



# **Développement d'algorithmes d'estimation de la pose d'objets saisis par un préhenseur robotique**

**Mémoire**

**Marianne Côté**

**Maîtrise en Génie mécanique**  
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Marianne Côté, 2016



# Résumé

Les préhenseurs robotiques sont largement utilisés en industrie et leur déploiement pourrait être encore plus important si ces derniers étaient plus intelligents. En leur conférant des capacités tactiles et une intelligence leur permettant d'estimer la pose d'un objet saisi, une plus vaste gamme de tâches pourraient être accomplies par les robots. Ce mémoire présente le développement d'algorithmes d'estimation de la pose d'objets saisis par un préhenseur robotique. Des algorithmes ont été développés pour trois systèmes robotisés différents, mais pour les mêmes considérations. Effectivement, pour les trois systèmes la pose est estimée uniquement à partir d'une saisie d'objet, de données tactiles et de la configuration du préhenseur. Pour chaque système, la performance atteignable pour le système minimaliste étudié est évaluée.

Dans ce mémoire, les concepts généraux sur l'estimation de la pose sont d'abord exposés. Ensuite, un préhenseur plan à deux doigts comprenant deux phalanges chacun est modélisé dans un environnement de simulation et un algorithme permettant d'estimer la pose d'un objet saisi par le préhenseur est décrit. Cet algorithme est basé sur les arbres d'interprétation et l'algorithme de RANSAC. Par la suite, un système expérimental plan comprenant une phalange supplémentaire par doigt est modélisé et étudié pour le développement d'un algorithme approprié d'estimation de la pose. Les principes de ce dernier sont similaires au premier algorithme, mais les capteurs compris dans le système sont moins précis et des adaptations et améliorations ont dû être appliquées. Entre autres, les mesures des capteurs ont été mieux exploitées. Finalement, un système expérimental spatial composé de trois doigts comprenant trois phalanges chacun est étudié. Suite à la modélisation, l'algorithme développé pour ce système complexe est présenté. Des hypothèses partiellement aléatoires sont générées, complétées, puis évaluées. L'étape d'évaluation fait notamment appel à l'algorithme de Levenberg-Marquardt.



# Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Remerciements	xv
Introduction	1
<b>1 Éléments généraux sur la pose</b>	<b>5</b>
1.1 Formalisme mathématique . . . . .	6
1.2 Introduction à la pose . . . . .	6
1.3 Méthodes d'estimation de la pose . . . . .	9
1.4 Préhenseurs sous-actionnés . . . . .	13
1.5 Capteurs tactiles . . . . .	13
<b>2 Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans le plan et validation en simulations</b>	<b>17</b>
2.1 Formulation du problème . . . . .	18
2.2 Modélisation . . . . .	18
2.3 Notions théoriques . . . . .	22
2.4 Présentation de l'algorithme . . . . .	24
2.5 Génération de données . . . . .	24
2.6 Estimation de la pose . . . . .	29
2.7 Résultats . . . . .	37
2.8 Conclusion . . . . .	38
<b>3 Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans le plan et validation expérimentale</b>	<b>41</b>
3.1 Formulation du problème . . . . .	42
3.2 Présentation et modélisation du montage expérimental . . . . .	43
3.3 Notions de géométrie plane . . . . .	48
3.4 Présentation de l'algorithme . . . . .	50
3.5 Traitement des données . . . . .	52
3.6 Estimation de la pose . . . . .	57

3.7	Résultats . . . . .	66
3.8	Conclusion . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans l'espace et validation expérimentale</b>	<b>71</b>
4.1	Formulation du problème . . . . .	72
4.2	Présentation du montage expérimental . . . . .	74
4.3	Algorithme de Levenberg-Marquardt . . . . .	74
4.4	Présentation de l'algorithme . . . . .	77
4.5	Traitement des données . . . . .	77
4.6	Estimation de la pose . . . . .	81
4.7	Résultats . . . . .	95
4.8	Conclusion . . . . .	101
	<b>Conclusion</b>	<b>105</b>
<b>A</b>	<b>Compléments au chapitre 4</b>	<b>109</b>
A.1	Notions théoriques . . . . .	110
A.2	Traitement préliminaire . . . . .	112
	<b>Bibliographie</b>	<b>117</b>

# Liste des tableaux

2.1	Valeur moyenne, écart type et valeur maximale de l'erreur angulaire, de l'erreur en translation et du temps de calcul pour les quatre objets. . . . .	37
3.1	Valeurs seuils de la distance moyenne $\bar{d}_{seuil}$ et de l'écart type de la distance $\sigma(d_{seuil})$ pour les trois objets testés. . . . .	65
3.2	Fréquence de l'erreur angulaire entre la pose estimée et la pose réelle pour 200 estimations de la pose pour chacun des trois objets. . . . .	67
4.1	Paramètres de simulation pour la validation expérimentale de l'algorithme. . . . .	96



# Liste des figures

1.1	Pose d'un objet dans un espace en deux dimensions. . . . .	6
1.2	Pose d'un objet en trois dimensions. . . . .	7
1.3	Orientation de l'objet en trois rotations successives. . . . .	8
1.4	Exemples de capteurs piézorésistifs, tirés de (Fraden, 2004). . . . .	15
1.5	Exemple d'un capteur capacitif, tiré de (Fraden, 2004). . . . .	16
2.1	Préhenseur sous-actionné à 2 doigts simulé, images tirées de (Robotiq, 2013). . . . .	19
2.2	Schéma du préhenseur modélisé. . . . .	20
2.3	Schéma du préhenseur et des capteurs tactiles modélisés. . . . .	20
2.4	Les quatre objets définis en deux dimensions dont la pose est à estimer. . . . .	22
2.5	Schéma de l'algorithme d'estimation de la pose développé. . . . .	25
2.6	Illustration d'une prise englobante, tirée de (Robotiq). . . . .	26
2.7	Exemple d'une configuration de l'objet avant la fermeture des doigts. . . . .	26
2.8	Exemple de la génération du point $\mathbf{p}_i$ du nuage de point, où $i = 1, 2, \dots, 100$ . . . . .	28
2.9	Exemple d'une saisie de l'Objet 4. Chaque point du nuage de points vert représente une position possible d'un contact préhenseur-objet. . . . .	29
2.10	Exemple d'une hypothèse peu probable (A) et d'une hypothèse probable (B) pour les trois points pigés $\mathbf{p}_1$ , $\mathbf{p}_2$ et $\mathbf{p}_3$ . . . . .	30
2.11	Exemple d'une hypothèse incohérente qui associe les points $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3)$ aux segments $(S_3, S_1, S_5)$ . . . . .	33
2.12	Exemple d'une hypothèse de concordance $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_1, S_5, S_3)$ qui mène à plusieurs hypothèses de poses. . . . .	34
2.13	Exemple d'une hypothèse de pose qui interfère avec le préhenseur. . . . .	35
2.14	Exemple d'une hypothèse de pose qui n'est pas cohérente au point de vue des tactels activés. . . . .	36
2.15	Exemple d'une estimation de la pose où l'erreur angulaire est de $4.03^\circ$ et l'erreur en translation est de $0.12 \text{ mm}$ . La pose réelle correspond à la ligne pleine noire et la pose estimée à la ligne brisée rouge. . . . .	39
3.1	Schéma du montage expérimental. . . . .	43
3.2	Dimensions de la Main Robotiq 3 Doigts, unités : mm / [po], image tirée de (Robotiq). . . . .	44
3.3	Schéma du préhenseur modélisé pour les expérimentations. . . . .	44
3.4	Vue de dessus du montage expérimental. . . . .	45
3.5	Capteurs tactiles intégrés au préhenseur et la représentation de la distribution de pression qu'ils permettent. . . . .	47

3.6	Les trois objets qui sont les sujets des expérimentations. À partir du coin supérieur gauche dans le sens horaire : Objet 1, Objet 2, Objet 3. . . . .	48
3.7	Illustration de l'orientation du système d'axes du préhenseur et d'un objet. Les axes $z_p$ et $z_o$ sont parallèles et pointent dans la même direction lors d'une saisie.	48
3.8	Modélisation géométrique et distance du point $P$ par rapport à la droite $\Delta$ . . .	49
3.9	Schéma de l'algorithme d'estimation de la pose dans le plan développé pour les expérimentations avec la Main Robotiq 3 Doigts. . . . .	51
3.10	Exemple de la projection en deux dimensions des contacts générés par la saisie d'un objet. . . . .	52
3.11	Exemple de la génération du point $\mathbf{p}_i$ du nuage de points au taclel $j$ , où $i = 1, 2, \dots, n_j$ et $n_j$ est le nombre de points à générer pour le taclel $j$ . . . . .	55
3.12	Exemple d'une saisie d'objet et le nuage de points généré résultant. . . . .	57
3.13	Exemple d'une hypothèse de concordance probable (droite) pour une saisie d'objet (gauche) : $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_7, S_1, S_4)$ . . . . .	59
3.14	Exemple d'une correction de la position hypothétique de l'objet. . . . .	62
3.15	Écart type de la distance ( $\sigma_d$ ) selon la distance moyenne ( $\bar{d}$ ) et l'erreur angulaire ( $\Delta\theta$ ). . . . .	64
3.16	Erreur de positionnement selon les axes $x$ ( $\Delta t_x$ ) et $y$ ( $\Delta t_y$ ) et l'erreur angulaire ( $\Delta\theta$ ). . . . .	67
3.17	Fréquence du temps requis ( $T$ ) pour obtenir la pose pour les 600 exécutions de l'algorithme. . . . .	67
3.18	Exemple d'une pose miroir (trait brisé rouge) et de la pose réelle (trait plein noir). . . . .	68
4.1	Schéma du montage expérimental. . . . .	75
4.2	Le quatrième objet dont la pose est à estimer. . . . .	75
4.3	Diagramme de l'algorithme d'estimation de la pose dans l'espace en trois dimensions développé pour les expérimentations avec la Main Robotiq 3 Doigts. . . . .	78
4.4	Distributions utilisées pour la génération d'un point $\mathbf{p}_i$ dans l'espace d'un élément tactile $j$ , où $i = 1, 2, \dots, n_j$ , $n_j$ est le nombre de points à générer pour le taclel $j$ et $j = 1, 2, \dots, m$ avec $m$ le nombre de tactels qui détectent un contact. . . . .	79
4.5	Éléments disponibles pour l'estimation de la pose. . . . .	83
4.6	Points générés à l'intérieur et à la surface du préhenseur. . . . .	83
4.7	Exemple d'une hypothèse d'orientation impossible (centre) et une autre possible (droite) compte tenu de la configuration du préhenseur (gauche). . . . .	85
4.8	Procédure de recherche de translations possibles. . . . .	86
4.9	Explicitation des trois distances utilisées pour l'évaluation rapide des hypothèses de pose et des divers nuages de points. . . . .	88
4.10	Exemple de points du <i>nuage de points interne du préhenseur</i> à proximité de points du <i>nuage de points interne de l'objet</i> . . . . .	89
4.11	Poids $W$ en fonction de l'erreur angulaire $\Delta\theta$ pour 19 poses différentes par objet, avec cinq exécutions de l'algorithme pour chacune. . . . .	97
4.12	Exemple d'une estimation de la pose où une hypothèse avec une forte erreur angulaire performe mieux que des hypothèses similaires à la pose réelle de l'objet saisi. . . . .	98
4.13	Poids $W$ en fonction de l'erreur angulaire $\Delta\theta$ pour 5 poses différentes par objet, avec cinq exécutions de l'algorithme pour chacune. . . . .	99

A.1	Modélisation mathématique d'un triangle $\mathcal{T}$ et d'un segment semi-infini $\mathcal{L}$ dans un repère orthonormé $\mathcal{R}$ . . . . .	112
A.2	Exemple de la transformation des triangles qui forment un objet en un nuage de points à sa surface. . . . .	114
A.3	Exemple de la génération de points à l'intérieur d'un objet. . . . .	116



The main lesson of thirty-five years of AI research is that the hard problems are easy and the easy problems are hard. The mental abilities of a four-year-old that we take for granted – recognizing a face, lifting a pencil, walking across a room, answering a question – in fact solve some of the hardest engineering problems ever conceived...

---

Steven Pinker



# Remerciements

Mes premiers remerciements sont destinés au professeur Clément Gosselin qui m'a confié un projet de recherche stimulant et en ligne avec mes intérêts. Son soutien, sa grande disponibilité, ses bons conseils et bonnes idées tout au long de mon passage au Laboratoire de robotique ont été très appréciés.

Je tiens également à remercier les collaborateurs de chez Robotiq et de l'École de technologie supérieure de Montréal pour leur contribution à ce projet. Merci aux professionnels de recherche du laboratoire Thierry et Simon qui sont toujours prêts à aider. Merci aux professeurs Alexandre Campeau-Lecours et Philippe Giguère pour l'évaluation de mon mémoire, vos commentaires et suggestions ont permis d'améliorer cet ouvrage.

Un merci particulier aux membres du laboratoire, je garde de bons souvenirs des moments passés en votre compagnie. Bien évidemment, merci à mes précieux amis et à la famille qui m'ont apporté tout le soutien nécessaire pour mener à terme mes études. Finalement, un gros merci à Pier-Luc mon cher époux et amoureux de longue date avec qui j'ai pu traverser les montagnes russes de l'Université. Sans ta présence, ta bonne humeur, ton humour et tes encouragements, ces dernières années n'auraient pu être parfaites comme elles l'ont été.



# Introduction

Dans quelques années, en 2020, le terme *robot* célébrera son premier centenaire. Ce terme a été introduit pour la première fois en 1920 dans une pièce de théâtre. Depuis ce moment où ils étaient uniquement imaginaires, les robots se sont lentement matérialisés et imposés dans plusieurs domaines et sous différentes formes. Dans le domaine domestique, ils remplacent les aspirateurs ou les tondeuses à gazon en effectuant les tâches de manière autonome. Au niveau du domaine médical, ils peuvent servir pour des chirurgies minimalement invasives ou encore pour la réadaptation physique.

Le domaine industriel s'est lui aussi imprégné de la robotique au cours des années. Ce qui peut être considéré comme les premiers pas dans ce domaine est l'installation de la première unité robotique dans une usine de la compagnie GM en 1961. Le bras robotique était utilisé sur une chaîne de production pour transporter et souder des pièces sur des voitures. Ce robot a permis de remplacer les humains pour ces tâches qui comportaient de nombreux risques pour les travailleurs.

Suite à cette introduction de la robotique dans le milieu industriel, plusieurs applications ont vu le jour. La précision, la rapidité, le travail sans relâche et la puissance des robots les rend très attrayants pour cette industrie. Les tâches qui leur sont confiées sont souvent répétitives et le robot est programmé de façon spécifique pour la dite tâche. Cependant, en automatisant une tâche à l'aide d'un robot, il est souvent requis de l'isoler des travailleurs pour des raisons de sécurité. Bien que d'une grande aide dans l'industrie, les opérations qui peuvent être accomplies de façon robotique sont pour le moment limitées.

Avec le vieillissement de la population partout dans le monde, le nombre de travailleurs diminuera, mais la demande ne variera pas pour autant. Une solution potentielle pour répondre à la demande est de remplacer les travailleurs retraités par des robots. Ces robots devront cependant être sécuritaires pour les travailleurs et plus autonomes.

Le projet de maîtrise présenté adresse d'ailleurs cet aspect et a pour but de rendre un système robotique plus autonome. Ce système plus intelligent permettrait par exemple que des tâches simples pour un humain mais d'une certaine complexité pour le robot puissent être effectuées par ce dernier. Plus précisément, l'aspect de la saisie d'objets est étudiée. Les humains sont

dotés d'un sens du toucher très développé et performant. Ce sens nous permet de saisir un objet et de déduire sa configuration sans même le regarder. Par exemple, en saisissant une tasse les yeux bandés, il est aisé de déduire sa position et son orientation dans notre main.

Le but du projet est de permettre à un préhenseur robotique de déterminer automatiquement la pose d'un objet saisi. Toutefois, ce système se veut simple, minimaliste, compact et mobile. Cela peut être formulé en quelques objectifs. D'abord, il est souhaité que l'obtention de la pose d'un objet saisi, c'est-à-dire sa position et son orientation dans le préhenseur robotique, ne dépende pas d'un système externe tel un système de vision. Également, il est souhaitable que la pose puisse être estimée à partir d'une unique saisie, à savoir que l'objet ne doit pas être palpé pour atteindre le but visé. Un autre objectif des travaux de recherche est d'estimer le taux de succès qu'il est possible d'atteindre avec un système minimaliste. L'atteinte de ces objectifs rendrait possible l'estimation de la pose d'un objet saisi pendant son transport vers sa destination finale. Ainsi, une fois à destination, l'objet pourrait être réorienté conformément à la tâche à effectuer et cela ouvrirait une porte pour que les robots puissent effectuer un plus grand nombre de tâches de manière autonome.

Le concept étudié dans ce mémoire comprend un préhenseur robotique, des capteurs tactiles et des encodeurs rotatifs. Ces trois éléments rassemblés imitent une partie de la mécanique de la main humaine et quelques-uns de ses capteurs. La partie manquante et non négligeable pour avoir un certain sens du toucher est l'équivalent de l'analyse qui est effectuée par le cerveau pour déterminer la configuration d'un objet saisi. Le travail de recherche s'est concentré surtout sur cette facette : comment traiter les données des capteurs tactiles et des encodeurs pour déterminer la pose d'un objet saisi ?

Pour différents systèmes robotiques, des algorithmes d'estimation de la pose ont été développés. Certains éléments ont été pris pour acquis lors de ces développements. En premier lieu, les objets saisis par le système sont tous connus et le préhenseur sait lequel des objets il a entre les doigts. Également, l'objet n'est saisi qu'une seule fois et la pose doit être estimée uniquement à partir des mesures effectuées par les capteurs à ce moment. Ainsi, les intrants d'un algorithme d'estimation de la pose sont : l'objet saisi, la configuration du préhenseur lors de cette saisie et les signaux tactiles générés.

Le mémoire se divise en quatre parties. Le chapitre 1 établit les concepts de base concernant la pose d'un objet. Également, les méthodes d'estimation de la pose présentées dans la littérature sont revues. Ce chapitre introduit aussi les composantes du système robotique considéré pour le projet de maîtrise.

Les travaux de recherche ont quant à eux été accomplis en trois étapes et chaque étape correspond à un chapitre du mémoire. Au commencement, un préhenseur simple et plan comprenant deux doigts à deux phalanges chacun a été étudié dans un environnement de simulation. La formulation du problème et la modélisation du système sont abordées au chapitre 2. Ce cha-

pitre explique aussi en détails l'algorithme d'estimation de la pose développé pour le système robotique.

Le chapitre 3 présente tout ce qui a trait à la deuxième étape des recherches. Un préhenseur plan est encore une fois l'objet de l'étude, mais cette fois le système est testé expérimentalement. Le système est similaire à celui étudié dans un environnement de simulation au chapitre 2, mais l'algorithme a été bonifié et adapté selon les résultats obtenus précédemment.

Le quatrième et dernier chapitre fait l'étude d'un système plus complet. Il est alors tenté d'estimer la pose d'un objet dans l'espace tridimensionnel, en comparaison à un espace bidimensionnel précédemment étudié. Les adaptations et améliorations à apporter aux algorithmes d'estimation de la pose pour un espace bidimensionnel sont présentées en détails et les résultats associés à ce système sont discutés. Des éléments complémentaires à ce chapitre sont également présentés à l'annexe A. Finalement, la conclusion du mémoire reprend les principaux résultats obtenus et formule des suggestions pour la suite des travaux.



# Chapitre 1

## Éléments généraux sur la pose

Dans ce chapitre, des notions de base nécessaires pour estimer la pose d'objets sont présentées. En premier lieu, la notation utilisée tout au long du mémoire est définie. Ensuite, la pose en deux et en trois dimensions sont explicitées, afin de clarifier les paramètres qui seront recherchés lors d'une estimation dans le plan et dans l'espace tridimensionnel. Quelques méthodes d'estimation de la pose répertoriées dans la littérature sont résumées et leurs avantages et inconvénients sont discutés. Finalement, deux éléments qui ont été exploités pour ce projet de maîtrise sont présentés, soit les préhenseurs sous-actionnés et les capteurs tactiles.

## 1.1 Formalisme mathématique

Tout au long de ce mémoire, la convention suivante sera utilisée pour décrire les éléments mathématiques. Les lettres en caractère standard minuscule et majuscule, tel que  $a$  et  $A$  représentent des scalaires. Les caractères gras en minuscule et en majuscule, tels que  $\mathbf{a}$  et  $\mathbf{A}$  sont réservés aux vecteurs et aux matrices respectivement. De plus, le système d'unités utilisé est le Système international d'unités (SI) (Taylor).

## 1.2 Introduction à la pose

L'essentiel du travail présenté dans ce mémoire concerne l'estimation de la pose d'objets. En d'autres mots, il est souhaité de trouver la configuration d'un objet saisi par un préhenseur robotique, où la pose décrit la position et l'orientation d'un objet dans un repère donné.

Le problème d'estimation de la pose d'un objet consiste donc à trouver les transformations rigides qui ont été appliquées à ce dernier depuis sa configuration initiale pour qu'il se retrouve dans sa configuration finale. Les deux types de transformations rigides possibles sont des translations et des rotations. Les sous-sections qui suivent explicitent les paramètres qui décrivent la configuration d'un objet en deux et en trois dimensions, ainsi que la relation mathématique entre la pose initiale et finale d'un objet.

### 1.2.1 Pose en 2D

Dans un espace à deux dimensions (un plan), un corps rigide général possède trois degrés de liberté et sa pose est complètement définie par trois paramètres : deux translations et une rotation. La figure 1.1 illustre ces paramètres qui définissent la pose en deux dimensions.

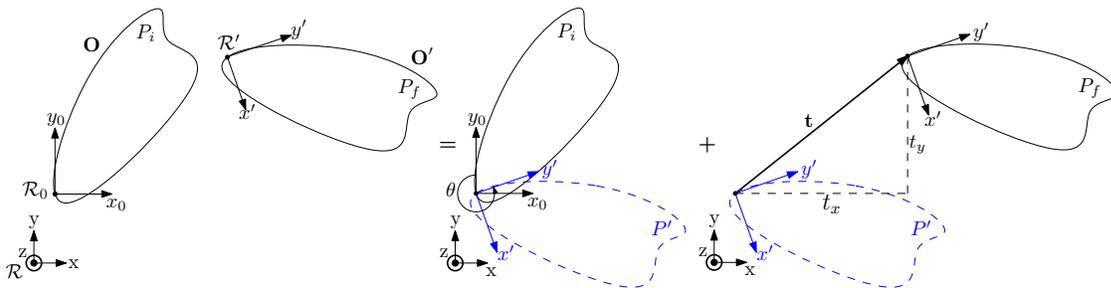


FIGURE 1.1 – Pose d'un objet dans un espace en deux dimensions.

Soit  $O$  un objet à deux dimensions défini dans son repère local  $\mathcal{R}_0$  et  $\mathcal{R}$  le repère global. La pose initiale est identifiée par  $P_i$  et la pose finale par  $P_f$ . La transformation appliquée à l'objet  $O$  le réoriente et le déplace jusqu'à sa configuration finale où l'objet est renommé  $O'$ .

Cette transformation peut être décomposée en deux transformations successives. La première consiste à orienter correctement l'objet, en lui appliquant une rotation d'un angle  $\theta$  dans le

sens anti-horaire. Le résultat de cette transformation mène à la pose intermédiaire  $P'$ . De là, l'objet effectue une translation  $\mathbf{t}$  suivant les axes  $x$  et  $y$  jusqu'à sa pose finale  $P_f$ .

Ces transformations apportées à l'objet modifient l'orientation et la position du repère local  $\mathcal{R}_0$ , le repère résultant est nommé  $\mathcal{R}'$ . Dans le cas illustré, le problème d'estimation de la pose consiste à trouver le changement d'orientation entre les repères  $\mathcal{R}'$  et  $\mathcal{R}_0$ , ainsi que la translation qui relie ces deux repères locaux, le tout exprimé dans le repère global  $\mathcal{R}$ . Les trois paramètres décrivant ces transformations sont  $\beta = (t_x, t_y, \theta)$  et apparaissent sur la figure 1.1.

Cette transformation peut être décrite mathématiquement à l'aide des paramètres définis dans les paragraphes ci-haut. À l'aide de l'expression suivante, il est possible de décrire le vecteur position, noté  $\mathbf{v}'$ , d'un point défini sur l'objet transformé  $O'$  en fonction du vecteur position, noté  $\mathbf{v}$ , de ce point défini sur l'objet  $O$  dans sa pose initiale et des paramètres de pose

$$\mathbf{v}' = \mathbf{Q}\mathbf{v} + \mathbf{t} \quad (1.1)$$

où

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \text{ et } \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}. \quad (1.2)$$

La matrice  $\mathbf{Q}$  est la matrice de rotation qui réoriente le repère local  $\mathcal{R}_0$  jusqu'à ce qu'il coïncide avec  $\mathcal{R}'$ . Le vecteur  $\mathbf{t}$  est le vecteur translation qui déplace l'objet de la pose intermédiaire  $P'$  jusqu'à la pose finale  $P_f$ .

