en oeuvre du calcul de l'indice de robustesse de l'équilibre statique est le fruit des travaux de Bruno Sauvet.

3.1.7 Choix du point de prise

Ultimement, le but du générateur d'hypothèses de prise est de déterminer le meilleur point de prise d'un objet donné. Il existe cependant plusieurs définitions de ce qu'est une bonne prise, fait illustré par les sections sur l'indice d'interférence de l'environnement s_{inter} et de robustesse de l'équilibre statique s_{robu} . Pour réconcilier les recommandations de ces différents indices et sélectionner une prise polyvalente, les deux mécanismes illustrés à la figure 3.8b sont utilisés. Le premier est l'utilisation de seuils minimaux de performance. Le second est la combinaison des deux indices pour générer un score global (représenté sur la figure par une modification du score de robustesse). La prise finalement sélectionnée est celle dont le score global est le plus élevé.

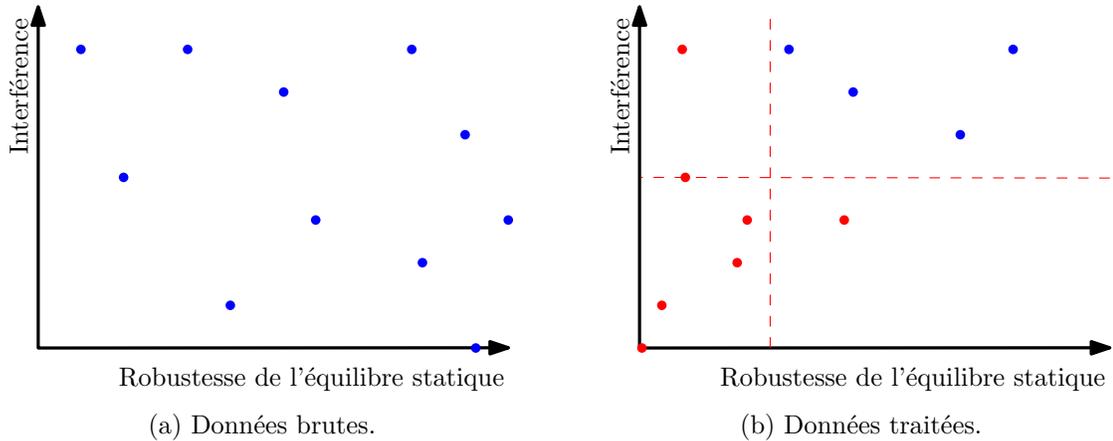


FIGURE 3.8 – Mesure de la qualité de différentes hypothèses de prise selon les indices de la robustesse de l'équilibre statique et de l'interférence de l'encombrement.

Les valeurs des seuils minimum sont déterminées empiriquement. Le seuil de la valeur de l'indice d'interférence est établi à 0,5, soit une situation où la moitié de l'aire d'un doigt de la pince est en interférence avec l'environnement. Utilisé pour filtrer les hypothèses de prise avant le calcul des indices de robustesse de l'équilibre statique, ce seuil permet un gain de rapidité notable de l'algorithme, cette dernière opération étant la plus coûteuse en temps. La valeur minimale acceptable de l'indice de robustesse de l'équilibre statique est quant à elle de 0, ce qui correspond à une prise étant à peine à l'équilibre statique sous l'effet des forces externes s'appliquant sur l'objet.

Pour classer les hypothèses restantes, un score global s_g est constitué en combinant la valeur des deux indices. L'indice d'interférence étant normalisé entre 0 (doigt complètement obstrué) et 1 (doigt complètement libre), la fonction de combinaison utilisée est une simple multiplication :

$$s_g = s_{inter} \times s_{robu}. \quad (3.10)$$

Finalement, d'autres méthodes de mélange d'indices plus complexes peuvent être envisagées. En accumulant des données expérimentales, il serait peut-être possible de discerner une fonction représentant plus finement la démarcation entre les prises réussies et celles vouées à l'échec. Une telle fonction pourrait être approximée par un humain ou générée par apprentissage machine.

3.1.8 Traduction de l'hypothèse de prise en position cartésienne

Durant les étapes précédentes de l'algorithme, les hypothèses de prise étaient exprimées comme étant la position des points de contact des doigts sur l'objet dans le plan XY du repère de base du robot. Comme le générateur de trajectoire du robot n'utilise que des points cartésiens représentant la position et l'orientation de l'organe terminal du robot sans sa pince (\mathbf{T}_{prise}), une traduction de l'expression de l'hypothèse de prise choisie est nécessaire. Pour ce faire, trois valeurs, toutes exprimées dans le repère de la base du robot, sont à déterminer : la position $[x,y]$ de l'organe terminal du robot, sa hauteur z et finalement son orientation, représentée par la matrice \mathbf{Q} . Ces quantités sont regroupées dans une matrice homogène \mathbf{T}_{prise} qui s'écrit comme :

$$\mathbf{T}_{prise} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

où $\mathbf{p} = [x,y,z]^T$ et $\mathbf{0}$ désigne le vecteur nul à trois composantes.

Position sur le plan horizontal $[x,y]$ de l'organe terminal du robot

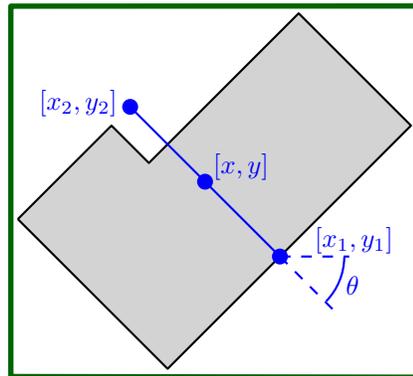


FIGURE 3.9 – Calcul de la position $[x,y]$ du centre de l'organe terminal à partir des positions des points de contact sur l'objet.

Les coordonnées de position horizontales $[x,y]$ de l'organe terminal du robot sont trouvées en calculant la position du point milieu des deux points de contact de l'hypothèse de prise à traduire (figure 3.9). Cette position permet aux doigts de la pince d'atteindre simultanément l'objet lors de sa fermeture et de minimiser l'effet d'erreurs

de positionnement du robot. Ainsi :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 + x_2)/2 \\ (y_1 + y_2)/2 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Ce calcul simple repose sur deux hypothèses importantes. La première est que la pince doit pointer vers le bas perpendiculairement au plan XY de la base du robot. La seconde est que que l'axe central de la pince (z_{pince}) coïncide avec l'axe central de l'organe terminal du robot (z_7). L'effet net de ces hypothèses est que la position $[x,y]$ du centre de la pince est équivalente à la position du centre de l'organe terminal.

Hauteur z de l'organe terminal du robot

La hauteur de l'organe terminal du robot z au point de prise de l'objet dépend des différentes variables illustrées à la figure 3.10 et décrites comme suit :

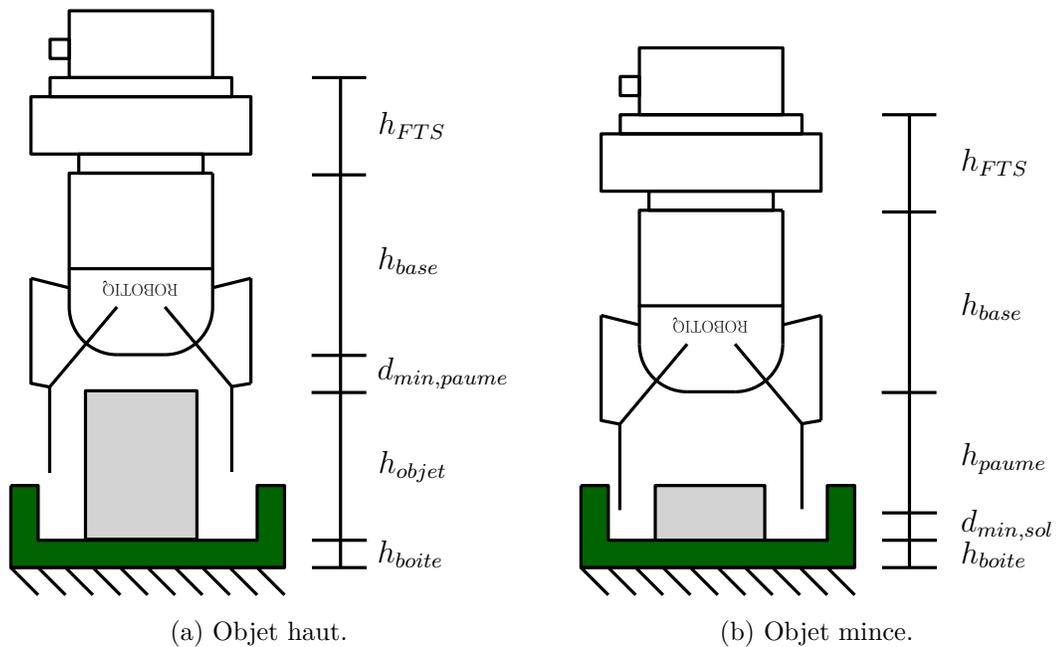


FIGURE 3.10 – Variables déterminant la hauteur z du point de prise d'un objet.

- h_{boite} : Distance entre le fond du contenant sur lequel repose l'objet et le plan XY de la base du robot.
- h_{objet} : Hauteur de l'objet au centre géométrique de son contour vu par le dessus.
- h_{paume} : Distance entre le bout des doigts de la pince en position ouverte et la paume de la pince.
- h_{base} : Distance entre la paume de la pince et sa base.
- h_{FTS} : Combinaison de la hauteur du capteur d'effort au poignet du robot et des plaques de couplage le maintenant en place.
- $d_{min,sol}$: Distance minimale entre le bout des doigts en position ouverte et le sol. Elle prend en compte l'extension maximale des doigts pendant la fermeture et une petite distance de sécurité.
- $d_{min,paume}$: Distance minimale entre le dessus de l'objet et la paume de la pince. Permet de maximiser l'aire de contact lors de la prise.

En fonction de sa hauteur, un objet peut être classé dans une de deux catégories : haut ou mince. Les objets hauts, représentés à la figure 3.10a, peuvent être pris de manière englobante par la pince. Un objet est classé dans cette catégorie si sa hauteur répond au critère suivant :

$$h_{objet} > d_{min,sol} + h_{paume} - d_{min,paume}. \quad (3.13)$$

La hauteur du point de prise pour ces objets hauts est déterminée comme suit :

$$z = h_{boite} + h_{objet} + d_{min,paume} + h_{base} + h_{FTS}. \quad (3.14)$$

En opposition, la seconde catégorie englobe les objets minces (figure 3.10b). La hauteur de ces derniers force l'extrémité des doigts de la pince à longer le fond du contenant pendant la prise. Pour les objets minces, la hauteur du point de prise est :

$$z = h_{boite} + d_{min,sol} + h_{paume} + h_{base} + h_{FTS}. \quad (3.15)$$

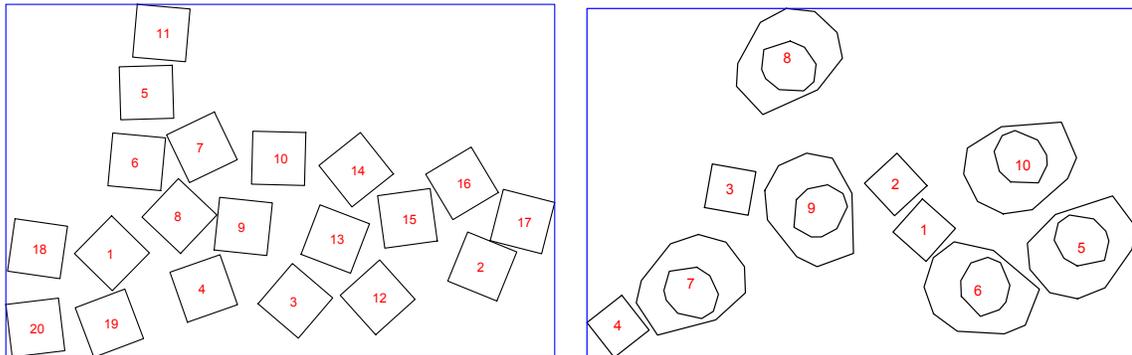
Matrice d'orientation Q de la pince

L'orientation de l'organe terminal du robot est le résultat de la combinaison de deux besoins : orienter la pince vers le bas perpendiculairement au plan XY de la base du robot et orienter la pince de l'angle ψ prescrit par l'hypothèse de prise (voir figure 3.9).

Afin de générer la matrice \mathbf{Q} demandée, ces besoins sont traduits en une série d'angles d'Euler de telle sorte que :

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \pi & 0 & \sin \pi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \pi & 0 & \cos \pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.2 Choix de l'objet à prendre



(a) 20 objets identiques.

(b) Deux types d'objets de hauteurs différentes (cercle = 3 cm et rectangles = 20 cm)

FIGURE 3.11 – Sélection de l'objet à prendre dans une scène encombrée générée aléatoirement. Les chiffres au centre des contours représentent l'ordre de prise des objets.

Si plusieurs objets sont présents dans l'espace de travail, la première étape du mouvement de prise consiste à choisir lequel de ces objets prendre. Pour choisir l'ordre dans lequel les objets sont à prendre, une combinaison de trois critères est utilisée. Ces derniers sont la hauteur de l'objet, le meilleur indice d'interférence des hypothèses de prise de l'objet et finalement le nombre d'objets environnants affectés par l'objet.

Lors de la prise d'un objet, les objets plus petits d'au moins la profondeur de la prise (la distance entre le bout des doigts de la pince et le dessus de l'objet lors de la prise, ici de 5 cm) ne peuvent pas causer de collision. Ce fait est utilisé pour réduire la complexité du choix d'un objet : pour une prise, seuls les objets dont la hauteur est

dans la plage de profondeur de prise de l'objet le plus haut de la scène sont considérés. L'effet net de ce filtrage est que les objets hauts sont pris en premier et que le temps de calcul de l'algorithme est réduit, le calcul d'interférences entre objets augmentant exponentiellement en fonction du nombre d'objets.

Le second critère considéré est le meilleur indice d'interférence (s_{inter}) de toutes les hypothèses de prise d'un objet (voir la section 3.1.5). Concrètement, ce critère indique s'il existe une position de prise de l'objet sans risque de collision avec son environnement. Des hypothèses de prise sont générées pour chaque objet encore considéré après le filtrage en hauteur ; ces hypothèses et leurs scores d'interférence sont ensuite réutilisés dans l'algorithme du choix de point de prise de l'objet choisi de la section 3.1.

Le dernier critère est le nombre d'objets à proximité de l'objet considéré (N_{obj}). Ce nombre est ici à maximiser, le retrait d'un objet en affectant beaucoup d'autres, permettant ainsi de libérer rapidement la scène. Pour calculer ce nombre, le nombre d'objets se trouvant dans une enveloppe de l'épaisseur d'un doigt de la pince autour du contour de l'objet (donc pouvant causer une collision lors de la prise) est comptabilisé.

Finalement, un score (s_c) est calculé pour chaque objet en multipliant l'indice d'interférence au nombre d'objets affectés :

$$s_c = s_{inter} \times N_{obj}. \quad (3.17)$$

L'objet ayant le score maximal est alors choisi. Si la prise de ce dernier est impossible, le deuxième meilleur objet est choisi (et ainsi de suite). Cet algorithme produit des ordres de prise semblables à ceux illustrés à la figure 3.11. Un défaut de cette méthode est que bien qu'il soit possible de détecter qu'un objet est dans une position où sa prise est impossible, ce dernier peut tout de même être choisi (habituellement, il s'agit du dernier objet de la scène). Une amélioration possible consisterait à commander une manipulation de l'objet pour le déplacer légèrement avant de réévaluer la situation.

3.3 Description du mouvement d'approche

Une fois que la position du point de prise de l'objet est connue, la trajectoire du robot et de la pince est planifiée puis envoyée aux différentes fonctions responsables de son exécution. Globalement, le mouvement effectué, illustré à la figure 3.12 et décrit en détail dans les paragraphes suivants, est simple : la pince se positionne initialement au-dessus du point de prise défini à la section 3.1.8, s'abaisse linéairement jusqu'à ce dernier, ferme la pince, remonte puis effectue sa prochaine tâche (par exemple, lâcher l'objet ailleurs). Il est à noter que ces étapes ne varient pas en fonction de l'objet ; la position du point de prise et son orientation peuvent changer, mais le mouvement reste le même. De plus, comme la caméra est obstruée par la présence du robot lors de la prise, tout le mouvement est exécuté en boucle ouverte (sans dévier de la trajectoire ici établie pour s'adapter à des changements dans l'environnement de travail).

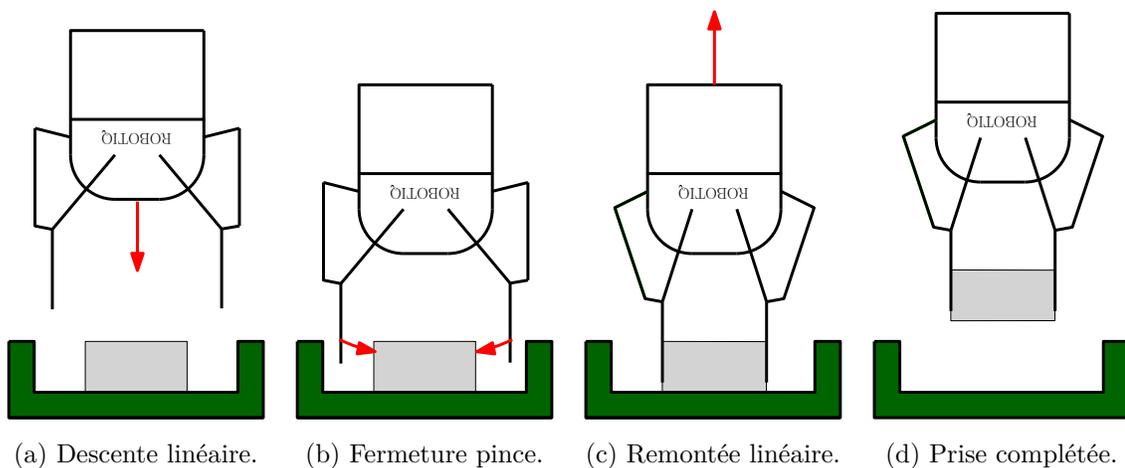


FIGURE 3.12 – Étapes du mouvement de prise par le dessus d'un objet.

1. Atteinte du point au-dessus de l'objet

La première étape du mouvement consiste à atteindre un point intermédiaire 15 cm au-dessus du point de prise de l'objet tout en orientant la pince de la manière désirée. Cette étape permet d'approcher l'objet avec une trajectoire minimisant les risques de contact avec l'environnement (contenant de l'objet, autres objets, etc.) ou de déplacement de l'objet lui-même. La valeur de 15 cm est un compromis choisi après quelques expériences entre un grand ajout de hauteur permettant un meilleur dégagement avec l'environnement et une hauteur basse permettant de maximiser l'espace de travail du robot.

2. Descente linéaire vers le point de prise

La pince se trouvant directement au-dessus du point de prise, l'étape suivante consiste à descendre linéairement vers ce dernier. L'avantage d'utiliser une trajectoire cartésienne droite est d'éliminer les petits déplacements latéraux présents dans une trajectoire articulaire. En effet, ces déplacements représentent une cause d'erreur importante lorsque la précision du positionnement de la pince est critique (espace confiné, très grande pièce, etc.).

3. Fermeture de la pince

La pince étant au point de prise choisi, ses doigts peuvent se refermer sur l'objet. Comme toutes les opérations du mouvement de prise, cette opération se fait en boucle ouverte ; par conséquent, le robot reste statique durant la durée maximale de fermeture de la pince (1 seconde). Finalement, une fois que la pince a cessé de bouger, la position des doigts rapportée par l'encodeur de la pince est prise en note afin de juger du succès ou de l'échec de la prise (voir section 3.4).

4. Remontée verticale linéaire de la pince

L'objet étant maintenant agrippé par la pince, il est soulevé linéairement jusqu'à un point intermédiaire au-dessus du point de prise afin de minimiser les risques de collision avec l'environnement. Mathématiquement, il s'agit d'un mouvement exactement inverse au mouvement de descente vers l'objet. Une fois cette opération terminée, la prise par le dessus est complétée et le robot peut alors passer à une autre opération (par exemple, le dépôt de l'objet).

3.4 Évaluation de la qualité de prise

Une fois l'opération de prise d'objet complétée, il est intéressant de pouvoir évaluer si cette dernière a été un succès ou un échec. Si la prise a été un succès, le transport de l'objet débute ; au cours de ce dernier, il est intéressant de savoir si l'objet est toujours bien pris dans la pince. Ces observations sont décrites comme l'évaluation de la qualité d'une prise. Il s'agit d'un vaste sujet de recherche et permet entre autres la détection et quantification autonome d'erreurs de prise par le robot (utile pour l'apprentissage machine de prises), la rectification de prises instables (par exemple en augmentant la force de fermeture de la pince sur un objet glissant) et la reprise de prises vouées à l'échec. En fonction des capteurs disponibles, plusieurs approches sont possibles.

Par exemple, une approche simple consiste à utiliser un capteur d'effort au poignet pour peser un objet et ainsi détecter sa présence, permettant de confirmer le succès d'une prise [46]. Autre approche, l'utilisation de capteurs tactiles permet de détecter et maintenir un contact [24], rectifier la position de prise d'un objet [26], détecter un début de glissement de l'objet pris [48], classifier une texture [61], reconnaître un objet [36], etc. Autre tactique, il est possible de combiner l'action de plusieurs capteurs. Par exemple, pour détecter la configuration d'objets dans un préhenseur, les travaux de maîtrise de Marianne Côté [13] utilisent une main à trois doigts sous-actionnée instrumentée à l'aide d'encodeurs aux jointures des doigts et de capteurs tactiles. La configuration de l'objet pris par la main est ensuite confirmée visuellement avec une caméra.

L'approche utilisée dans le cadre de ces travaux, autant pour l'évaluation de prise par le dessus qu'en pelletage, consiste à utiliser l'unique encodeur disponible sur la pince Robotiq C3 pour connaître le niveau de fermeture de la pince. Bien que cette méthode puisse sembler reposer sur peu d'informations, elle est suffisante pour bien évaluer si un objet est toujours dans la pince, s'il s'est déplacé ou bien s'il a été échappé. Pour déterminer lequel de ces états s'applique à une prise particulière, l'algorithme de la figure 3.13 est utilisé.

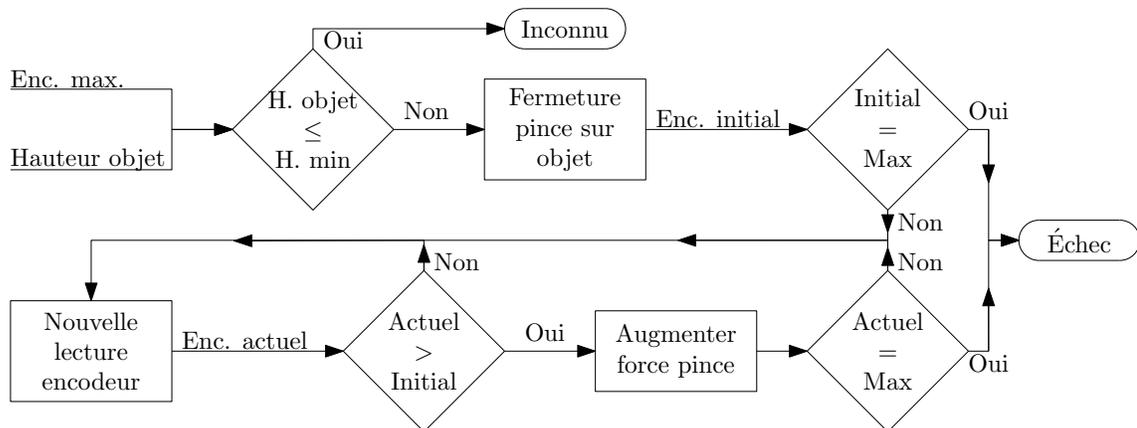


FIGURE 3.13 – Algorithme d'évaluation du succès de la prise à partir de seulement l'information de l'encodeur de la pince Robotiq C3.

La première étape de l'algorithme est de connaître la valeur retournée par l'encodeur de la pince si cette dernière s'est complètement refermée (notée Enc. max.). Il est important d'obtenir cette valeur expérimentalement : bien que la valeur de l'encodeur aille théoriquement de 0 (pince complètement ouverte) à 255 (pince complètement fermée), cette dernière varie en pratique dû à la présence de doigts plus ou moins épais et d'ef-

fets dynamiques lors de la fermeture de la pince. Par exemple, une valeur typiquement retournée par l'encodeur de la pince lorsqu'elle est fermée est de 225.

Il est également nécessaire de connaître l'épaisseur de l'objet au point de prise (la hauteur de l'objet est utilisée pour les prises en pelletage) afin de savoir si ce dernier est trop mince pour que l'algorithme fonctionne. En effet, il a été observé que la présence d'objets minces (< 1 mm) est susceptible de ne pas être détectée par l'encodeur de la pince. Sachant qu'il est possible qu'un tel objet mince soit malgré tout pris, le système indique alors que la qualité de prise est inconnue.

Si l'objet n'est pas mince, la valeur retournée par l'encodeur de la pince lors du premier contact est prise en note (notée Enc. initial). Si cette valeur est égale à la valeur d'une pince complètement fermée, la prise est un échec. Si au contraire la prise est un succès, la qualité de la prise est testée de nouveau à chaque fois que la pince renvoie de l'information sur son état. Lors d'une nouvelle lecture de l'encodeur, la valeur retournée (Enc. actuel) est comparée à celle obtenue lors du premier contact avec l'objet. Si la pince s'est refermée un peu depuis, c'est qu'il y a eu glissement de l'objet ; la force appliquée par la pince est alors augmentée à son maximum pour tenter de le stabiliser. Si la pince s'est complètement refermée, la prise est considérée comme étant un échec.

Dans tous les cas, si une prise est déclarée un échec, ce dernier est noté par le robot pour des fins de comptabilité et le mouvement en cours est interrompu pour être remplacé par un nouveau cycle de prise. Cette action a comme principal effet de permettre de reprendre un objet échappé, ce dernier ayant probablement terminé sa course dans l'espace de travail du robot et pouvant alors être traité comme un nouvel objet. Cette action permet également un gain marginal en temps. Ce gain est limité par le fait que même si le robot détecte l'échec tôt, la reprise de l'objet ne peut être immédiate car le robot est probablement encore dans le champ de vision de la caméra et doit le quitter avant d'amorcer un nouveau cycle de prise.

Finalement, grâce à cet algorithme, seul le succès des prises d'objets plus minces que 1 mm est impossible à quantifier. Pour éliminer ce défaut, une solution simple testée en collaboration avec John Dynan est d'intégrer aux doigts de la pince une diode électroluminescente (DEL) et un capteur de lumière sensible à cette dernière. Avec cet équipement, lorsque la pince se referme complètement sans prendre d'objet, le capteur

lumineux perçoit la lumière émise par la diode et envoie au robot un signal indiquant l'absence d'objet. Au contraire, la présence d'un objet est suspectée lorsque la lumière est obstruée. Grâce à cet ajout, la catégorie d'objets dont la prise ne peut être quantifiée se réduit aux objets minces et transparents (par exemple, une feuille d'acétate).

3.5 Conclusion

Ce chapitre présentait une méthode pour effectuer la prise par le dessus d'un objet avec une pince à deux doigts. En premier lieu, les différentes étapes nécessaires pour effectuer cette opération ont été abordées. Chronologiquement, ces étapes incluent la caractérisation du contour de l'objet comme simple ou complexe, la génération d'hypothèses de prise sur les objets complexes basée sur la présence de surfaces parallèles se faisant face, l'évaluation de ces hypothèses à l'aide d'un indice d'interférence de la pince avec l'environnement de l'objet et d'un indice de robustesse de l'équilibre statique de l'objet pris et finalement la traduction de l'hypothèse choisie en une position et orientation cartésienne à atteindre par le préhenseur.

La seconde section de ce chapitre portait sur le choix d'un objet si plusieurs sont présents dans l'espace de travail. L'algorithme développé à cette fin utilisait deux critères. Le premier était de ne considérer pour une prise que l'objet le plus haut et les objets étant assez élevés pour être un obstacle à sa prise. Le second était de tenter de libérer le plus rapidement possible l'espace de travail en privilégiant la prise sécuritaire d'objets étant un obstacle à la prise de plusieurs autres objets.

La troisième section de ce chapitre portait sur le mouvement d'approche de l'objet. Comme le titre de la méthode l'indique, ce mouvement consiste à approcher le point de prise choisi par le dessus. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide d'exécution et de limiter les risques de collision avec des obstacles environnants.

Finalement, la dernière section du chapitre présentait une méthode d'évaluation de la qualité des prises n'utilisant que l'encodeur d'une pince C3 de Robotiq. Cette dernière est adéquate pour évaluer le succès d'une prise si l'objet pris est suffisamment large pour que la pince ne se referme pas complètement, mais ne permet pas vraiment d'évaluer si un objet est en train de glisser de la pince.

Chapitre 4

Prise d'objet en pelletage

Afin d'aller chercher les objets minces ou larges impossibles à prendre avec la technique de prise par le dessus détaillée au chapitre 3, une nouvelle technique de prise par pelletage est développée dans le cadre de ce chapitre. Cette dernière consiste à d'abord insérer un doigt entre le dessous de l'objet et la surface sur laquelle il repose, puis à le soulever légèrement avant de finalement refermer le préhenseur. La première section de ce chapitre présente brièvement ce mouvement de prise ainsi que son origine. La seconde section porte sur le choix d'un point de prise à partir du contour de l'objet et de son environnement. La troisième partie détaille les différentes étapes du mouvement d'approche et de prise de l'objet. Finalement, le chapitre est clos par une description de l'algorithme employé pour choisir quelle technique de prise utiliser pour un objet particulier.

4.1 Mise en contexte

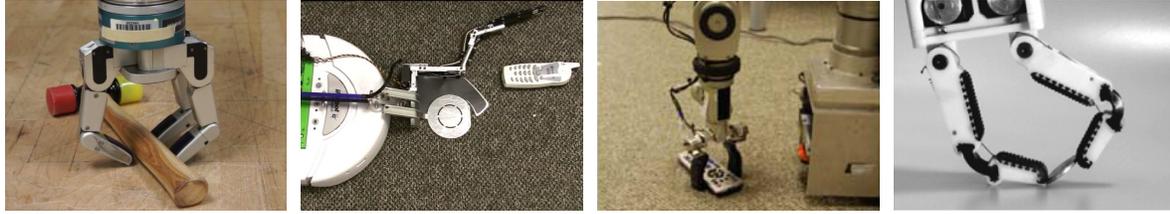
Le but de ce projet est d'arriver à prendre de manière autonome des objets de la vie courante en situation réelle à l'aide d'un robot sériel et d'une pince aux doigts sous-actionnés. Dans cette optique, les objets à prendre sont déposés sur une surface plane supposée infinie et leur environnement peut être encombré par la présence d'un contenant ou d'autres obstacles. Une connaissance préalable des objets (des modèles 3D complets par exemple) n'est pas disponible, une trop grande variété d'objets existant. Finalement, la position d'un objet à prendre n'est pas connue de manière très précise, la caméra utilisée pour percevoir le monde ayant une précision spatiale d'environ 3 mm. La méthode de prise développée doit donc être robuste face à des imprécisions de positionnement du préhenseur sur l'objet (critique pour les grands et petits objets) et compliant pour faire face à de possibles collisions avec l'environnement. Face à ces contraintes, plusieurs outils de planification de prise basés sur le positionnement précis des doigts sur l'objet et évitant tout contact avec l'environnement (tel GraspIt! [38]) ne peuvent être utilisés.



FIGURE 4.1 – Objets difficiles à prendre avec la technique de prise par le dessus.

La première méthode développée pour prendre des objets dans ce contexte est la prise par le dessus du chapitre 3. Cette dernière est relativement simple, efficace et polyvalente pour prendre des objets avec un robot sériel. Elle a cependant des limites. Par exemple, il est impossible de prendre des objets dont la section la plus étroite est plus large que l'ouverture maximale de la pince. Un autre problème est que les objets minces comme des livres sont difficiles à prendre car il ne sont alors en contact qu'avec le bout des doigts de la pince. Par exemple, dans le contexte du jeu d'objets de la vie courante utilisé pour tester l'efficacité des prises, 53 des 80 objets correspondent à ce type d'objet difficile à saisir. La figure 4.1 présente quelques exemples de tels objets.

Les exemples de robots pouvant prendre facilement ce type d'objet mince à plat sur une surface sont peu nombreux (quelques uns sont illustrés à la figure 4.2). Kazemi, Valois et al. [31] proposent une méthode de prise par le dessus où les doigts d'une



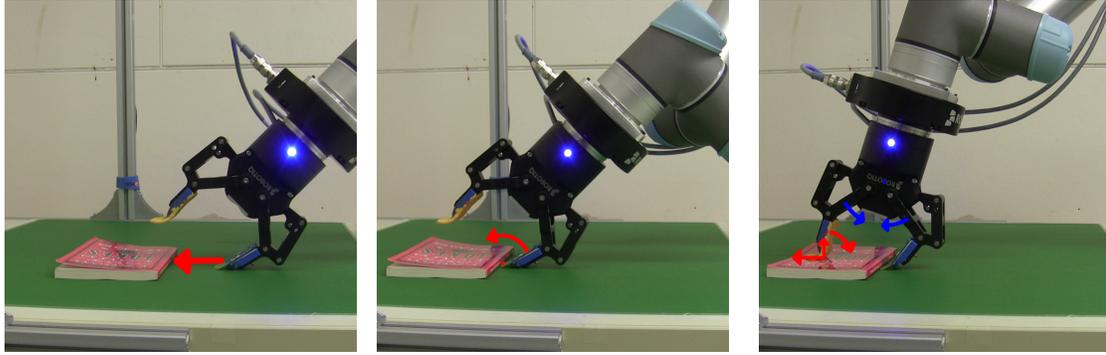
(a) Contrôle en force d'une main Barrett [31]. (b) Roomba avec « porte-poussière » [65]. (c) Le robot d'assistance EL-E [29]. (d) Pince sous-actionnée basculant un objet [42].

FIGURE 4.2 – Exemples de robots prenant des objets minces sur une surface plate.

main Barrett sont appuyés sur le sol grâce à un contrôle en force précis avant de se refermer en une prise en pincée. Cette méthode est robuste en contexte réel, le contrôle en force assurant une certaine adaptation de la pince et permettant de s'accommoder d'imprécisions dans le positionnement du robot par rapport à l'objet. Xu, Deyle et collab. [65] proposent quant à eux un manipulateur simple en forme de porte-poussière destiné à prendre des objets tombés sur le sol. Fixé sur une Roomba, ce manipulateur arrive à prendre 94 % des objets de la vie courante utilisés dans leurs 1096 essais sur une variété de recouvrement de sol. Le robot d'assistance EL-E décrit par Jain et Kemp [29] arrive quant à lui à prendre avec un succès variable 25 objets fréquemment demandés par les gens souffrant de sclérose latérale amyotrophique (une maladie dégénérative produisant une paralysie progressive mieux connue sous son acronyme anglais ALS). Pour y arriver, les objets (pilules, téléphone, etc.) sont repérés grâce à un capteur laser puis pris grâce à une pince simple orientée perpendiculairement à la surface soutenant les objets. Les objets problématiques étaient soit très minces (billet de banque) ou rigides (livre). Finalement, Odhner, Ma et collab. [42] utilisent une pince sous-actionnée pour prendre de petits objets minces comme des pièces de monnaie. Pour ce faire, un doigt de la pince est appuyé sur la table soutenant l'objet pour servir de butée ; l'autre doigt pousse alors l'objet vers cet obstacle de manière à le faire culbuter puis le prendre en pincée.

Afin de pouvoir saisir ces objets larges ou minces problématiques, une méthode de saisie en pelletage a ici été développée. Cette dernière consiste à insérer un doigt entre l'objet et la surface sur laquelle il repose (le sol), à soulever légèrement l'objet puis à fermer le préhenseur. La prise résultante est idéalement équivalente à celle d'une prise de l'objet par le côté. La figure 4.3 présente les étapes centrales de ce mouvement.

Cette technique de pelletage est grandement facilitée par l'utilisation d'une pince



(a) Avance et insertion sous l'objet. (b) Pose du doigt sur l'objet. (c) Mouvement de fermeture.

FIGURE 4.3 – Étapes principales du mouvement de prise en pelletage

aux doigts sous-actionnés comme préhenseur. Grâce à cette dernière, il est possible d'appuyer un doigt sur le sol pour réduire son angle d'attaque par rapport à l'objet et ainsi faciliter son insertion sous ce dernier. L'ajout d'un ongle à ce doigt facilite également cette étape en diminuant le soulèvement nécessaire de l'objet pour l'engager dans la pince lors du premier contact. L'utilisation d'un doigt sous-actionné permet également à l'utilisateur de commander une position du robot faisant entrer ce doigt en contact avec un obstacle (le sol) sans avoir à se soucier d'une collision fatale, le doigt se reconfigurant passivement. Pour répliquer ce mouvement avec des doigts « rigides », il serait nécessaire de pré-configurer ces doigts ainsi que de commander le robot en force afin de s'assurer que le contact entre le préhenseur et le sol ne soit pas dommageable.



FIGURE 4.4 – Mouvement humain de prise d'un objet rigide sur une surface plane.

L'inspiration derrière cette technique de prise est un mouvement analogue fait par les humains pour prendre des objets minces sur un plan (tel le livre rigide de la figure 4.4). Cette technique consiste à insérer un doigt sous l'objet (les ongles sont utiles pour cette tâche) tout en appliquant une force de retenue sur l'objet avec un autre doigt.

Lorsque l'espace entre l'objet et le sol est suffisant, le doigt soulevant l'objet est glissé de manière à générer une prise englobante. Il est à noter que cette tâche demande une certaine dextérité. Ainsi, l'humain préfère souvent déplacer l'objet vers un vide (un coin de table par exemple) pour libérer l'accès à un des côtés de l'objet [15]. Une autre tactique couramment utilisée par les humains consiste à déplacer l'objet vers un obstacle sur le plan de manière à l'empêcher de glisser durant la prise. Du côté de la robotique, Daffe, Rodriguez et collab. [14] proposent une liste de tels mouvements de manipulation assistés par un élément externe (dextérité extrinsèque) appliquée à une main à 3 doigts simples.

Les sections suivantes présentent la technique de prise en pelletage de manière plus détaillée. La prochaine section détaille le choix d'un point de prise maximisant la stabilité de prise attendue tout en prenant en compte l'environnement de la pièce. La section suivante présente quant à elle en détail les différentes étapes du mouvement.

4.2 Choix du point de prise

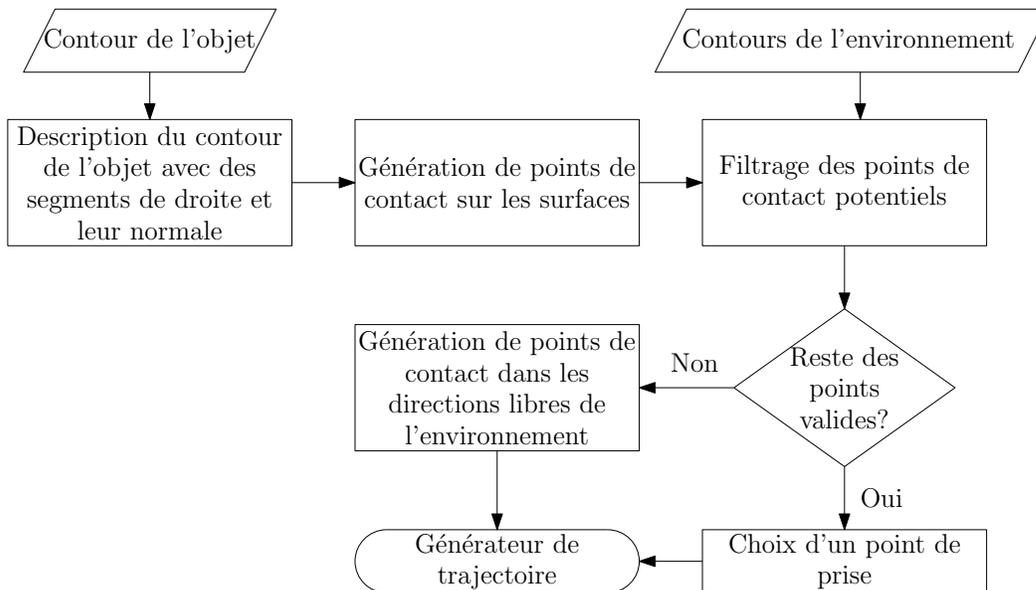


FIGURE 4.5 – Algorithme de génération d'un point de prise en pelletage d'un objet.

La première étape lors de la prise en pelletage d'un objet est le choix d'un point de prise permettant une saisie stable tout en assurant au manipulateur assez d'espace pour bien exécuter le mouvement. Afin de déterminer un tel point, l'heuristique illustrée à

la figure 4.5 a été développée ; les sous-sections suivantes décrivent plus en détail les différentes étapes de cette dernière. Le principe derrière cet algorithme est simple : si l'espace d'approche de l'objet n'est pas un problème, le point de prise optimal est celui le plus près possible de la position actuelle du robot et se trouve sur un côté long de l'objet au point où la normale de la surface passe par le centre géométrique de l'objet. Si l'environnement de la pièce est encombré, l'objet est pris en pelletant dans la direction où il y a le plus d'espace d'approche. Une fois le point de prise choisi, ce dernier est ensuite envoyé au générateur de trajectoires de pelletage décrit à la section 4.3.

4.2.1 Description du contour de l'objet avec des segments de droite et leurs normales

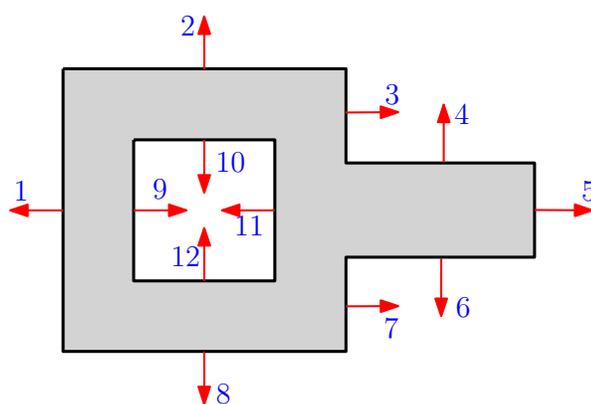


FIGURE 4.6 – Description des segments de droites d'un contour par leur vecteur normal.

Il est supposé qu'approcher les objets perpendiculairement à leur surface augmente les chances de pouvoir les prendre en pelletage, l'aire couverte par les doigts étant alors maximale (pour les objets convexes). Afin de générer des hypothèses de point de prise répondant à ce critère, il est nécessaire d'utiliser les vecteurs normaux des surfaces de l'objet comme direction d'approche de la pince. Pour calculer l'angle de ces vecteurs normaux, les points du contour sont ordonnés en sens horaire puis l'angle des vecteurs normaux est calculé (la procédure est identique à celle utilisée à la section 3.1.2 et est illustrée à la figure 4.6). Sachant que les sommets du contour de l'objet sont représentés par des coordonnées $[x_i, y_i]$ sur le plan XY du repère de base du robot, l'expression des

directions normales ν_i est :

$$\nu_i = \text{atan2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) + \pi/2 \quad (\text{surface pleine}) \quad (4.1)$$

$$\nu_i = \text{atan2} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) - \pi/2 \quad (\text{trou}). \quad (4.2)$$

4.2.2 Génération de points de contact sur les surfaces

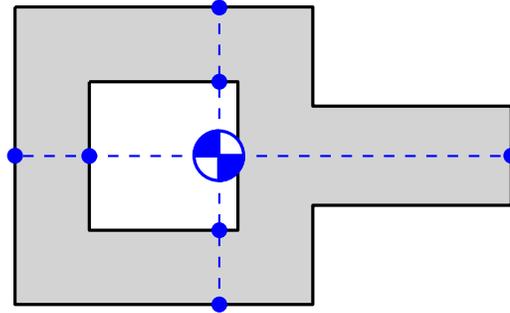


FIGURE 4.7 – Génération d’hypothèses de points de prises sur les surfaces de l’objet (représentés par les points).

Connaissant les directions d’approche possibles de l’objet, l’étape suivante consiste à trouver les points de contact entre le préhenseur et l’objet associés à ces directions. Pour une surface donnée, le point de contact se trouve à l’intersection entre le vecteur normal de la surface passant par le centre géométrique de l’objet et la surface en elle-même (tel qu’illustré à la figure 4.7). Ce point particulier est choisi afin de ne pas faire tourner l’objet sur lui-même lors du premier contact avec le préhenseur (il est supposé que le centre géométrique du contour du dessus de l’objet est équivalent à la position de son centre de masse).

Pour calculer la position du point de contact généré par la droite entre les sommets \mathbf{p}_i et \mathbf{p}_{i+1} d’un contour, la procédure suivante est suivie. Premièrement, la normale de la surface est exprimée sous la forme d’un polynôme de degré 1 passant par le centre de masse de l’objet $[x_{CM}, y_{CM}]$:

$$y = m_{n,i}x + b_{n,i} \quad (4.3)$$

où

$$m_{n,i} = \tan \nu_i, \quad b_{n,i} = y_{CM} - m_{n,i}x_{CM}. \quad (4.4)$$

La droite du contour subit le même traitement :

$$m_{d,i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad b_{d,i} = y_i - m_{d,i}x_i. \quad (4.5)$$

Le point d'intersection entre ces deux droites $\mathbf{p}_{c,i}$ est alors donné par :

$$\mathbf{p}_{c,i} = \begin{bmatrix} x_{c,i} \\ y_{c,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (b_{n,i} - b_{d,i}) / (m_{n,i} - m_{d,i}) \\ (m_{n,i}b_{d,i} - m_{d,i}b_{n,i}) / (m_{n,i} - m_{d,i}) \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Afin de s'assurer que ce point d'intersection se trouve bien sur la surface de l'objet, il est vérifié que la somme des normes des segments de droite entre les sommets et ce point est équivalente à la norme du segment de droite entre les deux sommets :

$$\|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{c,i}\| + \|\mathbf{p}_{i+1} \mathbf{p}_{c,i}\| = \|\mathbf{p}_i \mathbf{p}_{i+1}\|. \quad (4.7)$$

4.2.3 Filtrage des points de contact potentiels

En fonction de l'environnement de la pièce, il est possible que l'atteinte de certaines des hypothèses de points de prise cause des collisions avec le contenant, avec d'autres objets ou bien avec l'objet à prendre lui-même si l'hypothèse se trouve dans un trou (phénomènes illustrés à la figure 4.8. Afin de retirer ces hypothèses fautives, un point intermédiaire \mathbf{p}_{int} est défini à une distance l_{int} du point de contact dans la direction d'approche du préhenseur. Si ce point se trouve à l'extérieur du contenant ou si la droite le reliant au point de contact passe par un obstacle, l'hypothèse de point de prise est retirée. La position du point intermédiaire est calculée avec :

$$\mathbf{p}_{int,i} = \begin{bmatrix} x_{int,i} \\ y_{int,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{c,i} + l_{int} \cos \nu_i \\ y_{c,i} - l_{int} \sin \nu_i \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

La valeur précise de l_{int} est composée de deux éléments. Le premier correspond à la distance d_1 entre l'objet et la pince lorsque cette dernière touche initialement au sol (voir section 4.3.2). L'autre composante est une distance ajoutée pour représenter la portion du robot se trouvant sous la hauteur des bords du contenant h_{cont} . En supposant que l'axe de la pince forme un angle γ par rapport au sol et que le robot occupe l'espace

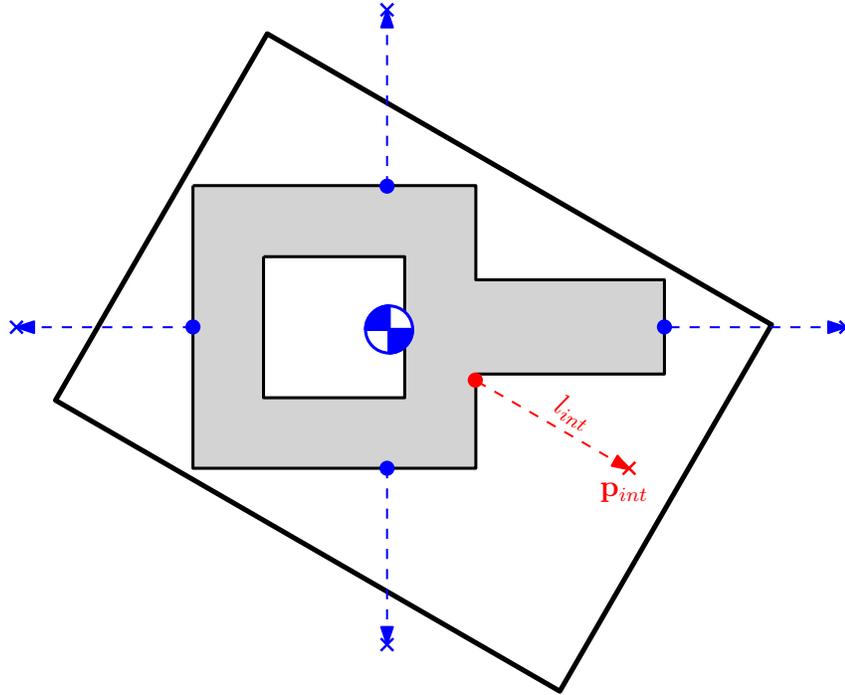


FIGURE 4.8 – Prise en compte de l’environnement pour filtrer les hypothèses de points de contact et génération d’un point de contact dans la direction la moins encombrée. Les croix représentent les points intermédiaires. Les hypothèses à l’extérieur du contenant (rectangle épais) sont éliminées. Les hypothèses dans le trou de l’objet ne sont pas représentées afin de clarifier la figure.

d’un cylindre de rayon r_{tube} placé dans l’axe de la pince (ici 6,5 cm, le rayon du capteur d’effort), l_{int} est équivalent à :

$$l_{int} = d_1 + \left(\frac{h_{cont} + r_{tube} \cos \gamma}{\sin \gamma} \right) \cos \gamma + r_{tube} \sin \gamma. \quad (4.9)$$

4.2.4 Génération de points de contact dans les directions libres de l’environnement

À la suite du tri des hypothèses de points de prise en fonction de la position de leur point d’approche, il se peut qu’aucune hypothèse ne soit valide. Dans ce cas, l’obligation d’approcher l’objet perpendiculairement à une de ses surfaces est délaissée. La direction d’approche de l’objet est alors déterminée par la direction la plus dégagée de l’environnement. Par exemple, dans le cas du contenant rectangulaire vide de la

figure 4.8, cette direction correspond à l'axe principal du contenant. Il est à noter toutefois que si la direction d'approche choisie n'est pas libre d'au moins l_{int} , il est impossible de pelleter l'objet. Connaissant la direction d'approche, le point de contact sur l'objet est choisi comme étant l'intersection entre le vecteur d'approche et la surface de l'objet. Les calculs sont presque les mêmes qu'à la section 4.2.2 ; seule la valeur de m_n change pour refléter la nouvelle direction d'approche.

4.2.5 Choix d'un point de prise

Si plusieurs hypothèses de points de prise valides existent, le point retenu est choisi en fonction de deux critères. Le premier consiste à maximiser la distance entre le point de contact et le sommet de l'objet le plus proche (d_{min} , en mm). Ce critère permet de minimiser l'effet d'erreur de positionnement du manipulateur lors de la prise. Le second critère consiste à minimiser le temps de trajet du robot (t_{trajet} , en s) pour se rendre au point de contact. En plus du gain d'efficacité temporel, ce critère présente l'avantage de favoriser certaines configurations « sécuritaires » du robot, ce dernier n'ayant pas à trop s'éloigner de sa base pour atteindre le point de contact choisi. Ces deux critères sont combinés par la relation linéaire ci-dessous de manière à produire un score unique S pour une hypothèse de prise. L'hypothèse choisie est celle dont le score est maximal.

$$S = a d_{min} + t_{trajet} \quad (4.10)$$

où a est un poids accordé au critères de performance pour les mettre sur une échelle comparable. Lors de l'implantation de cette technique, la valeurs $a = 10 \text{ s} \cdot \text{mm}^{-1}$ a été utilisée. Cette dernière a été déterminée empiriquement, son utilisation fournissant le compromis recherché entre la position du point de contact sur l'objet et temps de trajet du robot. Il est à noter que cette valeur est à recalculer si le montage expérimental est modifié.

Finalement, il serait possible, à la suite d'une collecte de donnée exhaustive, d'utiliser des méthodes plus complexes de mélange d'indices pour tenter d'affiner le choix du point de prise et maximiser ses chances de succès. Il pourrait également apparaître que d'autres critères de performance que d_{min} et t_{trajet} puissent évaluer les chances de succès d'une prise.