### 1.2.2 Pose 3D

Dans un espace à trois dimensions, six paramètres sont nécessaires pour définir les six degrés de liberté d'un objet : trois translations et trois rotations. Un exemple est présenté à la figure 1.2 et les explications sont données dans les paragraphes qui suivent.

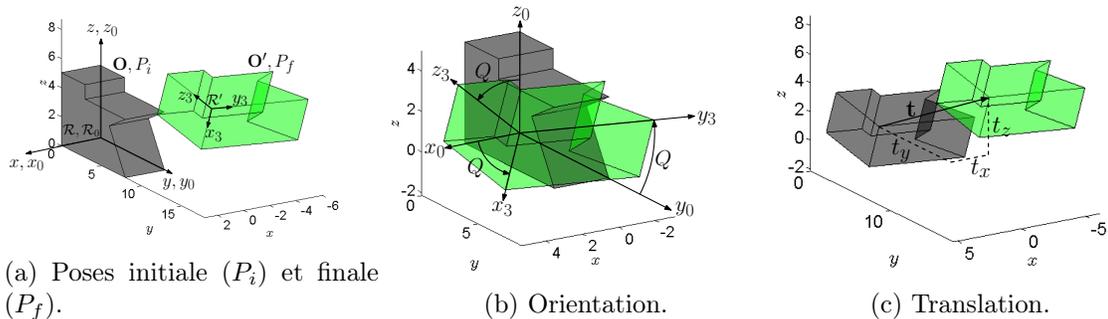


FIGURE 1.2 – Pose d'un objet en trois dimensions.

Le repère local de l'objet  $\mathcal{R}_0$  coïncide initialement avec le repère global  $\mathcal{R}$ . L'orientation de ce repère local est modifiée par les transformations appliquées à l'objet et le repère résultant est nommé  $\mathcal{R}'$ . Dans cet exemple, le problème d'estimation de la pose consiste à exprimer

l'orientation du repère local  $\mathcal{R}'$  dans le repère global  $\mathcal{R}$ , ainsi que la translation effectuée entre les deux repères. Les six paramètres qui expriment le changement de configuration de l'objet sont

$$\boldsymbol{\beta} = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (1.3)$$

où  $t_x, t_y$  et  $t_z$  sont les composantes du vecteur translation entre les origines des deux repères et  $\phi, \theta$  et  $\psi$  sont trois angles utilisés pour représenter les rotations entre les 2 repères.

Soient un objet  $O$  dans sa configuration initiale  $P_i$  et  $O'$  le même objet dans une nouvelle configuration, dite configuration finale  $P_f$ . De la même façon qu'en deux dimensions, les transformations appliquées à un objet en trois dimensions peuvent être divisées en deux transformations successives. La première oriente l'objet (figure 1.2b) et la deuxième le déplace (figure 1.2c).

L'orientation de l'objet est complètement décrite par la matrice de rotation  $\mathbf{Q}$  de dimension  $3 \times 3$ . Les angles d'Euler constituent une représentation de l'orientation d'un corps rigide couramment utilisée en robotique et qui peut être utilisée ici. Le triplet d'angles d'Euler  $(\phi, \theta, \psi)$  permet de décomposer une rotation quelconque en trois rotations successives autour de trois axes prédéfinis. Il existe 12 conventions et chacune indique l'ordre et autour de quels axes les rotations s'effectuent. Les axes de rotation sont fixés à l'objet, c'est-à-dire que les rotations sont effectuées autour des axes du repère local qui bougent de la même manière que l'objet.

La convention utilisée dans l'exemple de la figure 1.2 est la convention  $ZYZ$ . La figure 1.3 présente la décomposition de la réorientation en trois rotations successives. Une première rotation d'un angle  $\phi$  est effectuée autour de l'axe  $z_0$ . La deuxième rotation de  $\theta$  s'effectue autour de l'axe  $y_0$  modifié, c'est-à-dire autour de  $y_1$  et la dernière rotation est d'un angle  $\psi$  autour de  $z_2$ .

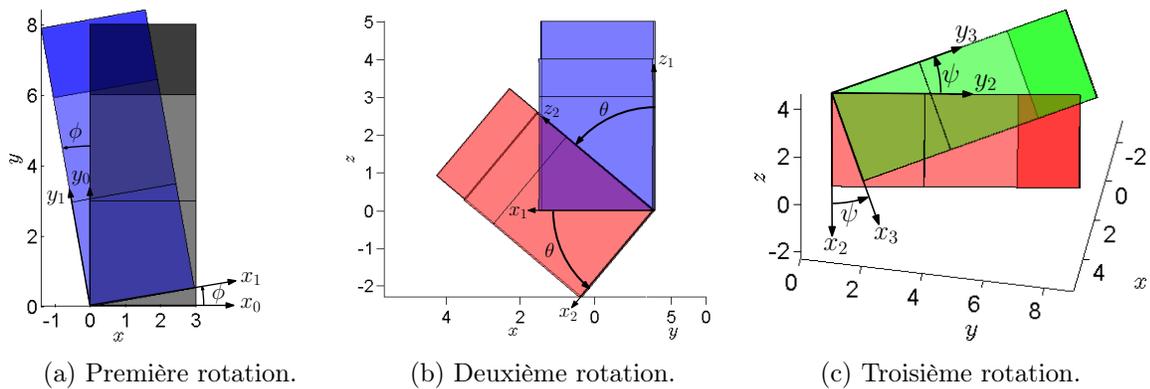


FIGURE 1.3 – Orientation de l'objet en trois rotations successives.

Suite à la réorientation, il suffit de déplacer l'objet jusqu'à sa configuration finale  $P_f$  (figure 1.2c). Cette translation est définie par le vecteur translation  $\mathbf{t}$  qui est exprimé dans le repère global  $\mathcal{R}$ .

L'équation 1.1 est valide dans le cas à trois dimensions et permet de décrire le vecteur position d'un point défini sur un objet  $O'$  dans sa configuration finale  $P_f$  en fonction du vecteur position de ce point défini sur l'objet  $O$  dans sa pose initiale et des paramètres de pose, soit

$$\mathbf{v}' = \mathbf{Q}\mathbf{v} + \mathbf{t} \quad (1.4)$$

où  $\mathbf{v}$  et  $\mathbf{v}'$  sont respectivement le vecteur position du point initial et du point final.

La seule différence entre l'équation 1.1 et l'équation 1.4 est la dimension des vecteurs et matrices qui figurent dans les équations. Dans l'équation 1.4, le vecteur translation est composé d'un élément supplémentaire qui représente la translation dans la troisième dimension  $t_z$  et la matrice de rotation  $\mathbf{Q}$  est de dimension  $3 \times 3$ . Ainsi, les trois paramètres qui décrivent la position de l'objet seront contenus dans le vecteur  $\mathbf{t}$ , soit

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} . \quad (1.5)$$

Pour l'orientation, la matrice de rotation  $\mathbf{Q}$  est de la forme suivante pour la convention  $ZYZ$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_\phi \mathbf{Q}_\theta \mathbf{Q}_\psi \quad (1.6)$$

où les matrices  $\mathbf{Q}_\phi$  et  $\mathbf{Q}_\psi$  sont les matrices de rotation élémentaires autour d'un axe  $z$  et  $\mathbf{Q}_\theta$  est la matrice de rotation élémentaire autour d'un axe  $y$ . La matrice qui suit est obtenue en combinant les trois matrices

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\phi s_\psi & c_\theta \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

où,  $c$ . et  $s$ . désignent respectivement le cosinus et le sinus de leur argument.

### 1.3 Méthodes d'estimation de la pose

L'estimation de la pose d'un objet saisi par un robot est un problème sur lequel se sont penchés plusieurs chercheurs au cours des dernières décennies et encore aujourd'hui, il n'y a pas de consensus sur la méthode à privilégier. Les méthodes présentées dans la littérature incluent souvent un ou des systèmes de vision, des capteurs de force/couple, des capteurs tactiles ou une combinaison de plusieurs de ces capteurs. La présente section expose diverses méthodes d'estimation de la pose répertoriées dans la littérature. Toutes ces méthodes ont comme point commun que le ou les objets dont la pose est à estimer sont connus.

### 1.3.1 Méthodes basées sur les arbres d'interprétation

Une des approches pour solutionner le problème consiste à analyser les caractéristiques des points de contact générés par la saisie d'un objet. Il est montré dans (Gaston et Lozano-Pérez, 1984) qu'il est possible d'identifier l'objet saisi parmi une banque d'objets et d'estimer sa pose à partir de capteurs tactiles. Ces travaux sont effectués en deux dimensions avec des objets de forme polygonale. La méthode proposée est basée sur les arbres d'interprétation (*Interpretation Tree (IT)*) qui établissent les combinaisons possibles des segments de l'objet avec les points de contacts mesurés. Ces combinaisons, ou hypothèses, sont basées sur des relations géométriques entre les segments de l'objet saisi telles que la plage de distances possibles et la plage d'angles entre les normales aux segments. L'arbre d'interprétation est donc parcouru pour identifier les combinaisons qui sont cohérentes avec les mesures. La pose attribuée est celle de l'hypothèse qui est cohérente avec toutes les mesures. Peu d'hypothèses sont possibles après cette recherche, mais il n'est pas rare qu'il y en ait plus d'une. Cette technique se veut assez rapide et simple pour le cas de figure étudié, mais elle ne permet pas d'identifier avec certitude la pose de l'objet lorsque plusieurs hypothèses sont cohérentes.

Une technique très similaire est présentée dans (Siegel, 1991) où les arbres d'interprétation en deux dimensions sont également utilisés. Les expérimentations sont effectuées avec des encodeurs qui informent sur la configuration du préhenseur et des capteurs de couple qui indiquent la trajectoire suivie par les doigts lors de la saisie. Des hypothèses sont générées pour identifier les segments touchés par les phalanges et une hypothèse est jugée cohérente si elle n'occasionne pas de collisions avec le préhenseur et si elle est conforme à la trajectoire des doigts. Le nombre d'hypothèses final est plus petit que dans (Gaston et Lozano-Pérez, 1984) car le nombre de contraintes à respecter est plus élevé, mais cette technique n'est pas robuste lorsqu'il y a plusieurs hypothèses cohérentes.

Dans la même lignée, les hypothèses valides après avoir parcouru l'IT sont évaluées par l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963) dans (Haidacher et Hirzinger, 2003). L'hypothèse ayant le plus haut score est désignée comme la bonne pose.

Ces trois travaux de la même famille sont intéressants, puisqu'ils ne nécessitent qu'une seule prise pour estimer la pose. Toutefois, la technique n'est pas très robuste et il est plutôt difficile d'identifier la pose de l'objet avec certitude.

### 1.3.2 Méthodes basées sur la palpation

Contrairement aux travaux présentés à la section 1.3.1, les méthodes qui suivent tentent d'estimer la pose d'objets connus en les palpant. Dans (Aggarwal et Kampmann, 2012), les mesures de capteurs tactiles, de capteurs de force et d'encodeurs sont combinées pour d'abord identifier l'objet saisi et ensuite estimer sa pose. L'objet à saisir est palpé par le préhenseur et cela permet de créer son nuage de points au même rythme que l'exploration. Leur technique

consiste à poser de nouvelles hypothèses à chaque fois que l'objet est palpé et de prioriser les meilleures. La première étape de l'algorithme de type Monte Carlo est de sélectionner trois points distants du nuage de points actuel et de calculer leurs caractéristiques. À l'aide de l'algorithme *Batch RANSAC* (Shan et collab., 2004), des hypothèses d'objets et de poses sont générées et un poids est associé à chacune. L'exploration se poursuit et permet de mettre à jour le nuage de points. Ensuite, l'algorithme *Iterative Closest Point (ICP)* (Chen et Medioni (1991), Besl et McKay (1992)) aligne le précédent et le nouveau nuage ensemble. Trois points de ce nuage mis à jour sont sélectionnés pour générer de nouvelles hypothèses. Les meilleures hypothèses de l'étape précédente sont comparées aux nouvelles et seules les meilleures sont conservées. Ainsi, plus l'exploration de l'objet progresse, plus les hypothèses sont cohérentes et l'hypothèse la plus probable à un temps  $t$  prédéfini est assignée comme la configuration de l'objet. Bien que ces travaux ne soient réalisés qu'en simulation, les résultats sont d'une bonne précision et la méthode est robuste au bruit des multiples capteurs.

Des extrusions ont été palpées par une pince à doigts parallèles pourvue de capteurs tactiles dans (Kubus et collab., 2009). L'algorithme utilisé pour l'estimation de la pose est le *Parallel Random Sample Matching (pRANSAM)* qui est une variante de RANSAM et dont les fondements sont très similaires à RANSAC (Fischler et Bolles, 1981). Le nuage de points généré par l'exploration de l'objet est comparé aux données du fichier CAO de l'objet. Cette méthode a permis d'estimer la pose d'objets avec une précision de quelques degrés et de quelques millimètres.

Ce type d'approche a comme avantage de fournir des informations riches sur l'objet car un nuage de points assez complet est créé. Par contre, le fait de palper l'objet requiert un certain temps, sans oublier que la pose obtenue est celle de l'objet qui repose sur une surface et que lorsqu'il sera saisi il est possible qu'il se déplace, faussant ainsi la pose précédemment estimée.

### 1.3.3 Méthodes requérant un estimé initial de la pose

Une autre approche pour résoudre le problème d'estimation de la pose consiste à effectuer l'estimation de pose à partir de données qui proviennent d'un système de vision, puis à raffiner le résultat à l'aide de capteurs tactiles. Cette approche permet de palier à des problèmes tels que l'occlusion qui est inhérente à l'utilisation de systèmes de vision. La combinaison de données de tels capteurs résulte en un système assez robuste et précis, vu la redondance d'information, tel que démontré ci-dessous.

Une fusion de capteurs est présentée dans (Hebert et collab., 2011), où la pose de l'objet saisi est initialement estimée par une caméra stéréo à l'aide des descripteurs SIFT (Lowe, 1999). Par la suite, les mesures de capteurs de force/couple et d'encodeurs sont combinées pour raffiner la pose estimée. Un filtre de Kalman étendu est utilisé pour estimer de façon continue la pose de l'objet pendant qu'il est manipulé. La précision de l'estimation s'améliore avec le temps et

est de quelques millimètres et degrés au final.

Un système similaire comprenant des capteurs de force/couple, des encodeurs et une kinect est utilisé dans (Bimbo et collab., 2012) et (Bimbo et collab., 2013). Après avoir estimé la pose à l'aide d'un système de vision, les régions de l'objet dans sa pose hypothétique qui sont les plus près des phalanges sont identifiées. Deux méthodes d'optimisation, soit la descente du gradient et l'algorithme de Levenberg-Marquardt, sont comparées pour minimiser la distance entre les points de contacts mesurés et les régions de l'objet qui sont à proximité, ainsi que l'angle entre les normales de l'objet et des doigts du préhenseur. La fusion des capteurs a amélioré la précision de la pose estimée initialement.

### 1.3.4 Méthodes probabilistes

Les travaux qui suivent s'appuient sur des méthodes probabilistes. Connaissant les commandes envoyées au système, les mesures effectuées, la condition initiale et le modèle des composantes du système, le but est de trouver les hypothèses les plus probables.

La pose initiale d'un objet a été estimée à partir d'un système de vision dans (Chalon et collab., 2013) et a servi d'entrée à un filtre à particules. Des particules sont ensuite générées selon un échantillonnage gaussien autour de la pose initiale. Chaque particule représente une hypothèse de pose, soit la position et orientation de l'objet saisi, et un poids est assigné à chacune selon les critères qui suivent : l'objet dans sa pose hypothétique devrait toucher le préhenseur aux endroits où des contacts ont été détectés, il ne devrait pas engendrer de collisions et l'objet devrait se déplacer de la même façon que le préhenseur entre deux mesures. Ainsi, à chaque déplacement du préhenseur et à chaque nouvelle mesure pendant la saisie, le poids des particules est évalué et les meilleures sont répliquées de sorte à converger vers les hypothèses les plus probables. L'erreur sur la pose est similaire aux autres travaux présentés.

Dans (Bimbo et collab., 2015), la poursuite et l'évolution de leurs travaux présentés à la section 1.3.3 est présentée. La méthode proposée permet d'estimer la pose lorsqu'un estimé initial est disponible, de même que lorsqu'il n'y en a pas. Pour ce faire, un algorithme évolutionnaire a été implémenté pour résoudre ce problème à six dimensions. Un grand nombre de particules (hypothèses de pose) est généré pour couvrir tout l'espace de recherche et un poids leur est attribué. Ce poids dépend de la proximité des points de contact mesurés avec l'objet dans sa pose hypothétique, ainsi que de la différence angulaire entre les normales à la surface des phalanges qui touchent l'objet et des facettes de l'objet à proximité des contacts. Les meilleures particules sont répliquées et ce procédé est répété à plusieurs reprises afin de diminuer le coût des hypothèses (équivalent à augmenter le poids des hypothèses). Après un nombre prédéterminé d'itérations, les meilleures hypothèses sont évaluées par l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour converger vers la pose optimale selon les mesures des capteurs.

Un nouveau type de filtre à particules est introduit dans (Koval et collab., 2013) : le *Manifold*

*Particle Filter.* Cette technique permet d'estimer de façon continue la pose d'un objet qui est poussé par un préhenseur équipé de capteurs tactiles. Le problème est réduit à trois dimensions puisque l'objet repose sur une surface plane, où il faut trouver la position dans le plan et l'orientation.

Ce type d'approche a un grand potentiel et donne de bons résultats. Cependant, elle ne peut être appliquée que dans des situations où l'objet n'est pas statique et qu'il est possible de faire un lien direct entre les commandes envoyées au système et les mouvements résultants.

## 1.4 Préhenseurs sous-actionnés

Les préhenseurs robotiques peuvent être décrits comme étant pleinement actionnés ou sous-actionnés. Lorsque le nombre de degrés de liberté est égal au nombre d'actionneurs, le préhenseur est pleinement actionné. À l'inverse, si le nombre de degrés de liberté excède le nombre d'actionneurs, le préhenseur est dit sous-actionné. Dans ce cas, en contrôlant un seul moteur il sera possible d'activer plusieurs degrés de liberté du préhenseur.

Lors du design d'un système, il est important de garder à l'esprit que tous les actionneurs intégrés au système doivent être contrôlés. Donc, de façon générale, il est avantageux de minimiser le nombre d'actionneurs pour limiter la complexité d'un système, diminuer les coûts et le poids. Les préhenseurs sous-actionnés ont entre autres comme avantage d'être plus faciles à contrôler vu le faible nombre d'actionneurs et leur potentiel à s'adapter de façon automatique à la forme de l'objet saisi (Birglen et collab., 2008).

Pour y parvenir, une intelligence mécanique est nécessaire. Les principes du sous-actionnement sont basés sur les mécanismes différentiels et intègrent généralement des ressorts et des butées. Une analyse mécanique poussée et un choix judicieux des pièces et de leurs caractéristiques sera requis pour obtenir en sortie le comportement et la trajectoire souhaités.

Donc, les grands avantages des préhenseurs sous-actionnés résident dans leur grande adaptabilité et leur contrôle simple. Dans le contexte où il est souhaité d'estimer la pose d'objets saisis par un préhenseur, ces caractéristiques complexifient énormément la tâche, puisqu'il n'est pas possible de connaître la configuration du préhenseur en tout temps. Cela a entre autres pour conséquence que la configuration du préhenseur pour une certaine pose d'un objet ne peut pas être prédite et les commandes envoyées au préhenseur pour saisir un objet ne peuvent pas être utilisées dans un algorithme du type filtre à particules.

## 1.5 Capteurs tactiles

La pose d'un objet peut être estimée à partir des mesures d'une panoplie de capteurs. La méthode de résolution du problème qui est explorée dans ce mémoire consiste à combiner les

mesures de capteurs tactiles à celles d'encodeurs rotatifs.

Les capteurs tactiles ont pour but de mesurer diverses caractéristiques relatives au toucher. Ce type de capteur tente d'imiter le sens du toucher des humains qui leur permet de détecter des contacts avec l'environnement, de ressentir la force de ces contacts, le cisaillement, la température des objets saisis et bien plus. Ce sens très développé permet de caractériser les interactions physiques. Vu la complexité du sens tactile humain, il est difficile de le recréer artificiellement dans sa totalité. Ainsi, plusieurs types de capteurs tactiles ont été créés pour reproduire certaines fonctions du sens tactile humain. Deux types de capteurs tactiles sont fréquemment utilisés dans le domaine de la robotique sont présentés ci-dessous : le capteur piézorésistif et le capacitif. Ces deux types de capteurs sont décrits aux sections 1.5.1 et 1.5.2 respectivement. Par ailleurs, les informations présentées dans ces sections sont tirées des ouvrages (Cutkosky et collab., 2008) et (Fraden, 2004).

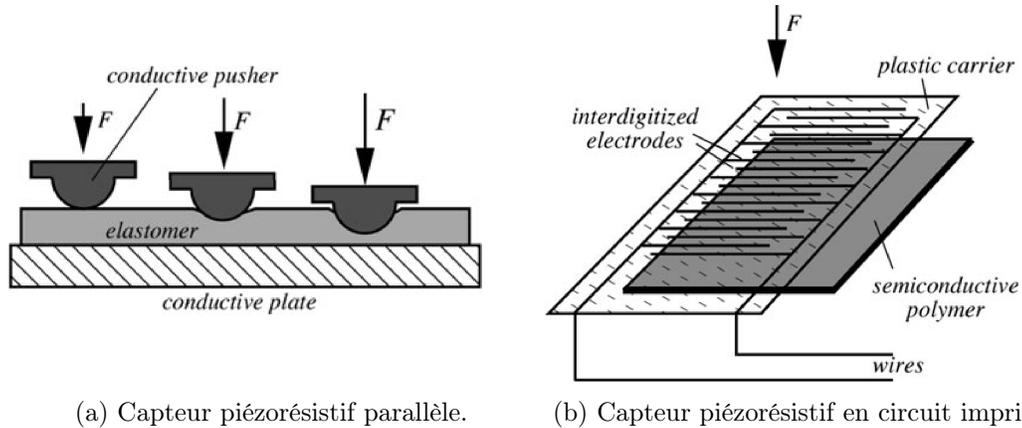
Les capteurs tactiles intégrés à des préhenseurs robotiques pour effectuer de la saisie d'objets sont souvent composés de plusieurs éléments sensibles. Dans les pages qui suivent, les termes *capteur tactile* font référence à une matrice d'éléments sensibles, où chaque élément est appelé un *élément tactile*. Ainsi, les éléments tactiles (tactels) composent les capteurs tactiles et chaque tactel est un élément indépendant qui peut détecter, par exemple, s'il y a un contact à sa surface.

### 1.5.1 Capteurs piézorésistifs

Les capteurs tactiles utilisant l'effet piézorésistif mesurent la variation de la résistance électrique causée par une pression appliquée sur le senseur. La figure 1.4a présente le schéma général de ces capteurs qui sont conçus de deux électrodes séparées par un matériau dont la résistance dépend de la force appliquée. Les électrodes sont identifiées par *conductive pusher* et *conductive plate*, le matériau à résistance variable par *elastomer*, puis la force appliquée par  $F$ . Le capteur est alimenté par un voltage constant et la résistance du capteur lorsqu'il n'y a pas de force appliquée est connue. Le voltage de sortie du capteur varie selon la pression appliquée car cela modifie la résistance du circuit. Ainsi, il est possible de déduire la pression causée par l'interaction physique entre le capteur et l'objet touché en mesurant le voltage de sortie.

Ces capteurs ont plusieurs avantages, entre autres, ils sont très compacts et peuvent avoir une épaisseur inférieure à un millimètre (Cutkosky et collab., 2008). Certains capteurs disponibles sur le marché utilisent des circuits imprimés flexibles en guise d'électrodes, ce qui rend les capteurs très minces (Fraden, 2004). Un exemple est présenté à la figure 1.4b où le circuit imprimé est contenu sur une feuille de plastique mince. Lorsqu'une force est appliquée sur le capteur, le matériau semi-conducteur crée un lien entre les électrodes et permet de détecter les contacts.