4.3 Mouvement d'approche

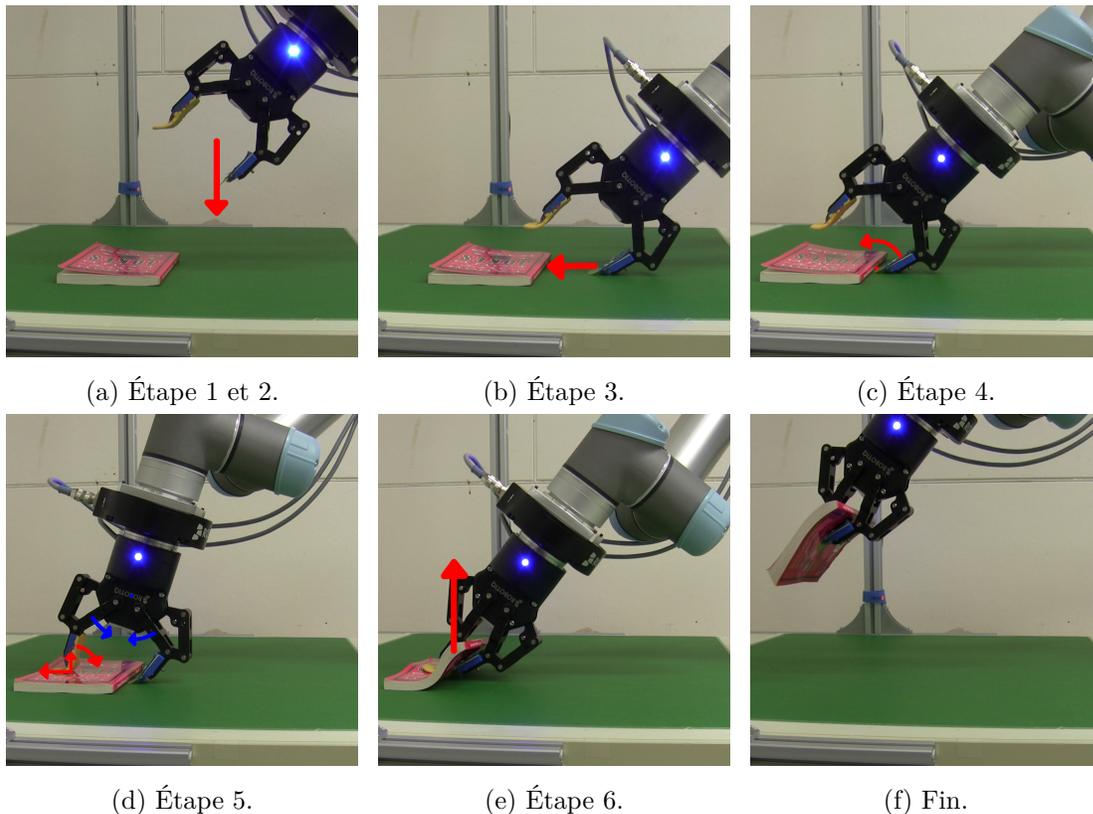


FIGURE 4.9 – Étapes du mouvement de pelletage d'objet.

Le mouvement de pelletage avec une pince sous-actionnée est décomposé en 6 étapes, toutes illustrées à la figure 4.9 et décrites dans les sous-sections suivantes. En résumé, la première étape consiste à atteindre un point intermédiaire à une certaine distance du point de prise sélectionné. La pince est alors orientée selon la direction d'approche sélectionnée et un angle lui est donné par rapport au sol. La pince descend ensuite vers la table de manière à replier le doigt de la pince muni d'un ongle afin de diminuer son angle d'attaque par rapport à l'objet. La pince est ensuite avancée vers l'objet jusqu'à ce qu'il y ait contact ; l'ongle s'est alors normalement glissé sous l'objet. La pince tourne ensuite autour de ce point de contact afin de venir appuyer son autre doigt sur le dessus de l'objet. Finalement, le mouvement de fermeture est amorcé. En plus de la fermeture de la pince, ce dernier consiste en une série de mouvements conçus pour insérer plus profondément le doigt du dessous sous l'objet. À la suite d'une remontée linéaire de la pince, l'objet est alors prêt à être transporté.

Ce mouvement de pelletage est similaire d'un objet à l'autre ; les seules variations sont la direction d'approche de l'objet, le niveau de repliement de la pince sur la table et la rotation appuyant un doigt sur le dessus de l'objet. Ces variations sont expliquées par les quelques paramètres définis par le point de prise choisi à la section 4.2. Le mouvement est effectué en boucle ouverte, c'est-à-dire que la trajectoire est définie et réalisée d'un coup sans rétroaction d'un capteur externe. Comme il a été mentionné précédemment, la seule information utilisée est la géométrie de l'objet telle que perçue par le système de vision. L'utilisation de capteurs pour affiner le mouvement en cours de route (boucle fermée) pourrait toutefois être bénéfique. Par exemple, l'utilisation de capteurs tactiles permettrait de détecter avec certitude le moment où les contacts se produisent entre la pince et l'objet (au lieu de se fier à une simple image de l'objet pour générer toute la trajectoire de prise).

Les différentes étapes du mouvement sont représentées sous forme de points cartésiens à atteindre exprimés sous la forme de matrices homogènes \mathbf{T}_i (où i est le numéro de l'étape en cours). Sauf pour le premier point de la trajectoire \mathbf{T}_1 , tous ces points \mathbf{T}_i sont calculés par le produit de l'opération à effectuer à cette étape ($\mathbf{T}_{op,i}$) et de l'état du robot à l'étape précédente (\mathbf{T}_{i-1}). Pour simplifier l'expression des opérations, ces dernières sont définies dans le plan de la direction d'approche de l'objet. Pour passer de ce plan au repère de la base du robot, une matrice de transformation de repère \mathbf{T}_n est utilisée à chaque opération. En combinant toutes ces opérations, les différents points cartésiens à atteindre \mathbf{T}_i sont calculés avec :

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_a \mathbf{T}_{op,i} \mathbf{T}_a^{-1} \mathbf{T}_{i-1}. \quad (4.11)$$

Finalement, les trajectoires utilisées pour passer de \mathbf{T}_{i-1} à \mathbf{T}_i sont spécifiées dans les sections portant sur ces étapes ; sauf exception, ces trajectoires sont linéaires.

Les sous-sections suivantes présentent la définition de la matrice de transformation de repère \mathbf{T}_n puis l'expression des différentes opérations $\mathbf{T}_{op,i}$ effectuées dans les différentes étapes du mouvement. La dernière sous-section présente quant à elle quelques observations produites expérimentalement et théoriquement sur l'efficacité du mouvement de pelletage ici décrit.

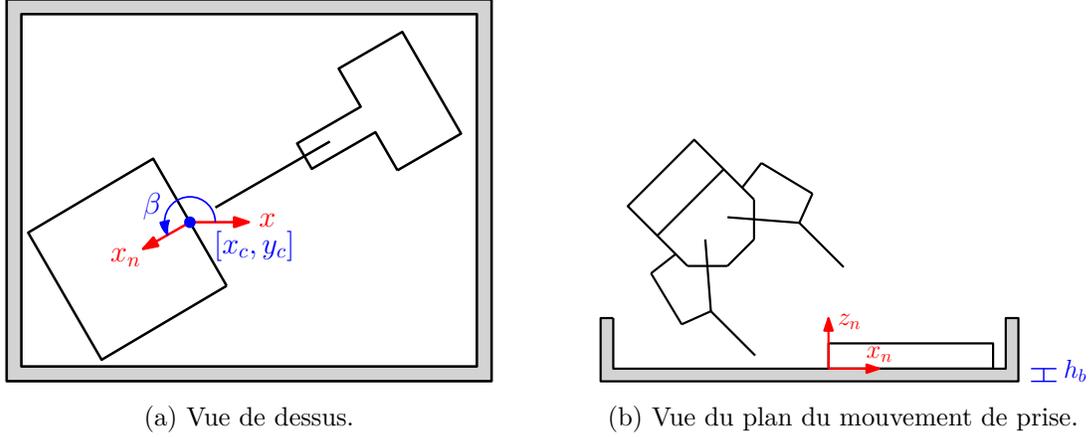


FIGURE 4.10 – Définition du repère d’approche \mathbf{T}_n .

4.3.1 Définition du repère d’approche de prise \mathbf{T}_n

Pour simplifier leurs expressions, toutes les opérations du mouvement de pelletage sont définies dans un repère aligné sur la direction d’approche de l’objet par la pince (un exemple d’un tel repère est illustré à la figure 4.10). L’axe x_n représente cette direction et pointe vers l’objet. Cette direction forme un angle β avec l’axe des x de la base du robot. L’axe z_n est la normale du plan sur lequel repose l’objet (le sol) ; il est ici supposé que cet axe est équivalent à l’axe z du repère de la base du robot. L’origine du plan $x_n z_n$ est l’intersection entre le coin de l’objet et le sol. Dans le repère de la base du robot, ce point représente le point de prise $[x_c, y_c]$ choisi à la section 4.2 et la hauteur h_b de la surface sur laquelle repose l’objet par rapport à la base du robot. En prenant en compte toutes ces informations et hypothèses, l’expression de \mathbf{T}_a est :

$$\mathbf{T}_a = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & x_c \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & y_c \\ 0 & 0 & 1 & h_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

4.3.2 Étape 1 - Atteinte d'un point intermédiaire et orientation de la pince

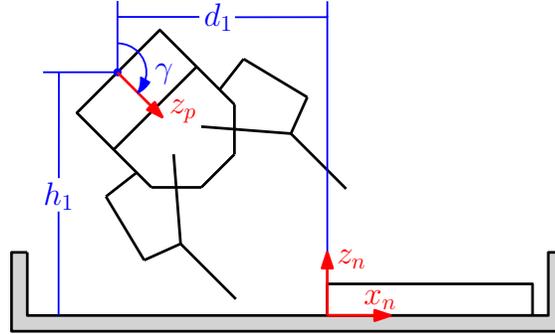


FIGURE 4.11 – Point intermédiaire \mathbf{T}_1 .

Tel qu'illustré à la figure 4.11, la première étape du mouvement de pelletage d'un objet consiste à atteindre un point intermédiaire à une certaine distance d_1 et hauteur h_1 du point de contact choisi. L'atteinte de ce point permet d'orienter la pince selon l'angle d'approche de l'objet β et de lui donner un angle par rapport au sol γ sans causer de collision accidentelle. L'expression de ce point intermédiaire dans le plan normal est donnée par la matrice homogène \mathbf{T}_{int} :

$$\mathbf{T}_{int} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma & -d_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma & h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

et l'expression de la pose cartésienne représentant cette étape dans le repère de base est donnée par :

$$\mathbf{T}_1 = \mathbf{T}_a \mathbf{T}_{int}. \quad (4.14)$$

À titre informatif, les valeurs suivantes sont utilisées dans l'implémentation de ce mouvement : $d_1 = 0,15$ m, $h_1 = 0,25$ m et $\gamma = \frac{3\pi}{4}$ rad. Les valeurs de d_1 et h_1 ont été choisies en fonction des dimensions du contenant et du désir de minimiser le temps de trajet du robot durant le reste du mouvement de prise. L'angle γ consiste à orienter la pince à 45° par rapport au sol. Cette valeur a été choisie comme compromis entre la maximisation du potentiel de repliement des doigts sans que leurs membrures externes heurtent le sol et la minimisation de l'angle initial du doigt inférieur par rapport au sol.

4.3.3 Étape 2 - Repliement du doigt inférieur sur la table

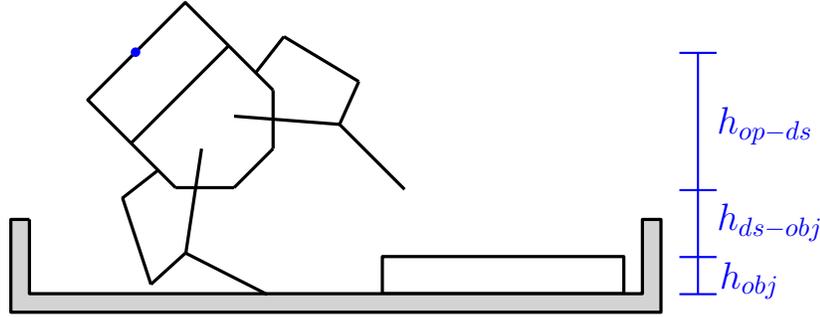


FIGURE 4.12 – Repliement du doigt inférieur sur le sol.

La deuxième étape, illustrée à la figure 4.12, consiste à approcher la pince du sol de manière à replier le doigt inférieur de la pince et diminuer son angle d'attaque par rapport à l'objet. La hauteur finale de la pince h_2 peut être calculée de deux manières différentes en fonction de la hauteur de l'objet h_{obj} et du désir de maintenir une distance minimale h_{ds-obj} entre le doigt supérieur et le dessus de l'objet (ici 1 cm). L'objet est classé comme mince s'il répond à ce critère :

$$h_{obj} \leq h_{2,min} - h_{op-ds} - h_{ds-obj} \quad (4.15)$$

où $h_{2,min}$ correspond à la hauteur de l'origine de la pince lorsque son doigt inférieur est replié au maximum et h_{op-ds} est la différence de hauteur entre le doigt supérieur de la pince et son origine. En se basant sur la géométrie de la pince C3 (voir section 1.3.2.1), l'expression de ces variables est :

$$h_{2,min} = -(0,038 \cos \gamma - 0,125 \sin \gamma) \quad (4.16)$$

$$h_{op-ds} = -(-49,4 \cos \gamma - 0,153 \sin \gamma). \quad (4.17)$$

Si l'objet est mince, le doigt inférieur de la pince est replié au maximum. La hauteur de la pince est alors :

$$h_2 = h_{2,min}. \quad (4.18)$$

Si au contraire l'objet est suffisamment haut, la hauteur de la pince est définie par :

$$h_2 = -(49,4 \cos \beta - 0,153 \sin \beta) + h_{ds-obj}. \quad (4.19)$$

Connaissant la hauteur de la pince désirée, il est alors possible de déterminer l'expression en matrice homogène de l'opération de descente $\mathbf{T}_{op,2}$:

$$\mathbf{T}_{op,2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_2 - h_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.20)$$

4.3.4 Étape 3 - Avance vers l'objet et insertion de l'ongle sous ce dernier

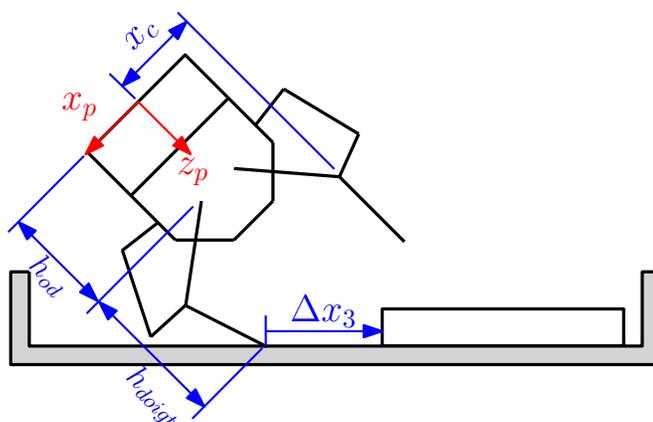


FIGURE 4.13 – Avance de la pince jusqu'au point de contact sur l'objet.

L'étape suivante, illustrée à la figure 4.13, consiste à glisser la pince vers l'objet jusqu'à ce que le bout du doigt replié de la pince atteigne le point de contact choisi, s'insérant du coup sous l'objet. Dans le plan de prise défini par \mathbf{T}_a , ce mouvement correspond à une avance de longueur Δx_3 . Dans l'optique où tout le mouvement s'effectue en boucle ouverte, il peut être bénéfique de l'allonger légèrement de x_{biais} et ainsi pousser l'objet, question d'assurer que le doigt soit bien enfoncé sous ce dernier. Sachant que le coin de l'objet où le contact se fait est l'origine du plan de prise et que la position en x du bout du doigt inférieur est noté x_{di} , Δx_3 est calculé avec :

$$\Delta x_3 = -x_{di} + x_{biais}. \quad (4.21)$$

La matrice homogène représentant cette opération prend la forme de :

$$\mathbf{T}_{op,3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Pour réaliser ce mouvement de manière précise, la position du bout du doigt x_{di} est calculée en déterminant la configuration du doigt pour une hauteur h_{doigt} donnée. Pour ce faire, la procédure détaillée à l'annexe C est suivie. Cependant, comme la configuration finale du doigt replié est inconnue, il est à ce stade impossible d'obtenir une valeur exacte de h_{doigt} . Sa valeur est approximée en trouvant le point d'intersection x_{inter} du doigt déplié et du sol dans le repère normal à la prise puis en transformant ce point dans le repère de la pince :

$$\begin{bmatrix} x_{inter} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ 0 \\ h_{doigt} + h_{od} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ 0 \\ z_p \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$h_{doigt} = x_c \tan \gamma - z_p / \cos \gamma - h_{od} \quad (4.24)$$

où h_{od} représente la distance entre l'origine de la pince et l'origine d'un doigt dans l'axe de la pince et où les composantes x_p et z_p représentent la position de l'origine de la pince dans le repère normal à la prise. La valeur de ces composantes est obtenue à partir des éléments (1,4) et (3,4) du produit matriciel $\mathbf{T}_a^{-1}\mathbf{T}_2$ correspondant à la position de la pince à la fin de l'opération précédente.

Une fois la configuration du doigt replié calculée dans le repère de la pince, la position du bout du doigt est ensuite exprimée dans le repère normal à la prise :

$$\begin{bmatrix} x_{di} \\ 0 \\ z_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{b,pince} \\ 0 \\ z_{b,pince} \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$

4.3.5 Étape 4 - Pose du doigt supérieur sur l'objet

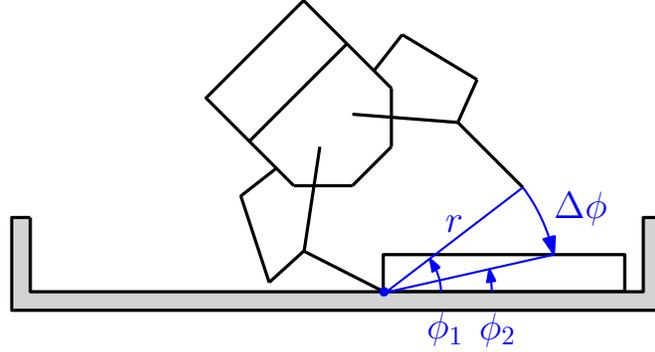


FIGURE 4.14 – Rotation autour du point de contact pour appuyer le doigt supérieur sur l'objet.

Une fois le doigt inférieur de la pince inséré sous l'objet, l'étape suivante consiste à venir appuyer le doigt supérieur sur le dessus de ce dernier. Tel qu'illustré sur la figure 4.14, ce mouvement correspond à une rotation d'un angle $\Delta\phi$ autour du bout du doigt inférieur jusqu'à ce que le doigt du dessus touche l'objet. N'utilisant pas l'information d'un capteur d'effort, cette rotation est calculée seulement à partir de la géométrie de la pince et de l'objet. Le mouvement du bout du doigt supérieur correspond à un arc de cercle de rayon r centré sur le bout du doigt inférieur. La position de ce bout de doigt inférieur est extraite des calculs de l'étape précédente ; étant donné la formulation des repères, elle correspond au biais d'avance du mouvement x_{biais} . L'angle que forme la droite entre les positions initiales des bouts des doigts est noté ϕ_1 . L'angle ϕ_2 représente quant à lui l'angle de la droite entre le bout de doigt inférieur et la position finale du doigt supérieur. À partir de ces informations, il est possible de construire la matrice homogène représentant l'opération de rotation :

$$\mathbf{T}_{op,4} = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2 - \phi_1) & 0 & \sin(\phi_2 - \phi_1) & x_{biais} - x_{biais} \cos(\phi_2 - \phi_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi_2 - \phi_1) & 0 & \cos(\phi_2 - \phi_1) & x_{biais} \sin(\phi_2 - \phi_1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.26)$$

4.3.6 Étape 5 - Mouvement de fermeture

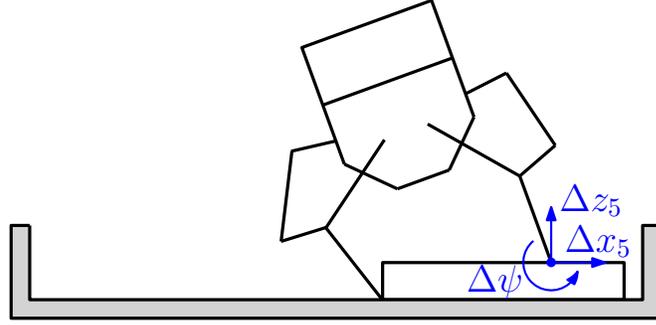


FIGURE 4.15 – Mouvement de fermeture.

La pince étant bien positionnée sur l'objet, le mouvement de prise présenté à la figure 4.15 est amorcé. Simultanément à la fermeture de la pince, le robot se déplace pour tenter d'insérer le doigt inférieur plus profondément sous l'objet et augmenter la surface de contact. Ce mouvement peut être décomposé en trois parties. La première est un mouvement de rotation autour du doigt sur le dessus de l'objet de $\Delta\psi$ pour pousser le doigt inférieur sous l'objet. La position du doigt sur le dessus est notée $[x_{ds}, z_{ds}]$. La deuxième partie du mouvement consiste à avancer vers l'objet de Δx_5 . Finalement, la troisième composante du mouvement soulève l'objet de Δz_5 . L'expression de la matrice homogène représentant toutes ces opérations est :

$$\mathbf{T}_{op,5} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\psi) & 0 & \sin(\Delta\psi) & [\Delta x_5 + x_{ds} - x_{ds} \cos(\Delta\psi) - z_{ds} \sin(\Delta\psi)] \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\Delta\psi) & 0 & \cos(\Delta\psi) & [\Delta z_5 + z_{ds} + x_{ds} \sin(\Delta\psi) - z_{ds} \cos(\Delta\psi)] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.27)$$

Sachant que le doigt du dessus est complètement déplié (il est dans sa configuration initiale), la position précise de son bout est obtenue à partir de la position de la pince au terme de l'opération précédente \mathbf{T}_4 et de la géométrie de la pince (voir section 1.3.2). Ainsi,

$$\begin{bmatrix} x_{ds} \\ 0 \\ z_{ds} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_a^{-1} \mathbf{T}_4 \begin{bmatrix} 49,85 \text{ mm} \\ 0 \\ 157,4 \text{ mm} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Finalement, les valeurs choisies par l'utilisateur des composantes du mouvement $\Delta\psi$, Δx_5 et Δz_5 doivent être faibles dans un contexte où le robot doit effectuer le mouvement dans le court laps de temps nécessaire pour fermer la pince (expérimentalement, au maximum 1 s). Ainsi, les valeurs utilisées dans l'implémentation du pelletage sont relativement petites : $\Delta\psi$ correspond à la rotation $\Delta\phi$ en sens inverse, Δx_5 est une avance vers l'objet de 4 cm et Δz_5 soulève l'objet de 2 cm.

4.3.7 Étape 6 - Remontée linéaire de la pince

Une fois le mouvement de fermeture complété, la prise en pelletage est complétée. Avant de passer à une autre opération comme le dépôt de l'objet, il est habituellement nécessaire d'extraire la prise de son contenant. Dans le but de limiter les risques de collision avec l'environnement, une remontée linéaire de la pince est faite. La valeur de la remontée Δz_6 est définie en fonction de l'environnement ; pour simplifier, il est possible d'utiliser la hauteur du point intermédiaire de l'étape 1, h_1 . La matrice homogène représentant cette opération prend la forme de :

$$\mathbf{T}_{op,6} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

4.3.8 Remarques sur l'efficacité du mouvement de pelletage

Le mouvement de pelletage d'objet a été élaboré empiriquement de manière à optimiser les résultats expérimentaux ; un modèle théorique quasi-statique de ce mouvement est aussi exploré à l'annexe D. Il est possible de tirer les mêmes conclusions de ces deux approches : le succès d'une prise repose sur les 4 facteurs décrits ci-dessous.

- Le premier facteur en importance pour réussir un mouvement de pelletage est d'arriver à glisser un doigt sous l'objet, d'où l'utilisation d'un ongle mince et flexible. Ce premier facteur explique également pourquoi il est plus facile de prendre un objet ayant un bord arrondi qu'un objet adhérent à la table (la bande de caoutchouc d'un porte-poussière par exemple).

- Le deuxième facteur en importance lors du pelletage est le coefficient de friction entre l’objet et le sol ; plus il est grand, plus il est facile de prendre l’objet. Un analogue à ce phénomène est l’utilisation d’un obstacle pour bloquer le glissement latéral de l’objet. Comme la seule manière d’affecter ce paramètre est de modifier le montage expérimental, ce dernier ne sera pas abordé en plus de détail.
- Le troisième paramètre important pour la qualité d’une prise est la force appliquée sur le dessus de l’objet. Cette dernière peut être séparée en deux forces : la force normale et la force de friction. Ces deux forces agissent en tant que retenues pour l’objet, l’empêchant d’être expulsé lors de la prise. Une plus grande force appliquée mène généralement à de meilleures chances de réussite d’une prise.
- Finalement, le modèle théorique ne simule la prise que d’objets infiniment rigides. Le modèle théorique et l’expérience mènent aux mêmes conclusions : ce type d’objet est très difficile à prendre. Les objets flexibles sont souvent plus faciles à prendre. Par exemple, les résultats expérimentaux de l’annexe E montrent qu’un livre à couverture souple peut être pris, mais pas un livre à couverture rigide de mêmes dimensions. Les objets étant généralement plus souples lorsque pris par leur bord long, c’est ce côté qui est privilégié comme point de prise.

4.4 Choix du mouvement de prise approprié pour un objet

La méthode de prise en pelletage a été développée principalement pour permettre à au préhenseur utilisé d’attraper des objets trop minces ou trop larges pour la prise par le dessus détaillée au chapitre 3. La plage d’objet pouvant être pris à l’aide de ces deux techniques se superposant par endroits, l’algorithme de choix de technique détaillé à la figure 4.16 a été élaborée.