D'autre part, les circuits et le traitement de signal requis pour l'utilisation des capteurs piézorésistifs sont simples, rendant l'intégration très rapide. Une autre caractéristique est qu'il est possible de mesurer une grande plage de pression. Cela peut être un avantage pour certaines applications et un désavantage pour d'autres. Ayant une grande plage de mesure, la sensibilité est moins grande que pour d'autres types de capteurs. D'autre part, bien que le capteur soit simple à construire, il est plus complexe de fabriquer des matrices de capteurs qui permettent de détecter plusieurs points de contact à la fois. Ainsi, la résolution spatiale est plutôt limitée.



(a) Capteur piézorésistif parallèle. (b) Capteur piézorésistif en circuit imprimé.

FIGURE 1.4 – Exemples de capteurs piézorésistifs, tirés de (Fraden, 2004).

### 1.5.2 Capteurs capacitifs

Un autre type de capteur bien connu en robotique est basé sur les propriétés capacitives de certains matériaux. Un diélectrique est inséré entre deux électrodes parallèles, tel que le présente la figure 1.5. Les deux électrodes sont identifiées par *top electrode* et *base electrode*, le diélectrique par *elastic dielectric* et la force appliquée par  $F$ . Pour ce qui est du principe de fonctionnement, lorsqu'une pression est appliquée sur le senseur, le diélectrique emmagasine des charges électriques et cela se traduit par une variation de la capacité du circuit. La capacité s'écrit

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1.8)$$

où  $\epsilon$  est la permittivité du diélectrique,  $A$  est l'aire des électrodes et  $d$  est la distance qui les sépare. L'application d'une pression sur les électrodes fait donc diminuer la distance qui les sépare et fait varier la capacité. Ainsi, en mesurant le changement de capacité, il est possible de déduire l'amplitude de la pression appliquée.

La plage des pressions qui peuvent être mesurées par de tels capteurs est plus limitée que pour les capteurs piézorésistifs. Par contre, il est possible d'atteindre une grande sensibilité ainsi qu'avoir une résolution spatiale de l'ordre de quelques millimètres. Ces capteurs sont moins compacts que les capteurs piézorésistifs et nécessitent un circuit de contrôle plus complexe, ainsi qu'un traitement de signal plus important.

Pour une application où il est souhaité de saisir des objets et d'en déduire la pose à partir de données tactiles, les capteurs piézorésistifs ne sont pas les plus appropriés. En effet, il est préférable de miser sur des capteurs ayant une résolution spatiale de quelques millimètres et une sensibilité dans la plage de forces possibles lors d'une saisie. Les capteurs capacitifs sont plus appropriés pour le contexte étudié, en vue des avantages offerts par ces derniers.

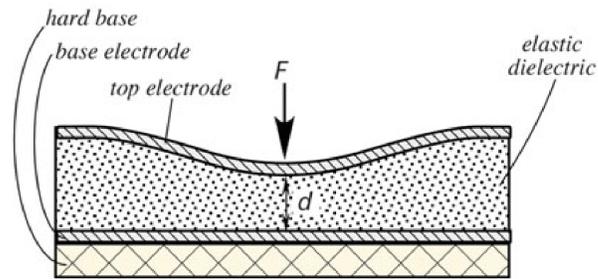


FIGURE 1.5 – Exemple d'un capteur capacitif, tiré de (Fraden, 2004).

## Chapitre 2

# Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans le plan et validation en simulations

Une méthode permettant d'estimer la pose d'objets plans et connus est présentée dans ce chapitre. La première partie du chapitre est dédiée à la formulation du problème étudié dans un environnement de simulation. Par la suite, le système, composé d'un préhenseur robotique et de capteurs, à partir duquel la pose est estimée est présenté et modélisé. Un algorithme préliminaire est ensuite décrit. Plus particulièrement, celui-ci génère aléatoirement la pose d'un objet connu et à partir d'hypothèses, l'objet dans cette configuration est saisi par le système modélisé et les mesures des capteurs qui seraient obtenues sont simulées. Après, l'algorithme principal qui permet d'estimer la pose d'objets est introduit et il exploite les données générées préalablement par l'autre algorithme pour atteindre le but visé. Finalement, les performances de l'algorithme développé sont étudiées.

## 2.1 Formulation du problème

En vue d'éventuellement pouvoir estimer la pose d'un objet en six dimensions, des travaux exploratoires ont été effectués pour un préhenseur simple dans un espace de dimensionnalité moindre. Un des objectifs est la familiarisation avec les concepts relatifs à l'estimation de la pose. Plus précisément, le but visé est de développer un algorithme permettant d'estimer la pose d'objets connus qui sont définis en deux dimensions.

Les travaux préliminaires sont effectués dans un environnement de simulation où le système modélisé est inspiré d'un montage expérimental. Comme le but n'est pas la modélisation d'un système en tant que tel, mais plutôt le développement d'outils pour l'estimation de la pose, le montage expérimental et ses caractéristiques ont été simplifiés pour la modélisation.

Le préhenseur modélisé est plan et il a deux doigts comprenant deux phalanges chacun. Le montage comprend également deux types de capteurs, soient de position angulaire et tactiles. Ainsi, les seules informations disponibles pour estimer la pose proviennent de ces capteurs simulés. De plus, l'estimation de la pose s'effectue à partir d'une saisie unique, c'est-à-dire que l'objet n'est pas palpé.

Les objets qui sont saisis sont connus, ils sont formés de segments droits ou courbes et sont de taille convenable pour être saisis par le préhenseur simulé. L'algorithme développé s'appuie sur la revue littéraire présentée à la section 1.3 et inclut du bruit sur les mesures des capteurs pour représenter le mieux possible un scénario réel.

En résumé, voici les hypothèses qui sont posées pour le scénario de simulation étudié :

- préhenseur plan possédant deux doigts à deux phalanges ;
- capteurs simulés : tactiles et encodeurs rotatifs ;
- les capteurs sont bruités ;
- les objets sont plans et connus ;
- les objets sont composés de segments droits ou courbes ;
- l'estimation de la pose s'effectue à partir d'une unique saisie d'objet.

La section 2.2 présente toutes les composantes du système modélisé. Ensuite, l'algorithme est sommairement présenté à la section 2.4. Cet algorithme est composé de deux étapes principales qui sont détaillées aux sections 2.5 et 2.6. Finalement, les résultats des simulations sont présentés à la section 2.7 et les conclusions sont portées à la section 2.8.

## 2.2 Modélisation

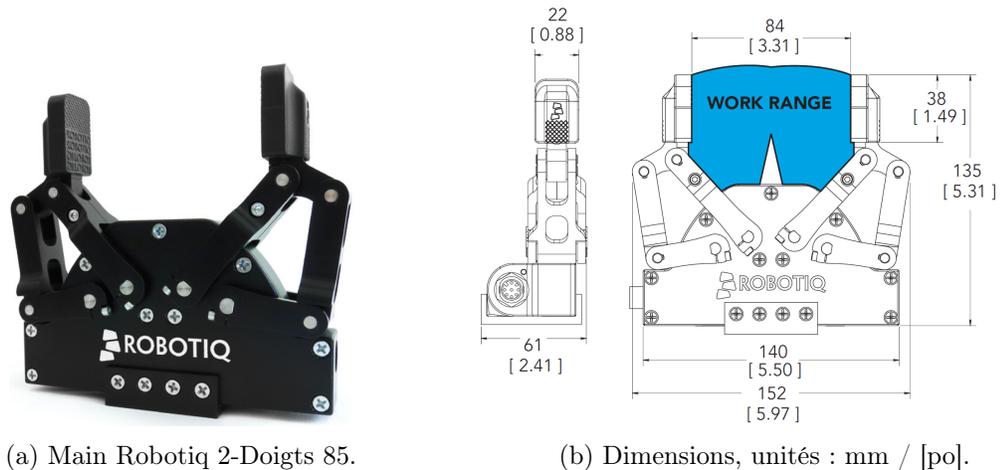
Avant de développer un algorithme d'estimation de la pose, il est nécessaire de sélectionner le système avec lequel les objets seront saisis. La modélisation du système choisi est présentée

dans les sous-sections qui suivent et ce système inclut un préhenseur plan, des capteurs tactiles et des encodeurs. De plus, les objets pour lesquels il est souhaité de déterminer la pose sont présentés à la fin de la présente section.

### 2.2.1 Préhenseur

Le préhenseur qui a été simulé est inspiré de la Main Robotiq 2-Doigts 85 qui est présentée à la figure 2.1a. Ce préhenseur est sous-actionné (voir section 1.4) et possède deux doigts ayant deux phalanges chacun. Les dimensions de ce dernier sont présentées à la figure 2.1b.

Pour le scénario étudié, le préhenseur modélisé a été simplifié pour ne conserver que les surfaces qui interagissent avec les objets lors d'une saisie, soient la paume et les phalanges. La figure 2.2 présente le résultat de cette modélisation de préhenseur, ainsi que des termes qui seront utilisés tout au long du chapitre.



(a) Main Robotiq 2-Doigts 85.

(b) Dimensions, unités : mm / [po].

FIGURE 2.1 – Préhenseur sous-actionné à 2 doigts simulé, images tirées de (Robotiq, 2013).

Les dimensions du modèle sont sensiblement les mêmes que celles qui apparaissent à la figure 2.1b, à l'exception des phalanges distales qui sont légèrement plus courtes. Cette main peut être modélisée comme un préhenseur possédant deux phalanges proximales qui sont attachées à la paume par des liaisons rotoïdes (disques noirs sur la figure 2.2). L'axe de rotation de ces articulations est perpendiculaire au plan  $xy$  de la figure, c'est-à-dire que cet axe virtuel sort de la feuille. Il y a aussi une liaison rotoïde qui relie chaque phalange proximale à une phalange distale.

Par rapport au comportement du préhenseur, étant sous-actionné, l'orientation des phalanges ne peut pas être contrôlée directement. Le comportement dans l'environnement de simulation est toutefois inspiré du comportement réel. Des objets ont été saisis à répétition par la main Robotiq 2-Doigts 85 et le comportement a été observé. Les tendances observées ont été transposées dans un algorithme pour déterminer la configuration finale du préhenseur pour une pose donnée d'un objet. En d'autres mots, puisque pour des fins de simulation il est nécessaire

de connaître la configuration du préhenseur pour une pose quelconque d'objet, une logique de fermeture des doigts a été implémentée. Évidemment, la configuration du préhenseur trouvée n'est pas conforme à ce qui serait observé avec le préhenseur réel. Par contre, elle constitue un estimé qui est suffisant pour le développement de l'algorithme d'estimation de la pose présenté ici qui s'inscrit dans un contexte de travaux exploratoires, tel qu'il sera brièvement discuté à la section 2.4.

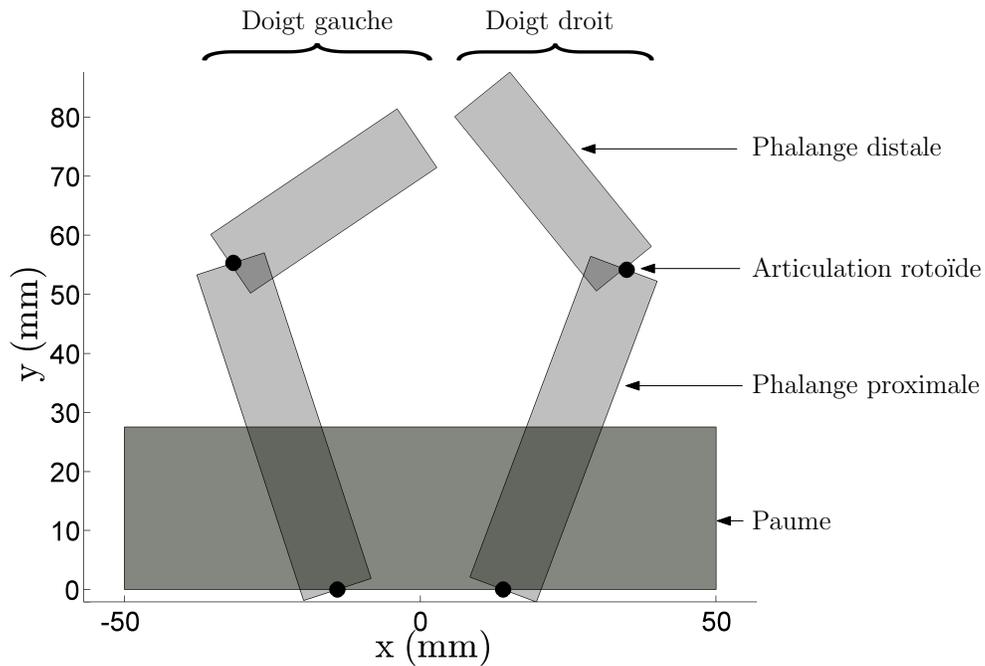


FIGURE 2.2 – Schéma du préhenseur modélisé.

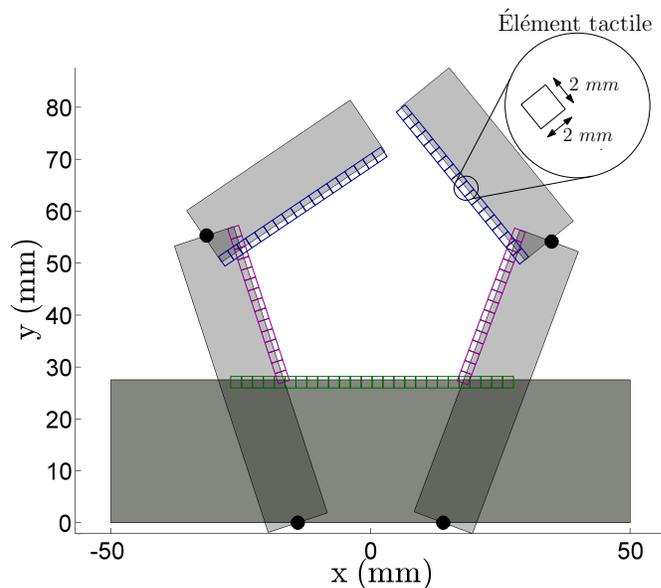


FIGURE 2.3 – Schéma du préhenseur et des capteurs tactiles modélisés.

### 2.2.2 Encodeurs

Des encodeurs rotatifs font également partie des capteurs qui ont été sélectionnés comme partie intégrante du système. Les capteurs sont installés aux quatre articulations du préhenseur permettant ainsi de connaître sa configuration finale lors de la saisie d'un objet. La résolution et la précision des capteurs angulaires ont été sélectionnées selon des recherches effectuées auprès de fournisseurs de tels capteurs, de sorte à simuler des encodeurs qui pourraient être installés sur le préhenseur plan. Il a pu être observé que des capteurs ayant une précision de  $\pm 1^\circ$  et une résolution de  $1^\circ$  étaient fréquents et de milieu de gamme en terme de performance. Ainsi, les valeurs suivantes de précision et de résolution ont été sélectionnées pour le système simulé :

$$\text{Précision} = \pm 1^\circ \quad (2.1)$$

$$\text{Résolution} = 1^\circ . \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Capteurs tactiles

Tel que présenté à la section 1.5, les capteurs tactiles permettent de mesurer divers paramètres ayant trait aux interactions physiques. Les capteurs tactiles inclus dans le système présenté ont la capacité de détecter les contacts qui surviennent avec les objets touchés.

Pour le système simulé, il est supposé qu'il y a un capteur tactile d'installé sur la facette interne de chaque phalange, de même que sur la surface interne de la paume. La figure 2.3 illustre la position des capteurs sur chacune des phalanges et sur la paume. Il peut être observé sur cette image que les surfaces internes du préhenseur ont été complètement tapissées de capteurs, sans égard à la faisabilité d'une telle configuration de capteurs pour un montage réel.

Les éléments tactiles (*tactels*) qui composent chaque capteur tactile ont une dimension de 2 mm x 2 mm x 2 mm, tel qu'indiqué à la figure 2.3. De la même manière que pour les encodeurs, cette dimension de tactel s'appuie sur la dimension des capteurs tactiles disponibles sur le marché. Puisque le travail présenté dans ce chapitre est en deux dimensions, la troisième dimension du capteur importe peu.

Chaque carré de 2 mm x 2 mm représente un élément tactile et les capteurs tactiles apparaissent de couleurs différentes pour faciliter la distinction des tactels qui n'appartiennent pas aux mêmes phalanges. La couleur verte est associée aux tactels de la paume, violet aux phalanges proximales et bleue aux phalanges distales. Suivant les dimensions mentionnées, la compression maximale de ces capteurs simulés est de 2 mm.

### 2.2.4 Objets à saisir

Quatre objets définis en deux dimensions ont été inventés et ce sont ces objets qui ont été saisis par le préhenseur simulé. Les objets apparaissent à la figure 2.4 et leur taille est telle qu'ils

peuvent être saisis convenablement par le préhenseur qui a une ouverture maximale de 85 mm. Ils sont composés de segments droits ou courbes et un des objets est symétrique. Un nombre est assigné à chaque segment pour une analyse future, ces nombres apparaissent également sur la figure. Chaque segment est divisé en une série de points et la distance maximale entre deux points consécutifs est d'une fraction de millimètre, cela est effectué pour simplifier les calculs subséquents. À titre d'exemple, les points générés le long du segment 1 de l'objet 1 sont espacés de  $0.1\text{mm}$  et la distance entre les points d'un même segment est similaire pour les autres objets.

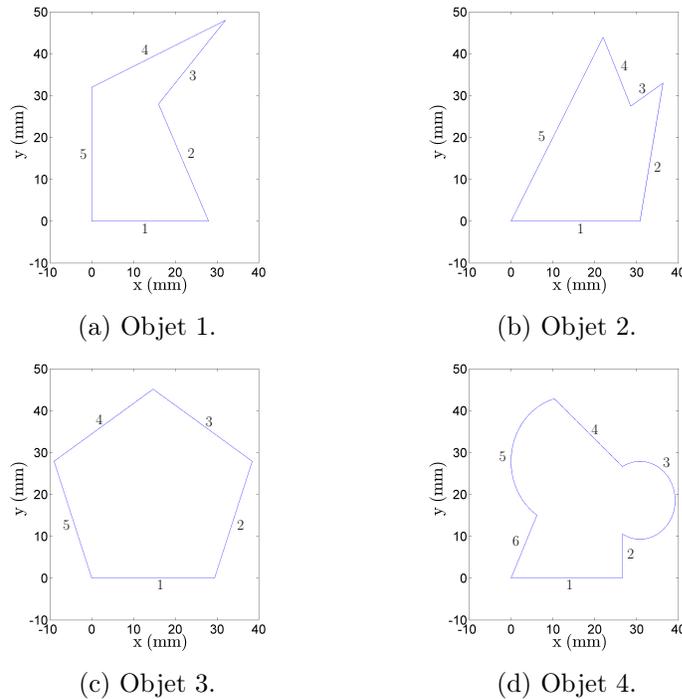


FIGURE 2.4 – Les quatre objets définis en deux dimensions dont la pose est à estimer.

## 2.3 Notions théoriques

La méthode présentée est inspirée de l'approche RANSAC (Fischler et Bolles, 1981) et utilise les arbres d'interprétation (ITs). RANSAC est un algorithme qui permet d'estimer les paramètres d'un modèle. Cette méthode est très intéressante pour un cas comme celui qui est étudié ici, puisqu'elle est robuste aux données aberrantes qui sont observées avec les capteurs bruités simulés. Cette méthode est composée de quatre étapes principales, tel que mis en évidence à l'algorithme 1.

Cet algorithme peut être utilisé par exemple pour trouver la meilleure droite qui représente un nuage de points. À ce moment, à l'étape 1, deux points sont sélectionnés aléatoirement et les paramètres de la droite sous-tendue sont calculés à l'étape 2. La distance de chaque point du

---

**Algorithme 1 : RANSAC**

---

- 1) Pige aléatoire du nombre minimal de points nécessaire pour représenter le modèle.
  - 2) Calcul des paramètres des points pigés.
  - 3) Calcul du pourcentage de points qui sont bien représentés par ces paramètres sous une certaine tolérance  $\epsilon$ .
  - 4) Si le pourcentage trouvé en **3)** est supérieur à la valeur seuil fixée  $\tau$ , les paramètres calculés correspondent au modèle. Sinon, retourne à **1)**.
- 

nuage à cette droite est ensuite calculée à la troisième étape, de même que le pourcentage des points pour lesquels cette distance est sous la tolérance  $\epsilon$ . Finalement, si le pourcentage obtenu est satisfaisant, il est conclu que les deux points pigés à l'étape **1)** appartiennent à la droite et représentent bien l'ensemble des données. L'algorithme retourne ainsi les derniers paramètres calculés en **2)** comme paramètres associés au modèle. Dans l'autre cas, si le pourcentage est trop faible, les étapes 1 à 4 sont répétées jusqu'à satisfaction.

Cet exemple illustre bien la robustesse de l'algorithme face aux données aberrantes qui composent un signal. En sélectionnant à répétition et aléatoirement le nombre minimal de points pour représenter le modèle, un ensemble de données pertinentes (appartenant à la meilleure droite) est éventuellement pigé et permet de bien expliquer le modèle. Néanmoins, cet algorithme est non-déterministe et il faut répéter les quatre étapes un certain nombre de fois avant d'espérer avoir un résultat convenable.

Les arbres d'interprétations (ITs) ont quant à eux été présentés à la section 1.3.1 et, sommairement, ils permettent de poser des hypothèses de concordance entre deux éléments. Dans le contexte présenté dans (Gaston et Lozano-Pérez, 1984), les deux éléments sont les doigts du préhenseur et les facettes de l'objet. Autrement dit, les hypothèses formulées ont pour but d'identifier les facettes touchées par les doigts, à partir des mesures des capteurs. Bref, cette méthode constitue une représentation simple des interactions possibles entre un objet et un préhenseur.

Ces deux méthodes ont inspiré l'approche utilisée pour estimer la pose. En effet, l'algorithme de RANSAC intervient dans la génération et l'évaluation des hypothèses, alors que les ITs n'interviennent que pour l'étape de génération. L'implication de chacune des méthodes est discutée en détails aux sections 2.6.1 et 2.6.2.

## 2.4 Présentation de l'algorithme

L'algorithme développé a pour but d'estimer la pose d'un objet qui est dans une configuration inconnue. L'objet est saisi par le système modélisé à la section précédente et il est ensuite souhaité d'estimer sa pose à partir des mesures qui seraient obtenues des capteurs utilisés. Un algorithme a été développé à cet effet et est présenté à la figure 2.5. Le lecteur est d'ailleurs

invité à s’y référer au besoin lors de la lecture des sections 2.5 et 2.6 pour mieux comprendre l’ordre des diverses étapes.

Cet algorithme comporte deux phases principales. D’abord, une saisie d’objet est simulée (bloc Génération de données) pour remplacer les données qui seraient fournies par les capteurs d’un montage expérimental. Ensuite, ces informations sont analysées pour déduire la pose de l’objet qui a été saisi (bloc Estimation de la pose). Lors de la deuxième étape, des hypothèses sont formulées et une à la suite de l’autre, elles sont évaluées jusqu’à ce que la solution soit trouvée. Si les hypothèses formulées ne permettent pas l’obtention de la solution, de nouvelles hypothèses sont tout simplement formulées et évaluées et ainsi de suite jusqu’à ce que la configuration de l’objet saisi soit trouvée. La génération de données est présentée à la section 2.5 et la section 2.6 traite de l’estimation de la pose et des diverses étapes requises pour y arriver. Toutes les étapes relatives à la génération des données sont regroupées dans l’encadré de gauche, où la ligne est verte et pointillée comme suit (...). Les étapes reliées à l’estimation de la pose sont quant à elles encadrées en noir par la ligne ( \_..\_ ) et celles de l’évaluation des hypothèses en bleu par la ligne ( \_\_\_ ).

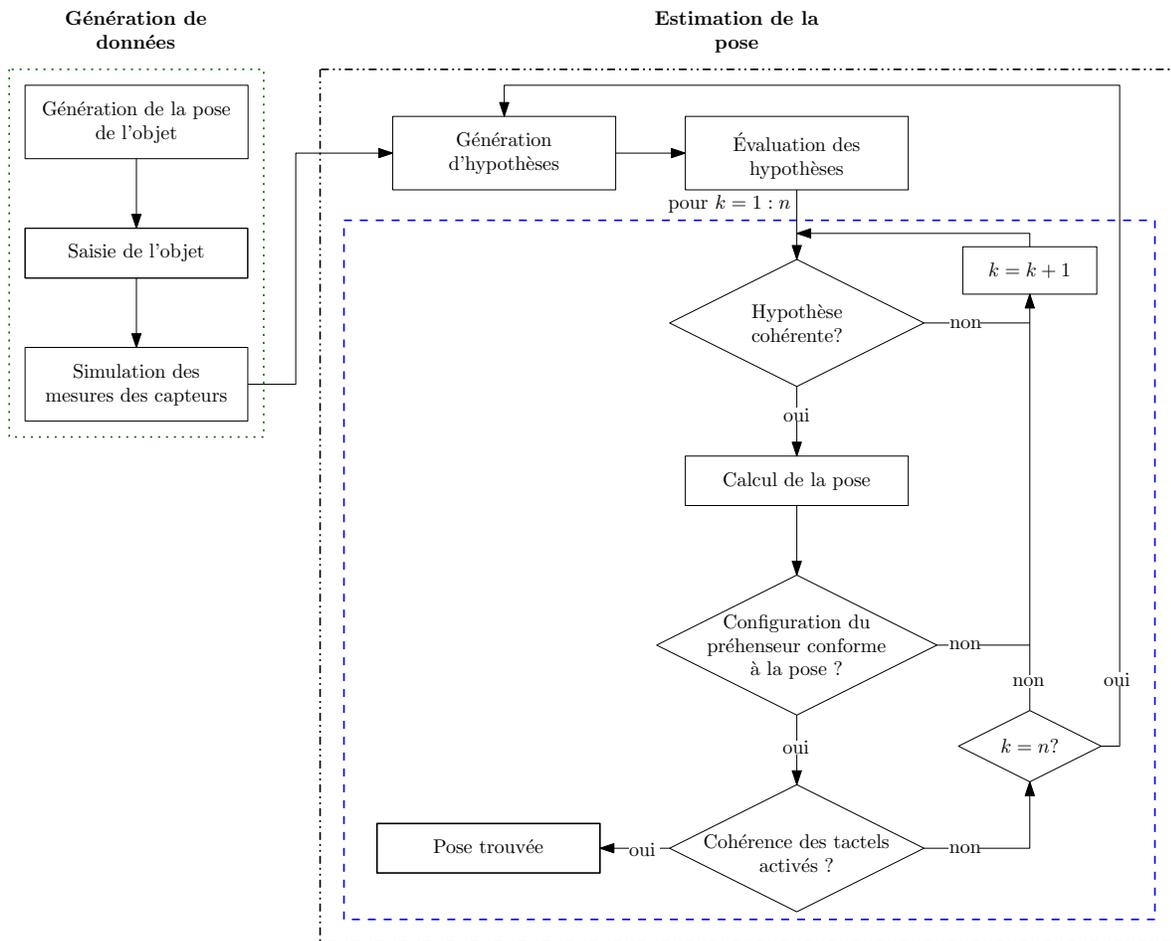


FIGURE 2.5 – Schéma de l’algorithme d’estimation de la pose développé.

## 2.5 Génération de données

La première étape de l'algorithme consiste à simuler une saisie d'objet et les mesures des capteurs qui en découleraient. Cette génération de données se sous-divise en trois étapes : une configuration aléatoire est d'abord imposée à l'objet à saisir, la fermeture des doigts est ensuite simulée, puis les mesures des capteurs sont déduites. Ces trois étapes sont expliquées en détails ci-dessous.

### 2.5.1 Génération d'une pose aléatoire

Tel qu'il a été mentionné, les travaux présentés dans ce chapitre sont en deux dimensions. Ainsi, les objets possèdent trois degrés de liberté et trois paramètres sont nécessaires pour complètement définir leur pose (voir section 1.2.1). La partie de l'algorithme présentée ici assigne à l'objet ces trois paramètres qui sont associés aux trois degrés de liberté (une rotation et deux translations).

Le premier paramètre de pose qui est assigné est l'orientation. Cette dernière est aléatoire et elle est tirée d'une distribution uniforme, soit

$$\theta_{objet} \sim \mathcal{U}(0^\circ, 360^\circ) \quad (2.3)$$

où  $\theta_{objet}$  est l'orientation assignée à l'objet.

Une fois que l'objet est orienté, les paramètres associés aux deux autres degrés de liberté sont identifiés et ils correspondent à la position dans le préhenseur. Cette dernière est obtenue en posant comme hypothèse que l'objet est saisi par le préhenseur de manière englobante, soit un des types de prise qu'il est possible d'effectuer avec un préhenseur comme celui qui a été modélisé. La figure 2.6 illustre la saisie englobante d'un objet, il peut être observé que les doigts entourent l'objet.

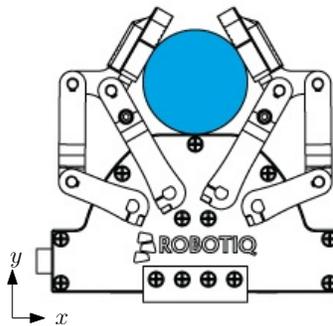


FIGURE 2.6 – Illustration d'une prise englobante, tirée de (Robotiq).

Ainsi, pour déterminer la position de l'objet dans le préhenseur, certaines caractéristiques des prises englobantes sont prises en compte. Lorsqu'un préhenseur est conçu et que les prises englobantes sont considérées pour une catégorie d'objets donnée, un des objectifs sera de

déplacer l'objet jusqu'à ce qu'il soit en contact avec la paume (direction  $y$  de la figure 2.6), tout en le centrant dans l'autre direction (direction  $x$  de la figure 2.6). Pour le cas simulé ici, il est supposé que le comportement décrit s'applique. De la sorte, la position assignée à l'objet dans la direction  $x$  centre l'objet dans le préhenseur et la position en  $y$  est telle qu'il y a un contact de créé avec la paume.

La figure 2.7 présente un exemple d'une configuration que pourrait avoir l'objet après l'étape de génération de pose décrite ci-haut, mais avant que les doigts n'amorcent leur mouvement de fermeture pour le saisir. Une orientation a d'abord été choisie aléatoirement, puis l'objet a été déplacé au centre de la pince en  $x$  et jusqu'à ce qu'il touche la paume en  $y$ , résultant en la pose présentée en bleu.

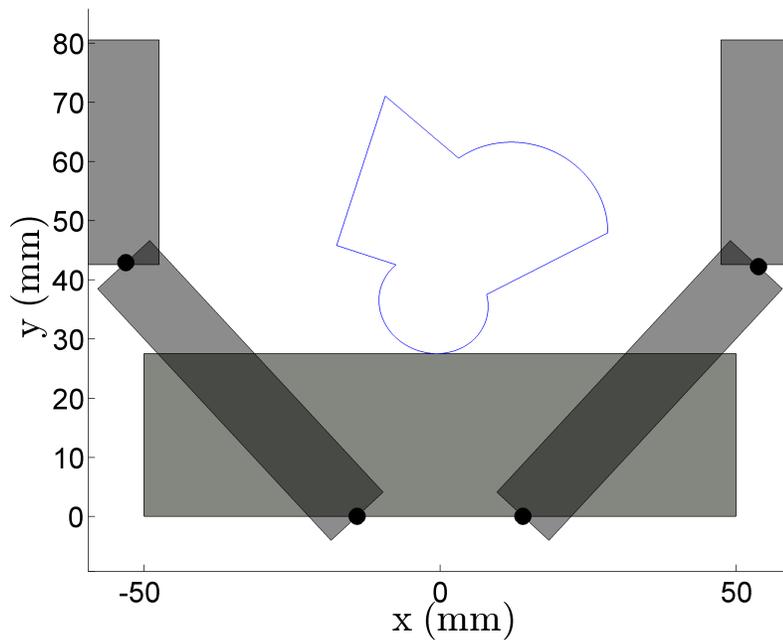


FIGURE 2.7 – Exemple d'une configuration de l'objet avant la fermeture des doigts.

### 2.5.2 Saisie de l'objet

Au cours de la deuxième étape de la génération de données, les doigts se ferment pour saisir l'objet qui est dans la configuration générée précédemment. Le comportement de fermeture est inspiré du comportement qui est observé pour la main Robotiq 2-Doigts 85, mais, tel que mentionné à la section 2.2.1, ce comportement n'est pas exact.

Puisque le préhenseur est sous-actionné, le comportement est très difficile à prédire. Toutefois, le comportement implémenté suffit pour les travaux de simulations visés, puisque ce qui est important pour être en mesure d'estimer la pose est d'avoir une configuration de la main possible et des mesures de capteurs cohérentes.

De plus, l’algorithme de fermeture primitif implémenté ne tient pas compte des notions d’inertie, frottement, stabilité ou tout autre phénomène physique impliqué lors d’une saisie d’objet. Cela permet de conserver un algorithme simple qui, au final, répond au critère principal de trouver une configuration plausible du préhenseur.

### 2.5.3 Détection des contacts et traitement du bruit

Une fois que le préhenseur a saisi l’objet dans l’environnement de simulation, la prochaine étape est de simuler les mesures qui seraient obtenues de capteurs tactiles installés de la même manière qu’à la figure 2.3 et d’encodeurs installés à chaque articulation.

L’orientation des phalanges est connue exactement, suite à l’étape précédente. Toutefois, ces valeurs sont ajustées pour être conformes à la précision et résolution des capteurs simulés qui sont de  $\pm 1^\circ$  et de  $1^\circ$  respectivement (voir section 2.2.2). Pour ce qui est des capteurs tactiles, en calculant la distance entre l’objet dans la configuration générée et les phalanges, il est possible de déterminer les tactels qui seraient activés (qui détecteraient un contact).

Les tactels ont une certaine dimension physique ( $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ) et il n’est pas possible de déterminer l’endroit exact où le contact survient sur un tactel. Autrement dit, lorsqu’un tactel détecte un contact, il n’y a pas a priori un endroit sur sa surface qui est plus probable qu’un autre pour expliquer le contact détecté.

Pour représenter cette incertitude sur les mesures des deux types de capteurs, un nuage de points est créé à chaque tactel détectant un contact. Chaque point du nuage de points représente une hypothèse de position du point de contact entre le préhenseur et l’objet. Plus précisément, 100 points ont été générés pour chacun de ces tactels. Le nombre de point par tactel a été choisi arbitrairement, de manière à ce que l’espace du tactel soit bien représenté. La position des 100 points est aléatoire et est tirée de trois distributions uniformes. La première distribution sert à représenter l’erreur angulaire sur l’orientation des quatre phalanges et les deux autres représentent la position inconnue du contact dans l’espace du tactel. Pour illustrer ces facteurs qui influencent la répartition des points qui forment le nuage de points, un exemple est présenté à la figure 2.8 et discuté dans les paragraphes suivants.

D’abord, soit un tactel  $j$  de dimension  $2a \times 2b$  et son repère local  $\mathcal{R}'$  situé en son centre géométrique, où  $j = 1, 2, \dots, m$  et  $m$  est le nombre d’éléments tactiles en contact avec l’objet. La profondeur du tactel est d’une valeur  $2a$  et c’est la direction dans laquelle la compression du capteur a lieu. La hauteur de l’élément tactile est de  $2b$ . La position d’un point  $\mathbf{p}_i$ , où  $i = 1, 2, \dots, 100$ , dans l’espace du tactel  $j$  est obtenue de deux distributions uniformes, tel qu’illustré à gauche de la figure. Cela donne une position  $(p_x, p_y)_i$  pour un point du nuage dans le repère local  $\mathcal{R}'$ , soit

$$(p_x)_i \sim \mathcal{U}(-a, a) \tag{2.4}$$

et

$$(p_y)_i \sim \mathcal{U}(-b, b) . \quad (2.5)$$

Ces deux distributions uniformes ont été sélectionnées pour représenter le fait qu'il n'y a pas un endroit plus probable qu'un autre dans l'espace du tactel  $j$  pour expliquer le contact détecté.

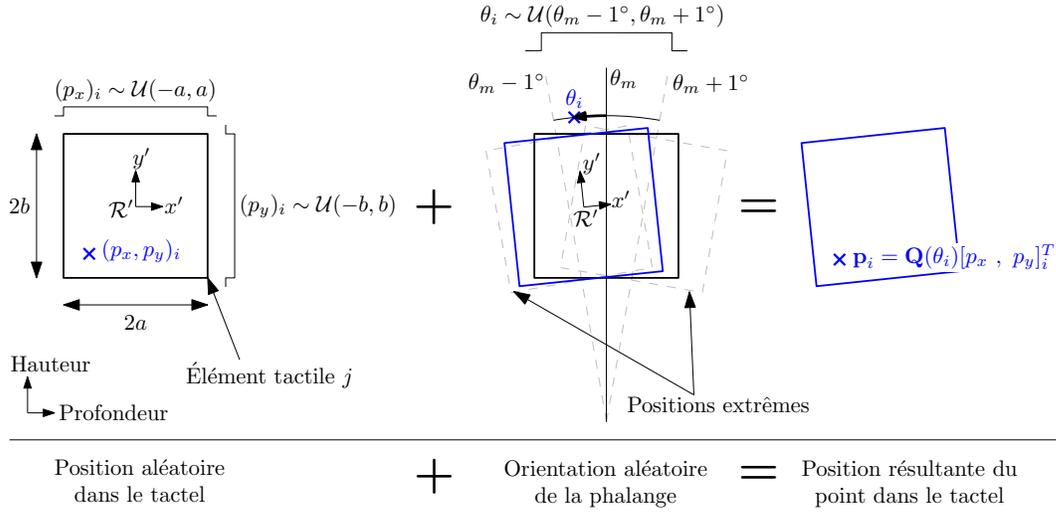


FIGURE 2.8 – Exemple de la génération du point  $\mathbf{p}_i$  du nuage de point, où  $i = 1, 2, \dots, 100$ .

Ensuite, un angle  $\theta_i$  est pigé d'une distribution uniforme qui s'étend à  $\pm 1^\circ$  de  $\theta_m$ , l'angle de la phalange qui a été mesuré (centre de la figure)

$$\theta_i \sim \mathcal{U}(\theta_m - 1^\circ, \theta_m + 1^\circ) . \quad (2.6)$$

Les deux positions extrêmes ( $\theta_m \pm 1^\circ$ ) de la phalange apparaissent également sur l'image du centre en gris pointillé. Ces positions extrêmes signifient que pour une mesure d'orientation de la phalange ( $\theta_m$ ), l'orientation réelle de la phalange est comprise entre ces valeurs seuils. L'angle  $\theta_i$  qui est assigné au  $i$ -ème point du nuage est donc sélectionné selon la distribution uniforme entre ces valeurs extrêmes.

Pour obtenir la position finale du point  $i$ , les informations sont combinées en appliquant une rotation  $\mathbf{Q}(\theta_i)$  à la position  $(p_x, p_y)_i$  précédemment trouvée

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{Q}(\theta_i) \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}_i \quad (2.7)$$

où  $\mathbf{Q}(\theta_i)$  est la matrice de rotation élémentaire d'un angle  $\theta_i$  en deux dimensions. Le point résultant  $\mathbf{p}_i$  est à la droite de l'image. Cette étape est répétée à 100 reprises et ce pour les  $m$  tactels qui détectent un contact. La figure 2.9 présente un exemple de nuage de points qui résulte de cette procédure, pour la même configuration que l'objet de la figure 2.7.

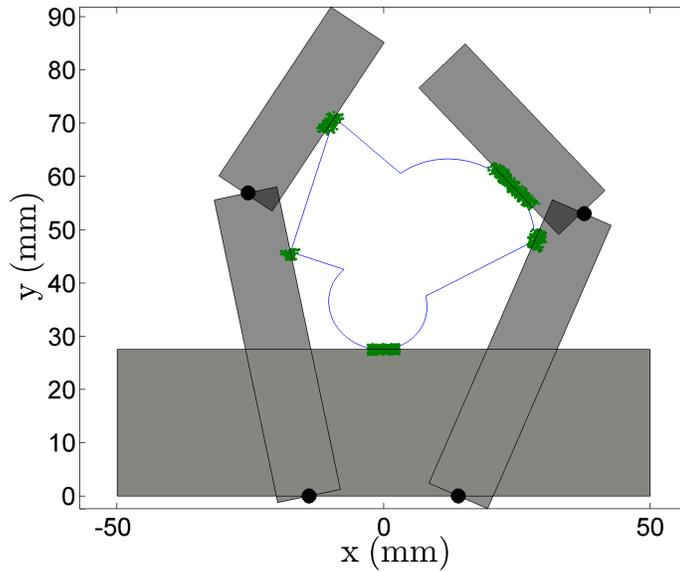


FIGURE 2.9 – Exemple d’une saisie de l’Objet 4. Chaque point du nuage de points vert représente une position possible d’un contact préhenseur-objet.

## 2.6 Estimation de la pose

La deuxième grande étape de l’algorithme développé consiste à estimer la pose de l’objet (bloc Estimation de la pose de la figure 2.5). Lors de la première étape (bloc Génération de données), une pose aléatoire a été assignée à l’objet, ce dernier a été saisi et les mesures des capteurs tactiles et des encodeurs ont été simulées. Ainsi, tous les éléments sont à présent disponibles pour être en mesure d’estimer la pose et la présente section décrit toutes les étapes qui sont requises pour atteindre ce but. Ces étapes apparaissent également à la figure 2.5.

De cette image, il est possible d’observer que l’étape d’estimation de la pose peut elle-même être sous-divisée en deux phases. D’abord,  $n$  hypothèses sont formulées quant à la pose de l’objet et, dans un second temps, ces hypothèses sont successivement vérifiées en vue d’identifier celle qui correspond à la pose réelle de l’objet. Si jamais aucune des hypothèses soumises à l’évaluation ne satisfait les critères d’évaluation, de nouvelles hypothèses sont formulées puis évaluées et ainsi de suite jusqu’à l’obtention de la solution. La génération d’hypothèses est développée à la section 2.6.1 et leur évaluation est détaillée à la section 2.6.2.

### 2.6.1 Formulation d’hypothèses

La première étape de l’algorithme d’estimation de la pose consiste à générer des hypothèses. Ces dernières portent sur l’appartenance des points de contact détectés par les capteurs tactiles aux divers segments de l’objet qui est saisi. Sommairement, pour poser des hypothèses, quelques points sont pigés aléatoirement du nuage de points créé à la section 2.5 et leurs

caractéristiques sont calculées. Un arbre d'interprétation est ensuite parcouru en comparant les caractéristiques des points sélectionnés et celles liant les divers segments de l'objet. Cette procédure résulte en la formulation de  $n$  hypothèses.

Tel que présenté par l'algorithme 1, la première étape de RANSAC consiste à sélectionner aléatoirement le nombre de points minimal pour représenter le modèle. Pour un problème à deux dimensions, ce nombre est de deux. Toutefois, le nombre de points pigé ici ne respecte pas l'algorithme de RANSAC et est de trois. Ainsi, le problème est surcontraint et cette redondance permet d'éliminer rapidement des hypothèses peu probables. Un exemple est présenté à la figure 2.10 pour illustrer ce qui est entendu par la redondance.

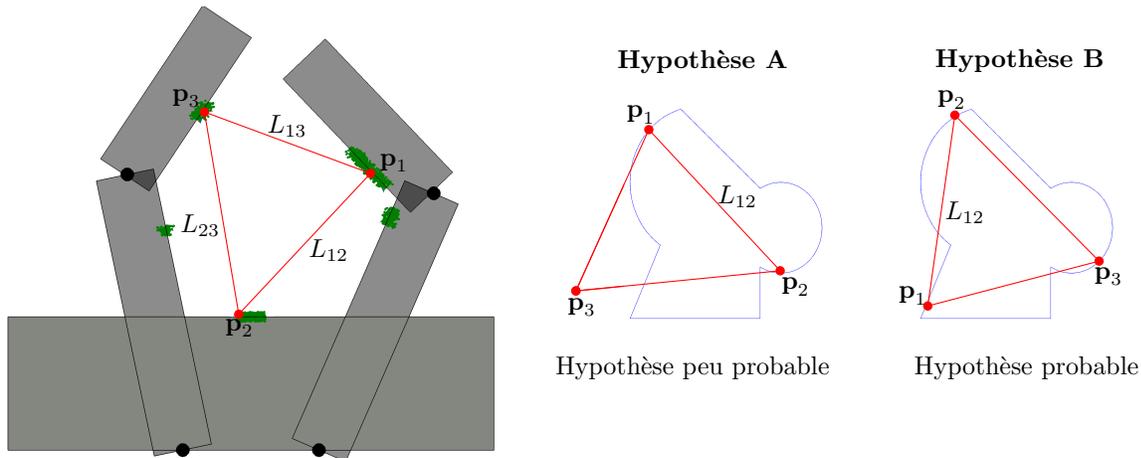


FIGURE 2.10 – Exemple d'une hypothèse peu probable (A) et d'une hypothèse probable (B) pour les trois points pigés  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$ .

À gauche de l'image, le préhenseur est dans une configuration quelconque après la saisie de l'objet 4 et le nuage de points qui représente les contacts détectés est aussi affiché. Dans un scénario où seulement deux points sont sélectionnés du nuage de points, comme par exemple les points  $\mathbf{p}_1$  et  $\mathbf{p}_2$  qui sont à une distance  $L_{12}$  l'un de l'autre, les hypothèses A et B, présentées à la droite de la figure, sont plausibles. En effet, il y a des positions sur ces segments qui respectent la distance  $L_{12}$  mesurée.

Toutefois, en considérant un troisième point  $\mathbf{p}_3$ , il est rapidement évident que l'hypothèse A est peu probable car  $\mathbf{p}_3$  ne se trouve pas à proximité de l'objet. Il est important de se rappeler que les points  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$  sont des points de contacts causés par l'objet, ils doivent donc nécessairement lui toucher pour qu'une hypothèse soit probable. L'hypothèse B qui stipule que  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_6, S_5, S_3)$  est quant à elle plausible, puisque les trois points sélectionnés concordent avec l'objet. Ici,  $S_k$  représente le  $k$ -ième segment de l'objet. La redondance apportée par le troisième point permet donc d'éliminer des hypothèses improbables similaires à l'hypothèse A et ainsi éviter des efforts inutiles de calculs pour l'évaluation subséquente.

Pour cette raison, trois points sont sélectionnés aléatoirement et il est exigé qu'ils soient

relativement distants l'un de l'autre pour obtenir une représentation plus globale des données. La distance séparant les trois paires de points et les angles entre chacune des paires sont ensuite calculés. La prochaine étape fait intervenir les arbres d'interprétations et la distance entre chaque paire de segments qui a été préalablement calculée.

Pour formuler les hypothèses, l'arbre est parcouru en comparant la distance minimale et maximale entre les paires de segments à la distance entre les trois paires de points. La distance entre les points  $\mathbf{p}_1$  et  $\mathbf{p}_2$  est notée  $L_{12}$ , celle entre  $\mathbf{p}_1$  et  $\mathbf{p}_3$   $L_{13}$  et  $L_{23}$  pour  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$ . Il est supposé que  $\mathbf{p}_1$  est causé par le segment  $S_M$ ,  $\mathbf{p}_2$  par  $S_N$  et  $\mathbf{p}_3$  par  $S_O$ . Ainsi, pour qu'une hypothèse assignant les trois points pigés à trois segments soit valable, les critères

$$(D_{min-MN} - d_{seuil}) \leq L_{12} \leq (D_{max-MN} + d_{seuil}) \quad (2.8)$$

$$(D_{min-MO} - d_{seuil}) \leq L_{13} \leq (D_{max-MO} + d_{seuil}) \quad (2.9)$$

$$(D_{min-NO} - d_{seuil}) \leq L_{23} \leq (D_{max-NO} + d_{seuil}) \quad (2.10)$$

doivent être satisfaits. Ici,  $D_{min-(\cdot)(\circ)}$  et  $D_{max-(\cdot)(\circ)}$  sont respectivement la distance minimale et maximale entre les segments  $(\cdot)$  et  $(\circ)$  de l'objet et  $d_{seuil}$  est la tolérance ajoutée pour compenser le bruit dans les mesures et la dimension des tactels. En résumé, les paires de segments qui sont distantes du même ordre de grandeur que la distance entre les paires de points sont cherchées dans l'arbre d'interprétation à l'aide des équations 2.8 à 2.10.

En guise d'exemple et en se référant aux figures 2.4 et 2.10, l'hypothèse B est plausible selon les trois critères de distance et s'écrit

$$\mathbf{p}_1 \in S_6, \mathbf{p}_2 \in S_5 \text{ et } \mathbf{p}_3 \in S_3 \quad (2.11)$$

où  $S_{(\cdot)}$  représente le segment  $(\cdot)$  de l'objet, chaque segment des objets saisis apparaissent à la figure 2.4.

En procédant de la sorte, toutes les combinaisons *segments – points pigés* cohérentes au point de vue de la distance sont trouvées et forment un ensemble de  $n$  hypothèses. Il est maintenant possible de passer à la prochaine étape qui a pour but d'évaluer les hypothèses formulées pour identifier la bonne hypothèse.