Les seuils utilisés par cet algorithme sont définis à partir de la géométrie de la pince (voir la section 1.3.2.1), des mouvements de prise et d’essais empiriques. Ainsi, la distance entre les doigts de la pince lorsque cette dernière est pleinement ouverte permet de déterminer si l’objet est trop large pour une prise par le dessus ($d_{max,d} = 80$ mm). Si l’objet est suffisamment étroit pour être pris par le dessus, il est ensuite vérifié s’il est trop mince pour être pris par le dessus de manière convenable. Le seuil utilisé,

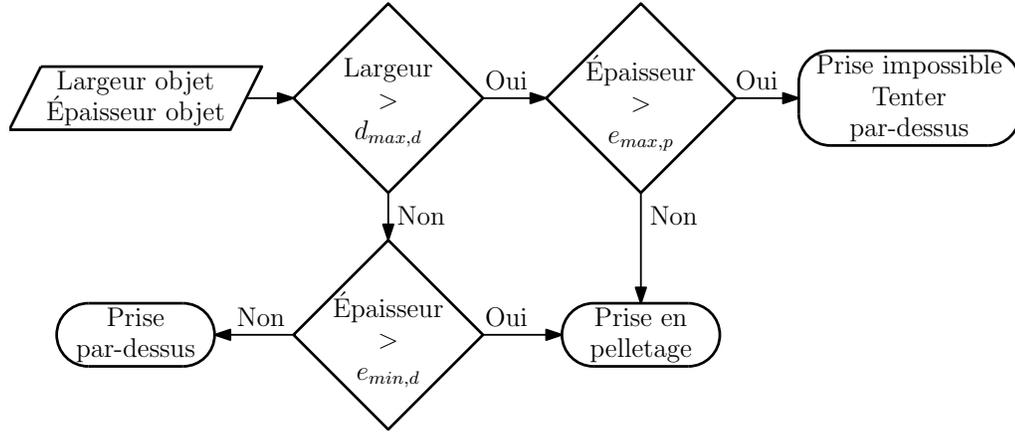


FIGURE 4.16 – Algorithme de choix du type de prise à utiliser pour un objet.

$e_{min,d} = 40$ mm, a été déterminé empiriquement et correspond à une hauteur d'objet en deçà de laquelle une prise en pelletage de l'objet a plus de succès. Si l'objet est trop large pour être pris par le dessus, il est vérifié s'il est trop haut pour être pris en pelletage. Sachant que la hauteur maximale de l'objet admissible en pelletage $e_{max,p}$ correspond à la distance verticale entre les doigts de la pince lorsque cette dernière effleure la table à un angle γ ,

$$e_{max,p} = 2(12,7 \text{ mm} + 57,15 \text{ mm} \cos(49,45^\circ)) \sin \gamma \quad (4.30)$$

où les valeurs numériques correspondent à la géométrie de la pince ouverte et dépliée. Dans le cadre de ces travaux, la valeur d'angle de la pince par rapport au sol utilisée est $\gamma = 45^\circ$, ce qui mène à $e_{max,p} \approx 70,5$ mm.

4.4.1 Perspectives d'amélioration

Cet algorithme de choix de technique de prise a été conçu pour être simple, ce qui permet de comprendre facilement le comportement du système en marche. Ainsi, dans un cas où il n'y a qu'un seul objet à prendre, cet algorithme représente l'approche la plus simple possible et est suffisant pour prendre les bonnes décisions de prise. Cependant, l'ajout de complexité pourrait pallier certaines de ses faiblesses.

Par exemple, un problème commun découle de la représentation des objets. Le système de vision assigne une hauteur unique à chaque objet à partir d'une mesure de l'épaisseur en leur centre, ce qui est problématique pour les objets possédants un trou

central (par exemple, un rouleau de ruban adhésif). Dans ces cas, l'algorithme perçoit les objets comme minces et commande une prise en pelletage alors que la hauteur des bords de l'objet est souvent suffisamment élevée pour justifier une prise par le dessus. La combinaison de trois actions pourraient régler ce problème. La première serait de générer simultanément des hypothèses de prise en pelletage et par le dessus lors de la détection d'un nouvel objet. La deuxième action serait de détecter la hauteur de l'objet au point de prise. Finalement, il faudrait créer un nouvel algorithme de choix de point de prise pouvant juger une liste d'hypothèses contenant autant des prises en pelletage que des prises par le dessus.

Un autre problème est la gestion des objets impossibles à prendre. Si les dimensions hors tout de l'objet indiquent que ce dernier est trop large pour entrer dans la pince et trop haut pour être pris en pelletage, ce dernier est théoriquement impossible à prendre. Dans ces cas, la technique de prise par le dessus est recommandée dans l'espoir que l'analyse en détail de l'objet permette de trouver une position de prise; il se peut toutefois qu'une telle position n'existe pas. Trois améliorations sont ici envisagées. Premièrement, l'amélioration de la représentation 3D des objets couplée à des générateurs d'hypothèses de prise pouvant utiliser cette information permettrait de trouver des points de prise jusqu'ici invisibles. Par exemple, il serait possible de trouver une section plate et mince d'un objet haut permettant de le prendre en pelletage ou bien de trouver une « tour » qu'il est possible de prendre par le dessus. Une deuxième amélioration possible serait de générer les hypothèses de prise pour le pelletage et celle pour la prise par le dessus avant d'arriver à cet algorithme de choix de technique. La technique utilisée serait alors simplement celle de l'hypothèse ayant le plus de chance de succès. Finalement, une troisième amélioration consisterait à créer un protocole pour les objets impossibles à saisir. Il est possible d'imaginer utiliser des éléments extérieurs pour manipuler ces objets et possiblement découvrir de nouveaux points de prise. Il serait également possible de simplement pousser ces objets hors de l'espace de travail.

Finalement, un autre problème dans cet algorithme est qu'il ne prend pas en compte l'environnement de l'objet à prendre. Cela est surtout problématique pour les prises en pelletage, ces dernières demandant beaucoup d'espace libre dans la direction d'approche de l'objet choisie. Encore une fois, une solution à ce problème serait de générer les hypothèses de prise de l'objet par le dessus et celles en pelletage avant de prendre une décision sur le type de prise à tenter.

4.5 Conclusion

Afin de pouvoir prendre des objets trop larges ou trop minces pour la prise par le dessus établie au chapitre 3, une méthode de prise en pelletage a été élaborée. Cette dernière consiste à glisser un doigt du préhenseur utilisé entre le dessous de l'objet et la surface le supportant. Cette technique a été inspirée d'un mouvement analogue fait par les humains ayant à prendre des objets minces et rigides comme des livres sur des surfaces planes. Comme pour la prise par le dessus, le problème de l'implémentation de ce mouvement a été séparé en deux sous-problèmes : le choix d'un point de prise et la définition du mouvement de prise.

Le choix du point de prise a été dicté par l'hypothèse voulant que la prise d'un objet perpendiculairement à un de ses bords longs en un point où la direction d'approche de la pince passe par son centre de masse soit la plus stable possible. Toutefois, si l'environnement est trop restreint pour permettre la génération d'un tel point, la contrainte d'approcher l'objet perpendiculairement à une de ses surfaces est abandonnée. Le choix d'un point de prise est fait à partir des seules informations fournies par le système de vision décrit au chapitre 1 : les contours de l'objet et de son environnement vu de dessus.

Le mouvement de prise a été conçu spécifiquement pour utiliser les avantages offerts par l'utilisation d'une pince aux doigts sous-actionnés. Ce dernier est décomposé en six étapes : l'atteinte d'un point intermédiaire pour orienter la pince, la descente pour faire entrer en contact la pince avec le sol, l'avance vers l'objet pour glisser un doigt dessous, la pose d'un doigt sur le dessus de l'objet, la fermeture de la pince puis finalement un mouvement d'extraction de l'objet de son contenant. Ce mouvement de prise est effectué en boucle ouverte, c'est-à-dire sans modification de sa trajectoire pré-calculée à la suite de la rétroaction d'un capteur au cours de son exécution.

Chapitre 5

Essais expérimentaux

Ce chapitre présente les essais expérimentaux réalisés pour évaluer la performance des techniques de prise par le dessus et en pelletage décrites aux chapitres 3 et 4 respectivement. Ces essais consistent en une série de 10 essais de prise sur chacun des 80 objets du jeu d'objets décrits à la section 1.3.4 pour un total de 800 essais de prise. La dernière partie de ce chapitre porte sur les résultats globaux de ces essais, sur les causes d'erreur les plus fréquentes ainsi que sur des modifications possibles à apporter au système pour améliorer ses performances. Les résultats détaillés par objets peuvent être consultés à l'annexe E.

5.1 Mise en contexte

Le but des travaux présentés dans ce document est de développer des méthodes pour permettre à un robot sériel muni d'une pince sous-actionnée et d'une caméra 3D de prendre de manière autonome une variété d'objets de la vie courante. L'algorithme utilisé pour ce faire est décrit en détail au chapitre 1 ; le matériel expérimental utilisé y est aussi décrit. En connaissant ce matériel, deux techniques de prise ont été développées : une prise par le dessus (chapitre 3) et une prise en pelletage (chapitre 4). Le présent chapitre présente les essais expérimentaux faits afin d'évaluer leur efficacité.

La tâche de prise d'objet est une des premières qui a été développée en robotique industrielle (la première utilisation d'Unimate, le premier robot sériel industriel, était de déplacer des pièces d'acier coulées sous pression (*die casting*) dans une usine de General Motors en 1961 [55]). Malgré cela, elle fait toujours l'objet de recherches et il n'existe toujours pas de consensus dans la littérature sur la méthode à employer pour tester l'efficacité des méthodes développées. Par exemple, un test classique est le déchargement robotisé d'un lave-vaisselle pour simuler une scène non structurée [53]. Il existe cependant d'autres tests se rapprochant plus de ce qui est tenté dans le cadre de ces travaux ; les articles cités ci-dessous présentent quelques exemples de telles méthodes expérimentales. Bien que les résultats de ces articles ne puissent être directement comparés entre eux, ils fournissent également une idée du taux de succès de prise acceptable dans la littérature.

Saxena et collab. [53] ont travaillé sur l'entraînement par apprentissage machine d'un modèle de ce qu'est visuellement un bon point de prise afin de pouvoir prendre des objets jusqu'alors inconnus par le système. Pour tester leur système, un robot sériel à 5 degrés de liberté muni d'un préhenseur parallèle simple a été utilisé. 4 essais de prise ont été faits sur 5 objets semblables à ceux du jeu d'entraînement du modèle avec un taux de succès de 90 %. En utilisant 9 objets totalement inconnus, le taux de succès était plutôt de 87,8 %.

Xu et collab. [65] ont quant à eux développé un préhenseur spécialement adapté pour permettre à une Roomba (petit robot mobile) d'attraper des objets de la vie commune tombés au sol en les pelletant. Pour tester ce préhenseur, une batterie de 680 essais de prise lui fut imposé. Cette dernière consistait en la prise de 34 objets présentés

5 fois dans des configurations différentes et sur 4 types de surfaces. Le taux de succès atteint avec ce mécanisme était de 94,7 %.

Les participants du Amazon Picking Challenge 2015 [28] ont eu à identifier, prendre et déplacer 12 objets contenus dans 12 casiers verticaux placés devant le robot contenant initialement au total 50 objets. Le score assigné à une prise dépendait du nombre d'objets dans le casier lors de la prise et du non-endommagement de l'objet et de l'équipement. L'équipe RBO de l'Université Technique de Berlin a remporté cette compétition en déplaçant 10 objets en 20 minutes avec un robot sériel WAM de Barret utilisant comme préhenseur une ventouse actionnée par un aspirateur.

5.2 Méthodologie

La méthodologie retenue pour tester l'algorithme de prise d'objet automatisé est relativement simple. Dix essais de prise sont tentés sur chacun des 80 objets de la liste d'objets de la vie courante décrite à la section 1.3.4 pour un total de 800 essais de prise. Lors des essais, le robot est libre d'employer la technique de prise la plus appropriée selon l'algorithme de la section 4.4 ; il arrive parfois que les deux méthodes soient employées pour un même objet s'il se trouve à la limite d'un choix de l'algorithme.



FIGURE 5.1 – 8 configurations possibles d'un objet sur le plan.

Au cours des essais sur un objet, deux mesures sont prises pour simuler son arrivée aléatoire dans l'espace de travail du robot et ainsi tester pleinement les capacités du système. Premièrement, la position de l'objet est changée légèrement d'essai en essai. Ainsi, un objet peut être placé autant à droite qu'à gauche du robot, son angle sur le

plan de travail peut changer, etc. Deuxièmement, toutes les configurations possibles de l'objet sur le plan sont présentées au système. Par exemple, l'objet illustré à la figure 5.1 peut être présenté de 8 manières différentes au mouvement de pelletage choisi par le système. Cette méthodologie affecte particulièrement les résultats du mouvement de pelletage : plusieurs objets ne peuvent être pris qu'à l'aide d'une direction d'approche spécifique. Finalement, il est à noter que si un changement de configuration entraîne un changement de la méthode de prise choisie (par exemple, un livre à plat sur la surface de travail n'est pas pris de la même manière que ce même livre placé debout), cette nouvelle configuration est traitée comme un nouvel objet.

5.3 Résultats

Les résultats détaillés des essais sont présentés à l'annexe E. Cette dernière présente chacun des 80 objets en détail, quel type de prise est employé pour les prendre, le taux de succès des prises ainsi que les commentaires de l'expérimentateur au cours des essais. Les résultats globaux sont quant à eux résumés par la figure 5.2.

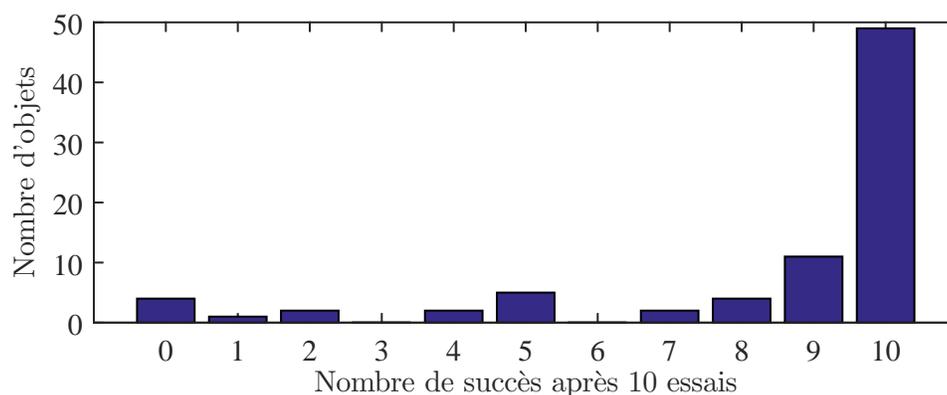


FIGURE 5.2 – Nombre d'objets du jeu expérimental de 80 objets ayant atteint un taux de succès donné.

En résumé, sur 800 essais de prise, 673 ont été réussis (un taux de succès de 84 %). 9 objets sur 80 ne sont pris qu'entre 0 et 4 fois sur les 10 essais de prise tentés ; 11 sont pris 9 fois et 49 sont toujours pris. Divisés en fonction du type de prise, 53 des 80 objets sont pris par pelletage avec un taux de succès de 80 % et 27 objets sont pris par le dessus avec un taux de succès de 91 %. Il est à noter que la variation systématique de la

configuration des objets a affecté négativement les résultats. En effet, 12 des 21 objets étant pris entre 5 et 9 fois ont des configurations dans lesquelles ils sont facilement pris alors que c'est impossible dans d'autres. En posant toujours ces objets dans une configuration favorable, le taux de succès global aurait pu monter jusqu'à 88 %.

Le temps de cycle (perception de l'objet par la caméra, planification du mouvement de prise, exécution de la prise, dépôt de l'objet) était d'environ 20 secondes. Le temps de cycle varie en fonction de la technique de prise utilisée (le mouvement de prise par le dessus est plus rapide que celui en pelletage mais prend plus de temps à planifier) et de la complexité de l'objet (le temps nécessaire au choix d'un point de prise augmente exponentiellement en fonction du nombre d'arêtes du contour de l'objet). Sans grandes modifications au montage expérimental, il serait possible de diminuer ce temps de cycle en augmentant la puissance de calcul disponible durant la planification de prise et en augmentant la vitesse de déplacement du robot (pour la sécurité de tous, le robot était limité à 20 % de sa vitesse maximale durant les essais).

En analysant les résultats par objet, 12 causes d'échec de prises ont été identifiées. Ces dernières sont présentées en ordre décroissant du nombre d'erreurs qu'elles ont causées au tableau 5.1. Il est à noter que certaines catégories de causes d'erreur se superposent (par exemple, l'approche du mauvais côté de l'objet implique généralement que l'objet est rigide). Un échec particulier n'est assigné qu'à la catégorie le représentant le mieux. Les différentes causes d'erreurs sont décrites en détail ci-dessous ainsi que certaines idées pour les atténuer.

1. **Mauvaise direction d'approche :** Tel que démontré par le modèle quasi-statique du mouvement de pelletage de l'annexe D, deux caractéristiques d'un objet peuvent donner du fil à retordre au mouvement de pelletage : une grande rigidité et un contact hermétique entre l'objet et la surface dans la direction d'approche du préhenseur. Sur certains objets, ces caractéristiques problématiques ne se manifestent que dans certaines configurations de l'objet (ou direction d'approche de la pince). Par exemple, un livre est plus rigide dans un sens que dans l'autre. Pour améliorer les performances du système, ce dernier devrait apprendre à reconnaître ces directions d'approche difficile et les prendre en compte lors du choix d'un point de prise. Une autre solution consisterait à systématiquement présenter les objets au robot dans une configuration favorable.

2. **Hauteur de l'objet imprécise** : La hauteur du point de prise de l'objet choisi est erronée, causant une prise trop haute ou trop basse. Ce phénomène a deux causes. La première est lorsque la hauteur au point de prise diffère de la hauteur du centre de l'objet (objet ayant une forte pente comme les gobelets pour enfants). Pour résoudre ce problème, la hauteur du point de prise devrait être mesurée au point de prise et non au centre de l'objet comme c'est fait présentement (cette manière de faire simplifiait grandement l'algorithme et diminuait la quantité d'information à garder en mémoire). La seconde cause d'erreur est lorsque la hauteur perçue par la caméra est erronée. La cause principale de ce type de problème est la technique de projection d'un patron infrarouge sur l'environnement utilisée par la caméra 3D pour percevoir la profondeur. Certains objets viennent déformer ce patron de manière inattendue par la caméra, rendant les mesures de la hauteur et du contour de l'objet imprécises . Trois types d'objets causent ce phénomène : les objets ayant des arêtes vives causant de la diffraction (comme la poubelle en grillage), les objets très réfléchissants (le métal poli par exemple) et les objets transparents. L'utilisation d'une caméra utilisant une autre technique de perception de la profondeur pourrait régler une partie de ce problème.
3. **Objet invisible à la caméra** : Pour une variété de raisons, il arrive que certains objets ne puissent être perçus par la caméra. Deux catégories d'objets sont ici distinguées. La première comprend les objets trop fins pour être perçus par la caméra (la paire d'anneaux par exemple). Ces objets sont tellement petits qu'ils sont traités comme du bruit par le système de vision. L'élimination du bruit dans l'image couleur de la caméra se fait actuellement en retirant les objets plus petits qu'une certaine aire, les objets fantômes créés par les variations lumineuses de l'espace de travail étant généralement plus petits que ce seuil. Une réduction du bruit dans l'image à l'aide de meilleures conditions d'éclairage (élimination des ombres, éclairage constant au fil de la journée, etc.) permettrait de réduire ce seuil et donc de réduire la taille du plus petit objet détectable. La seconde catégorie d'objets comprend les objets invisibles par le système de perception de la profondeur de la Kinect (voir l'item 2 de cette liste). Dans ces cas, la caméra est incapable d'assigner des valeurs réelles au contour de l'objet segmenté à partir de son image couleur. Une caméra utilisant une autre méthode de perception des profondeurs pourrait résoudre ce problème.
4. **Objet rigide** : Les objets rigides ont tendance à être éjectés du préhenseur lors de leur prise en pelletage. Comme démontré par le modèle quasi-statique du mouvement de pelletage de l'annexe D, ce cas de préhension est particulièrement difficile. En pratique, la cause principale de ce phénomène est l'incapacité d'insérer un doigt sous

l'objet sans le déplacer. Pour le résoudre, trois pistes de solutions sont envisageables. La première est l'augmentation de la force de friction empêchant l'objet de glisser sur le sol (l'utilisation d'un obstacle bloquant son mouvement aurait le même effet). La seconde est la diminution des forces poussant l'objet vers l'avant en utilisant un doigt d'insertion lisse et en diminuant son angle d'attaque par rapport à l'objet. Finalement, l'augmentation de la force appliquée sur le dessus de l'objet permettrait de mieux le garder en place.

5. **Objet trop gros :** La taille de l'objet dans sa configuration actuelle est telle qu'il n'existe aucune manière de le prendre en raison des limites imposées par la taille du préhenseur utilisé et par l'environnement. Certains de ces cas pourraient être résolus par une manipulation de l'objet pour l'amener dans une configuration plus favorable. Il faudrait également être capable de reconnaître qu'un objet est impossible à prendre en pincée uniquement à partir de sa géométrie.
6. **Contour de l'objet imprécis :** Le contour de l'objet perçu par la caméra 3D Kinect placée au-dessus de l'aire de travail est imprécis, ce qui peut mener à trois types de problèmes. Le premier est la mauvaise identification du centre géométrique de l'objet, rendant plus difficile la prise de petits objets. Le second est une taille d'objet à la limite de ce que peut accommoder le préhenseur : une petite imprécision de la position du contour cause un échec. Finalement, l'algorithme de choix de point de prise par le dessus pour les objets à forme complexe peut sélectionner un point erroné, causant ainsi une collision avec l'objet ou au contraire une prise dans le vide. Pour réduire ces problèmes, le système de vision doit être amélioré. Pour ce faire, il serait possible d'utiliser une caméra 3D plus précise, une meilleure calibration entre le robot et la caméra ou une meilleure segmentation des objets à partir des images produites par la caméra.
7. **Mauvaise insertion de l'ongle :** Le mouvement de pelletage requiert qu'un doigt soit inséré sous l'objet. Pour faciliter cette tâche, un ongle flexible a été ajouté au doigt inférieur du préhenseur. Lorsque cet ongle ne réussit pas à se glisser sous l'objet lors de la phase d'approche, le mouvement est presque toujours un échec. La cause de ce phénomène est une combinaison d'un contact hermétique entre l'objet et la surface (la bande de caoutchouc d'un porte-poussière par exemple) et d'un ongle trop épais et trop adhérent pour s'insérer dans ce contact. Pour améliorer les performances, trois changements peuvent être effectués : utiliser une surface de travail texturée pour créer des espaces entre cette dernière et l'objet, utiliser un ongle plus affûté et finalement utiliser une surface de doigt d'insertion plus glissante.

8. **Déplacement de l'objet** : Certains objets sont assez légers et petits pour que leur approche par le préhenseur suffise à les déplacer de manière significative, faisant ainsi échouer la prise. Pour régler ce problème, deux approches sont considérées. La première consiste en une approche plus douce des objets. Malheureusement, la vérification expérimentale de cette hypothèse a démontré que cette mesure a en réalité peu d'effet sur ce phénomène. Sa principale cause est plutôt un léger décalage entre la direction d'approche du préhenseur et le centre de masse de l'objet causant une rotation de ce dernier. La seconde approche appelle à l'utilisation d'une surface de travail plus adhérente dans l'espace de travail du robot.
9. **Erreur de parallaxe** : Normalement, la caméra produit des images du dessus des objets seulement ; les côtés de ces objets sont invisibles. Idéalement, une image 3D produites par la caméra est donc équivalente à une carte topographique. Cependant, si les objets sont hauts et à l'extrémité du champ de vision de la caméra, cette hypothèse devient invalide. Ces erreurs de parallaxe viennent fausser les contours produits par le système de vision et déplacent le centre géométrique perçu de l'objet vers l'axe optique de la caméra. L'imprécision du contour résultant peut créer un point de prise faussé et ainsi empêcher la bonne prise de l'objet. Deux solutions sont considérées pour régler ce problème. La première consiste à réduire l'erreur que ce phénomène peut créer, soit en éloignant la caméra de l'espace de travail ou bien en réduisant l'espace de travail et en le centrant autour de l'axe optique de la caméra. Ces deux options causent toutefois une perte de précision des images produites ou une restriction de l'espace de travail, d'importants désavantages. L'autre piste de solution considérée est de créer un modèle 3D des objets à partir des données perçues par la caméra. Avec ce modèle, il serait possible soit d'extraire un contour 2D du dessus de l'objet pour continuer à utiliser les algorithmes créés dans le cadre de ces travaux ou bien d'en développer de nouveaux utilisant le modèle complet. Cette dernière solution est toutefois plus complexe à mettre en place et reste tributaire de la précision de la caméra utilisée.
10. **Objet glissant** : Les surfaces de l'objet en contact avec les doigts du préhenseur sont parfois glissantes. L'effet net est que l'objet a tendance à être éjecté de la pince lors de sa prise ou bien lors de son transport. L'utilisation de doigts plus adhérents pourrait réduire le problème.
11. **Objet fragile** : Certains objets sont assez fragiles pour être endommagés par la force de fermeture de la pince pendant la prise. Parmi les objets utilisés dans les essais, cette catégorie d'objet concerne principalement les boîtes de carton. Pour réduire ce problème sans changer de préhenseur, la force de fermeture de la pince

devrait être ajustée à l'objet. Dans la pratique, la force de fermeture utilisée est choisie pour attraper la majorité des objets sans les échapper ou les endommager. Avant d'augmenter la force, il est vérifié si l'objet a glissé en mesurant la position des doigts : s'ils se sont refermés depuis la fin de la prise, l'objet a glissé. Cette méthode ne pouvant indiquer qu'après coup que l'objet a sérieusement glissé, la force minimale de fermeture de la pince est maintenue relativement haute. Pour la diminuer, une méthode consisterait à avoir un meilleur système de détection du glissement des objets. Cela permettrait d'utiliser la force de fermeture minimale de la pince en tout temps. L'utilisation de capteurs tactiles (voir section 3.4) serait donc tout indiquée.

12. **Mauvais type de prise choisi** : Certains objets ne peuvent être pris que par le dessus ou bien en pelletage. Il arrive cependant que leur géométrie fasse prendre au système une mauvaise décision sur le type de prise à tenter. Ce problème est souvent relié à une mauvaise perception des dimensions de l'objet ou bien à une géométrie d'objet difficile à prendre par le dessus (par exemple, la pente des lunettes de soleil). Un cas particulier est celui du porte-poussière : ce dernier peut être pris par le dessus grâce à sa poignée, mais comme la hauteur de l'objet est perçue au centre géométrique de l'objet (ici mince), il est plutôt pris en pelletage. Une solution pour régler ce problème particulier serait de prendre la hauteur de l'objet au point de prise choisi.