## 2.6.2 Évaluation des hypothèses

La présente section décrit la procédure qui a été implémentée pour évaluer les  $n$  hypothèses générées à la section 2.6.1. Pour que l'une d'entre elles soit identifiée comme la bonne pose, elle doit satisfaire trois critères d'évaluation. En premier lieu, l'hypothèse de concordance évaluée doit être cohérente. Ensuite, l'hypothèse de pose doit être cohérente avec la configuration du préhenseur et, finalement, les contacts générés doivent être cohérents avec les signaux des capteurs obtenus à la section 2.5. Il est important de bien faire la distinction entre le but visé

par le premier et les deux autres critères d'évaluation, car le type d'hypothèse évalué diffère. Le premier fait la vérification de la cohérence de la combinaison du trio de points avec le trio de segments hypothétique. Quant à eux, les deuxième et troisième critères évaluent une hypothèse de pose de l'objet face à la cohérence avec les mesures des capteurs tactiles et de position angulaire.

Lorsqu'une hypothèse satisfait les trois critères, c'est généralement parce qu'elle correspond à la bonne pose. Ainsi, les hypothèses sont évaluées l'une après l'autre et si l'une d'elles satisfait tous les critères, l'algorithme est interrompu, car il est jugé que la solution a été trouvée. Dans le même ordre d'idées, si une hypothèse ne satisfait pas l'un des critères, son évaluation s'arrête et la prochaine est à son tour évaluée.

En résumé, l'étape d'évaluation des hypothèses est une boucle qui étudie successivement les hypothèses  $k$ , où  $k = 1, 2, \dots, n$  et  $n$  est le nombre d'hypothèses de concordance générées, et elle s'arrête lorsqu'une hypothèse qui satisfait les trois critères est trouvée. L'hypothèse sélectionnée n'est pas nécessairement l'hypothèse optimale, mais elle est la première à avoir satisfait les critères pré-établis. Avant d'entrer dans les détails de l'évaluation des hypothèses, il est important de d'abord rappeler les éléments qui sont disponibles pour atteindre le but visé :

- Configuration du préhenseur ;
- Nuage de points représentant les contacts entre l'objet et le préhenseur ;
- $n$  hypothèses de combinaison de points du nuage de points aux segments de l'objet.

D'autre part, les hypothèses qui ont été formulées associent trois points pigés du nuage généré à la section 2.5 à trois segments de l'objet. Comme le but ultime est d'obtenir la pose de l'objet, les hypothèses de combinaisons doivent être transformées en des hypothèses de pose. Cette conversion est effectuée une fois que le premier critère de cohérence est satisfait. La procédure nécessaire pour cela, de même que l'analyse effectuée pour identifier l'hypothèse la plus probable est détaillée ci-dessous.

### **Cohérence de l'hypothèse $k$**

Les hypothèses de concordance générées à la section 2.6.1 ont une certaine cohérence, mais certaines peuvent être éliminées rapidement. Soit une hypothèse  $k$  qui associe les points  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$  aux segments  $S_M$ ,  $S_N$  et  $S_O$  respectivement, où  $M$ ,  $N$  et  $O$  est le numéro de chaque segment hypothétique. En basant la validité de l'hypothèse  $k$  seulement sur les critères de distance présentés aux équations 2.8 à 2.10, il est assuré que la paire de segments  $S_M$  et  $S_N$  peut accueillir les points  $\mathbf{p}_1$  et  $\mathbf{p}_2$ ,  $S_M$  et  $S_O$  peuvent accueillir  $\mathbf{p}_1$  et  $\mathbf{p}_3$ , de même que  $S_N$  et  $S_O$  avec  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$ . Toutefois, rien n'assure qu'il existe une position sur ces segments qui permet de remplir les trois critères à la fois, tel que mis en évidence à la figure 2.11.

Dans cet exemple, les trois points sélectionnés sont les mêmes qu'à la figure 2.10 et l'indice des segments ( $M, N, O$ ) associés aux trois points pigés est  $(3, 1, 5)$ . Lors de l'étape de formulation d'hypothèses, l'hypothèse  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_3, S_1, S_5)$  a été jugée probable, car lorsque les trois combinaisons de paires de *segments* – *points* sont étudiées individuellement, elles satisfont toutes les critères des équations 2.8 à 2.10. Par contre, comme il peut être observé sur la figure, il n'existe pas une position sur l'objet qui permet que les trois points touchent simultanément les segments hypothétiques. Cette hypothèse est donc à rejeter et n'est pas cohérente ; la redondance apportée par le troisième point pigé est ici mise à profit.

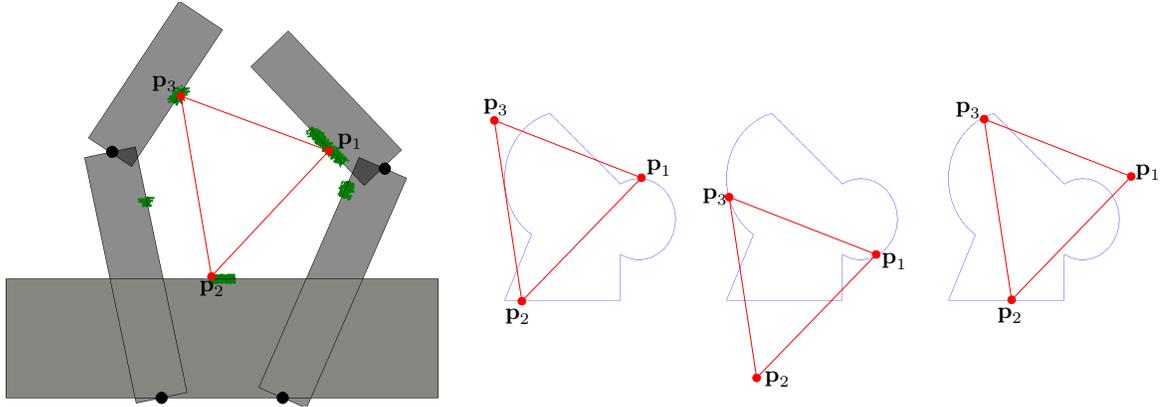


FIGURE 2.11 – Exemple d'une hypothèse incohérente qui associe les points  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3)$  aux segments  $(S_3, S_1, S_5)$ .

Lorsqu'une hypothèse  $k$  satisfait ce premier critère d'évaluation portant sur sa cohérence, sa pose est calculée, transformant ainsi l'hypothèse de concordance en une hypothèse de pose. En réalité, une hypothèse de concordance peut mener à plusieurs hypothèses de pose. En effet, il peut exister plusieurs positions sur les segments hypothétiques qui permettent d'accueillir le trio de points pigés. La figure 2.12 illustre d'ailleurs un exemple de cette situation. Toujours en partant de la saisie de l'objet 4 présentée dans les exemples précédents, il est observé que l'hypothèse de combinaison  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_1, S_5, S_3)$  mène à un minimum de trois hypothèses de pose, qui sont identifiées sur la figure par des couleurs et styles de ligne différents. Pour les étapes subséquentes, toutes ces hypothèses de pose seront évaluées.

Pour ce qui est du calcul de la pose, la technique présentée à la section 1.2.1 est exploitée. Tel que mentionné, il est supposé que les trois points pigés du nuage de points sont causés par des contacts entre l'objet et le préhenseur. Donc, pour calculer la pose de l'objet, il faut d'abord trouver les endroits sur les segments qui peuvent correspondre aux trois points de contact. La figure 2.12 présente trois positions possibles pour l'hypothèse de concordance considérée.

Une fois que ces positions sont trouvées, il suffit de trouver pour chacune le changement d'orientation entre le trio de points du nuage et sa correspondance sur l'objet. Ensuite, la translation qui sépare les deux trios est calculée. Pour éviter des interférences entre l'objet dans cette pose et le préhenseur, l'objet est légèrement déplacé pour être mieux centré dans

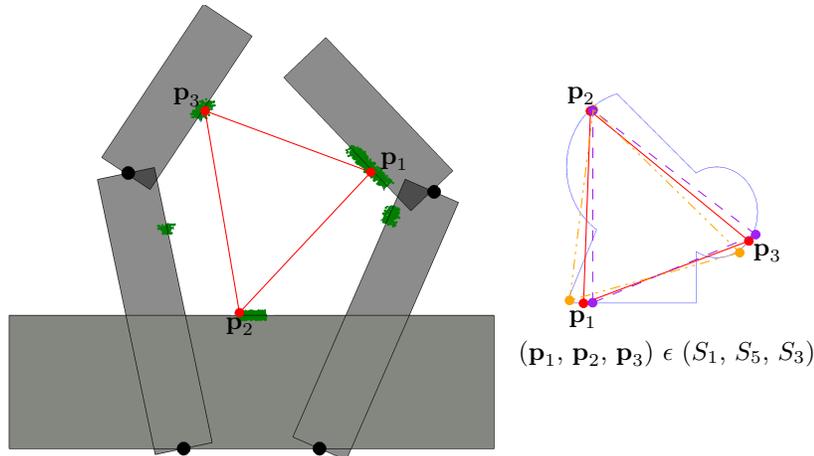


FIGURE 2.12 – Exemple d’une hypothèse de concordance  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_1, S_5, S_3)$  qui mène à plusieurs hypothèses de poses.

le préhenseur. Cette correction est effectuée pour compenser la dimension des tactels et l’imprécision des encodeurs. Le changement d’orientation, ainsi que la translation additionnée de sa correction constituent l’hypothèse de pose.

En résumé, l’évaluation de la  $k - ième$  hypothèse consiste à d’abord trouver, si elles existent, la ou les positions sur les segments hypothétiques où pourrait se trouver le trio de points. Lorsqu’il y a une ou des possibilités, la pose associée est calculée. Donc, les hypothèses de concordance probables sont transformées en un ou plusieurs hypothèses de pose.

### Cohérence avec la configuration du préhenseur

Une fois que le premier critère de cohérence est satisfait et que les hypothèses de pose associées sont formulées, la deuxième étape d’évaluation débute. Le but de celle-ci est de vérifier s’il est possible que l’objet dans la configuration hypothétique ait été saisi par le préhenseur. Tel que mentionné dans le préambule de la section 2.6.2, la configuration du préhenseur est un élément disponible pour estimer la pose de l’objet. Pour que l’hypothèse étudiée soit plausible, il est donc essentiel qu’elle interfère peu ou pas avec le préhenseur dont la configuration est connue.

En utilisant encore une fois le même exemple qu’aux figures précédentes, l’une des hypothèses de pose de la figure 2.12 a été évaluée à la figure 2.13. La transformation requise pour faire concorder le trio de points attaché à l’objet (droite de l’image) avec ses homologues du nuage de points a été appliquée à l’objet. Cette transformation résulte en l’image de gauche, où l’objet est dans sa pose hypothétique. Il peut être observé que pour cette pose il y a une interférence entre l’objet et la phalange distale du doigt gauche. Cette hypothèse n’est donc pas valable et ne sera pas évaluée plus longuement.

De la sorte, toutes les hypothèses de poses qui ont été générées par la  $k - ième$  hypothèse de concordance sont évaluées selon le critère de cohérence avec la configuration du préhenseur.

Les hypothèses de poses qui n'interfèrent pas avec le préhenseur passent à l'étape suivante pour évaluer la cohérence des contacts qu'elles généreraient.

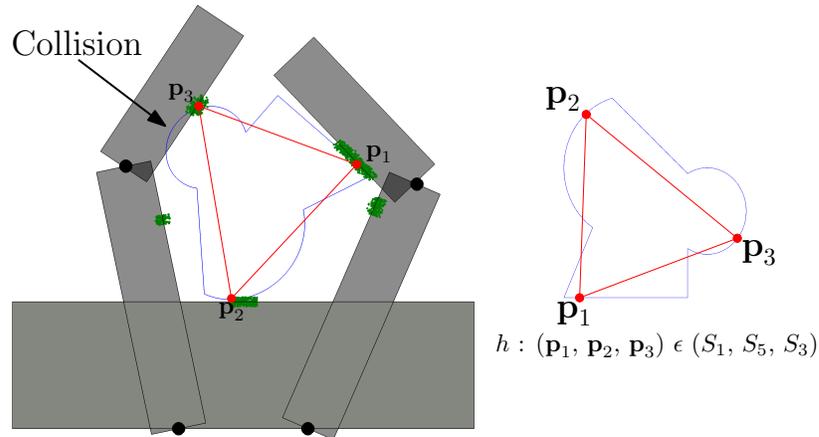


FIGURE 2.13 – Exemple d'une hypothèse de pose qui interfère avec le préhenseur.

### Cohérence des éléments tactiles activés

Le dernier critère à satisfaire pour qu'une hypothèse de pose soit désignée comme la bonne pose concerne la cohérence des contacts qui sont générés par l'objet dans sa pose hypothétique. Les capteurs tactiles simulés permettent de détecter les contacts qui surviennent entre l'objet saisi et le préhenseur. Une hypothèse de pose cohérente doit donc activer sensiblement les mêmes éléments tactiles que ceux identifiés au moment de la saisie. Comme les éléments tactiles ne font que  $2mm \times 2mm$ , une légère erreur en translation ou en rotation peut activer un ensemble de tactels bien différent de ce qui a été mesuré par les capteurs. Une certaine tolérance est permise pour tenir compte de cette réalité.

De plus, l'approche présentée est en quelque sorte dans le domaine discret, où la concordance entre deux trios de points est recherchée. Cette recherche résulte en une transformation précise qui ne tient compte que des deux trios de points. À l'inverse, une méthode continue trouverait la meilleure transformation en tenant compte de l'ensemble des points. Ainsi, il est très peu probable qu'une hypothèse de pose concorde exactement avec la réalité et une certaine souplesse doit être introduite dans l'algorithme pour compenser.

Pour tenir compte de ces deux faits, il n'est pas exigé d'une pose hypothétique qu'elle génère exactement les mêmes contacts que ceux mesurés. Plutôt, la pose hypothétique doit remplir un des deux critères suivants qui sont plus souples et qui ont été établis heuristiquement :

- au moins 3 des 5 capteurs tactiles qui détectent un contact sont également en contact avec l'objet dans sa pose hypothétique (plusieurs des tactels activés le sont aussi pour la pose hypothétique) ;
- 75% des tactels qui ont détecté un contact sont communs aux tactels activés par l'objet dans la pose hypothétique.

Le premier critère signifie que si certains tactels de la phalange proximale gauche ont détecté des contacts, il faut que la pose hypothétique active également certains de ces tactels. Il est requis qu'au minimum trois des cinq capteurs tactiles (voir les cinq différents capteurs de la figure 2.3) aient des tactels activés de commun. Le deuxième critère, qui doit être satisfait si le premier ne l'est pas, exige que 75% des tactels qui ont détecté un contact soient communs aux tactels activés par la pose hypothétique.

La figure 2.14 illustre un cas où l'hypothèse de pose n'interfère pas avec le préhenseur, mais elle ne satisfait pas le critère de cohérence des éléments tactiles. En effet, les capteurs tactiles ont détecté des contacts aux phalanges proximale gauche et distale droite, alors que la pose hypothétique ne provoque aucun contact avec ces phalanges. De plus, le contact engendré par la pose hypothétique à la phalange proximale droite ne survient pas au même endroit que celui mesuré par les capteurs tactiles. Cette hypothèse ne satisfait donc pas le dernier critère et ne correspond pas à la pose recherchée.

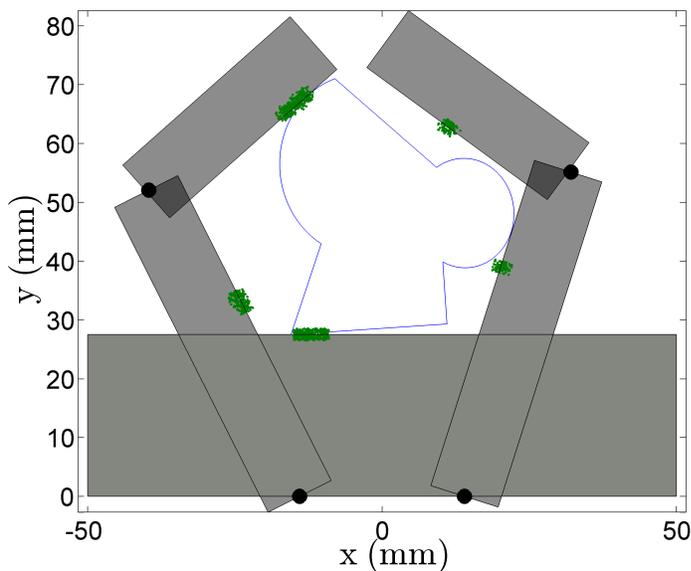


FIGURE 2.14 – Exemple d'une hypothèse de pose qui n'est pas cohérente au point de vue des tactels activés.

## 2.7 Résultats

Pour tester la performance de l'algorithme présenté aux sections 2.4 à 2.6 et illustré à la figure 2.5, des simulations ont été effectuées. Le comportement de l'algorithme face aux quatre objets présentés à la figure 2.4 a été étudié. Tout d'abord, une pose aléatoire a été assignée à l'objet étudié. Ce dernier a été saisi et les mesures des capteurs ont été simulées. Par la suite, des hypothèses ont été générées puis vérifiées. Pour cette évaluation, il est présumé que l'algorithme sait quel objet est saisi et tous les objets sont connus.

Au total, l’algorithme décrit a été sollicité à 50 reprises pour chacun des objets, résultant en 200 tentatives d’estimation de la pose. Pour chacune des simulations, l’erreur entre la pose réelle de l’objet (celle qui a été générée à la section 2.5.1) et sa pose estimée a été calculée, de même que le temps requis pour trouver la solution. L’erreur d’estimation de la pose peut se diviser en l’erreur angulaire et l’erreur en translation. L’erreur en rotation correspond à la différence angulaire séparant le repère local attaché à l’objet dans sa pose réelle du repère local attaché à l’objet dans sa pose estimée. De même, l’erreur en translation est la distance entre les deux repères locaux. Ces derniers sont situés au centre géométrique de l’objet d’intérêt.

Le tableau 2.1 présente les résultats des simulations décrites. Les valeurs présentées sont la valeur moyenne, l’écart type et la valeur maximale pour les trois paramètres notés, soient l’erreur en rotation, l’erreur en translation et le temps de calcul. L’erreur angulaire est notée  $\Delta\theta$ , celle en translation  $\Delta t_y$  et le temps de calcul  $T$ . Finalement, la valeur moyenne d’une variable  $x$  est exprimée  $\bar{x}$ , son écart type  $\sigma(x)$  et sa valeur maximale  $\max(x)$ .

	Erreur angulaire [°]			Erreur en translation [mm]			Temps de calcul [s]		
	$\bar{\Delta\theta}$	$\sigma(\Delta\theta)$	$\max(\Delta\theta)$	$\bar{\Delta t_y}$	$\sigma(\Delta t_y)$	$\max(\Delta t_y)$	$\bar{T}$	$\sigma(T)$	$\max(T)$
Objet 1	1.51	1.35	8.19	0.28	0.27	1.28	0.66	0.80	4.72
Objet 2	1.46	1.25	6.22	0.29	0.30	1.23	0.53	1.71	2.23
Objet 3	2.11	1.73	8.66	0.64	0.52	1.70	0.32	0.31	1.13
Objet 4	2.17	1.64	6.88	0.25	0.27	1.31	0.38	0.43	1.92

TABLE 2.1 – Valeur moyenne, écart type et valeur maximale de l’erreur angulaire, de l’erreur en translation et du temps de calcul pour les quatre objets.

Tout d’abord, il est possible de remarquer que l’erreur en translation notée est seulement celle selon l’axe  $y$  et que l’erreur en translation selon le deuxième axe  $x$  n’est pas présentée. La raison de cette omission est que par les hypothèses posées pour le développement de l’algorithme, cette erreur est quasi nulle. Il a été mentionné dans la section 2.5.1 que la position de l’objet dans le préhenseur était choisie afin que ce dernier établisse un contact avec la paume et soit centré entre les doigts. Cela était vrai pour la génération de la pose initiale (section 2.5.1) et le même principe était appliqué après la formulation de chaque hypothèse de pose pour mieux centrer l’objet dans le préhenseur. Ainsi, le centre géométrique de l’objet dans sa pose réelle et pose hypothétique coïncide presque parfaitement, d’où l’erreur quasi nulle.

Par rapport aux résultats, les valeurs démontrent que l’algorithme a permis d’estimer la pose avec une bonne précision et dans un temps raisonnable. En effet, l’erreur angulaire moyenne pour les quatre objets est très faible et se situe entre  $1.46^\circ$  et  $2.17^\circ$  et celle en translation est sous le millimètre. De plus, l’erreur angulaire maximale enregistrée est dans tous les cas inférieure à  $9^\circ$  et plus petite que  $2\text{ mm}$  pour l’erreur de positionnement. Ainsi, la pose estimée

s'approche grandement de la pose réelle de l'objet ce qui valide bien l'approche utilisée.

Il est également intéressant de constater que le temps requis pour trouver la configuration de l'objet saisi à partir des mesures des capteurs est minime. Effectivement, le temps de calcul moyen est très raisonnable et se situe environ à  $0.5\text{ s}$ , où les simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel *Matlab R2011b* sur un ordinateur standard ayant un processeur de  $3.40\text{ GHz}$ .

De manière générale, l'erreur en translation est très faible. En fait, plus l'erreur angulaire est grande, plus l'erreur en translation le sera, puisque le positionnement dépend de l'orientation de l'objet. Dans les simulations effectuées la précision en orientation entre la pose estimée et la pose réelle est très bonne et cela permet d'obtenir une erreur en positionnement qui est elle aussi faible. La grande précision des capteurs sélectionnés influence grandement le taux de réussite de l'algorithme. Ayant des encodeurs et des capteurs tactiles très précis, l'objet est contraint par le préhenseur et ne peut donc pas avoir une pose très erronée.

Un exemple d'une estimation de la pose réussie est présenté à la figure 2.15. La pose réelle de l'objet correspond à la ligne noire pleine et celle qui a été estimée est représentée par la ligne brisée rouge. Il est possible de constater pour cet exemple que la pose estimée représente bien la pose réelle. L'erreur angulaire est de  $4.03^\circ$  et en translation il n'y a qu'une erreur de  $0.12\text{ mm}$ .

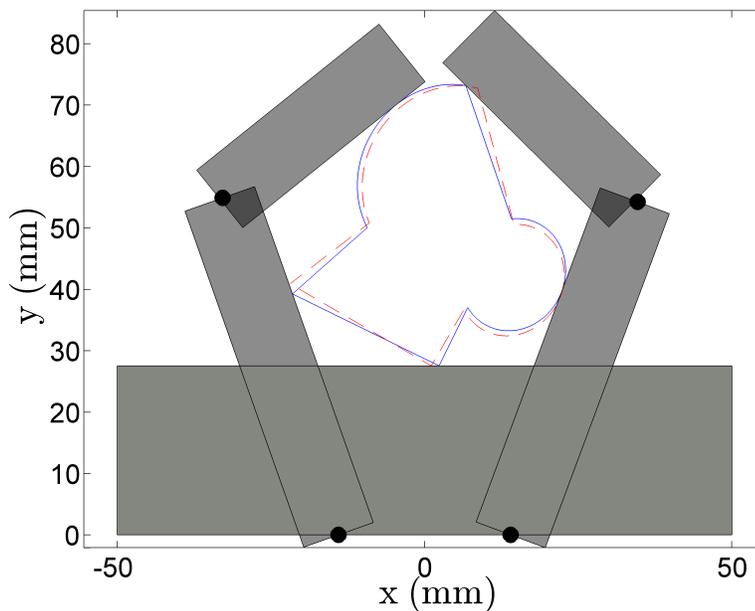


FIGURE 2.15 – Exemple d'une estimation de la pose où l'erreur angulaire est de  $4.03^\circ$  et l'erreur en translation est de  $0.12\text{ mm}$ . La pose réelle correspond à la ligne pleine noire et la pose estimée à la ligne brisée rouge.

## 2.8 Conclusion

Ce chapitre avait pour but de développer un algorithme permettant d'estimer la pose d'un objet connu saisi par un préhenseur robotique. Tout d'abord, pour ces travaux exploratoires dans un environnement de simulation, le système qui a été utilisé pour saisir les objets a été présenté et modélisé. Le préhenseur qui a été retenu est plan et a deux doigts de deux phalanges. Des capteurs tactiles et des encodeurs rotatifs ont été montés sur ce dernier.

Ensuite, diverses hypothèses ont été posées sur la façon dont les objets sont saisis, de même que sur la méthode de génération des mesures qui seraient obtenues des capteurs simulés. Ces éléments ont été intégrés dans l'étape préalable à l'estimation de la pose qui est de générer les données relatives à la saisie de l'objet. L'algorithme permettant d'estimer la pose a par la suite été décrit en détails.