5.4 Conclusion

Des essais expérimentaux ont été menés pour évaluer l'efficacité des méthodes de prise par le dessus et en pelletage développées dans le cadre de ces travaux. Pour mener ces essais, un jeu de 80 objets de la vie courante a été assemblé en prenant comme base les 27 objets du Amazon Picking Challenge ; les objets supplémentaires ont été sélectionnés de manière à poser des défis au système. La méthodologie utilisée pour tester les méthodes de prise ainsi que les limites du montage expérimental était relativement simple : 10 essais de prise sur chacun des 80 objets du jeu expérimental. Pour simuler l'arrivée aléatoire des objets, chaque configuration d'un objet (à l'endroit, à l'envers, etc.) a été testée au cours d'une série d'essais de prise et les objets ont été placés à des endroits légèrement différents d'essai en essai.

Au terme des 800 essais de prise, 673 ont été réussis, soit un taux de succès global de 84 %. 53 des 80 objets ont été pris par pelletage (avec un taux de succès de 80 %) et 27 objets ont été pris par le dessus (avec un taux de succès de 91 %). Sur les 80 objets, 60 ont été pris entre 9 et 10 fois ; 9 objets n'ont été pris qu'entre 0 et 4 fois.

En analysant les résultats par objet (détaillés à l'annexe E), 12 causes d'erreur ont été identifiées. De ces dernières, 4 sont responsables de près de 75 % des échecs de prise. La première en importance est la présentation d'objets dans une mauvaise configuration pour une prise en pelletage. La seconde est une mauvaise perception de la hauteur de l'objet au point de prise. La troisième concerne les objets invisibles par le système de vision actuel. Finalement, la quatrième concerne les objets trop rigides pour le mouvement de pelletage utilisé. Pour résoudre ces problèmes, plusieurs suggestions ont été formulées. Celles ayant possiblement le plus d'impact sont la reconnaissance des directions d'approches favorable à une prise, l'amélioration du système de vision pour en améliorer la précision et finalement l'utilisation d'une surface adhérente et texturée pour améliorer les performances du mouvement de pelletage.

Tableau 5.1 – Causes d'échec de prise lors des essais expérimentaux. L'échec de la prise d'un objet peut être causé par la combinaison de plusieurs des causes détaillées dans ce tableau, mais un échec particulier n'est assigné qu'à sa cause d'échec principale.

Cause	Nombre d'erreurs	Nombre d'objets	Exemples			
Mauvaise direction d'approche	28	12				
Hauteur de l'objet imprécise	27	9				
Objet invisible à la caméra	20	2				
Objet rigide	19	11				
Objet trop gros	10	1				
Contour de l'objet imprécis	8	3				
Mauvaise insertion de l'ongle	6	5				
Déplacement de l'objet	6	2				
Erreur de parallaxe	2	5				
Objet glissant	1	1				
Objet fragile	0	5				
Mauvais type de prise choisi	0	5				

Conclusion

Le but du projet décrit dans ce mémoire était de créer et tester une cellule robotisée autonome pour faire la prise et le dépôt (*pick and place*) d'objets de la vie courante. L'inspiration derrière ce projet était l'automatisation de l'emballage de colis dans de grands entrepôts pouvant contenir plusieurs centaines de milliers d'objets différents (comme ceux d'Amazon.com). Le défi était donc d'arriver à créer un montage pouvant rapidement prendre et déposer des objets très variés sans avoir de connaissances préalables sur ces derniers (aucun modèle 3D des objets, de trajectoire de prise unique pour un objet particulier, etc.). Pour le relever, il fut décidé de garder le montage expérimental simple en utilisant des composants disponibles sur le marché et faciles d'utilisation. Pour le programme gérant la cellule robotisée, une accumulation d'heuristiques simples a été préférée aux méthodes d'apprentissage machine, permettant ainsi d'aisément comprendre et modifier le comportement du robot.

Le premier chapitre a d'abord présenté l'algorithme décisionnel indiquant au système quelle action entreprendre à un instant donné. Ce dernier est relativement simple, effectuant successivement les tâches d'initialisation du montage, de perception des objets sur le plan de travail, de planification de la prise d'un objet suivi de son exécution et de son évaluation et finalement de dépôt de l'objet pris. La cellule robotisée assemblée pour tester cet algorithme a ensuite été présentée. Cette dernière est constituée de quatre éléments : un robot sériel UR5 de Universal Robots, une pince sous-actionnée C3 de Robotiq, un système de vision 3D utilisant une Kinect de Microsoft pour détecter les objets et finalement un jeu de 80 objets de la vie courante pour tester le tout.

Le second chapitre a présenté en détail le robot UR5, la pièce centrale du montage expérimental. Afin de pouvoir faire interagir ce dernier avec le reste des composantes du montage expérimental, il fut nécessaire de le commander à partir d'un ordinateur externe. Pour établir la communication entre cet ordinateur et le robot, le paquet ROS de Universal Robots fut utilisé. Les capacités de ce programme sont cependant limitées, ne pouvant envoyer comme commande que des configurations articulaires à atteindre en un temps donné par le robot. Les mouvements à effectuer étant plus complexes, il fut nécessaire de programmer un planificateur de trajectoire adapté au UR5 à partir des solutions analytiques de ses problèmes géométriques direct (PGD) et inverse (PGI). Une étude des configurations singulières du robot et des zones d'auto-collision fut également faite afin de parfaire le planificateur de trajectoire.

Le troisième chapitre portait sur la technique de prise par le dessus d'objets utilisée dans le cadre de ces travaux. Lorsqu'appelée, cette méthode produit une trajectoire où le robot se place directement au dessus d'un point de prise avant de descendre verticalement et de fermer sa pince. L'avantage de cette technique est qu'en plus d'être rapide d'exécution, elle minimise les risques de collisions avec l'environnement ; elle est donc privilégiée lorsque des obstacles entourent l'objet à prendre. La prise par le dessus peut être découpée en trois grandes parties : le choix de l'objet à prendre, le choix d'un point de prise sur cet objet et finalement la planification du mouvement d'approche et de prise de l'objet. Finalement, ce chapitre décrivait une méthode d'évaluation du succès d'une prise à partir de l'information retournée par la position des doigts de la pince C3 et la largeur de l'objet à son point de prise telle que perçue par le système de vision 3D.

Bien qu'efficace, la méthode de prise par le dessus ne permet pas d'attraper tous les objets, étant limitée par les dimensions de la pince utilisée. Pour prendre les objets trop larges ou trop minces pour la prise par le dessus, la technique de prise en pelletage décrite au chapitre 4 a été développée. Cette dernière consiste à prendre avantage du sous-actionnement de la pince pour appuyer le dessous d'un de ses doigts sur la surface soutenant l'objet puis à le glisser sous ce dernier ; un mouvement semblable est fait par les humains pour prendre un objet mince et rigide sur un plancher. Ce chapitre présentait l'algorithme de choix d'un point de prise en pelletage ainsi qu'une description mathématique de ce mouvement. L'algorithme permettant de choisir quel type de prise utiliser pour un objet spécifique y était également présenté.

Le dernier chapitre de ce mémoire présentait les essais empiriques menés pour tester les capacités de prise d'objet du montage expérimental au terme de ces travaux. La méthodologie employée était simple : 80 objets différents furent présentés 10 fois chacun au système pour être pris. Les objets étaient placés seuls dans l'espace de travail du robot et toutes leurs configurations possibles (à l'endroit, à l'envers, de côté, etc.) furent testées. Sur 800 essais de prise, 673 furent réussis, soit un taux de succès de 84 %. Par ailleurs, 74 % des échecs de prises furent causés par quatre phénomènes : l'approche de l'objet dans une direction défavorable (28 échecs), une perception de la hauteur de l'objet imprécise (27 échecs), un objet invisible pour le système de vision (20 échecs) et finalement la prise d'un objet trop rigide pour le mouvement de pelletage (19 échecs). Finalement, le temps de cycle moyen de prise et de dépôt d'objet lors de ces essais était d'environ 20 secondes.

Travaux futurs

Les travaux décrits dans ce mémoire ne sont ultimement qu'un point de départ vers l'objectif d'automatiser des tâches d'assemblage de colis dans un contexte logistique. En effet, il reste du travail à faire : le taux de succès de prise global reste inférieur à ce qui serait acceptable en industrie (>99 %), le temps de cycle est trop élevé et finalement le système actuel est également encore trop spécialisé. Pour répondre à ces critiques, les travaux décrits ci-dessous pourraient être entrepris.

Amélioration du taux de succès de prise

Améliorer le taux de succès global des prises est primordial. Un point de départ pour ce faire serait l'implantation des recommandations faites lors de l'analyse des résultats des essais du chapitre 5. De plus, quelques autres modifications sont proposées dans les sections ci-dessous (amélioration du préhenseur, du système de vision, etc.). Toutefois, ces dernières ne seront vraisemblablement pas suffisantes pour atteindre un taux de succès parfait. Une autre stratégie pour améliorer le taux de succès serait d'arriver à mieux détecter lorsqu'un échec est sur le point de se produire ou s'est déjà produit. L'utilisation de capteurs plus sophistiqués comme des capteurs tactiles pourraient servir à cette fin. Une autre amélioration serait d'enseigner au système la reconnaissance d'objets qu'il lui est impossible de prendre, question de les envoyer à un humain.

Modification du préhenseur

Une manière d'améliorer les performances de prise serait de modifier le préhenseur. L'avenue modifiant le moins le montage actuel serait de modifier les doigts de la pince C3 utilisée. Par exemple, le développement d'un doigt glissant dans un sens et adhérent de l'autre serait pratique pour le mouvement de pelletage. Un changement plus radical serait de remplacer le préhenseur utilisé. Par exemple, la conception d'une pince pouvant accommoder des objets de plus grande dimension et conçue pour le mouvement de pelletage performerait mieux que la solution commerciale polyvalente ici utilisée. Un autre exemple serait d'utiliser un système intégrant une ventouse passive ou active. Cette dernière solution est déjà populaire dans l'industrie, les ventouses pouvant manipuler sans risque d'endommagement des objets présentant une section relativement plate et hermétique (des pièces électroniques, des boîtes, etc.). Cependant, la prise d'objets ne présentant pas de telles surfaces est difficile ou demande des outils spécialisés. La force que peut appliquer une seule ventouse est également limitée et localisée (un problème pour les objets comme des livres pouvant grandement se déformer). Finalement, l'utilisation de ventouses actives complexifie la conception du préhenseur, ce dernier devant intégrer un système pneumatique ou hydraulique.

Modification du système de vision

Pour percevoir la position et la géométrie des objets dans l'espace de travail du robot, un système de vision 3D basé sur une Kinect placée directement au dessus des objets est utilisé. Pour améliorer la précision des informations reçues sur les objets, la solution la plus simple (mais coûteuse) serait d'utiliser une caméra plus précise ou utilisant une autre technique de perception de la profondeur. Une autre amélioration serait de traiter les données produites par la caméra comme provenant d'un objet 3D au lieu d'un contour doté d'une hauteur (un prisme). Pour créer un modèle 3D plus complet de l'objet, il serait également possible d'utiliser plus d'une caméra 3D, question de percevoir les côtés de l'objet. Finalement, l'utilisation d'un caméra au poignet du robot, de capteurs tactiles sur les doigts du préhenseur ou d'un capteur d'effort au poignet du robot permettrait d'affiner le mouvement d'approche de l'objet.

Modifications de l'algorithme

L'algorithme utilisé pour prendre des décisions et planifier les mouvements de prise pourrait être raffiné ou remplacé de diverses façons. Une avenue intéressante serait l'utilisation d'apprentissage machine pour remplacer ou compléter certaines fonctions de l'algorithme, d'autant plus que le montage expérimental est fonctionnel et pourrait générer des données réelles pour l'enseignement de comportements.

Diminution du temps de cycle de prise et de dépôt d'objets

Un autre facteur d'importance en industrie est le temps de cycle moyen des opérations de prise et de dépôt. Pour le diminuer, deux actions simples pourraient être entreprises : augmenter la vitesse de déplacement du robot (tout en gardant en tête la sécurité de tous) et augmenter la puissance de calcul de l'ordinateur planifiant les mouvements de prise. Une option demandant un peu plus de travail serait la réorganisation de l'ordre des opérations. Par exemple, la planification du mouvement de prise d'un objet se fait alors que le robot est à l'arrêt. En amorçant cette opération dès que le robot quitte le champ de vision de la caméra pour aller déposer un objet, une partie du temps de planification serait « caché » par le temps de mouvement du robot. Si plusieurs objets sont présents dans l'espace de travail, il serait également possible de créer une liste de prises à effectuer les unes après les autres à partir d'une seule image de l'espace de travail ; même après le lancement de la première prise, l'algorithme pourrait continuer à planifier les prochaines. Pour assurer la robustesse de cette technique, la production de nouvelles images après la prise d'un objet servirait à confirmer si cette liste tient toujours la route. Finalement, l'optimisation et le débogage général du programme faisant fonctionner le système serait bénéfique.

Ajout de nouvelles tâches et capacités

La programmation de nouvelles capacités permettrait au système de se rapprocher de l'idéal d'un robot pouvant faire de l'emballage de colis de manière autonome. Une première amélioration serait de diversifier la présentation possible des objets : pris dans des emballages serrés (*structured bin-picking*), posés semi-aléatoirement sur une surface (*semi-structured bin-picking*) ou jetés dans une pile (*unstructured bin-picking*). Une autre amélioration serait de pouvoir manipuler les objets (changer leur configuration). Cela permettrait d'attraper des objets impossibles à prendre (dégager un objet pris dans un coin, glisser un objet rigide vers un coin de table, etc.) ou bien de les configurer pour une tâche ultérieure. Finalement, dans l'optique d'assemblage d'un colis, il serait nécessaire de programmer un moyen de reconnaître facilement les objets (comme une lecture des codes barres) et un algorithme d'empilement rationnel des objets dans une boîte.

Bibliographie

- [1] 360pi. How many products does Amazon actually carry? And in what categories? http://360pi.com/press_release/many-products-amazon-actually-carry-categories/, June 2016.
- [2] Thomas Timm Andersen. Optimizing the Universal Robots ROS driver. Technical report, Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering, 2015.
- [3] Thomas Timm Andersen. Universal Robots ROS modern driver. https://github.com/ThomasTimm/ur_modern_driver, June 2016.
- [4] Charles Arthur. Jeff Bezos spends a week on the Amazon warehouse floor. <https://www.theguardian.com/technology/blog/2009/mar/27/amazon-bezos-kentucky-warehouse-week>, March 2009.
- [5] Yasemin Bekiroglu, Danica Kragic, and Ville Kyrki. Learning grasp stability based on tactile data and HMMs. In *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*. IEEE, September 2010.
- [6] A. Bicchi. Hands for dexterous manipulation and robust grasping : a difficult road toward simplicity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6) :652–662, December 2000.
- [7] Jeannette Bohg, Antonio Morales, Tamim Asfour, and Danica Kragic. Data-driven grasp synthesis - a survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2) :289–309, April 2014.

- [8] Gary M. Bone, Andrew Lambert, and Mark Edwards. Automated modeling and robotic grasping of unknown three-dimensional objects. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 292–298. IEEE, May 2008.
- [9] James Bowman and Patrick Mihelich. ROS camera calibration Indigo package. http://wiki.ros.org/camera_calibration, 2016.
- [10] Rodney A. Brooks. Robust layered control system for a mobile robot. *IEEE journal of robotics and automation*, RA-2(1) :14 – 23, 1986.
- [11] Samuel R. Buss. Introduction to inverse kinematics with Jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods. Unpublished, October 2009.
- [12] Hee-Byoung Choi, Sukhan Lee, and Jihong Lee. Minimum infinity-norm joint velocity solutions for singularity-robust inverse kinematics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(3) :469–474, June 2011.
- [13] Marianne Côté. *Développement d’algorithmes d’estimation de la pose d’objets saisis par un préhenseur robotique*. Mémoire, Université Laval, April 2016.
- [14] Nikhil Chavan Daffe, Alberto Rodriguez, Robert Paolini, Bowei Tang, Siddhartha S. Srinivasa, Michael Erdmann, Matthew T. Mason, Ivan Lundberg, Harald Staab, and Thomas Fuhlbrigge. Extrinsic dexterity : In-hand manipulation with external forces. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1578–1585. IEEE, May 2014.
- [15] Raphael Deimel, Clemens Eppner, José Álvarez Ruiz, Marianne Maertens, and Oliver Brock. Exploitation of environmental constraints in human and robotic grasping. In *Robotics Research*, volume 114, pages 393–409. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [16] Robert James Firby. *Adaptive Execution in Complex Dynamic Worlds*. Ph. D. Thesis, Yale University, May 1989.
- [17] Philippe Giguère. *Notes de cours de robotique mobile*. Québec, Canada, September 2015.
- [18] Clément M. Gosselin and Ammar Hadj-Messaoud. Automatic planning of smooth trajectories for pick-and-place operations. *Journal of Mechanical Design, Transactions Of the ASME*, 115(3) :450 – 456, 1993.

- [19] Clément M. Gosselin, Jaouad Sefrioui, and Marc J. Richard. Solutions polynomiales au problème de la cinématique directe des manipulateurs parallèles plans à trois degrés de liberté. *Mechanism and Machine Theory*, 27(2) :107–119, March 1992.
- [20] Point Grey. Bumblebee 2. <https://www.ptgrey.com/bumblebee2-firewire-stereo-vision-camera-systems>, November 2016.
- [21] François Guay, Philippe Cardou, Ana Lucia Cruz-Ruiz, and Stéphane Caro. Measuring how well a structure supports varying external wrenches. In *New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications*, volume 17, pages 385–392. Springer, The Netherlands, 2014.
- [22] Insoo Ha and Jihong Lee. Analysis on a minimum infinity-norm solution for kinematically redundant manipulators. *ICASE Transaction on Control, Automation and Systems Engineering*, 4(2) :130–139, June 2002.
- [23] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York, 2nd ed edition, 2003.
- [24] Robert Haschke. Grasping and manipulation of unknown objects based on visual and tactile feedback. In *Motion and Operation Planning of Robotic Systems*, volume 29, pages 91–109. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [25] K. Hsiao, S. Chitta, M. Ciocarlie, and E. G. Jones. Contact-reactive grasping of objects with partial shape information. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1228–1235. IEEE, November 2010.
- [26] K. Hsiao, S. Chitta, M. Ciocarlie, and E. G. Jones. Contact-reactive grasping of objects with partial shape information. pages 1228–1235. IEEE, October 2010.
- [27] J. Ilonen and V. Kyrki. Robust robot-camera calibration. In *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. IEEE, June 2011.
- [28] Amazon.com inc. Amazon picking challenge. <http://amazonpickingchallenge.org/>, January 2016.
- [29] Advait Jain and Charles C. Kemp. EL-E : An assistive mobile manipulator that autonomously fetches objects from flat surfaces. *Autonomous Robots*, 28(1) :45–64, January 2010.

- [30] Dov Katz, Arun Venkatraman, Moslem Kazemi, J. Andrew Bagnell, and Anthony Stentz. Perceiving, learning, and exploiting object affordances for autonomous pile manipulation. *Autonomous Robots*, 37(4) :369–382, December 2014.
- [31] Moslem Kazemi, Jean-Sebastien Valois, J. Andrew (Drew) Bagnell, and Nancy Pollard. Robust object grasping using force compliant motion primitives. Technical Report CMU-RI-TR-12-04, Robotics Institute, Pittsburgh, PA, January 2012.
- [32] Ben Kehoe, Dmitry Berenson, and Ken Goldberg. Toward cloud-based grasping with uncertainty in shape : Estimating lower bounds on achieving force closure with zero-slip push grasps. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 576–583. IEEE, May 2012.
- [33] Kouros Khoshelham and Sander Oude Elberink. Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications. *Sensors*, 12(12) :1437–1454, February 2012.
- [34] Marc-Antoine Lacasse, Vincent Duchaine, and Clément Gosselin. Characterization of the electrical resistance of carbon-black-filled silicone : Application to a flexible and stretchable robot skin. In *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, May 2010.
- [35] Elise Lachat, H el ene Macher, Tania Landes, and Pierre Grussenmeyer. Assessment and calibration of a RGB-d camera (kinect v2 sensor) towards a potential use for close-range 3d modeling. *Remote Sensing*, 7(10) :13070–13097, October 2015.
- [36] Shan Luo, Xiaozhou Liu, Kaspar Althoefer, and Hongbin Liu. Tactile object recognition with semi-supervised learning. In *Intelligent Robotics and Applications*, volume 9245, pages 15–26. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [37] Microsoft. Kinect for windows sensor components and specifications. <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj131033.aspx>, May 2016.
- [38] A.T. Miller and P.K. Allen. GraspIt! *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 11(4) :110–122, December 2004.
- [39] Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Ralf Steinmann, and Henrik Schunk. *Robot Grippers*. Wiley-Blackwell, October 2006.
- [40] Randall Munroe. XKCD : New pet. <https://xkcd.com/413/>, April 2008.

- [41] Nils J. Nilsson. A mobile automation : An application of artificial intelligence techniques. In *Proceedings of the 1st International Joint Conference on Artificial Intelligence*, IJCAI'69, pages 509–520. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1969.
- [42] L. U. Odhner, R. R. Ma, and A. M. Dollar. Open-loop precision grasping with underactuated hands inspired by a human manipulation strategy. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3) :625–633, July 2013.
- [43] Seymour Papert. The summer vision project. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/6125>, July 1966.
- [44] Audrey Penven. Dancing With Invisible Light. <http://audreypenven.net/photography/dancing-with-invisible-light/>, November 2010.
- [45] Le Minh Phuoc, Philippe Martinet, Sukhan Lee, and Hunmo Kim. Damped least square based genetic algorithm with Gaussian distribution of damping factor for singularity-robust inverse kinematics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(7) :1330–1338, July 2008.
- [46] Lerrel Pinto and Abhinav Gupta. Supersizing self-supervision : Learning to grasp from 50k tries and 700 robot hours. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 3406–3413. IEEE, May 2016.
- [47] Mario Prats, Pedro J. Sanz, and Angel P. del Pobil. Task-oriented grasping using hand preshapes and task frames. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, April 2007.
- [48] Jean-Philippe Roberge, Samuel Rispal, Tony Wong, and Vincent Duchaine. Unsupervised feature learning for classifying dynamic tactile events using sparse coding. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2675–2681. IEEE, May 2016.
- [49] Robotiq. 2-finger adaptive robot gripper instruction manual. <http://support.robotiq.com/display/2FIM/Home>, September 2015.
- [50] Robotiq. Robotiq ROS Indigo package. <http://wiki.ros.org/robotiq>, 2016.
- [51] Universal Robots. Universal Robots ROS Indigo package. http://wiki.ros.org/universal_robot, 2016.
- [52] J. Kenneth Salisbury and John J. Craig. Articulated hands - Force control and kinematic issues. *International Journal of Robotics Research*, 1(1) :4–17, 1982.

- [53] A. Saxena, J. Driemeyer, and A. Y. Ng. Robotic Grasping of Novel Objects using Vision. *The International Journal of Robotics Research*, 27(2) :157–173, February 2008.
- [54] A. Saxena, Min Sun, and A.Y. Ng. Make3d : Learning 3d scene structure from a single still image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(5) :824–840, May 2009.
- [55] Bruno Siciliano and Oussama Khatib, editors. *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [56] Tomomichi Sugihara. Solvability-unconcerned inverse kinematics by the Levenberg-Marquardt method. *IEEE Transactions on Robotics*, 27(5) :984–991, October 2011.
- [57] William Townsend. The BarrettHand grasper – programmably flexible part handling and assembly. *Industrial Robot : An International Journal*, 27(3) :181–188, June 2000.
- [58] Bill Triggs, Philip F. McLauchlan, Richard I. Hartley, and Andrew W. Fitzgibbon. Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. In *Vision Algorithms : Theory and Practice*, volume 1883, pages 298–372. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000.
- [59] M. Visvalingam and J. D. Whyatt. Line generalisation by repeated elimination of points. *The Cartographic Journal*, 30(1) :46–51, June 1993.
- [60] Wikipedia. Golden section search. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Golden_section_search&oldid=662104131, May 2015.
- [61] Hiroshi Yamazaki, Michiko Nishiyama, Kazuhiro Watanabe, and Mikhail Sokolov. Tactile sensing for object identification based on hetero-core fiber optics. *Sensors and Actuators A : Physical*, 247 :98–104, August 2016.
- [62] Tsuneo Yoshikawa. Analysis and control of robot manipulators with redundancy. In *Robotics Research, the 1st International Symposium*, pages 735–747. MIT Press, 1984.
- [63] Yun Jiang, Stephen Moseson, and Ashutosh Saxena. Efficient grasping from RGBD images : Learning using a new rectangle representation. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3304–3311. IEEE, May 2011.

- [64] Zhengyou Zhang. Parameter estimation techniques : a tutorial with application to conic fitting. *Image and Vision Computing*, 15(1) :59–76, January 1997.
- [65] Zhe Xu, T. Deyle, and C.C. Kemp. 1000 Trials : An empirically validated end effector that robustly grasps objects from the floor. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2160–2167. IEEE, May 2009.
- [66] Tianyi Zhu, Hailong Yang, and Wenzeng Zhang. A spherical self-adaptive gripper with shrinking of an elastic membrane. In *2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. IEEE, August 2016.

Annexe A

Calibration caméra-robot

Dans cette annexe, une technique de calibration extrinsèque pour caméra 3D définie dans un article d'Ilonen et Kyrki [27] est explorée. Dans le cadre de ce mémoire, cette calibration extrinsèque sert à définir la matrice de transformation de repère \mathbf{T} permettant de transposer les données générées dans le repère de la caméra vers le repère de base du robot. La première partie de l'annexe détaille l'origine et les fondements mathématiques de cette technique de calibration. La seconde partie traite quant à elle de son application lors de la mise en route du montage expérimental.

A.1 Mise en contexte

Avant de pouvoir utiliser un capteur visuel (caméras), à temps de vol (sonars, lidars, etc.) ou inertiels (accéléromètres, gyroscopes, etc.) dans une cellule robotisée, il est généralement nécessaire de transformer les informations produites par ce capteur dans le repère du robot. En coordonnées homogènes, cette opération est habituellement représentée par une matrice de transformation de repère \mathbf{T} . Le processus permettant de déterminer la transformation à effectuer pour passer du repère local du capteur au repère utilisé par le robot pour générer une trajectoire est appelé la calibration extrinsèque du capteur. Il est à noter que ce processus doit se faire après la calibration intrinsèque du capteur, ce processus servant à modéliser la réponse du capteur face à des stimuli connus (par exemple, trouver la distance focale et les coefficients de distorsion d'une caméra).