Cet algorithme peut être décomposé en deux étapes principales, soient la génération d'hypothèses et l'évaluation de ces hypothèses. Lors de la génération d'hypothèses, l'algorithme RANSAC et les arbres d'interprétation sont exploités pour identifier les combinaisons de points de contact et de segments possibles. Ces hypothèses sont par la suite évaluées pour déterminer celle qui correspond à la pose réelle de l'objet. Trois critères de cohérence ont été formulés pour évaluer ces hypothèses et portent sur la cohérence de l'hypothèse de concordance et la concordance de l'hypothèse de pose avec les mesures des capteurs.

Finalement, des simulations ont été effectuées pour tester l'algorithme présenté. À cet effet, quatre objets simulés ont été saisis à 50 répétitions chacun et l'erreur en rotation et en translation a été notée à toutes les reprises. Il est ressorti de ces expérimentations que l'algorithme développé permet d'estimer la pose avec une bonne précision, ce qui répond au but principal du chapitre. Effectivement, l'erreur angulaire associée à l'estimation de la pose n'excède pas  $9^\circ$  et est en moyenne autour de  $2^\circ$ . De faibles valeurs d'erreur en translation ont également été notées.



## Chapitre 3

# Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans le plan et validation expérimentale

Ce troisième chapitre présente le développement d'un algorithme d'estimation de la pose d'objets connus dans le plan. Les objets sont saisis par un préhenseur et l'estimation de leur pose est effectuée à partir de données tactiles et de mesures d'encodeurs, toutes deux provenant d'un montage expérimental. Dans un premier temps, le problème est formulé et le montage expérimental est décrit et modélisé. L'algorithme est par la suite présenté. D'abord, une technique pour traiter les mesures des capteurs et les transformer en des données utiles pour l'estimation est introduite. L'algorithme principal, qui se divise en une étape de formulation d'hypothèses et en leur évaluation, est ensuite vu en détails, tout comme un algorithme alternatif. Les performances de cet algorithme sont finalement estimées en l'exécutant à maintes reprises pour estimer la pose.

### 3.1 Formulation du problème

Au chapitre 2, un algorithme permettant d'estimer la pose d'objets plans saisis par un préhenseur robotique plan a été présenté. Ces travaux exploratoires ont été développés et évalués au moyen de simulations. Le préhenseur modélisé était constitué de deux doigts de deux phalanges chacun. De plus, des encodeurs rotatifs et des capteurs tactiles étaient intégrés au système modélisé. Ces derniers étaient d'une bonne précision et ont permis d'estimer la pose avec une très faible erreur d'estimation.

Le présent chapitre présente la poursuite et l'évolution de ces travaux. D'abord, il est souhaité d'adapter l'algorithme afin qu'il permette d'estimer la pose d'objets saisis à partir d'un montage expérimental et non seulement dans un environnement de simulation. Le montage mis en place comporte un préhenseur, des capteurs tactiles et des encodeurs, mais leurs caractéristiques diffèrent des caractéristiques hypothétiques du montage modélisé au chapitre précédent.

Le préhenseur robotique sélectionné est composé de trois doigts à trois phalanges chacun, soit une phalange et un doigt de plus que pour le scénario étudié précédemment. Il est du type sous-actionné et des capteurs tactiles sont installés sur la surface interne des phalanges et de la paume, ces derniers informent sur la position et la force des contacts qui surviennent lors d'une saisie. Les encodeurs qui font partie du montage permettent de connaître l'orientation de chacune des phalanges lors d'une saisie. Les deux types de capteurs offrent des mesures bruitées.

Les travaux sont encore une fois effectués dans le plan, malgré la tridimensionnalité du montage expérimental. Le système est utilisé pour une saisie unique d'objets connus et les données générées par les deux types de capteurs sont les entrées de l'algorithme d'estimation de la pose. Les objets à l'étude sont des extrusions qui ont un profil quelconque et leur modèle est disponible par le biais de leur fichier CAO. La saisie d'objet est telle qu'il n'y a que trois degrés de liberté à déterminer pour estimer la pose.

Sommairement, les caractéristiques suivantes sont considérées pour le développement de l'algorithme d'estimation de la pose :

- préhenseur à trois doigts de trois phalanges ;
- capteurs disponibles : capteurs tactiles et encodeurs rotatifs ;
- les capteurs sont bruités ;
- les objets sont des extrusions et leur modèle CAO est disponible ;
- l'estimation de la pose s'effectue à partir d'une saisie unique.

Les caractéristiques et hypothèses posées pour le développement de l'algorithme d'estimation de la pose présenté dans ce chapitre sont similaires à celles énoncées à la section 2.1. Toutefois, l'algorithme développé au chapitre 2 ne peut pas être directement utilisé ici pour plusieurs

raisons. Certaines modifications doivent être effectuées entre autres pour tenir compte de la phalange supplémentaire du préhenseur sélectionné pour les expérimentations. Également, les dimensions des éléments tactiles et les caractéristiques des encodeurs ne sont pas les mêmes que ce qui est présenté à la section 2.2. Les capteurs tactiles choisis pour les expérimentations informent sur la force des contacts et cette information n'est pas exploitée par l'algorithme de la section 2.4. De plus, le préhenseur simulé au chapitre 2 est sous-actionné et son comportement de fermeture lors d'une saisie est approximé. Toutefois, bien que cette approximation soit suffisante pour les simulations, elle ne peut pas être utilisée dans un contexte expérimental. En effet, le comportement est imprévisible et rend impossible l'application du troisième critère d'évaluation de l'algorithme implémenté en simulations. Pour toutes ces raisons, plusieurs modifications sont apportées pour qu'il soit possible d'estimer la pose d'un objet directement à partir des mesures des capteurs tactiles et des encodeurs.

Le montage expérimental brièvement décrit est exposé en détails à la section 3.2, de même que les objets qui sont saisis et la stratégie de saisie. La section 3.4 fait la présentation de l'algorithme et de ses deux aspects principaux, soient le traitement des mesures des capteurs et l'estimation de la pose, qui eux sont détaillés aux section 3.5 et 3.6. Les résultats obtenus à l'aide de cet algorithme sont montrés à la section 3.7 et finalement la conclusion est à la section 3.8.

## 3.2 Présentation et modélisation du montage expérimental

Le montage expérimental mis en place est constitué des trois mêmes composantes principales qu'au chapitre précédent et il est présenté à la figure 3.1. Le préhenseur, les encodeurs et les capteurs tactiles sélectionnés sont présentés en détails dans cette section.

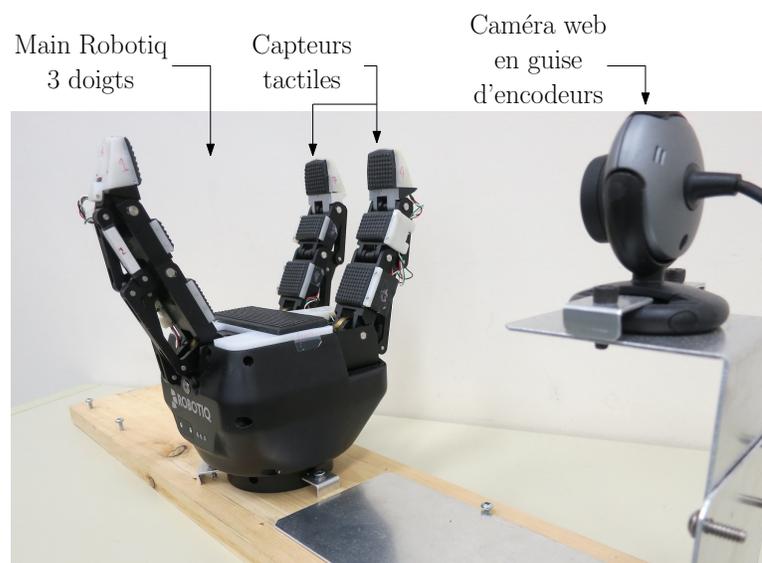


FIGURE 3.1 – Schéma du montage expérimental.

### 3.2.1 Préhenseur robotique

Le manipulateur robotique qui a été sélectionné pour les expérimentations dans le plan est la Main Robotiq 3 doigts. Comme son nom l'indique, le préhenseur a trois doigts et chacun est composé de trois phalanges. De plus, il est sous-actionné, ce qui signifie qu'il n'est pas possible de contrôler l'orientation des phalanges, ni de prédire sa configuration lors d'une saisie. Pour ce qui est de ses dimensions, elles apparaissent à la figure 3.2.

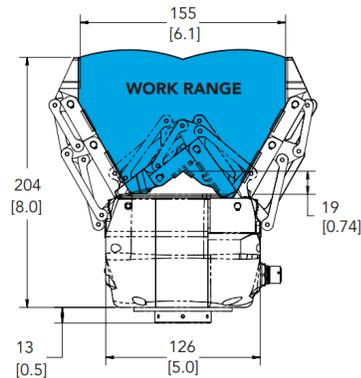


FIGURE 3.2 – Dimensions de la Main Robotiq 3 Doigts, unités : mm / [po], image tirée de (Robotiq).

Pour la modélisation, toutes les dimensions ont été respectées afin que l'algorithme d'estimation de la pose soit spécifique à la Main Robotiq 3 doigts. Certaines simplifications sont toutefois appliquées pour ne conserver que les surfaces qui interagissent avec les objets lors d'une saisie. Le résultat de la modélisation est présenté à la figure 3.3.

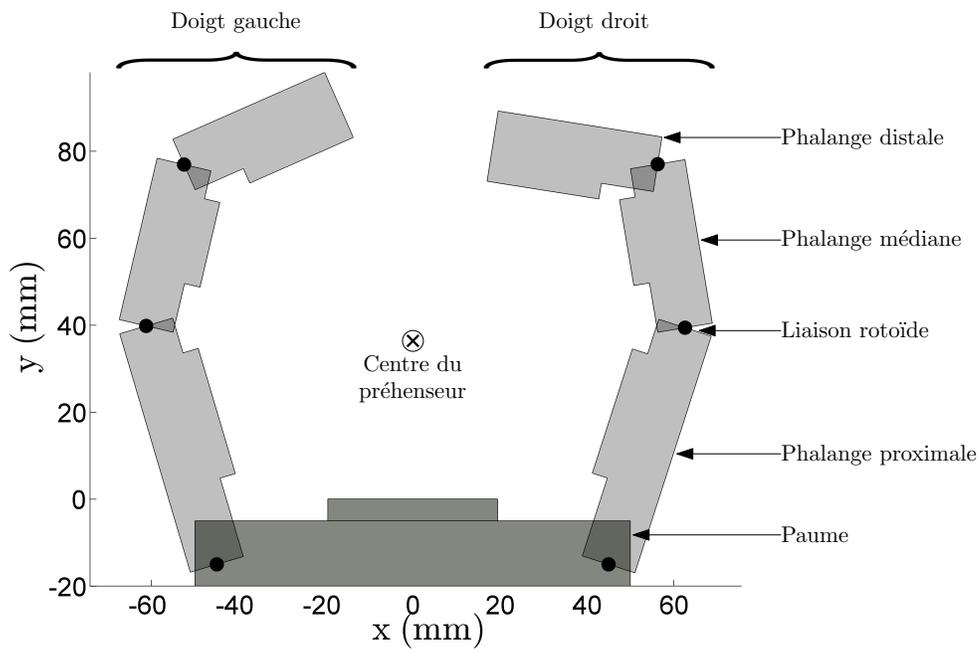


FIGURE 3.3 – Schéma du préhenseur modélisé pour les expérimentations.

Cette figure présente une vue de face du préhenseur de la figure 3.1. Toutes les articulations du préhenseur sont rotoïdes et l'axe de rotation est perpendiculaire au plan  $xy$  de la figure (l'axe sort de la feuille). Chaque phalange porte un nom : la phalange attachée à la paume par une liaison rotoïde est nommée proximale, la suivante médiane et la plus distante de la paume est la phalange distale.

### 3.2.2 Encodeurs rotatifs

Pour l'estimation de la pose, une des hypothèses posées initialement est que la configuration finale de la main robotique lors de la saisie d'un objet est connue. Étant en présence d'un mécanisme sous-actionné, cette information ne peut pas être déduite des commandes envoyées pour fermer les doigts. Pour obtenir ces mesures, une méthode alternative consiste à installer des encodeurs rotatifs à chaque articulation du préhenseur. Ce n'est pas une mince tâche d'intégrer de tels capteurs à un préhenseur déjà conçu et pour cette raison, une alternative plus simple a été trouvée et implémentée pour les besoins expérimentaux. Cette solution alternative consiste à installer une caméra web face au préhenseur. Comme le problème étudié est bidimensionnel, une caméra installée convenablement offre toutes les informations souhaitées.

La figure 3.4 présente une vue de dessus du montage expérimental et la configuration de la caméra est explicitée. D'abord, l'axe optique de la caméra est perpendiculaire au plan  $xy$  du repère local de la main robotique, indiqué par les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  ici et qui apparaît également à la figure 3.3. La distance entre la caméra et le préhenseur est notée  $f$ . De plus, l'axe optique est parallèle à l'axe  $z$  du préhenseur et la position de la caméra selon les axes  $x$  et  $y$  est choisie pour que l'axe optique coïncide avec le centre du préhenseur qui est d'ailleurs identifié sur la figure 3.3. De cette manière, l'image ne subit pas une déformation significative.

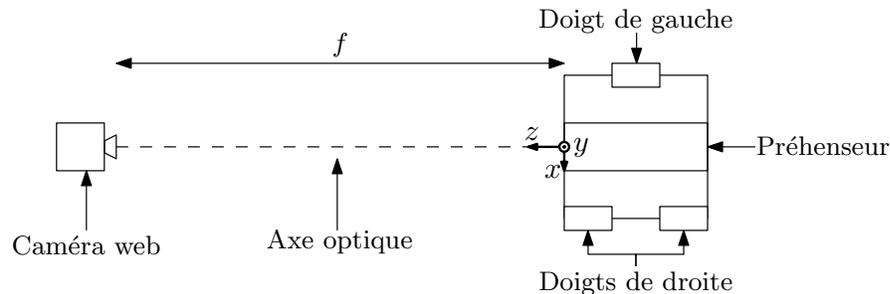


FIGURE 3.4 – Vue de dessus du montage expérimental.

La procédure suivie pour déterminer l'orientation des phalanges après une saisie débute par la prise d'une photographie de la situation, selon la configuration caméra-préhenseur décrite ci-haut. L'image est ensuite analysée à l'aide du logiciel *ImageJ* (ImageJ) qui permet à l'utilisateur de mesurer l'orientation des phalanges. La précision atteinte par cette méthode a été évaluée en comparant l'orientation des phalanges mesurée à l'aide d'un goniomètre à celle obtenue à partir du logiciel *ImageJ*. Il est estimé que la précision se chiffre à  $\pm 2^\circ$ .

### 3.2.3 Capteurs tactiles

L'algorithme d'estimation de la pose développé dans ce chapitre requiert des mesures provenant de capteurs tactiles et ceux qui ont été sélectionnés sont du type capacitif. Les capteurs tactiles intégrés au montage expérimental ont été développés au Laboratoire de commande et de robotique (CORO) de l'École de technologie supérieure de Montréal. Ils sont composés d'une peau, d'un matériau semi-conducteur, puis d'un circuit imprimé. La peau est constituée d'un silicone particulier auquel sont ajoutées des fibres de Nickel, du nitrure de Nickel, ainsi que des nanoparticules. Le circuit imprimé traite les données tactiles issues de contacts entre les capteurs et les objets.

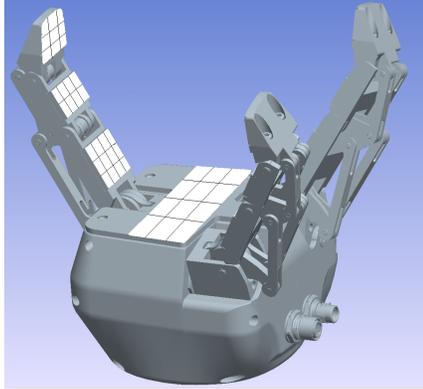
Ces capteurs peuvent mesurer des forces aussi faibles que  $0.0001N$  et jusqu'à  $10N$  (Duchaine et Rana, 2014). Il est également possible d'effectuer des mesures statiques et dynamiques (Risपाल, 2014). Les données statiques donnent des informations sur la distribution de la pression sur les capteurs, alors que les données dynamiques informent sur les vibrations. L'analyse des vibrations peut informer sur la texture de l'objet saisi ou encore détecter qu'un objet glisse de la main, par exemple. Pour ce qui est de l'estimation de la pose, les données essentielles sont les statiques et c'est donc cette fonctionnalité des capteurs qui est exploitée.

Dans (Risपाल, 2014), la relation entre la force appliquée sur les capteurs et le signal obtenu a été étudiée. Les capteurs mesurent un nombre de *counts* qui est proportionnel à la capacité du circuit (voir section 1.5.2) et la valeur de capacité est elle-même proportionnelle à la force qui est appliquée sur le capteur. Donc, le signal mesuré peut être converti en une valeur de force. Toutefois, beaucoup de facteurs influencent le signal mesuré et rendent difficile l'établissement d'une relation *force appliquée-signal mesuré* précise. Entre autres, le signal est victime de l'hystérésis des capteurs et d'un bruit interne. De plus, il dépend de l'endroit sur le tactel où la force est appliquée, la relation *signal-force* n'est pas directement linéaire et le nombre de *counts* mesuré pour une même force ne sera pas le même s'il est effectué au démarrage des capteurs ou après un usage de quelques minutes.

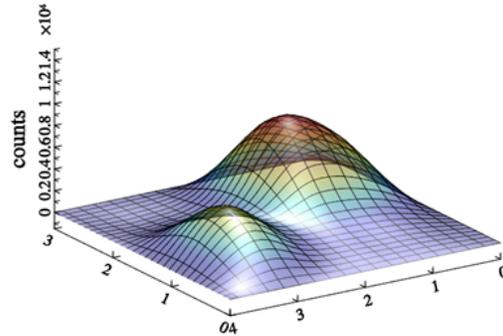
Les capteurs décrits ont été installés sur la majeure partie des surfaces internes du préhenseur robotique. D'ailleurs, la figure 3.5a illustre la répartition des éléments tactiles de chaque capteur. Chaque phalange distale compte 9 éléments tactiles, les médianes en ont 8, les proximales 12, de même que la paume. Les tactels des phalanges ont une dimension de  $5.5\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  et ceux de la paume ont une dimension de  $9\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ . L'épaisseur des capteurs est estimée à  $2\text{ mm}$ .

À la figure 3.5b est présenté un exemple de la distribution de la pression mesurée par les capteurs. Cette image a été obtenue avec l'interface de visualisation fournie avec les capteurs. Pour cet exemple, le capteur représenté a 12 tactels et l'axe identifié *counts* indique l'ampleur de la force mesurée par chaque tactel. Il y avait deux points sur le capteur où une pression différente était appliquée. À titre informatif, pour obtenir la figure 3.5b un filtrage bicubique est

appliqué aux mesures des tactels pour faire l'interpolation entre les mesures de chaque taclel et tenter d'interpréter la distribution de la pression. Ce filtrage n'est toutefois pas appliqué pour le développement de l'algorithme, les données brutes sont plutôt utilisées.



(a) Répartition des capteurs tactiles.



(b) Exemple d'un profil de pression.

FIGURE 3.5 – Capteurs tactiles intégrés au préhenseur et la représentation de la distribution de pression qu'ils permettent.

### 3.2.4 Objets

Comme cela a été fait au chapitre 2, quelques objets ont été sélectionnés pour évaluer l'algorithme d'estimation de la pose développé. Les trois objets retenus apparaissent à la figure 3.6. Ce sont tous des extrusions et leur profil est quelconque. Également, le modèle CAO de chacun est disponible et ils sont considérés comme indéformables. Les dimensions grossières du profil des objets sont d'environ  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ . Cette taille d'objet permet au préhenseur de les saisir convenablement de manière englobante. Un ruban adhésif de couleur noire a été apposé à l'avant de chaque objet pour faciliter la prise de mesure de l'orientation de l'objet qui est utilisée à des fins de vérification.

### 3.2.5 Stratégie de saisie

Le problème visé est dans un espace bidimensionnel, il est donc supposé que les deux doigts à la droite du préhenseur conservent la même configuration lors de la saisie d'objets. Pour cette raison, sur la figure 3.3, les deux doigts de droite sont superposés. Cette hypothèse est valide pour le contexte étudié, puisque les objets dont la pose est à estimer sont des extrusions dont la géométrie ne varie que dans le plan. De plus, elles sont saisies de façon à ce qu'il n'y ait que trois degrés de liberté (une rotation et deux translations). Un exemple de configuration du préhenseur et d'un objet à saisir est présenté à la figure 3.7. Le repère local du préhenseur  $\mathcal{R}_p$  apparaît sur ce dernier, de même que celui de l'objet  $\mathcal{R}_o$ . Lors d'une saisie, les axes  $z$  du préhenseur et de l'objet,  $z_p$  et  $z_o$  respectivement, sont parallèles et pointent dans la même

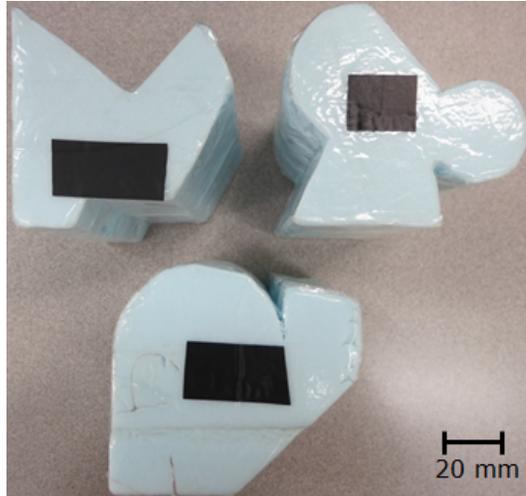


FIGURE 3.6 – Les trois objets qui sont les sujets des expérimentations. À partir du coin supérieur gauche dans le sens horaire : Objet 1, Objet 2, Objet 3.

direction. De cette façon, le problème d'estimation de la pose est en deux dimensions et seulement trois paramètres doivent être trouvés pour obtenir la pose.

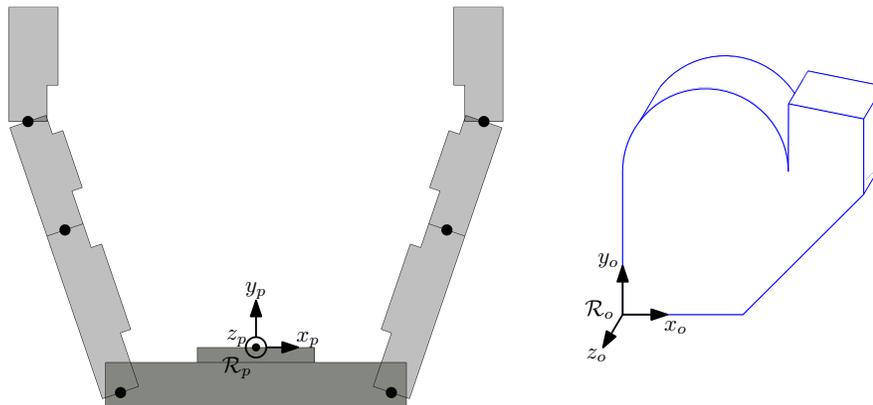


FIGURE 3.7 – Illustration de l'orientation du système d'axes du préhenseur et d'un objet. Les axes  $z_p$  et  $z_o$  sont parallèles et pointent dans la même direction lors d'une saisie.

### 3.3 Notions de géométrie plane

Lors de l'exploitation des données pour l'obtention de la pose de l'objet, il est requis de connaître sa position par rapport à la main sous-actionnée, en vue de détecter d'éventuelles collisions entre l'objet et la main. Le préhenseur présenté à la figure 3.3 peut être décrit par un ensemble de segments de droites. Cela rend possible l'utilisation de l'algèbre linéaire pour déterminer la position de l'objet par rapport à la main.

Considérant un plan défini à l'aide d'un repère  $\mathcal{O}_{xy}$  et en se référant à la figure 3.8, toute

droite  $\Delta$  du plan peut s'écrire sous la forme

$$\Delta : a x + b y = c \quad (3.1)$$

où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées d'un point défini dans le repère  $\mathcal{O}_{xy}$ ,  $a/b$  est la pente de la droite  $\Delta$  et  $c/b$  est l'ordonnée à l'origine.

Cette formulation utile permet de connaître directement la direction d'un vecteur  $\mathbf{n}$  normal à cette droite, c'est-à-dire,

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} . \quad (3.2)$$

Soit  $\mathbf{p}$  le vecteur position d'un point  $P$  du plan. La droite  $\Delta$  divise le plan en deux demi-plans situés de part et d'autre de la droite, l'un dans la direction de  $\mathbf{n}$  et l'autre dans la direction opposée au vecteur normal. La distance entre le point  $P$  et la droite  $\Delta$  est obtenue en effectuant d'abord l'opération

$$\mathbf{n}^T \mathbf{p} - c = d \quad (3.3)$$

où  $d$  est un paramètre proportionnel à la distance séparant le point  $P$  de la droite  $\Delta$ .