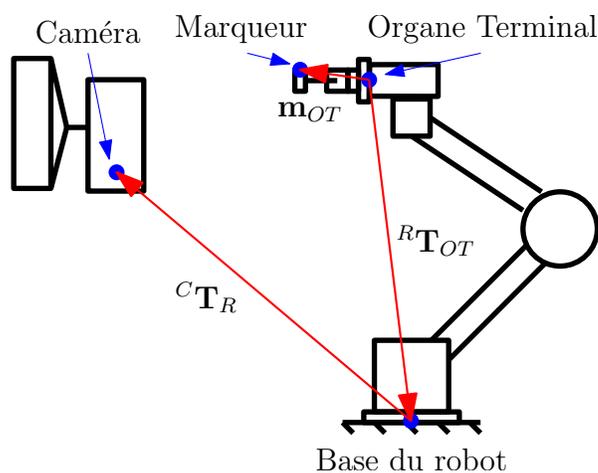


FIGURE A.1 – Matrices et vecteurs de transformation entre les différents repères du montage expérimental (adapté de [27]).

La technique utilisée pour faire la calibration extrinsèque de la caméra 3D utilisée par le montage expérimental est tirée d'un article d'Ilonen et Kyrki [27] et se déroule en deux étapes.

La première de ces étapes consiste à prendre une mesure avec la caméra de la position \mathbf{m}_C d'un marqueur fixé au robot. Comme la caméra prend cette mesure, cette dernière est exprimée dans son repère local. Au même moment, la position et l'orientation de l'organe terminal du robot dans le repère de base de ce dernier (${}^R\mathbf{T}_{OT}$) est prise en note. Sachant que la position du marqueur dans le repère de l'organe terminal est notée \mathbf{m}_{OT}

et que ${}^C\mathbf{T}_R$ est la matrice permettant de passer du repère de la base du robot au repère de la caméra, il est possible de dresser la relation suivante (illustrée à la figure A.1) :

$$\mathbf{m}_C = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^C\mathbf{T}_R {}^R\mathbf{T}_{OT} \mathbf{m}_{OT}. \quad (\text{A.1})$$

Comme \mathbf{m}_{OT} est connue de manière imprécise, il est improbable d’obtenir une expression précise de ${}^C\mathbf{T}_R$ à partir d’une seule mesure. Afin de générer plus de données, le robot est déplacé légèrement après une mesure et la procédure est répétée n fois (l’augmentation de la précision de l’estimé final devient négligeable après 20 mesures).

Les mesures expérimentales terminées, il est possible de lancer la deuxième étape de la calibration. Cette dernière consiste à estimer \mathbf{m}_{OT} ainsi que ${}^C\mathbf{T}_R$ grâce à l’algorithme de Gauss-Newton utilisé avec des M-Estimeurs [23][58]. Connaissant alors ${}^C\mathbf{T}_R$, la calibration extrinsèque est terminée.

La prochaine section présente la procédure expérimentale utilisée pour générer des mesures de position de marqueur sur le robot. La section suivante présente quant à elle la construction du vecteur de paramètres à estimer β utilisé pour déterminer ${}^C\mathbf{T}_R$. Finalement, la dernière section présente l’algorithme de Gauss-Newton utilisé pour faire le raffinement d’un estimé initial de β à partir des données expérimentales.

A.2 Acquisition des mesures expérimentales

Deux séries de mesures sont nécessaires pour la calibration extrinsèque de la caméra. La première est une série de mesures de la position d’un marqueur fixe sur le robot dans le repère de la caméra (\mathbf{m}_C). La seconde consiste à prendre en note la configuration du robot ${}^R\mathbf{T}_{OT}$ au moment d’une lecture de position du marqueur. Pour obtenir ces mesures, la procédure suivante est utilisée.

Premièrement, le marqueur choisi est le centre d’un carré blanc de 12 cm de largeur (illustré à la figure A.2). Ce marqueur a été sélectionné parce qu’il est relativement

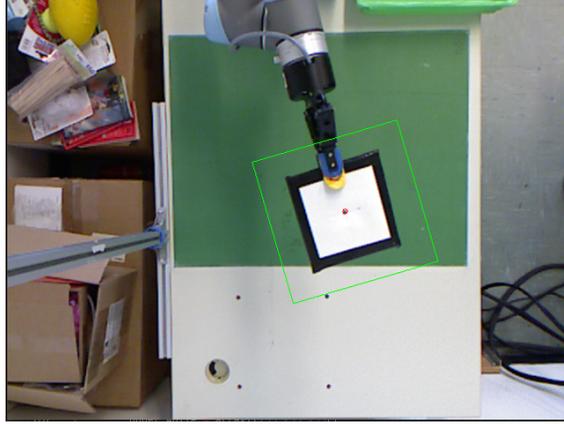


FIGURE A.2 – Segmentation par la caméra du marqueur de position fixe sur le robot.

aisé pour les programmes de traitement d'image de segmenter de l'environnement un rectangle de couleur unie. Ce motif est posé sur un bloc de bois de dimensions similaires pour être facilement pris par le préhenseur posé au bout du robot. Une fois pris, le bloc est fixe par rapport à l'organe terminal. Une estimation de la position du marqueur \mathbf{m}_{OT} est alors faite (par exemple, sur l'image $\mathbf{m}_{OT} = [0, 0, 30 \text{ cm}]$).

Le marqueur étant bien fixé par rapport à l'organe terminal du robot, ce dernier est déplacé jusqu'à ce que la caméra le perçoive de manière stable. Une fois une telle configuration atteinte, la position du marqueur telle que perçue par la caméra \mathbf{m}_C ainsi que la matrice de changement de repère entre le repère de l'organe terminal et celui de la base du robot ${}^R\mathbf{T}_{OT}$ sont prises en note. La matrice ${}^R\mathbf{T}_{OT}$ est obtenue grâce à la résolution du problème géométrique (PGD) du robot détaillé à la section 2.1.1.

Plusieurs mesures sont effectuées en déplaçant légèrement le robot jusqu'à ce qu'une autre configuration convenable soit détectée. De manière générale, garder le marqueur dans l'espace de travail normal du robot est préféré. Le nombre total n de mesures à prendre n'est pas strictement défini. L'utilisation d'un algorithme de Gauss-Newton dicte toutefois un nombre minimal d'essais pour qu'un estimé soit valide. Ainsi, sachant que chaque mesure produit 3 données (la position $[x, y, z]$ du marqueur dans le repère de la caméra) et que le système à estimer possède 9 inconnues (voir section A.3), un nombre minimal de 3 mesures est requis. Il n'existe pas de nombre maximal de mesures, l'estimé des paramètres ne devenant théoriquement que plus précis à mesure que des données sont ajoutées. Cependant, Ilonen et Kyrki [27] notent qu'après 20 essais l'estimé des paramètres converge et la précision cesse alors d'augmenter de manière significative.

A.3 Définition des paramètres à estimer β

Dans le contexte de la calibration extrinsèque d'une caméra, la série de paramètres à estimer représente deux choses. La première est la matrice de transformation entre le repère de la base du robot et de la caméra ${}^C\mathbf{T}_R$. Cette dernière est décomposée en 3 composantes de position cartésienne ($[t_x \ t_y \ t_z]$) et trois angles d'Euler ($[\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2]$) représentant respectivement la position de l'origine \mathbf{t} et l'orientation \mathbf{R} de la caméra dans le repère de la base du robot. Sachant que les angles d'Euler $\boldsymbol{\theta}$ représentent 3 rotations successives autour des axes Z, Y et Z du repère de la caméra, la matrice \mathbf{R} prend la forme de :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_1 c_0 c_2 - s_0 s_2 & -c_1 c_0 s_2 - s_0 c_2 & s_1 c_0 \\ c_1 s_0 c_2 + c_0 s_2 & -c_1 s_0 s_2 + c_0 c_2 & s_1 s_0 \\ -s_1 c_2 & s_1 s_2 & c_1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

où par exemple c_0 représente $\cos \theta_0$ et s_1 représente $\sin \theta_1$. Finalement, la relation entre tous ces paramètres et la matrice ${}^C\mathbf{T}_R$ est donnée par :

$${}^C\mathbf{T}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{(3 \times 3)} & \mathbf{t}_{(3 \times 1)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.3})$$

L'autre série de paramètres à estimer est constituée des composantes de la position en 3D du marqueur dans le repère de l'organe terminal du robot \mathbf{m}_{OT} :

$$\mathbf{m}_{OT} = [m_{OTx} \ m_{OTy} \ m_{OTz}]^T. \quad (\text{A.4})$$

Finalement, la liste des paramètres à estimer β prend la forme de :

$$\beta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ t_x \ t_y \ t_z \ m_{OTx} \ m_{OTy} \ m_{OTz}]. \quad (\text{A.5})$$

A.4 Calibration extrinsèque avec l’algorithme de Gauss-Newton et des M-Estimeurs

Les n mesures de \mathbf{m}_C et de ${}^R\mathbf{T}_{OT}$ collectées, l’étape suivante consiste à les utiliser pour générer une estimation des paramètres $\boldsymbol{\beta}$ permettant à terme de construire la matrice ${}^C\mathbf{T}_R$, terminant ainsi la calibration extrinsèque de la caméra. Les sous-sections suivantes présentent d’abord l’algorithme de Gauss-Newton utilisé puis détaillent ses différentes composantes et opérations dans le contexte de la calibration extrinsèque d’une caméra 3D.

A.4.1 Algorithme de Gauss-Newton

L’algorithme de Gauss-Newton classique consiste à progressivement améliorer un estimé initial $\boldsymbol{\beta}^{(0)}$ des paramètres d’une série d’équations non-linéaires (ou modèle) en minimisant la somme des carrés du résiduel \mathbf{r} entre les mesures réelles $\boldsymbol{\gamma}$ et prédites $\bar{\boldsymbol{\gamma}}$ avec les paramètres $\boldsymbol{\beta}^{(s)}$.

$$\mathbf{r} = \bar{\boldsymbol{\gamma}} - \boldsymbol{\gamma}. \quad (\text{A.6})$$

Pour ce faire, la pseudo-inverse de la matrice jacobienne \mathbf{J} (représentant ici l’influence de chaque paramètre sur le modèle) est employée pour définir la « direction » de modification des paramètres $\boldsymbol{\Delta}$. Si le vecteur des paramètres $\boldsymbol{\beta}$ et du résiduel \mathbf{r} sont tous les deux des colonnes, l’expression d’un élément (i,j) de la matrice \mathbf{J} est donnée par :

$$\mathbf{J}_{i,j} = \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}. \quad (\text{A.7})$$

Connaissant l’influence de chaque paramètre sur le résiduel, il est alors possible de définir la direction de modification des paramètres permettant de minimiser la somme des carrés du résiduel $\boldsymbol{\Delta}$. Pour ce faire, le produit matriciel de la pseudo-inverse de \mathbf{J} et du matriciel est calculé :

$$\boldsymbol{\Delta} = -(\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (\text{A.8})$$

où \mathbf{W} est une matrice de pondération.

Cette direction connue, l'estimé des paramètre β est modifié par un « pas » d'amplitude α dans cette direction.

$$\beta^{(s+1)} = \beta^{(s)} + \alpha \Delta. \quad (\text{A.9})$$

Une fois cette modification faite, une nouvelle itération de cette procédure est lancée. L'algorithme continue jusqu'à ce que la solution ait convergé (peu d'amélioration de la solution entre chaque itération) ou bien qu'un nombre prédéterminé d'itérations ait été effectué. La variante de la méthode classique ici employée est que le résiduel de chaque observation est pondéré grâce à une matrice \mathbf{W} de manière à minimiser l'influence des données aberrantes. Il est à noter que dans la méthode classique, $\mathbf{W} = \mathbf{I}$, où \mathbf{I} est la matrice identité.

A.4.2 Résiduel \mathbf{r}

Les n lectures de la position du marqueur sont constituées de 3 composantes ($[x y z]$). Ces coordonnées sont toutes traitées comme des lectures indépendantes par l'algorithme, de telle sorte que le vecteur des mesures réelles γ prend la forme de :

$$\gamma = \left[m_{Cx,1} \quad m_{Cy,1} \quad m_{Cz,1} \quad m_{Cx,2} \quad (\dots) \right]_{3n}^T. \quad (\text{A.10})$$

Le vecteur des prédictions des mesures $\bar{\gamma}$ est quant à lui généré en utilisant une version de l'équation (A.1) où les composantes $\mathbf{m}_{OT}^{(s)}$ et ${}^C\mathbf{T}_R^{(s)}$ reflètent l'estimé actuel des paramètres $\beta^{(s)}$. Ainsi, pour chaque mesure de la configuration du robot ${}^R\mathbf{T}_{OT,i}$, un estimé de la lecture de la position du marqueur lu par la caméra $\bar{\mathbf{m}}_{C,i}$ est formulé :

$$\bar{\mathbf{m}}_{C,i} = {}^C\mathbf{T}_R^{(s)} {}^R\mathbf{T}_{OT,i} \mathbf{m}_{OT}^{(s)} \quad i = 1, \dots, n. \quad (\text{A.11})$$

La forme que prend le vecteur colligeant toutes les estimations de lectures $\bar{\gamma}$ est le même que pour les lectures réelles :

$$\bar{\gamma} = \left[\bar{m}_{Cx,1} \quad \bar{m}_{Cy,1} \quad \bar{m}_{Cz,1} \quad \bar{m}_{Cx,2} \quad (\dots) \right]_{3n}^T. \quad (\text{A.12})$$

Ces deux vecteurs connus, le résiduel est alors calculé comme étant :

$$\mathbf{r} = \bar{\gamma} - \gamma. \quad (\text{A.13})$$

A.4.3 Matrice de pondération du résiduel \mathbf{W}

Dans l'algorithme de Gauss-Newton classique, le but d'une itération est de trouver le moindre carré du résiduel r :

$$\min \sum_i r_i^2. \quad (\text{A.14})$$

Cette méthode possède cependant l'inconvénient d'accorder une importance démesurée aux données aberrantes (*outliers*). L'utilisation de M-estimateurs permet de contrer ce problème en cherchant plutôt à minimiser une fonction ρ qui dépend du résiduel :

$$\min \sum_i \rho(r_i). \quad (\text{A.15})$$

Dans le cadre de ces travaux, l'application des M-estimateurs se fait par l'entremise d'une matrice diagonale de pondération du résiduel $\mathbf{W}_{3n \times 3n}$. Chaque élément $w_{i,i}$ de cette matrice est calculé en fonction du niveau de convergence de la solution. Ainsi, au début, le M-estimateur $L_2 - L_1$ de l'équation (A.16) est employé. Cette méthode est utilisée pour sa convergence rapide et la combinaison des avantages de la minimisation de la norme L_1 (minimisation de l'effet des données aberrantes mais indéfinie lorsque $r = 0$) et L_2 (définie partout).

$$w_{i,i} = \frac{1}{\sqrt{1 + r_i^2/2}}, \quad i = 1, \dots, 3n. \quad (\text{A.16})$$

Une fois la variation du vecteur β entre chaque itération devenue faible, le M-estimateur Welsh de l'équation (A.17) est employé car il est plus résistant aux données aberrantes (mais plus lent à converger). Une valeur de $c = 2.9846$ est employée dans cette dernière équation pour capturer 95% des points de la gaussienne des données.

$$w_{i,i} = e^{-\left(\frac{r_i}{c}\right)^2}, \quad i = 1, \dots, 3n. \quad (\text{A.17})$$

Finalement, il est à noter que les informations ici présentées ont été tirées de l'excellent tutoriel sur les M-estimateurs (ainsi que sur d'autres techniques d'estimation de paramètres comme la descente de gradient ou les filtres de Kalman) fourni dans un article de Zhang [64].

A.4.4 Matrice jacobienne \mathbf{W}

La matrice jacobienne $\mathbf{J}_{3n \times 9}$ détaille l'effet d'une variation des paramètres contenus dans $\boldsymbol{\beta}$ sur le résiduel \mathbf{r} . Par définition, \mathbf{J} prend la forme de :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_{1x}}{\partial \theta_0} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial t_x} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial t_y} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial t_z} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial m_{EEEx}} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial m_{EEEy}} & \frac{\partial r_{1x}}{\partial m_{EEz}} \\ \frac{\partial r_{1y}}{\partial \theta_0} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial t_x} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial t_y} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial t_z} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial m_{EEEx}} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial m_{EEEy}} & \frac{\partial r_{1y}}{\partial m_{EEz}} \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (\text{A.18})$$

Le problème du calcul de \mathbf{J} est simplifié par le fait qu'il est possible de décomposer l'effet des dérivations. Ainsi, pour chacune des n mesures de position du marqueur, un jeu de dérivés partielles est calculé pour remplir les trois lignes de \mathbf{J} associées à cet échantillon :

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \theta_{0,1,2}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_{0,1,2}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} {}^R \mathbf{T}_{OTi} \mathbf{m}_{OT}, \quad i = 1, \dots, 3n \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t_{x,y,z}} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t_{x,y,z}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} {}^R \mathbf{T}_{OTi} \mathbf{m}_{OT}, \quad i = 1, \dots, 3n \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial m_{OT_{x,y,z}}} = {}^C \mathbf{T}_R {}^R \mathbf{T}_{OTi} \frac{\partial \mathbf{m}_{OT}}{\partial m_{OT_{x,y,z}}}, \quad i = 1, \dots, 3n. \quad (\text{A.21})$$

Voici les dérivations partielles de la matrice de rotation \mathbf{R} de l'équation (A.2) par chacune de ses parties constituantes :

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_0} = \begin{bmatrix} -c_1 s_0 c_2 - c_0 s_2 & c_1 s_0 s_2 - c_0 c_2 & -s_1 s_0 \\ c_1 c_0 c_2 - s_0 s_2 & -c_1 c_0 s_2 - s_0 c_2 & s_1 c_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_1} = \begin{bmatrix} -s_1 c_0 c_2 & s_1 c_0 s_2 & c_1 c_0 \\ -s_1 s_0 c_2 & s_1 s_0 s_2 & c_1 s_0 \\ -c_1 c_2 & c_1 s_2 & -s_1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_2} = \begin{bmatrix} -c_1 c_0 s_2 - s_0 c_2 & -c_1 c_0 c_2 + s_0 s_2 & 0 \\ -c_1 s_0 s_2 + c_0 c_2 & -c_1 s_0 c_2 - c_0 s_2 & 0 \\ s_1 s_2 & s_1 c_2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.24})$$

Les dérivations partielles de \mathbf{t} et \mathbf{m}_{OT} par les paramètres associés sont quant à elles triviales :

$$\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t_x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t_y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial t_z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}_{OT}}{\partial m_{OT_x}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}_{OT}}{\partial m_{OT_y}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}_{OT}}{\partial m_{OT_z}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.30})$$

A.4.5 Variation optimale des paramètres avec α

Dans le cadre de l'algorithme de Gauss-Newton utilisé, les paramètres $\boldsymbol{\beta}$ sont itérativement améliorés de manière à converger vers une solution minimisant l'erreur \mathbf{r} entre les données prédites avec $\boldsymbol{\beta}$ et les données réelles collectées lors d'essais expérimentaux. Pour améliorer $\boldsymbol{\beta}$ lors d'une itération s , la direction d'amélioration maximale est d'abord calculée :

$$\boldsymbol{\Delta} = -(\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{r} \quad (\text{A.8})$$

puis $\boldsymbol{\beta}$ est modifiée en faisant un « pas » d'amplitude α dans cette direction :

$$\boldsymbol{\beta}^{(s+1)} = \boldsymbol{\beta}^{(s)} + \alpha \boldsymbol{\Delta}. \quad (\text{A.9})$$

Dans le but d'accélérer la convergence de la solution, le paramètre α minimisant le résiduel pondéré prévu pour la prochaine itération est recherché :

$$\arg \min_{\alpha \in]0,2]} \rho(\alpha, \boldsymbol{\beta}) = \arg \min_{\alpha \in]0,2]} \|\mathbf{W}(\bar{\boldsymbol{\gamma}}(\boldsymbol{\beta} + \alpha \boldsymbol{\Delta}) - \boldsymbol{\gamma})\|_2. \quad (\text{A.31})$$

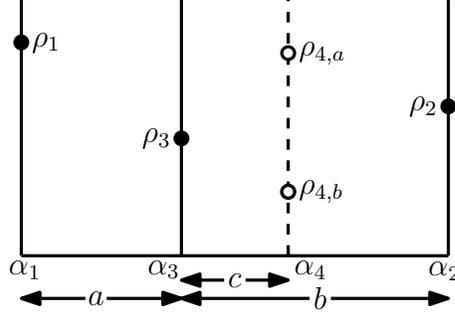


FIGURE A.3 – Représentation de l’algorithme de recherche linéaire par nombre d’or (adapté de [60]).

Pour trouver cette valeur d’amplitude de pas α , une recherche linéaire directe est utilisée. La méthode retenue pour ce faire est celle de la recherche linéaire itérative par section au nombre d’or [60], illustrée à la figure A.3. La première étape de cet algorithme consiste à déterminer les bornes α_1 et α_2 de la plage de recherche du α optimal (dans la pratique, des valeurs de 0 et 2 sont utilisées). La valeur de la fonction à minimiser ρ associée à ces valeurs de α est également calculée au même moment. Une valeur intermédiaire α_3 est ensuite générée entre ces deux bornes et la valeur de fonction ρ pour cette valeur calculée. Le ratio de la différence de valeur entre α_3 et α_1 (a) et la différence entre α_2 et α_3 (b) doit équivaloir au nombre d’or φ (d’où le nom de méthode), de telle sorte que la valeur précise de α_3 est donnée par :

$$\alpha_3 = \alpha_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{1 + \varphi} \quad (\text{A.32})$$

où le nombre d’or φ est :

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}. \quad (\text{A.33})$$

Ces trois points établis, un nouveau point intermédiaire α_4 est établi dans la plus grande intervalle de la plage restante (entre α_2 et α_3). Sachant que l’étape suivante consiste à redéfinir la plage de recherche entre α_1 et α_4 ou bien entre α_2 et α_3 , il est désiré que ces intervalles soient égale (bref que $a + c = b$). La valeur précise de α_4 est donc donnée par :

$$\alpha_4 = \alpha_2 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{1 + \varphi}. \quad (\text{A.34})$$

Ces 4 points établis, l’étape suivante consiste à réduire l’intervalle de recherche. Pour ce faire, le point où la valeur de la fonction à minimiser ρ est la plus petite est

identifié et l'intervalle le contenant est conservé. Par exemple, si la valeur associée à α_4 sur la figure A.3 est $\rho_{4,a}$, le point α_3 est minimal et l'intervalle $\alpha_1 - \alpha_4$ est conservée.

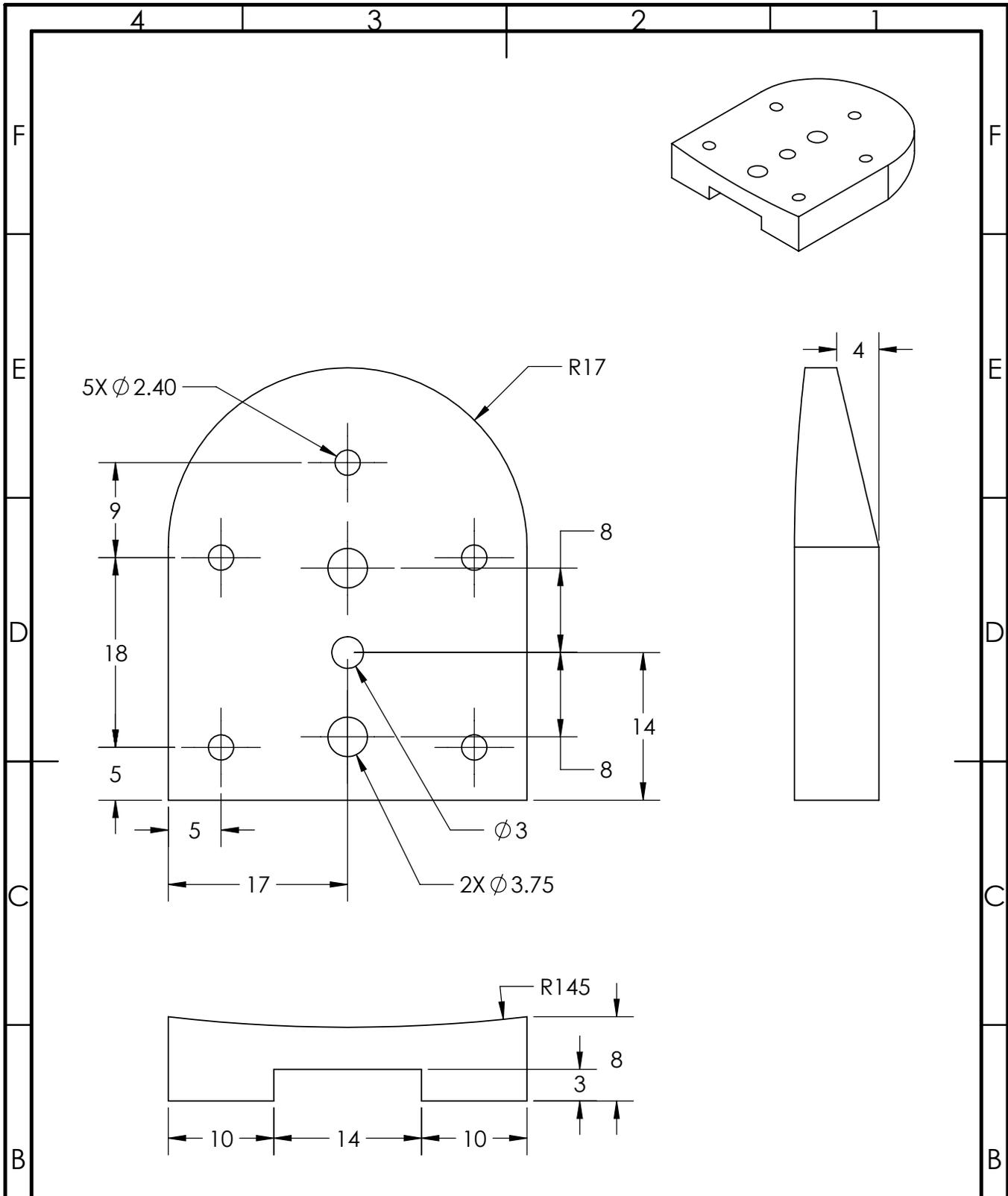
Pour la prochaine itération, les indices des différents points sont remaniés. En reprenant l'exemple du paragraphe précédent, α_1 reste α_1 , α_4 devient α_2 et finalement α_3 devient α_4 . Il ne reste plus alors qu'à calculer un nouveau point α_3 dans cette nouvelle plage de recherche puis à réduire de nouveau l'intervalle de recherche.