Il y a trois cas de figure pour la valeur de  $d$  et chacun d'entre eux révèle la position relative de  $P$  par rapport à la droite  $\Delta$  et au vecteur normal  $\mathbf{n}$  :

- si  $d > 0$  alors  $P$  est situé dans le demi-plan défini dans la direction de  $\mathbf{n}$  ;
- si  $d = 0$  alors  $P$  appartient à la droite  $\Delta$  ;
- si  $d < 0$  alors  $P$  est situé dans le demi-plan défini dans la direction de  $-\mathbf{n}$ .

De plus, la distance  $D$  entre le point  $P$  et la droite  $\Delta$ , mesurée dans la direction du vecteur normal, est obtenue à l'aide du paramètre  $d$  trouvé à l'équation 3.3 et des composantes du vecteur normal, c'est-à-dire,

$$D = \frac{d}{\sqrt{a^2 + b^2}} . \quad (3.4)$$

Une distance  $D$  négative indique que  $P$  est situé dans le demi-plan opposé au vecteur normal  $\mathbf{n}$ , tel qu'il a été défini à l'équation 3.2.

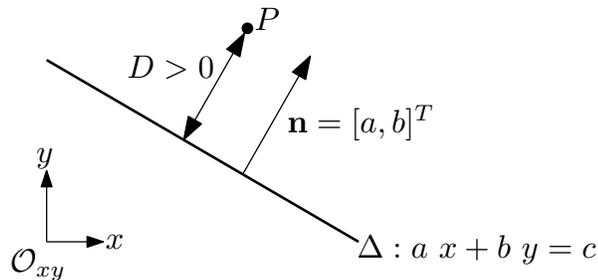


FIGURE 3.8 – Modélisation géométrique et distance du point  $P$  par rapport à la droite  $\Delta$ .

### 3.4 Présentation de l'algorithme

Le but de ce troisième chapitre est de développer un algorithme permettant d'estimer la pose d'objets connus saisis par un préhenseur robotique, à partir de mesures de capteurs tactiles et d'encodeurs (émulés ici par la vision). La main robotique et les deux types de capteurs à partir desquels l'estimation est effectuée ont été présentés à la section 3.2. Une attention est maintenant portée pour trouver une manière d'exploiter les données de ces capteurs. Les étapes principales de l'algorithme apparaissent à la figure 3.9 et sont brièvement décrites ci-dessous.

L'algorithme peut être divisé en deux étapes majeures. La première partie de l'algorithme traite les données acquises par les capteurs pour les transformer en des données utiles pour l'estimation. Lors de la deuxième étape, ces données sont exploitées pour trouver la pose de l'objet qui est cohérente avec les mesures. Plus précisément, des hypothèses de concordance sont d'abord formulées à partir, entre autres, de ces signaux. L'étape suivante consiste à évaluer les hypothèses formulées. Toutes les étapes relatives à cette évaluation sont regroupées dans l'encadré en ligne bleue pointillée. Un total de  $n$  hypothèses sont générées dans un premier temps et elles sont ensuite évaluées une à une selon les étapes de l'encadré. Lorsque la pose n'est pas trouvée à l'intérieur d'un certain temps prédéterminé et qu'il excède une valeur seuil, un algorithme alternatif est lancé. Ce dernier trouve la pose la plus probable en comparant les mesures actuelles à d'autres d'une base de données et l'assigne comme pose de l'objet.

Les détails de toutes les étapes de l'algorithme sont disponibles aux sections 3.5 et 3.6. Avant d'étudier en détails la composition de l'algorithme, une routine qui doit être appliquée à chaque objet de la banque d'objet avant qu'il ne puisse être saisi par le préhenseur est décrite. Cette routine est nommée traitement préliminaire.

La méthode utilisée pour estimer la pose présentée dans ce chapitre est similaire à celle qui a été présentée au chapitre 2. Notamment, les arbres d'interprétation, une méthode de représentation des objets, sont utilisés ici. Le traitement préliminaire concerne d'ailleurs cette méthode et tous les objets qui sont saisis par le montage expérimental doivent subir ce traitement.

En premier lieu, le profil de toutes les extrusions est séparé en segments qui peuvent être droits ou courbes. En se référant à la figure 3.6, l'objet 1 est formé de 8 segments, l'objet 2 de 6 et le troisième objet est divisé en 7 segments. Ensuite, la distance minimale et maximale séparant chaque paire de segments est calculée puis conservée en mémoire. Ces informations de distance sont utilisées pour la formulation d'hypothèses par le biais des arbres d'interprétation.

La deuxième et dernière étape préliminaire consiste à transformer les segments qui forment les objets en une série de points distants d'environ 1 *mm*. Ensuite, la distance entre chaque paire de points est calculée et est elle aussi conservée en mémoire. Cette distance entre chaque point est exploitée lors de l'estimation de la pose, tel qu'il sera discuté à la section 3.6. Ainsi, lorsqu'une saisie d'objet est effectuée et qu'il est souhaité d'estimer la pose, les données de

distance de l'objet sont importées et évitent des calculs répétitifs.

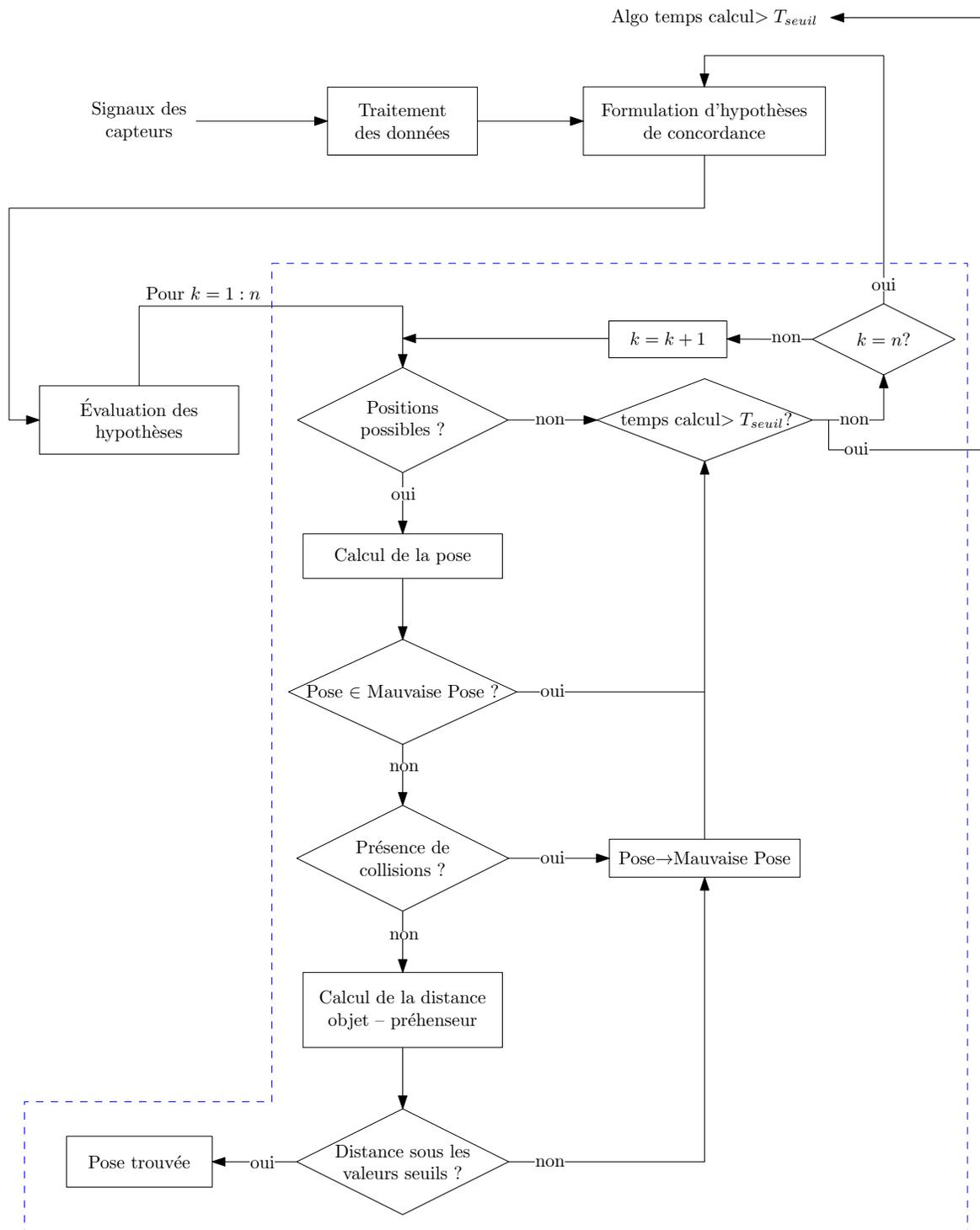


FIGURE 3.9 – Schéma de l’algorithme d’estimation de la pose dans le plan développé pour les expérimentations avec la Main Robotiq 3 Doigts.

## 3.5 Traitement des données

L'étape du traitement des données a pour but de transformer les signaux obtenus par les capteurs en des données utilisables pour estimer la pose. Les encodeurs fournissent l'orientation de chaque phalange du préhenseur avec une certaine précision et les signaux des capteurs tactiles informent sur la force enregistrée à chaque élément tactile. Au cours de la présente étape, les informations des deux types de capteurs sont traitées et combinées en tenant compte de l'incertitude de chaque type de capteur pour obtenir des données plus riches.

Le premier élément du traitement des données qui est présenté ci-dessous a pour but de convertir les données acquises dans l'espace tridimensionnel par les capteurs tactiles en des données en deux dimensions. La deuxième partie se concentre quant à elle sur le traitement des données en deux dimensions pour qu'elles puissent être exploitables par l'algorithme présenté plus loin.

### 3.5.1 Projection des signaux tactiles

L'algorithme d'estimation de la pose présenté ici vise le scénario bidimensionnel, d'où l'utilisation d'extrusions et de la stratégie de saisie présentée. Toutefois, les mesures des capteurs tactiles sont tridimensionnelles, elles doivent donc être adaptées pour n'en retirer qu'une information bidimensionnelle. Pour cela, les données tactiles sont projetées dans un espace en deux dimensions, un exemple de cette projection est présenté à la figure 3.10. Cet exemple montre le cheminement à partir d'une saisie d'objet jusqu'à l'obtention des signaux tactiles en deux dimensions.

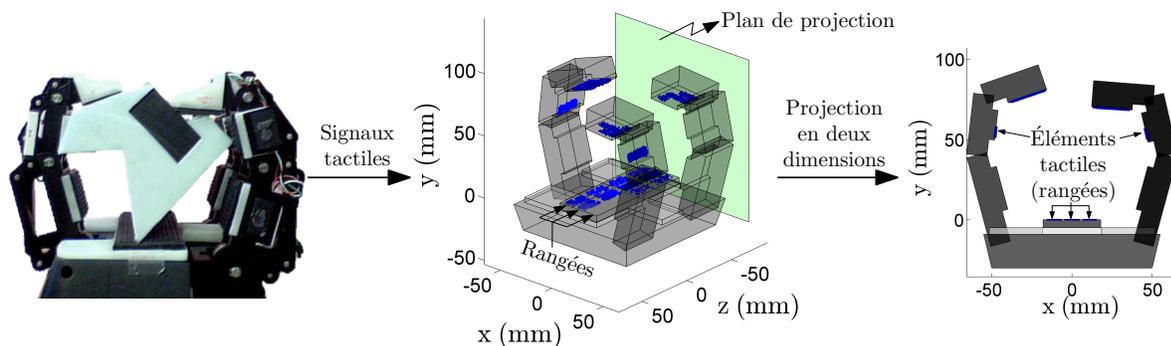


FIGURE 3.10 – Exemple de la projection en deux dimensions des contacts générés par la saisie d'un objet.

La saisie de l'objet est présentée à la gauche de l'image, où la stratégie de saisie de la section 3.2.5 a été respectée. Avec cette stratégie, il est souhaité que les axes  $z_p$  et  $z_o$  (voir figure 3.7) soient parallèles et pointent dans une même direction lors d'une saisie. Néanmoins, en pratique il est difficile d'atteindre un parallélisme parfait.

Sur l'image du centre, les éléments tactiles qui ont détecté un contact sont coloriés en bleu et

le préhenseur modélisé en trois dimensions est également visible. Puisque les axes  $z_p$  et  $z_o$  ne sont pas parfaitement parallèles, ce ne sont pas tous les éléments tactiles d'une même rangée qui détectent un contact. En se référant au système d'axe de l'image du centre, une rangée est définie comme l'ensemble des éléments tactiles qui possèdent les mêmes coordonnées  $x$  et  $y$  et dont seule la coordonnée  $z$  varie. En guise d'exemple, les trois rangées du capteur tactile de la paume sont pointées sur le graphique de droite.

Pour palier ces difficultés pratiques, les signaux d'une même rangée sont moyennés. Cela équivaut à projeter les signaux tactiles (rectangles bleus de l'image centrale) sur un plan de projection défini dans le plan  $xy$  ici illustré par le plan verdâtre. Cette projection transforme les données à trois dimensions en des données à deux dimensions et le résultat peut être observé sur l'image de droite. Les taches bleues correspondent aux rangées qui ont détecté un contact. Pour le reste de ce chapitre, le terme *rangée* sera abandonné et remplacé par les termes *élément tactile* (tactel), puisqu'en deux dimensions ils désignent la même chose. Certains tactels qui ont détecté un contact sont pointés sur l'image de droite. En comparaison avec le nombre de tactel par phalange décrit à la section 3.2.3, le nombre par phalange distale est réduit à 3, celui des phalanges médianes à 2 et à 3 pour les phalanges proximales et la paume vu le moyennage appliqué.

À la section 3.2.3, les capteurs tactiles utilisés ont été présentés et le nombre d'éléments tactiles installés sur chaque phalange est également mentionné. Pour le travail dans l'espace à deux dimensions, le nombre de tactels par phalange est réduit à 2 pour les phalanges médianes et à 3 pour les phalanges distales et proximales ainsi que pour la paume.

### 3.5.2 Génération du nuage de points

Les signaux tactiles mesurés dans l'espace tridimensionnel ont été convertis en données bidimensionnelles, selon la méthode expliquée aux paragraphes précédents. La prochaine phase exploite ces signaux en générant un nuage de points qui représente la distribution des contacts enregistrés.

Il a été mentionné à la section 3.2.3 qu'un capteur tactile est composé de plusieurs éléments tactiles (tactels) et que chaque tactel est une unité de mesure indépendante qui informe sur les interactions physiques qui y surviennent. Le capteur capacitif permet de détecter la présence d'un contact et d'estimer sa force, mais il n'est pas possible de trouver l'emplacement du point de contact sur la surface du tactel à partir d'une mesure de la capacité.

Ainsi, une détection de contact par un tactel indique uniquement qu'il y a un contact dans la région de ce tactel. De manière similaire à ce qui a été présenté à la section 2.5.3, un nuage de points est généré dans la région de ces tactels pour représenter la position inconnue des points de contact entre l'objet et le préhenseur. Chaque point du nuage représente alors une position probable d'un point de contact entre l'objet et un tactel.

La distribution des points dans le nuage créé autour des éléments tactiles et le nombre de points qui le forment dépendent des quatre facteurs qui suivent :

- Force enregistrée au tactel ;
- Hauteur du tactel ;
- Profondeur du tactel ;
- Précision angulaire des encodeurs.

Tout d’abord, le nombre de points à générer pour chaque tactel est calculé à partir du signal des capteurs tactiles, car il est souhaité que le nombre de points soit proportionnel à la force appliquée. Soit un tactel  $j$  qui détecte un contact, où  $j = 1, 2, \dots, m$  et  $m$  est le nombre total d’éléments tactiles en contact avec l’objet. Le signal  $s_j$  d’un élément tactile indique le nombre de *counts* mesuré et cette quantité varie selon une relation non-linéaire monotone croissante à la force qui lui est appliquée.

Il est discuté à la section 3.2.3 que pour les capteurs tactiles utilisés, il est plutôt ardu d’établir précisément la relation entre le signal mesuré et la force appliquée. Pour cette raison, il n’a pas été tenté de déterminer précisément la force appliquée sur les capteurs. Plutôt, le nombre de *counts* de chaque tactel est transformé en une valeur de force relative à la force maximale mesurée, en supposant que la force maximale est enregistrée au tactel qui mesure le plus grand nombre de *counts*  $s_{max}$ . Ainsi, le signal de tous les tactels qui ont mesuré un nombre raisonnable de *counts* est normalisé par rapport au nombre maximal de *counts*  $s_{max}$ , ce qui équivaut grossièrement à leur assigner une valeur de force relative

$$f_j = \frac{s_j}{s_{max}} \quad (3.5)$$

où  $f_j$  est la force relative à la force maximale du tactel  $j$ .

Par nombre raisonnable de *counts*, il est entendu que seuls les éléments tactiles qui mesurent plus de *counts* qu’une certaine valeur seuil sont considérés comme en contact avec l’objet. Cela évite de détecter de faux contacts qui sont en fait dûs au bruit de mesure des capteurs tactiles.

Une fois que les signaux tactiles sont normalisés et transformés en force relative, le nombre de points à générer pour chaque tactel peut être calculé. Le nombre de points  $n_j$  généré pour un tactel est proportionnel à la force relative  $f_j$  qui lui est associée. Celui qui a mesuré la plus grande force aura un total de 250 points, ce nombre est arbitraire et a été choisi pour que l’espace d’un tactel soit bien représenté. De la sorte, plus un contact est persistant, plus il y aura de points de générés à proximité. Le nombre de points générés pour un tactel  $j$  s’exprime donc

$$n_j = 250f_j \quad (3.6)$$

où la force relative  $f_j \in [0,1]$ .

La prochaine étape est de distribuer les  $n_j$  points de chaque tactel dans l’espace bidimensionnel. La distribution est dictée par les dimensions du tactel  $j$  et par la précision angulaire des

encodeurs. Soit un point  $\mathbf{p}_i$  généré pour représenter un contact détecté au taclel  $j$ , où  $i = 1, 2, \dots, n_j$ . La figure 3.11 illustre comment la position de chaque point  $\mathbf{p}_i$  du nuage est trouvée et toutes les explications reliées à la technique illustrée sont données aux paragraphes qui suivent.

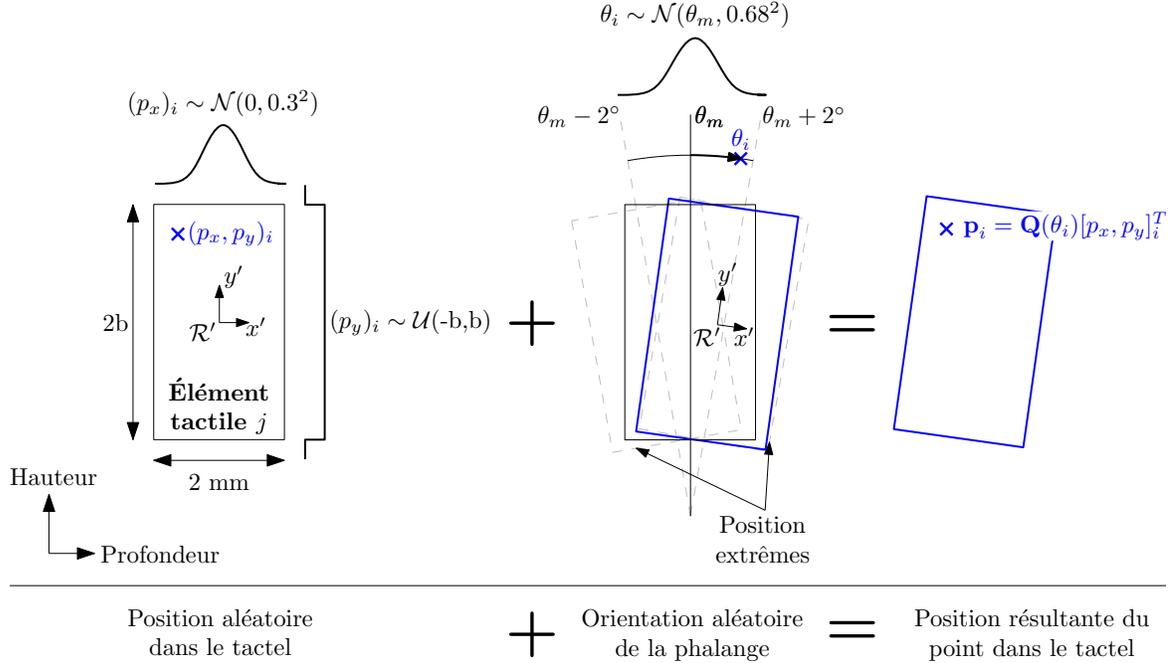


FIGURE 3.11 – Exemple de la génération du point  $\mathbf{p}_i$  du nuage de points au taclel  $j$ , où  $i = 1, 2, \dots, n_j$  et  $n_j$  est le nombre de points à générer pour le taclel  $j$ .

Pour représenter la position inconnue du point de contact qui a causé le signal au taclel  $j$ ,  $n_j$  points  $\mathbf{p}_i$  sont générés dans les environs du taclel  $j$ . Une position aléatoire est d'abord assignée au point et ensuite une orientation aléatoire de la phalange est désignée. Ces paramètres aléatoires sont ensuite combinés pour obtenir la position finale du point  $\mathbf{p}_i$ .

À gauche de l'image de la figure 3.11, la position aléatoire du point  $\mathbf{p}_i$  dans le taclel est illustrée. Dans la direction  $x'$ , c'est-à-dire selon la profondeur du taclel, la position  $(p_x)_i$  est pigée de la distribution normale

$$(p_x)_i \sim \mathcal{N}(0, 0.3^2) \quad (3.7)$$

où la moyenne de la distribution normale est nulle et l'écart type est de 0.3 mm.

Les éléments tactiles ont une compression maximale de 2 mm et il est supposé que lorsqu'il y a un contact, le capteur se comprime de  $(1 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm})$ , ce qui est bien représenté par la loi normale de l'équation 3.7. De manière logique, la compression du capteur dépend directement de la force qui lui est appliquée. Une faible force comprimerait légèrement l'élément tactile alors qu'une plus grande force le comprimerait beaucoup plus, ce qui fait que la position du point de contact dépend de la force. Toutefois, cet étalonnage de la compression en fonction de la

force appliquée n'a pas été effectuée, puisque la profondeur du capteur est d'uniquement  $2\text{ mm}$ . La différence entre la position du point de contact dans la direction de la profondeur obtenue avec l'équation 3.7 ou avec un étalonnage ne serait pas assez significative pour influencer les résultats et ne justifie donc pas les efforts nécessaires pour effectuer cet étalonnage.

Dans la direction  $y'$ , soit dans la direction de la hauteur du tactel, la position  $(p_y)_i$  est tirée de la distribution uniforme

$$(p_y)_i \sim \mathcal{U}(-b, b) \quad (3.8)$$

où l'élément tactile a une hauteur de  $2b$  et la distribution est centrée sur l'axe des abscisses. La distribution uniforme a été sélectionnée pour générer la position des points dans cette direction, car il n'y a pas de position plus probable qu'une autre pour expliquer le contact détecté. Lorsque les  $n_j$  points sont générés, ils sont uniformément distribués dans la direction de la hauteur du tactel.

Par la suite, l'orientation aléatoire de la phalange  $\theta_i$  est générée (centre de la figure). Il est supposé que les mesures des encodeurs suivent une loi normale centrée sur l'angle mesuré  $\theta_m$  et d'écart type égal à  $0.68^\circ$ , soit

$$\theta_i \sim \mathcal{N}(\theta_m, 0.68^2) . \quad (3.9)$$

Les paramètres de la distribution normale ont été sélectionnés de sorte que la cloche est centrée sur la valeur angulaire mesurée et que la majorité de la distribution se situe à proximité de la valeur mesurée, soit à  $\theta_m \pm 2^\circ$  où le  $2^\circ$  provient de la précision des encodeurs.