Finalement, l'algorithme est arrêté lorsque la plage de recherche définie par les bornes α_1 et α_2 est inférieure à un certain seuil (la valeur arbitraire de 0,01 est ici utilisée).

Annexe B

Plan de la base des doigts modifiés de la pince C3

Pour faciliter les opérations de pelletage décrites au chapitre 3, les doigts faits sur mesure décrits à la section 1.3.2.3 ont été créés. Ces deux doigts utilisent la même base pour être fixés sur la pince C3 de Robotiq ; le plan de cette dernière est présenté dans cette annexe. Cette pièce a été conçue pour utiliser les mêmes trous de fixation sur la pince C3 que les doigts originaux : le trou central de $\varnothing 3$ mm accommode la goupille de positionnement (*dowel pin*) et les deux trous de $\varnothing 3,75$ mm sont conçus pour recevoir des douilles taraudées M3 (*threaded inserts*). Les 5 autres trous de $\varnothing 2,4$ mm sont présents pour pouvoir fixer facilement un ongle sur le dessus de la base à l'aide de vis à bois #5. Dans le cadre de ces travaux, les exemplaires de cette pièces ont été créés par l'impression 3D de plastique ABS ; des modifications aux plans sont nécessaires si un matériel plus rigide est utilisé.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

SCALE: 2:1

REVISION: A

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN François Lévesque		5/15/2016
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		
MATERIAL:		ABS
WEIGHT:		7.1 g

TITLE:

Base doigt C3

DWG. NO.

A4

SHEET 1 OF 1

Annexe C

Configurations possibles d'un doigt sous-actionné représenté par un mécanisme à 5 barres

Dans cette annexe, une solution analytique est développée pour trouver les configurations possibles d'un doigt de la pince C3 de Robotiq lorsque le sous-actionnement de ce dernier est enclenché par un contact avec une surface plane. À partir de cette solution, la relation mettant en lien la hauteur de la surface dans le repère du doigt et la position latérale du bout du doigt sur cette surface est trouvée.

C.1 Géométrie d'un doigt de la pince C3

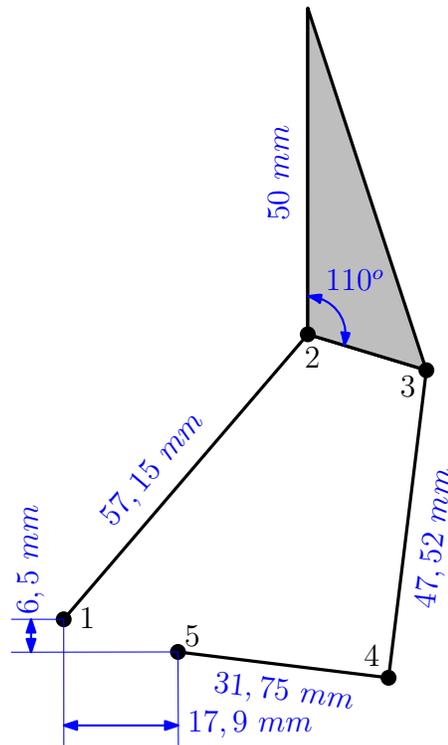


FIGURE C.1 – Dimensions d'un doigt de la pince C3 de Robotiq.

Les solutions dans cette annexe sont développées particulièrement pour les doigts de la pince C3 de Robotiq (dont un est représenté par la figure C.1). Ces doigts constituent un mécanisme à 5 barres dont le comportement peut être expliqué par la superposition de l'effet de deux mécanismes à 4 barres. Le premier de ces mécanismes est celui relié au moteur de la pince et qui permet de la fermer. Il est constitué des articulations 1, 2, 3 et 5, cette dernière articulation étant reliée au moteur. Si le sous-actionnement du doigt n'est pas enclenché, l'angle de l'articulation 4 reste fixe et sa position est déterminée uniquement par la position du moteur ; le doigt se comporte alors comme un mécanisme à 4 barres. Le deuxième mécanisme à 4 barres du doigt est celui lui permettant de se reconfigurer. Si un obstacle est rencontré par le doigt, les angles des articulations 1, 2, 3 et 4 changent pour adapter la configuration du doigt à cet obstacle (la position de l'articulation 4 étant fixée par le moteur de la pince).

C.2 Représentation du problème comme un mécanisme parallèle à 2 degrés de liberté

Le problème ici abordé consiste à déterminer la position du bout d'un doigt de la pince C3 de Robotiq lorsque le sous-actionnement de ce dernier est enclenché par un contact avec une surface plane. Ce type de contact implique généralement que la hauteur h du bout du doigt par rapport à son origine est connue mais pas sa position latérale x . Pour représenter ce problème, le mécanisme à 4 barres du sous-actionnement de la pince est imaginé à la figure C.2 comme étant un mécanisme parallèle plan 2RPR-PR à 2 degrés de liberté (ddls) où les liaisons P sont associées aux segments de longueur ρ_1 , ρ_2 et ρ_3 . La configuration illustrée peut changer en fonction du niveau d'ouverture de la pince (changeant ainsi la position de \mathbf{b}_2) et de la hauteur du sol (h).

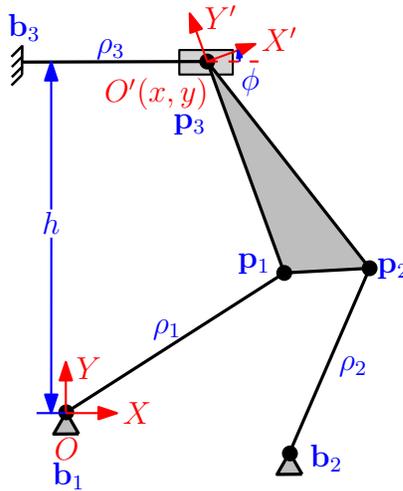


FIGURE C.2 – Représentation du sous-actionnement d'un doigt comme un mécanisme parallèle à 2 degrés de liberté.

Les origines des différents repères ont été positionnées pour simplifier les calculs. Premièrement, l'origine du repère fixe O est placée sur l'origine du premier actionneur, de telle sorte que :

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} b_{1x} \\ b_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{C.1})$$

L'axe X de ce repère est toujours parallèle à la surface entrant en contact avec le bout du doigt. Cela permet de facilement prendre en compte l'orientation de la pince dans l'espace. Le 3^e actionneur représentant le glissement du doigt sur une surface plane

causant le sous-actionnement du doigt, ce dernier est parallèle à l'axe X du repère fixe. Pour faire simple, l'origine de cet actionneur est placée directement au-dessus de O :

$$\mathbf{b}_3 = \begin{bmatrix} b_{3x} \\ b_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ h \end{bmatrix}. \quad (\text{C.2})$$

L'origine du repère mobile O' est quant à elle placée sur le bout du doigt \mathbf{p}_3 :

$$\mathbf{p}_3 = \begin{bmatrix} p_{3x} \\ p_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ h \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

$$\mathbf{p}'_3 = \begin{bmatrix} p'_{3x} \\ p'_{3y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{C.4})$$

Finalement, le problème consiste alors à trouver la position x du bout du doigt. Pour trouver cette valeur, il est nécessaire d'utiliser certaines des équations résolvant le problème géométrique direct (PGD) et inverse (PGI) de ce mécanisme. La solution ici présentée est fortement inspirée de celle développée par Gosselin, Serifou et collab. [19] pour un mécanisme parallèle plan 3-RRR à 3 degrés de liberté.

C.3 Position x du doigt en fonction de la hauteur h de la surface

Le problème à résoudre est de trouver la position x du bout d'un doigt lorsque le sous-actionnement est enclenché par un contact avec une surface plane située à une hauteur h de l'origine de ce doigt. Lorsqu'appliqué au mécanisme plan 2RPR-PR étudié à la section précédente, cela implique trois inconnues : x , ρ_3 et ϕ . Pour trouver les valeurs de ces dernières, les contraintes géométriques associées aux longueurs ρ_i du mécanisme sont d'abord détaillées :

$$\rho_1^2 = x^2 + h^2 + Q_1x + R_1h + S_1 \quad (\text{C.5})$$

$$\rho_2^2 = x^2 + h^2 + Q_2x + R_2h + S_2 \quad (\text{C.6})$$

$$\rho_3 = x \quad (\text{C.7})$$

où

$$Q_i = 2(p'_{ix} \cos \phi - p'_{iy} \sin \phi - b_{ix}) \quad (\text{C.8})$$

$$R_i = 2(p'_{ix} \sin \phi + p'_{iy} \cos \phi - b_{iy}) \quad (\text{C.9})$$

$$S_i = \frac{1}{4}(Q_i^2 + R_i^2). \quad (\text{C.10})$$

D'après l'équation (C.7), les valeurs de ρ_3 et x sont équivalentes. Pour isoler la valeur de x , l'équation (C.6) est soustraite de l'équation (C.5) et l'équation résultante est retravaillée pour obtenir :

$$x = \frac{(\rho_1^2 - \rho_2^2) - (R_1 - R_2)h - (S_1 - S_2)}{(Q_1 - Q_2)}. \quad (\text{C.11})$$

Pour identifier les valeurs possibles de ϕ , l'équation (C.11) est ensuite substituée à la variable x dans l'équation (C.5). L'équation résultante dépendant de $\sin \phi$ et de $\cos \phi$, il est décidé de la simplifier grâce à l'identité trigonométrique de la tangente du demi-angle de ϕ :

$$T = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad \phi = 2 \tan^{-1}(T) \quad (\text{C.12})$$

$$\sin \phi = \frac{2T}{1 + T^2} \quad \cos \phi = \frac{1 - T^2}{1 + T^2}. \quad (\text{C.13})$$

En réorganisant un peu l'équation ainsi obtenue, un polynôme de degré 6 en T est obtenu :

$$0 = AT^6 + BT^5 + CT^4 + DT^3 + ET^2 + FT + G. \quad (\text{C.14})$$

L'expression complète des différents coefficients de cette équation étant trop longue pour être affichée en ces pages, elle est plutôt fournie sur demande par l'auteur. Une fois traitées, les racines réelles de ce polynôme indiquent les valeurs possibles que peut prendre ϕ . Les valeurs correspondantes de x sont alors obtenues directement en substituant ces valeurs de ϕ dans l'équation (C.11). Dans la plage d'opération du doigt, seules deux configurations du doigt sont possibles pour une hauteur h donnée ; un exemple de ces configurations est fourni à la figure C.3.

De ces configurations possibles, seule la configuration 1 reflète le comportement réel du doigt. C'est donc cette branche de solution qui est utilisée pour fournir un estimé de la position en x du bout du doigt. La figure C.4 présente la trajectoire du bout du doigt en x en fonction de la hauteur de la surface h calculée avec cette dernière.

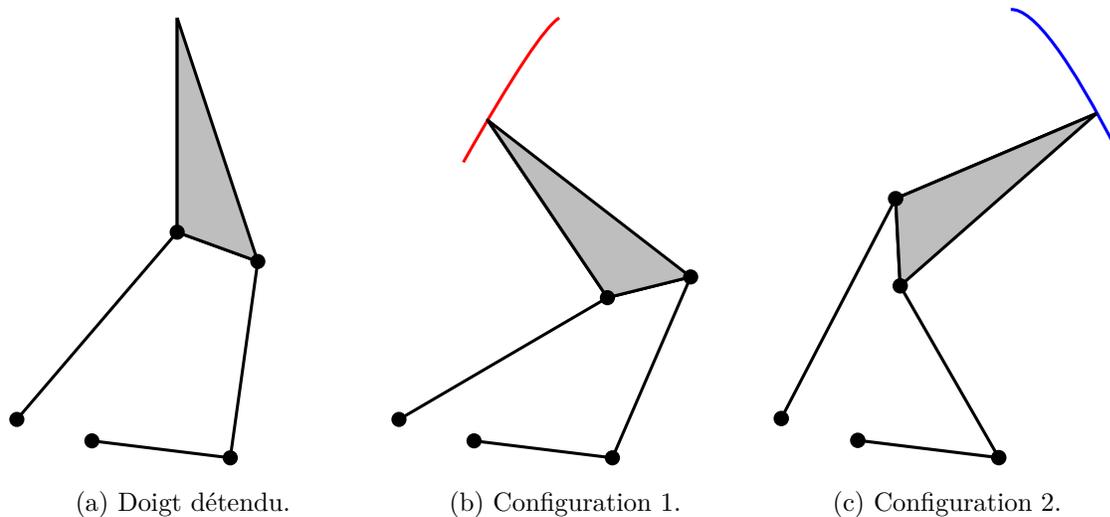


FIGURE C.3 – Configurations possibles du doigt sous-actionné à une hauteur $h = 80$ mm. Les traits au bout des doigts représentent les trajectoires suivies par ces derniers.

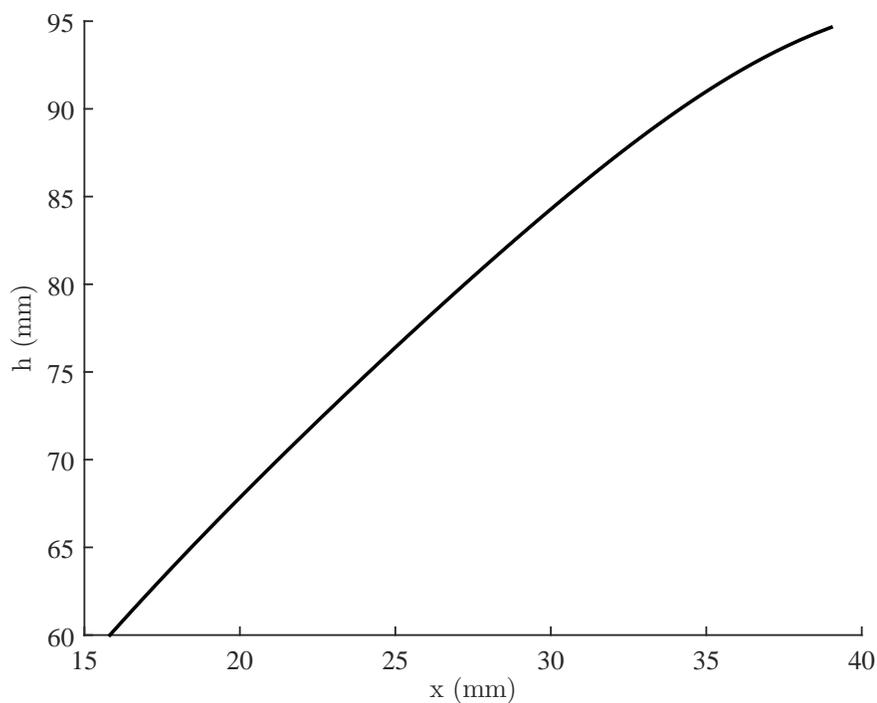


FIGURE C.4 – Position en x du bout du doigt en fonction de sa hauteur h dans le repère fixe du doigt.

Annexe D

Modèle quasi-statique du mouvement de pelletage

Dans cette annexe, le modèle quasi-statique du mouvement de pelletage introduit à la section 4.3 est élaboré. Ce modèle simplifie grandement la physique du mouvement, le représentant comme la prise quasi-statique d'un objet rectangulaire infiniment rigide par une simple pince parallèle. Le modèle étant établi, des simulations d'une prise d'objet sont faites en variant certains paramètres importants comme les coefficients de friction de la pince et du sol. Les conclusions principales à la suite de ces simulations sont qu'une bonne insertion initiale d'un doigt sous l'objet est primordiale, que le coefficient de friction entre le sol et l'objet est le facteur principal expliquant l'équilibre statique d'une prise et que la prise d'objets rigides est parfois impossible.

Comme il a été mentionné au chapitre 4, le mouvement de prise en pelletage exposé à la section 4.3 a été développé empiriquement. Dans le but de mieux expliquer les facteurs affectant la stabilité de la prise, le modèle analytique simple présenté dans cette annexe a été élaboré. Il consiste à représenter le pelletage comme la prise d'un objet infiniment rigide par une pince parallèle en un mouvement quasi-statique (illustré à la figure D.1). La première section présente de manière approfondie les hypothèses utilisées pour simplifier le modèle. Les sections suivantes présentent les contraintes géométriques du modèle ainsi que les relations d'équilibre statique de l'objet. Finalement, les dernières sections présentent un indice de performance de configuration de l'objet et de la pince ainsi que le résultat de simulations de prise faites avec ce modèle.

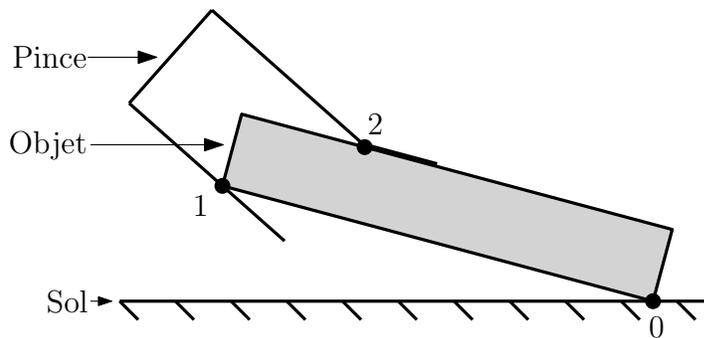


FIGURE D.1 – Modèle quasi-statique du mouvement de prise en pelletage. Les points de contacts numérotés sur l'objet sont toujours maintenus.

D.1 Hypothèses

Afin de générer un modèle simple, les hypothèses ci-dessous sont émises :

- La pince sous-actionnée est modélisée comme une pince parallèle simple. La longueur des doigts de cette dernière est équivalente à celle des deux phalanges lorsque la pince est pleinement ouverte (52,85 mm). La distance entre les doigts lorsque la pince est ouverte est la même que celle de la pince C3 (85 mm).
- L'objet à prendre est modélisé comme un prisme rectangulaire dont la masse est répartie uniformément.
- La pince, l'objet et le sol sont infiniment rigides.
- Le mouvement de prise est supposé être quasi-statique, c'est-à-dire que les effets dynamiques de la prise ne sont pas pris en compte.

- Il est supposé que le doigt inférieur muni d'un ongle flexible est déjà inséré sous l'objet au début du mouvement.
- Le doigt se posant sur le dessus de l'objet disposant d'un ongle flexible recouvert d'un matériel adhérent, la force appliquée par ce doigt est modélisée comme l'action d'un ressort de torsion générant une force distribuée sur tout l'ongle.
- Les points de contact suivants sont toujours maintenus :
 - Un coin du dessous de l'objet sur le sol (contact 0).
 - L'autre coin du dessous de l'objet sur le doigt inférieur (contact 1).
 - Le bout du doigt supérieur sur le dessus de l'objet (contact 2).

D.2 Dimensions et variables

À partir des hypothèses énoncées à la section précédente, le modèle affiché à la figure D.2 est élaboré. Ce dernier contient 3 variables : l'angle de l'objet par rapport au sol α , la distance entre le bord de l'objet et le doigt sur le dessus l_2 et l'angle entre la pince et l'objet β . Comme il est supposé que tous les éléments de ce modèle sont infiniment rigides et que l'objet est toujours coincé entre les deux mandibules de la pince, ce système ne possède que deux degrés de liberté (voir section D.3.1). Le tableau D.1 présente une description des différentes variables sur cette figure ainsi que les valeurs utilisées dans les simulations de la section D.6.

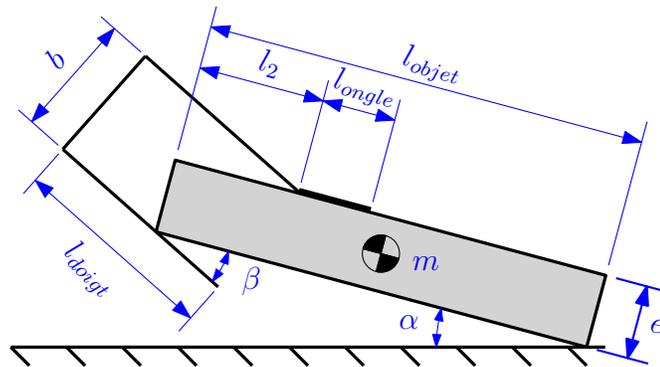


FIGURE D.2 – Dimensions et variables du modèle de mouvement de pelletage.

Tableau D.1 – Dimensions nécessaires à la description du mouvement de pelletage modélisé.

Dimension	Valeur	Description
α^*	0 à $\pi/2$ (rad)	Angle de l'objet par rapport au sol
β^*	Voir section D.3	Angle de la pince par rapport à l'objet
l_2^*	Voir section D.3	Distance entre le point de contact du doigt sur le dessus de l'objet et le bord de ce dernier
e	15 mm	Épaisseur de l'objet dans le plan
l_{objet}	100 mm	Longueur de l'objet dans le plan
m	0,1 kg	Masse de l'objet (supposée être centrée par rapport au centre géométrique de l'objet dans de plan)
μ_0	0,3	Coefficient de friction statique entre l'objet et le sol
l_{doigt}	52,85 mm	Distance entre le bout des doigts et la paume de la pince
b	85 mm (initial) à e (final)	Distance entre les deux doigts de la pince
μ_1	0,1	Coefficient de friction statique entre le doigt sous l'objet et l'objet
μ_2	0,4	Coefficient de friction statique entre le doigt sur l'objet et l'objet
k_{ongle}	1 Nm	Raideur du ressort de torsion qu'est l'ongle du doigt sur l'objet. Sa position de repos est à $\beta = 0$.
l_{ongle}	10 mm	Longueur de l'ongle flexible du doigt sur le dessus de l'objet

* Variable

D.3 Contraintes géométriques

Les hypothèses employées dans ce modèle spécifient que les doigts de la pince, l'objet soulevé ainsi que le sol sont infiniment rigides et qu'il existe toujours deux contacts entre l'objet et la pince. Ces hypothèses contraignent l'objet à demeurer au sein d'une certaine plage de configurations possibles. Les sous-sections suivantes présentent la relation réduisant le nombre de degrés de liberté de l'objet ainsi que les configurations limites de l'objet dans la pince.

D.3.1 Relation entre β , l_2 et b

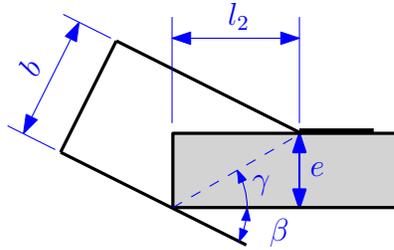


FIGURE D.3 – Illustration de la relation entre l'angle de la pince sur l'objet β , la position du doigt sur le dessus de l'objet l_2 et la largeur de la pince b .

Une implication des hypothèses de ce modèle est que l'angle que forme la pince avec l'objet β est une fonction géométrique des deux autres variables du modèle, l_2 et α . Ainsi qu'illustré à la figure D.3 :

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{e}{l_2} \right) \quad (\text{D.1})$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{l_2^2 + e^2}} \right) - \gamma \quad (\text{D.2})$$

d'où

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{l_2^2 + e^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{e}{l_2} \right). \quad (\text{D.3})$$

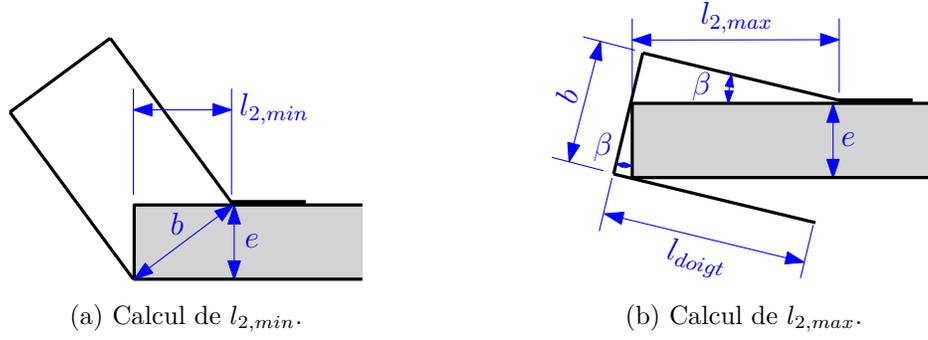


FIGURE D.4 – Valeurs limites de la variable l_2 .

D.3.2 Valeurs limites de l_2

Une autre implication des hypothèses utilisées pour ce modèle est qu'il existe des limites à la variable l_2 . Ainsi, $l_{2,min}$ se produit lorsque le bout du doigt inférieur touche le coin inférieur de l'objet (figure D.4a) :

$$l_{2,min} = \sqrt{b^2 - e^2}. \quad (D.4)$$

La distance $l_{2,max}$ se produit quant à elle lorsque le coin supérieur de l'objet touche à la paume de la pince (figure D.4b). Pour trouver $l_{2,max}$, la première étape consiste à trouver une équation permettant de calculer β :

$$b = l_{doigt} \sin \beta + \frac{e}{\cos \beta}. \quad (D.5)$$

Pour extraire β de cette équation, l'identité trigonométrique de la tangente du demi-angle de β est utilisée pour la transformer l'équation (D.5) en un polynôme :

$$T = \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad \beta = 2 \tan^{-1}(T) \quad (D.6)$$

$$\sin \beta = \frac{2T}{1+T^2} \quad \cos \beta = \frac{1-T^2}{1+T^2} \quad (D.7)$$

$$0 = T^4(b+e) - 2l_{doigt}T^3 + 2eT^2 + 2l_{doigt}T + (e-b). \quad (D.8)$$

Les racines réelles de ce polynôme représentent les configurations possibles de la pince générant ce type de conditions de contact. La solution retenue est celle où β est compris entre 0 et $\pi/2$. Ayant isolé β , il est finalement possible de calculer $l_{2,max}$:

$$l_{2,max} = l_{doigt} / \cos \beta. \quad (D.9)$$

D.4 Diagramme de corps libre et relations statiques

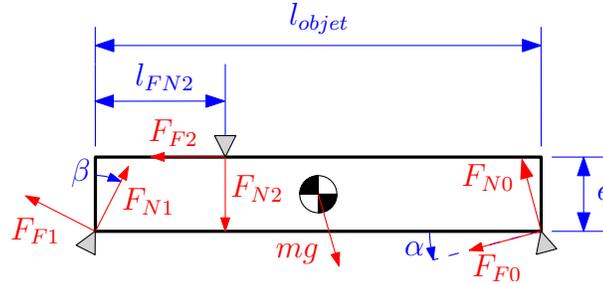


FIGURE D.5 – Diagramme de corps libre du modèle.

Pour comprendre si une prise est stable, il est nécessaire de connaître les forces s'appliquant sur l'objet lors du mouvement de prise. Pour ce faire, le diagramme du corps libre du modèle est dressé à la figure D.5. Deux forces sont connues d'emblée. La première est la force de gravité mg s'appliquant au centre de masse de l'objet. La seconde est la force normale appliquée par le doigt sur le dessus de l'objet F_{N2} . L'amplitude et la position de F_{N2} sont déterminées à l'aide de l'hypothèse voulant que cette force provienne uniquement de la rotation de l'ongle du doigt supérieur de longueur l_{ongle} . En effet, il est supposé que cet ongle se comporte comme un ressort de torsion de rigidité k_{ongle} . L'effet net est illustré à la figure D.6.

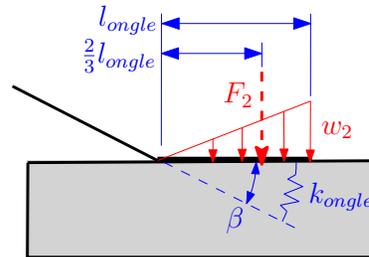


FIGURE D.6 – Distribution de la force sur l'ongle du doigt sur l'objet et force équivalente F_{N2} .

Comme la forme de la distribution de charge sur l'ongle est connue (un triangle rectangle de charge linéique maximale w_2), il est possible de calculer F_{N2} :

$$w_2 = k_{ongle}\beta \quad (\text{D.10})$$

$$F_{N2} = \frac{1}{2}w_2l_{ongle}. \quad (\text{D.11})$$

Il existe donc 5 forces inconnues : la force normale appliquée par le sol F_{N0} , la force de friction entre le sol et l'objet F_{F0} , la force de friction entre le doigt sur le dessus de l'objet et ce dernier F_{F2} et finalement la force normale appliquée par le doigt du dessous sur l'objet F_{N1} et la force de friction associée F_{F1} . Comme les équations de statique classique ne fournissent que 3 équations dans une situation de chargement dans le plan, le système est hyperstatique du 2^e ordre. Pour arriver à retirer ces deux inconnues de trop et à générer une solution approximative au problème, il est supposé que les forces de friction F_{F1} et F_{F2} sont toujours au maximum possible défini par le modèle de Coulomb :

$$F_{Fi} = F_{Ni}\mu_i, \quad i = 1,2 \quad (\text{D.12})$$

où μ_i est le coefficient de friction des deux surfaces en contact. Les équations décrivant les forces nécessaires pour maintenir l'objet immobile prennent alors la forme de :

$$\Sigma F_x = 0 :$$

$$\begin{aligned} 0 &= F_{N0} \sin \alpha + F_{F0} \cos \alpha - mg \sin \alpha + F_{F2} - F_{N1} \sin \beta + F_{F1} \cos \beta \\ &= F_{N0} \sin \alpha + F_{F0} \cos \alpha - mg \sin \alpha + F_{N2}\mu_2 + F_{N1}(-\sin \beta + \mu_1 \cos \beta) \end{aligned} \quad (\text{D.13})$$

$$\Sigma F_y = 0 :$$

$$\begin{aligned} 0 &= F_{N0} \cos \alpha - F_{F0} \sin \alpha - mg \cos \alpha - F_{N2} + F_{N1} \cos \beta + F_{F1} \sin \beta \\ &= F_{N0} \cos \alpha - F_{F0} \sin \alpha - mg \cos \alpha - F_{N2} + F_{N1}(\cos \beta + \mu_1 \sin \beta) \end{aligned} \quad (\text{D.14})$$

$$\Sigma M_0 = 0 :$$

$$\begin{aligned} 0 &= mg\left(-\frac{1}{2}l \cos \alpha + \frac{1}{2}e \sin \alpha\right) - F_{N2}(l - l_2) - F_{F2}e + F_{N1}l \cos \beta + F_{F1}l \sin \beta \\ &= mg\left(-\frac{1}{2}l \cos \alpha + \frac{1}{2}e \sin \alpha\right) - F_{N2}((l - l_2) + \mu_2 e) + F_{N1}(l \cos \beta + l\mu_1 \sin \beta). \end{aligned} \quad (\text{D.15})$$

En résumé, sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \sin \alpha & \cos \alpha & -\sin \beta + \mu_1 \cos \beta \\ \cos \alpha & -\sin \alpha & \cos \beta + \mu_1 \sin \beta \\ 0 & 0 & l(\cos \beta + \mu_1 \sin \beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{N0} \\ F_{F0} \\ F_{N1} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} mg \sin \alpha - F_{N2}\mu_2 \\ mg \cos \alpha + F_{N2} \\ \frac{1}{2}mg(l \cos \alpha - e \sin \alpha) + F_{N2}((l - l_2) + e\mu_2) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{D.16})$$

D.5 Indice de performance

On cherche à déterminer quantitativement les meilleures positions possibles de l'objet et de la pince au cours de l'opération pelletage. Pour ce faire, un indice de performance S est élaboré à partir des équations d'équilibre statique établies à la section D.4. Cet indice consiste à comparer la force maximale de friction entre l'objet et le sol (contact 0) et la force de friction nécessaire pour maintenir l'objet en équilibre. Cette différence est ensuite normalisée par la force de friction maximale applicable, résultant en l'équation suivante :

$$S = \frac{F_{N0}\mu_0 - |F_{F0}|}{F_{N0}\mu_0}. \quad (\text{D.17})$$

Cet indice est positif ou égal à 0 lorsque l'objet est à l'équilibre dans sa position actuelle. Si le score est négatif, l'objet n'est pas à l'équilibre et est éjecté de la pince. Le score maximal possible est 1, indiquant que la force de friction au sol n'est pas sollicitée et donc qu'il n'y a aucun risque de glissement de l'objet.

D.6 Simulations et résultats

Afin de tester l'effet des différents paramètres du modèle sur la stabilité de prise, des simulations de pelletage d'objet ont été réalisées grâce à un script Matlab. Ce script simule la fermeture de la pince, faisant linéairement passer la largeur de la pince de 85 mm à e , l'épaisseur de l'objet. Tout au long du mouvement, la configuration maximisant la stabilité de l'objet dans la pince est recherchée. Pour faire cette recherche, la plage de valeurs possibles de α et l_2 pour une largeur de pince donnée b est subdivisée en m et n échantillons respectivement (ici 50, un nombre suffisant pour illustrer le comportement du modèle). La combinaison maximisant l'indice de performance établi à la section D.5 est retenue.

La figure D.7 présente l'évolution des variables α , β et l_2 lors tout au long d'une telle simulation de mouvement de prise optimal. Les caractéristiques de l'objet pris et celles de l'environnement sont celles définies au tableau D.1. Finalement, il est à noter que ce graphique se lit de droite à gauche, la pince se refermant sur l'objet.

La figure D.8 présente quant à elle l'évolution de l'indice d'équilibre statique de la pièce au cours de ce mouvement de pelletage optimal. La courbe pleine représente l'utilisation des paramètres du tableau D.1. D'après cette dernière, il apparaît clairement que l'initialisation du mouvement est difficile, la stabilité de l'objet n'étant atteinte qu'au milieu du mouvement lorsque l'objet forme un angle d'environ 60° par rapport au sol. Les données de la courbe aux traits longs sont obtenues en augmentant le coefficient de friction entre l'objet et le sol μ_0 , augmentant significativement la stabilité de prise. Finalement, la courbe pointillée montre qu'une augmentation de la force appliquée sur le dessus de l'objet a un léger effet bénéfique sur la stabilité de prise.

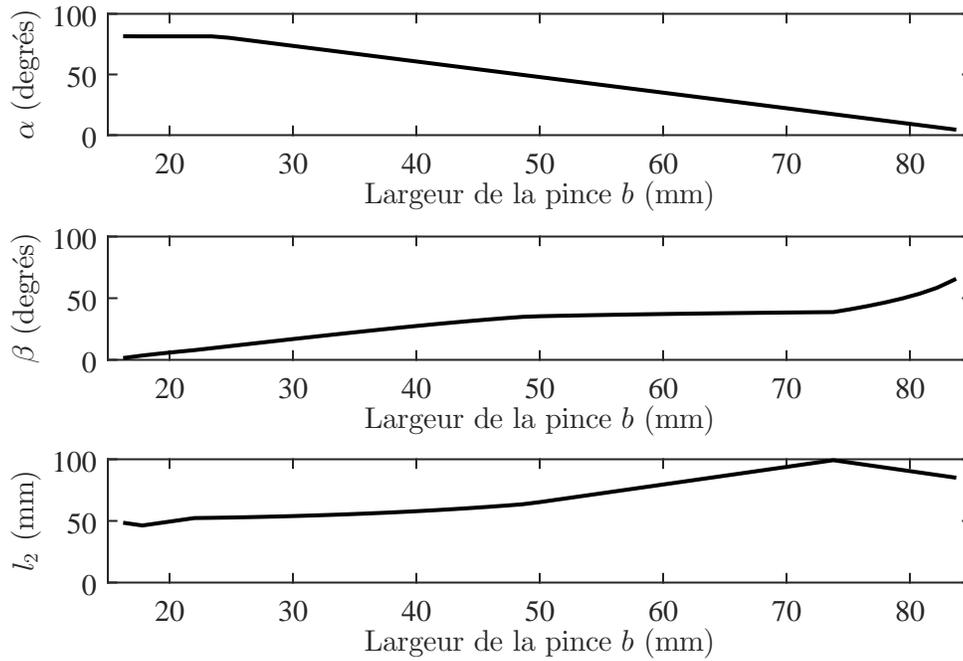


FIGURE D.7 – Évolution de α , β et l_2 lors d'un mouvement optimal de pelletage.

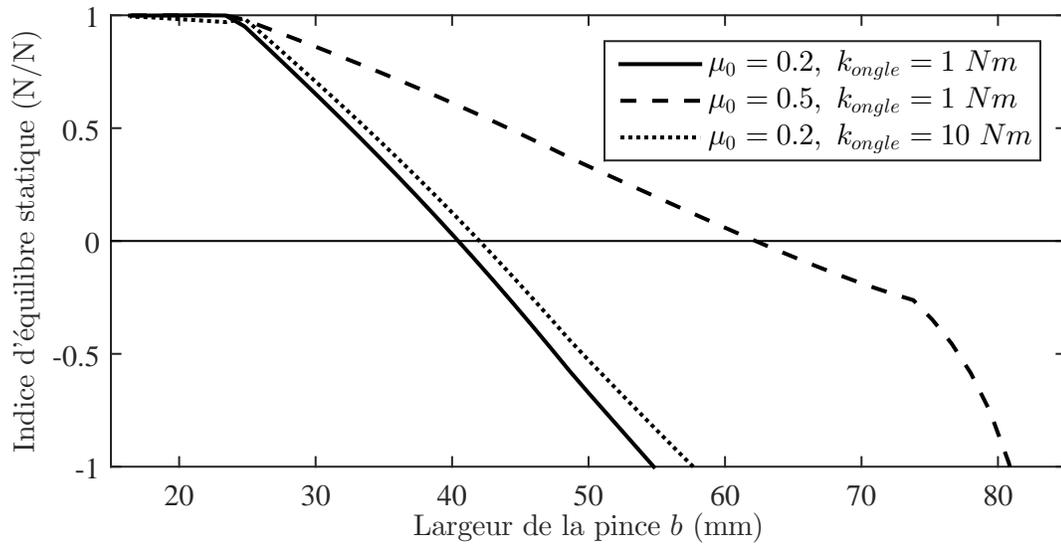


FIGURE D.8 – Évolution de l'indice d'équilibre statique au cours d'un mouvement optimal de pelletage.

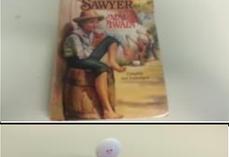
Annexe E

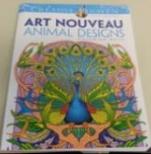
Résultats expérimentaux complets

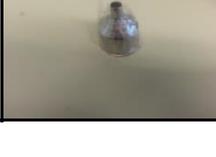
Les résultats complets des essais expérimentaux décrits au chapitre 5 sont présentés dans cette annexe. Ces derniers sont organisés en un tableau décrivant les résultats de chaque objet en ordre croissant de succès de prise. Chaque ligne du tableau décrit un objet grâce à une image de ce dernier, sa masse, ses dimensions, le type de prise tenté par le système pour le prendre, le nombre de prises réussies ou échouées pour cet objet (10 essais sont tentés pour chaque objet) et finalement les commentaires de l'expérimentateur pris lors des essais de prise.

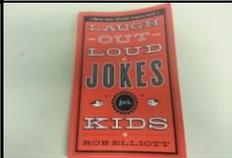
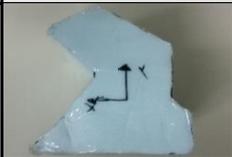
Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Anneaux		7	9,5 x 5 x 0,1	Pelletage	0	10	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est trop fin pour être segmenté de l'environnement par la caméra.
Cheese Nips (vide, à plat)		44	18,5 x 14,3 x 6	Pelletage	0	10	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est trop haut pour le mouvement de pelletage actuel. Je le laisse car il s'agit d'un objet du Amazon Picking Challenge.
Planche à découper		265	34,5 x 22,5 x 0,4	Pelletage	0	10	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est grand, très rigide et glissant.
Poubelle en grillage		92	13,4 x 10,9 x 10,9	Par-dessus simple	0	10	<ul style="list-style-type: none"> Le grillage est impossible à percevoir en 3D en raison de la technique de perception de la profondeur utilisée par la caméra Kinect. La base est trop grande pour la pince; la seule prise possible est une pincée du rebord.
Livre rigide - Politically Correct Bedtime Stories		174	18,3 x 13 x 1,5	Pelletage	1	9	<ul style="list-style-type: none"> La couverture du livre est rigide.
Verres avec pailles (à plat)		122	16,5 x 9 x 8	Par-dessus complet	2	8	<ul style="list-style-type: none"> L'algorithme prend la bonne décision et tente la prise près de la base pour accommoder l'ouverture max. de la pince. Les erreurs sont causées par la perception de la hauteur au centre de l'objet et non au point de prise.
Brosse à biberon		73	30,5 x 10,4 x 4,5	Pelletage	2	8	<ul style="list-style-type: none"> Le centre géométrique de l'objet est à la jonction entre la brosse et son manche; le mouvement de pelletage ne prenant en compte que la hauteur à ce point, il cause une collision entre la pince et la brosse.
Post-it (individuel)		14,5	5 x 3,7 x 0,9	Pelletage	4	6	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est petit et léger, donc une petite imprécision du mouvement d'approche cause l'échec de la prise. Déplacement de l'objet lors de la prise.
Sharpie (individuel)		16,5	11,7 x 1,7 x 1,7	Pelletage	4	6	<ul style="list-style-type: none"> Si l'approche est trop brusque, le crayon peut s'échapper avant la fermeture de la pince. Déplacement de l'objet lors de la prise.
Tape 2 face		25	13 x 9 x 2	Pelletage	5	5	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est rigide et son dessus est glissant. Il est possible de prendre l'objet s'il est retourné ou en le prenant par la languette.
Oreos (vide, à plat) 159		34	22,5 x 13 x 5,5	Pelletage (x6) Par-dessus (x4)	5	5	<ul style="list-style-type: none"> Hauteur de l'objet à la limite du possible en pelletage. Objet fragile. Il est possible d'attraper les languettes dans le sens long de l'objet.

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Sharpie (paquet)		114	12 x 11 x 2,7	Pelletage	5	5	<ul style="list-style-type: none"> La prise en pelletage est possible seulement dans l'axe perpendiculaire aux crayons.
Bouteilles pressables		47	20,5 x 9,5 x 5,5	Pelletage	5	5	<ul style="list-style-type: none"> Il est difficile de percevoir la hauteur de l'objet (il est transparent). La différence de hauteur entre les essais va jusqu'à 8 cm! Les essais réussis sont ceux où la hauteur est bien perçue.
Coupe pâte plat		134	15,7 x 9,4 x 2,5	Pelletage	5	5	<ul style="list-style-type: none"> La prise est possible seulement si le pelletage se fait dans une direction autre que celui du côté plat sur la table. L'objet se prend à l'envers seulement du côté arrondi.
Pinceaux		38	22,7 x 8,5 x 1	Pelletage	7	3	<ul style="list-style-type: none"> Échec des prises dans l'axe des pinceaux.
Livre souple - Huckleberry Finn		163	20,2 x 12,7 x 1,3	Pelletage	7	3	<ul style="list-style-type: none"> Insertion de l'ongle sous l'objet difficile.
Cartes index		147	12,7 x 7,6 x 2	Pelletage	8	2	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est glissant et modérément rigide. Insertion de l'ongle sous l'objet difficile.
Crayola (boite)		207	17 x 12,7 x 3,3	Pelletage	8	2	<ul style="list-style-type: none"> Insertion de l'ongle sous l'objet difficile. Endommagement de l'emballage.
Petits tournevis		81	19,2 x 9,8 x 1,5	Pelletage	8	2	<ul style="list-style-type: none"> Échec des prises dans l'axe des tournevis.
Cloche pour vélo		19	5,2 x 4,5 x 3,5	Par-dessus simple	8	2	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est fait de métal réfléchissant rendant difficile la perception de sa hauteur. L'objet est petit et convexe; il est facilement éjectable.
Cuillères pour bébé		82	18,5 x 9,5 x 2	Pelletage	9	1	<ul style="list-style-type: none"> Échec de la prise dans l'axe des cuillères du côté sans languette.
Canard Kong 160		30	21 x 9 x 4	Pelletage (x9) Par-dessus (x1)	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec est causé par une prise sur le bout du bec du canard.

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Chandelles		218	14 x 13 x 4	Pelletage	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec causé par une éjection de l'objet lors du transport vers son point de dépôt (l'emballage est glissant). Précision de la hauteur détectée variable.
Crayons à mine Mirado		72	19,2 x 4,8 x 1,5	Pelletage	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec causé par un pelletage dans le sens long de la boîte.
Crayons de cire		40	11,1 x 6,8 x 0,7	Pelletage	9	1	<ul style="list-style-type: none"> La position du centre de masse de l'objet est mal estimée; couplé à la petite taille et masse de l'objet, ce dernier tourne lors du contact avec la pince.
Kleenex (boite de côté)		56	22 x 11,5 x 6,9	Par-dessus simple	9	1	<ul style="list-style-type: none"> La seule manière d'attraper l'objet est de le poser de côté sur la table. L'objet est fragile et se déforme beaucoup avec l'utilisation de la force de fermeture utilisée avec les autres objets.
Lunettes de soleil		26	14,5 x 4,7 x 3,5	Pelletage (x9) Par-dessus (x1)	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec est causé par une prise par-dessus.
Menthes (boite couchée)		8	6 x 3,5 x 1,5	Pelletage (x9) Par-dessus (x1)	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec est causé par une tentative de prise par-dessus (l'objet étant convexe, il a été éjecté).
Oreos (vide, côté)		34	22,5 x 13 x 5,5	Par-dessus simple	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est placé de côté sur la table. Il y a déformation importante de l'objet avec la force normale de prise. La hauteur de l'objet cause des erreurs de parallaxe avec la caméra.
Packet de gomme		21	9,2 x 6,5 x 0,5	Pelletage	9	1	<ul style="list-style-type: none"> Le point de contact avec l'objet doit être sur son bord long.
Porte-poussière		67	33,5 x 23 x 5,5	Par-dessus complet	9	1	<ul style="list-style-type: none"> L'échec causé par une mauvaise perception du contour menant à une solution aberrante. Note : La prise en pelletage est possible par tous les côtés de l'objet autre que la partie avec caoutchouc.
Livre souple usagé - The adventures of Tom Sawyer		133	17,5 x 10,5 x 2	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> Le livre est usagé : il est raide, glissant (car poli par l'usure) et légèrement fragile.
Moule à oeuf 161		38	13 x 13 x 2,5	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> L'objet comprend un couvercle de plastique glissant au centre de l'anneau. L'anneau de l'objet est formé de silicone et est facilement déformable; il ne retient pas les doigts de la pince.

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Gratte dos		44	23,5 x 6 x 0,7	Pelletage	10	0	
Livre souple - Livre à colorier		225	25,7 x 20,8 x 0,6	Pelletage	10	0	
Popcorn (1 kg)		1010	26 x 17 x 3	Pelletage	10	0	• Attention : le sac est glissant et son contenu se déplace beaucoup au cours du transport.
Savon (paquet, côté)		392	13,5 x 8,5 x 6	Par-dessus simple	10	0	• L'objet est suffisamment haut pour créer des erreurs de parallaxe.
Bâtons pour café		125	25 x 9 x 3	Pelletage	10	0	• Prise difficile dans l'axe des bâtons mais l'emballage sauve la mise.
Balle au bout d'un corde		100	18,8 x 10,5 x 5,5	Par-dessus simple	10	0	
Balles pour chien		50	23 x 12,5 x 6,5	Par-dessus simple	10	0	
Bougie d'allumage		54	9,5 x 2,4 x 2	Par-dessus simple	10	0	• La boîte est fragile et peut se déformer après plusieurs prises.
Canard en plastique		73	14 x 9,5 x 7	Par-dessus simple	10	0	• L'emballage plastique rend difficile la perception de la hauteur de l'objet.
Cartes de hockey		13	13 x 6,5 x 0,3	Pelletage	10	0	
Cheese Nips (de côté, vide)		44	18,5 x 14,3 x 6	Par-dessus simple	10	0	• L'objet est placé de côté sur la table. • Il y a déformation importante de l'objet avec la force normale de prise. • La hauteur de l'objet cause des erreurs de parallaxe avec la caméra.

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Colle Elmer		145	14,7 x 6,5 x 3	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> Cette méthode de prise de l'objet a été forcée par l'expérimentateur.
Convertisseur USB-Firewire		11,5	13 x 2 x 0,3	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> Les dimensions de l'objet sont à la limite des perceptions de la caméra.
Cordes de chandelles		12	9 x 7,5 x 0,7	Pelletage	10	0	
Coupe pâte rond		46	11,5 x 11,5 x 4,5	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> Comme la hauteur des objets est perçue à leur centre géométrique (ici nulle car le centre de l'objet est vide), la prise se fait en pelletage.
Coupe ravioli		55	12 x 7,5 x 6,5	Par-dessus simple	10	0	
Couvercle en silicone pour tarte		117	26 x 25,5 x 1,5	Pelletage	10	0	
Cylindre acier		600	5 x 5 x 3,8	Par-dessus simple	10	0	
Dérouleur de tube de pâte à dent		20	8 x 5 x 2	Par-dessus simple	10	0	
Duct tape		125	9,8 x 9,8 x 4,7	Pelletage	10	0	<ul style="list-style-type: none"> Comme la hauteur des objets est perçue à leur centre géométrique (elle est donc ici nulle), la prise se fait en pelletage. La hauteur de l'objet est à la limite de ce qui est possible de prendre en pelletage.
Efface à tableau blanc		20	13 x 5,2 x 3,5	Par-dessus simple	10	0	
Entonnoir à pâtisserie		11	5 x 4 x 4	Par-dessus simple	10	0	<ul style="list-style-type: none"> L'objet est difficile à percevoir par la vision (objet métallique réfléchissant).

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Infuseur de thé (fraise)		16	11 x 8 x 2	Pelletage (x 7) Par-dessus (x3)	10	0	• Le système de vision perçoit mal la hauteur de l'objet, causant occasionnellement des prises par-dessus.
Infuseur de thé (vache de mer)		32	10,5 x 4,5 x 4,5	Par-dessus simple	10	0	
Jouet pour chien		30	24 x 9 x 3,5	Pelletage	10	0	
Livre souple - Laugh Out Loud Jokes		79	17,7 x 10,6 x 0,8	Pelletage	10	0	
Livre souple - Robinson Crusoe		173	22 x 12,6 x 1,4	Pelletage	10	0	
Lunettes de protection		44	17 x 8 x 5	Par-dessus (x8) Pelletage (x2)	10	0	
Marianne Bloc		15	10 x 8 x 7,5	Par-dessus complet	10	0	• Le recouvrement en plastique luisant de cet objet générerait des contours semi-aléatoires; il a donc été recouvert de «masking tape» mat.
Marianne Rond		12,5	10 x 8 x 7,5	Par-dessus complet	10	0	• Le recouvrement en plastique luisant de cet objet générerait des contours semi-aléatoires; il a donc été recouvert de «masking tape» mat.
Marianne Triangle		11,6	10 x 7,5 x 7,5	Par-dessus complet	10	0	• Le recouvrement en plastique luisant de cet objet générerait des contours semi-aléatoires; il a donc été recouvert de «masking tape» mat.
Masking tape beige		154	11,7 x 11,7 x 2,4	Pelletage	10	0	• Comme la hauteur des objets est perçue à leur centre géométrique (elle est donc ici nulle), la prise se fait en pelletage.
Moule en silicone pour gâteaux 164		95	21 x 16 x 3,5	Pelletage	10	0	

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Peluche chien		12	12 x 7 x 2,5	Pelletage	10	0	
Petit bonhomme en plastique		18,5	9 x 4,5 x 4	Par-dessus simple	10	0	
Pilulier		31	12,5 x 6,5 x 2,2	Pelletage	10	0	
Poignée de porte de voiture		93	24 x 7 x 3,5	Par-dessus simple	10	0	
Pois chiches (1 kg)		1016	26 x 17 x 3	Pelletage	10	0	
Post-it (paquet)		180	11,5 x 5 x 4,2	Par-dessus simple	10	0	
Recouvre prise de courant anti-bébé		74	19 x 9 x 5,5	Par-dessus simple	10	0	
Ruban coloré		42	8 x 4 x 4	Par-dessus simple	10	0	
Savon (individuel)		98	8,5 x 6 x 3,5	Pelletage (x6) Par-dessus (x4)	10	0	• L'objet est à la limite de hauteur entre le choix de la technique de prise par le dessus et en pelletage. La technique utilisée varie donc en fonction du bruit de mesure de la hauteur de l'objet.
Sucre (1 kg)		1015	26 x 17 x 3	Pelletage	10	0	
Masking tape mince 165		18	10,2 x 10,2 x 0,5	Pelletage	10	0	

Nom	Image	Masse (g)	Dimensions (cm)	Type de prise	Succès	Échec	Commentaires / Observations
Temptations		189	19,5 x 10,5 x 2,5	Pelletage	10	0	
Tray de vaisselle		107	23 x 18,5 x 1,5	Pelletage	10	0	
Tylenols		10	6,5 x 3,3 x 3,3	Par-dessus simple	10	0	