La position aléatoire dans le tactel et l'orientation aléatoire de la phalange sont maintenant combinées (droite de la figure) pour obtenir la position finale du point  $\mathbf{p}_i$ , soit

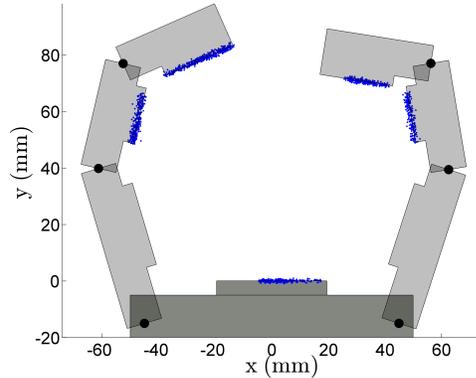
$$\mathbf{p}_i = \mathbf{Q}(\theta_i) \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}_i \quad (3.10)$$

où  $\mathbf{Q}(\theta_i)$  est la matrice de rotation élémentaire d'un angle  $\theta_i$  en deux dimensions .

Cette procédure est répétée  $n_j$  fois pour les  $m$  éléments tactiles qui ont détecté un contact. La figure 3.12 présente un exemple où un nuage de points a été généré pour représenter les contacts qui surviennent lors de la saisie d'une extrusion. La quantité de points à chaque tactel en contact dépend de la force enregistrée et la distribution des points est selon les quatre facteurs mentionnés ci-haut. Il est possible de remarquer que les points générés aux phalanges sont plus dispersés que ceux de la paume, vu l'erreur angulaire qui s'accumule. Donc, pour un contact détecté sur une phalange distale, la dispersion des points est plus grande que pour un contact à la phalange médiane ou encore proximale.



(a) Pose réelle de l'objet.



(b) Nuage de points représentant les contacts mesurés.

FIGURE 3.12 – Exemple d'une saisie d'objet et le nuage de points généré résultant.

## 3.6 Estimation de la pose

À ce point-ci, les mesures des capteurs ont été projetées en deux dimensions, traitées et converties en un nuage de points qui tient compte de l'incertitude et de l'imprécision des capteurs. Une méthode permettant d'estimer la pose à partir de ce nuage de points est proposée dans cette section. D'abord, la première partie de l'algorithme d'estimation de la pose qui consiste à formuler des hypothèses est expliquée. Cette étape fait intervenir, tout comme au chapitre 2, les arbres d'interprétations et l'algorithme RANSAC. Finalement, l'évaluation de ces hypothèses est abordée. Les principes de l'algorithme RANSAC sont encore une fois exploités par le biais de critères d'évaluation des poses hypothétiques. De plus, un algorithme qui intervient lorsque la pose n'est pas trouvée après une certaine limite de temps est présenté.

### 3.6.1 Formulation des hypothèses de concordance

La démarche suivie pour arriver à estimer la pose d'une extrusion saisie par un préhenseur robotique plan consiste à poser des hypothèses puis de les vérifier, jusqu'à l'obtention de la pose. Pour formuler les hypothèses, un arbre d'interprétation (voir section 1.3.1) est parcouru. Les hypothèses portent sur l'appartenance de certains points du nuage généré à la section 3.5 aux divers segments qui forment l'objet et sont appelées hypothèses de concordance.

Premièrement, trois points sont pigés aléatoirement du nuage de points et il est exigé que ces points soient relativement distants l'un de l'autre pour avoir une représentation la plus globale possible de la distribution des points de contact. Ces points sont désignés  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$  et un exemple de trois points qui ont été sélectionnés aléatoirement est présenté à la gauche de la figure 3.13.

Pour les mêmes raisons que celles évoquées à la section 2.6.1, bien que deux points suffisent pour

définir une transformation rigide dans le plan, trois points sont pigés et utilisés pour générer les hypothèses. La redondance apportée par le troisième point permet d'éliminer d'emblée des hypothèses improbables et ainsi éviter des calculs inutiles.

Une fois que les points sont sélectionnés, la distance entre chaque paire est calculée. La notation du chapitre 2 est réutilisée ici pour désigner la distance entre une paire de points. La distance  $L_{12}$  sépare  $\mathbf{p}_1$  de  $\mathbf{p}_2$ ,  $L_{13}$  sépare  $\mathbf{p}_1$  de  $\mathbf{p}_3$  et  $L_{23}$  sépare  $\mathbf{p}_2$  de  $\mathbf{p}_3$ . L'angle  $\theta_{213}$  entre le vecteur reliant le point  $\mathbf{p}_1$  à  $\mathbf{p}_2$  et le vecteur reliant  $\mathbf{p}_1$  à  $\mathbf{p}_3$  est également calculé. Toutes ces quantités sont indiquées sur la figure 3.13. Les distances calculées sont utilisées pour parcourir l'arbre d'interprétation et l'angle est utilisé dans une étape ultérieure.

Maintenant que le trio de points est sélectionné et que ses caractéristiques sont calculées, les hypothèses peuvent être formulées à l'aide des arbres d'interprétation. Plus précisément, ceux-ci sont utilisés pour trouver les trios de segments qui pourraient avoir causé les trois points de contact représentés par  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$ . Les hypothèses de concordance sont formulées en comparant les distances  $L_{ij}$  entre la paire de points  $\mathbf{p}_i$  et  $\mathbf{p}_j$ , où  $i, j = 1, 2, 3$  et  $i < j$ , avec la distance entre les paires de segments de l'objet saisi. Pour compenser l'incertitude angulaire des encodeurs et la dimension physique des éléments tactiles, une certaine tolérance est acceptée lors de la comparaison des distances. Plus formellement, une hypothèse de concordance est énoncée à chaque fois que les trois critères qui suivent sont respectés

$$(D_{min-MN} - d_{seuil}) \leq L_{12} \leq (D_{max-MN} + d_{seuil}) \quad (3.11)$$

$$(D_{min-MO} - d_{seuil}) \leq L_{13} \leq (D_{max-MO} + d_{seuil}) \quad (3.12)$$

$$(D_{min-NO} - d_{seuil}) \leq L_{23} \leq (D_{max-NO} + d_{seuil}) . \quad (3.13)$$

Ici,  $D_{min-MN}$  et  $D_{max-MN}$  sont respectivement la distance minimale et maximale entre les segments  $M$  et  $N$  et  $d_{seuil}$  est la tolérance permise.

La figure 3.13 présente un exemple d'une hypothèse de concordance basée sur les trois critères des équations 3.11 à 3.13. Cette hypothèse stipule que  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_7, S_1, S_4)$ , où les numéros de segments sont inscrits en petits caractères sur la figure.

En résumé, pour la formulation d'hypothèses de concordance, trois points distants sont pigés aléatoirement du nuage de points et les caractéristiques angulaire et de distance sont calculées. La distance entre les points est ensuite comparée à la distance entre les segments de l'objet pour établir des combinaisons possibles de *points pigés - segments*, à l'aide d'un arbre d'interprétation. Cette étape correspond aussi à la première étape de l'algorithme de RANSAC (voir section 1), sauf que le nombre de points pigés n'est pas le minimal. Les autres étapes de RANSAC sont effectuées lors de l'évaluation des hypothèses qui est détaillée dans la prochaine section présentée ci-dessous.

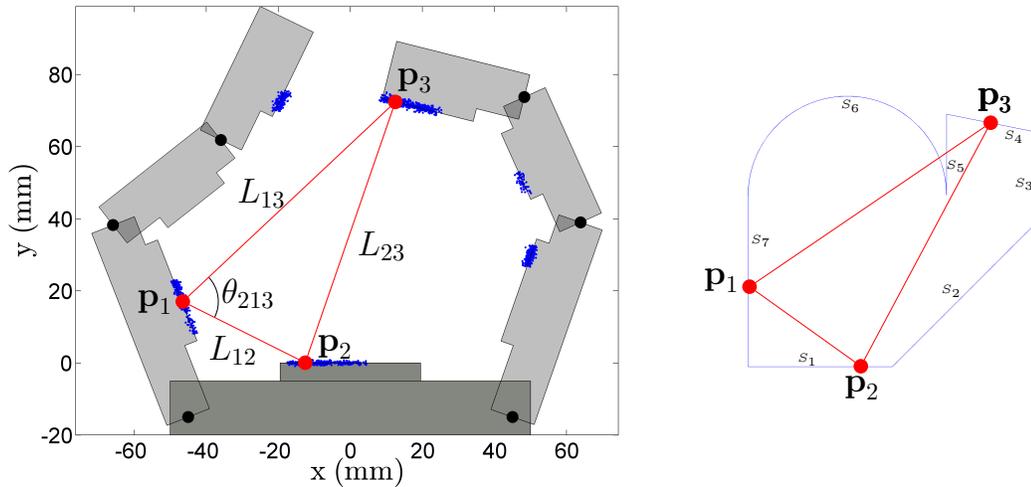


FIGURE 3.13 – Exemple d’une hypothèse de concordance probable (droite) pour une saisie d’objet (gauche) :  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_7, S_1, S_4)$ .

### 3.6.2 Évaluation des hypothèses

La figure 3.9 présente l’architecture de l’algorithme développé. La présente section s’attarde à toutes les étapes qui ont trait à l’évaluation des hypothèses formulées préalablement, soit toutes les étapes regroupées dans l’encadré bleu pointillé de cette figure. Un total de  $n$  hypothèses ont été formulées à la section 3.6.1 et maintenant la validité de ces hypothèses  $k$  est évaluée tour à tour, où  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Pour qu’une hypothèse soit caractérisée comme celle qui correspond à la pose de l’objet, elle doit satisfaire quatre critères. Dans un premier temps, une hypothèse de concordance est cohérente seulement s’il existe au moins une position sur les segments hypothétiques qui permet d’accueillir le trio de points. S’il existe au moins une position pour cette hypothèse de concordance, la pose est calculée et forme une hypothèse de pose. Le deuxième critère ne requiert que l’hypothèse de pose n’ait pas déjà été testée et caractérisée comme une mauvaise hypothèse. Troisièmement, l’objet n’interfère pas avec le préhenseur pour une hypothèse de pose valable. Finalement, un critère de distance doit aussi être satisfait pour conclure que la pose de l’objet est trouvée.

Chacun de ces critères est vu en détails dans les sections qui suivent. Si jamais une hypothèse ne satisfait pas l’un des critères, son évaluation s’arrête à ce point et l’évaluation de la prochaine hypothèse débute. Si la pose n’a pas été trouvée et que les  $n$  hypothèses ont été testées, deux options sont offertes selon le temps de calcul écoulé depuis la première formulation d’hypothèses. Si jamais le temps écoulé est inférieur au temps seuil, l’étape de formulation des hypothèses est répétée, suivie de leur évaluation jusqu’à l’obtention de la solution. Pour le cas où le temps écoulé excède le temps permis, l’algorithme d’estimation de la pose s’arrête

et l'algorithme présenté à la section 3.6.3 prend le relais.

### Cohérence de l'hypothèse de concordance

Soit l'hypothèse de concordance  $k$  qui associe les points  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  et  $\mathbf{p}_3$  aux segments de l'objet  $S_M$ ,  $S_N$  et  $S_O$  respectivement, où  $k = 1, 2, \dots, n$  et  $n$  est le nombre total d'hypothèses de concordance générées. Cette hypothèse est jusqu'ici jugée probable, car la distance entre les points et entre les segments est telle que la paire de points  $\mathbf{p}_1\text{-}\mathbf{p}_2$  peut se trouver sur les segments  $S_M\text{-}S_N$ ,  $\mathbf{p}_1\text{-}\mathbf{p}_3$  sur  $S_M\text{-}S_O$  et  $\mathbf{p}_2\text{-}\mathbf{p}_3$  sur  $S_N\text{-}S_O$ .

L'objectif du critère de cohérence, qui concerne l'hypothèse de concordance  $k$ , est de vérifier que les trois paires de points peuvent appartenir aux trois paires de segments en même temps. Des recherches sont donc effectuées pour trouver, s'il y a lieu, la ou les positions sur les segments qui respectent ce critère. Un exemple de position possible est présenté à la figure 3.13 pour l'hypothèse  $(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) \in (S_7, S_1, S_4)$ . Toutes les positions possibles sont trouvées et la pose associée à chacune est calculée selon la technique présentée à la section 1.2.1. De cette façon, une hypothèse de concordance  $k$  valable est transformée en une ou plusieurs hypothèses de pose.

Toutes les hypothèses de pose qui sont générées sont conservées en mémoire, de même que le résultat de leur évaluation. Sachant que différentes hypothèses de concordance peuvent mener à des hypothèses de pose très similaires, il est préférable de toutes les enregistrer pour éviter de les évaluer plus d'une fois. Cette vérification constitue le deuxième critère d'évaluation et est discuté dans la prochaine section.

Le premier critère est donc essentiellement pareil au premier critère d'évaluation de l'algorithme développé en simulations et présenté au chapitre 2. La seule différence est que toutes les hypothèses de pose générées lors de cette étape sont conservées en mémoire.

### Recherche d'hypothèses semblables déjà testées

Pour éviter des efforts de calcul inutiles, avant d'aller plus loin une vérification est effectuée pour s'assurer que l'hypothèse de pose en évaluation ou une hypothèse très similaire n'a pas déjà été évaluée. Si tel est le cas et qu'elle n'a pas été retenue à ce moment, il est peu probable que l'hypothèse actuelle corresponde à la pose de l'objet. Ainsi, l'évaluation de celle-ci s'arrête et la prochaine est évaluée.

Pour les hypothèses qui n'ont jamais été testées, elles passent à la prochaine étape d'évaluation. Pour toutes les étapes subséquentes, si une hypothèse de pose ne satisfait pas un critère d'évaluation, cela est noté et permet de restreindre l'espace de recherche.

## Recherche d'interférence entre l'objet et le préhenseur

La troisième étape d'évaluation étudie les interférences entre l'objet dans sa pose hypothétique et le préhenseur. Jusqu'à présent, seulement trois points du nuage de points et leur correspondance sur les segments sont exploitées. Pour les deux derniers critères d'évaluation, plus de données sont utilisées.

Avant de vérifier s'il y a présence d'interférence, la position hypothétique de l'objet est corrigée à l'aide d'un ensemble de points du nuage (Mackenzie et Dudek, 1994). Plus précisément, 100 points du nuage sont pigés de manière aléatoire. Ensuite, les points de l'objet les plus près de ces 100 points sont trouvés. Comme les points du nuage auraient été causés par l'objet, il est logique que l'objet en soit très près. Les points de l'objet sont reliés aux points du nuage de contact pour former 100 vecteurs translation et le vecteur translation moyen est calculé. La transformation moyenne est ensuite appliquée à l'objet pour corriger sa position. Cela a comme effet de mieux le centrer dans la pince en tenant compte de plusieurs points de contact, contrairement à seulement trois au départ.

Un exemple d'une correction de la position est présenté à la figure 3.14 et tous les éléments qui y figurent sont identifiés par la légende et décrits ci-dessous. D'abord, le préhenseur est dans une configuration conforme aux mesures des encodeurs et les trois points du nuage qui ont été pigés sont identifiés par une croix rouge (+). Les 100 points pigés aléatoirement du nuage de points sont encerclés (o). L'objet dans sa pose hypothétique apparaît en ligne continue noire et touche aux trois points pigés du nuage. Les points de l'objet les plus à proximité des 100 points encerclés du nuage sont trouvés, de même que le vecteur translation associé à chacun. Seulement quatre vecteurs translation sont tracés sur l'image (flèches bleues) par simplicité. Le vecteur translation moyen est calculé et appliqué à l'objet, résultant en une nouvelle position. Le résultat de la translation apparaît en ligne rouge brisée. Dans sa pose initiale, l'objet n'était pas à proximité de la phalange médiane droite qui a pourtant détecté des contacts. La nouvelle position de l'objet est plus près de cette phalange, tout en tenant compte des autres contacts détectés. En corrigeant de cette façon la position de l'objet, il est positionné dans le préhenseur de manière optimale par rapport aux contacts détectés et cela limite les potentielles interférences.

Suite à cette correction, la recherche d'interférence est effectuée. La technique utilisée pour cela est celle présentée à la section 3.3. Celle-ci est facilement applicable puisque l'objet est décrit comme une série de points distants d'environ  $1mm$  et les phalanges comme un ensemble de segments de droite. La position de la série de points décrivant l'objet par rapport aux segments qui forment les phalanges est vérifiée et permet de détecter s'il y a des interférences. Si tel est le cas, l'hypothèse de pose est rejetée et l'évaluation de la prochaine hypothèse débute. L'hypothèse de pose de la figure 3.14 serait d'ailleurs à rejeter car l'objet interfère avec la phalange distale droite.

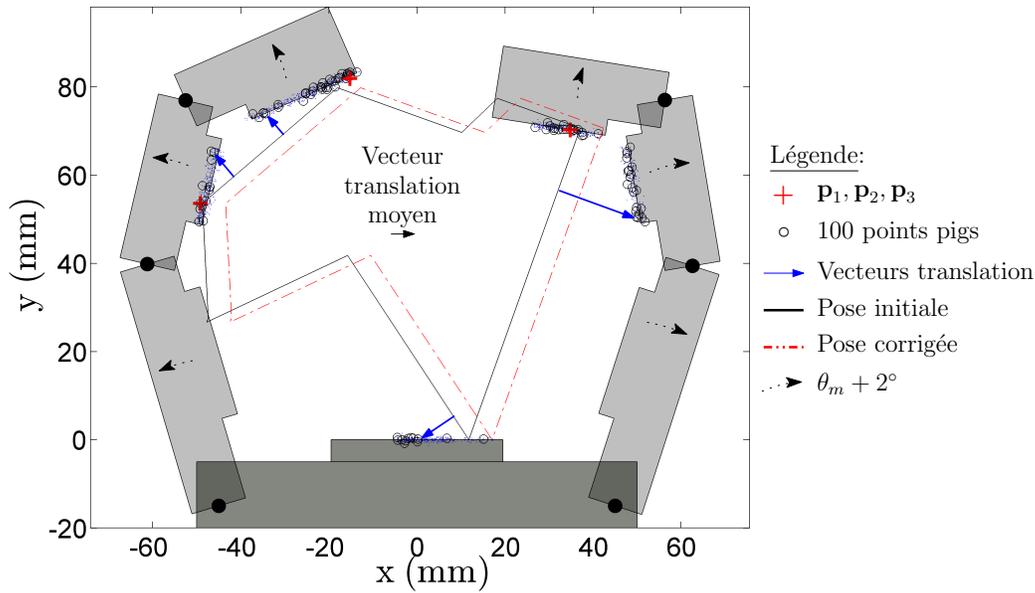


FIGURE 3.14 – Exemple d’une correction de la position hypothétique de l’objet.

D’autre part, si une interférence est notée, avant d’éliminer définitivement l’hypothèse, sa gravité est étudiée. Pour cela, l’orientation de toutes les phalanges est légèrement modifiée et une nouvelle recherche d’interférence entre le préhenseur dans cette configuration et l’objet est effectuée. Plus spécifiquement, l’orientation de toutes les phalanges est corrigée de  $2^\circ$ , soit la valeur de la précision des encodeurs rotatifs utilisés. Le sens de la correction est indiqué sur les phalanges du préhenseur de la figure 3.14. Cette modification a pour effet d’ouvrir le préhenseur au maximum par rapport aux valeurs mesurées. Ainsi, si ce changement de configuration élimine les interférences décelées, il est conclu que l’interférence était causée par l’erreur de mesure des encodeurs rotatifs et l’évaluation de l’hypothèse se poursuit. Dans le cas contraire, l’hypothèse est mise de côté définitivement.

### Respect des distances seuils

Le dernier critère d’évaluation des hypothèses concerne la proximité de l’objet et des points du nuage de points. Il est important de se rappeler que le nuage de points généré représente les points de contacts entre l’objet et le préhenseur, tel que détecté par les capteurs tactiles. La proximité entre le nuage de points et l’objet est donc un élément essentiel pour conclure qu’une hypothèse de pose correspond au scénario observé.

Plusieurs acquisitions de données ont été effectuées avec le montage expérimental de la section 3.2, les trois objets de la section 3.2.4 et la stratégie proposée à la section 3.2.5. Cela donne accès aux données tactiles et des encodeurs associées à une pose donnée. Un total de 57 acquisitions ont été effectuées, soit 19 pour chaque objet, c’est-à-dire que 19 différentes poses ont été

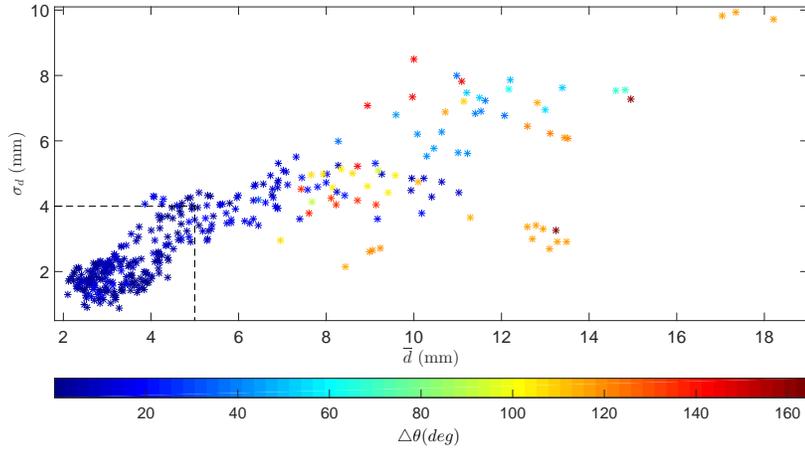
testées par objet. L'algorithme, tel que décrit jusqu'à ce point, a été exécuté et certaines caractéristiques relatives à la distance *nuage de points - objet* ont été notées, tout comme l'erreur angulaire entre la pose hypothétique et la réelle.

L'algorithme a été sollicité à 1000 reprises et à chaque itération une acquisition parmi les 57 était sélectionnée aléatoirement et il était tenté d'estimer la pose associée aux mesures. Ainsi, environ 330 estimations de la pose ont été effectuées pour chaque objet. Tel que mentionné, l'erreur angulaire entre la pose réelle et son estimé a été notée à chaque itération, de même que des informations de distance. La distance dont il est question est celle entre 100 points sélectionnés aléatoirement du nuage de points et leur plus proche voisin sur l'objet. Le nombre de 100 points est arbitraire et a été sélectionné simplement car il a été jugé que la distribution des contacts est ainsi relativement bien représentée.

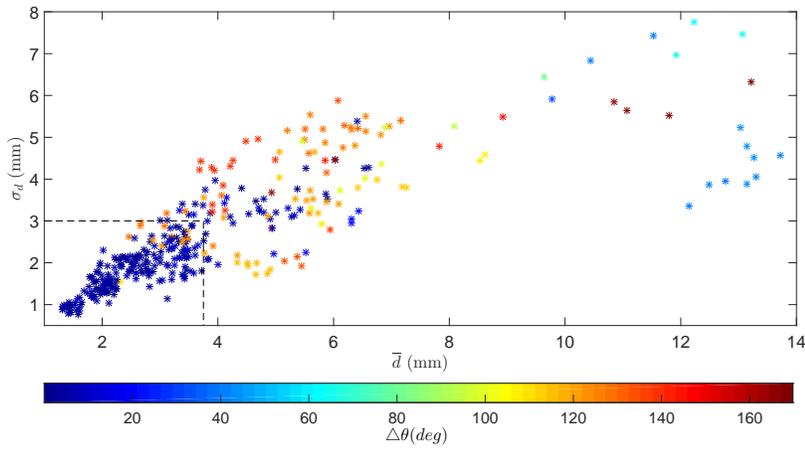
Il a été observé que la distance moyenne entre ces 100 points et leur homologue sur l'objet ainsi que l'écart type de cette distance constituent de bons indicateurs de la véracité d'une hypothèse, tel que mis en évidence par la figure 3.15. Cette figure présente l'écart type de la distance ( $\sigma_d$ ) en fonction de la distance moyenne ( $\bar{d}$ ) et de l'écart angulaire ( $\Delta\theta$ ) pour les trois objets. Pour ces trois graphiques, l'axe des abscisses est associée à la distance moyenne  $\bar{d}$ , l'axe des ordonnées à l'écart type  $\sigma_d$  et la couleur de chaque point représente l'erreur angulaire associée  $\Delta\theta$ . Les couleurs froides comme le bleu indiquent une faible erreur angulaire entre la pose réelle et celle estimée, alors que les couleurs chaudes comme le rouge représentent de grandes erreurs angulaires.

De ces graphiques, certaines tendances peuvent être observées. D'abord, il est possible de constater que les hypothèses ayant une faible erreur angulaire ont généralement une faible distance moyenne et un faible écart type. Également, ces deux paramètres de distance sont en général plus grands lorsque l'erreur angulaire est plus importante. Selon cette tendance qui est observée pour les trois objets, il est possible de fixer des valeurs seuils en-dessous desquelles l'erreur angulaire est la plupart du temps faible. Ainsi, si une hypothèse de pose satisfait tous les critères d'évaluation et qu'en plus elle a une distance moyenne et écart type inférieures aux valeurs seuils fixées, elle représente fort probablement la pose réelle de l'objet saisi.

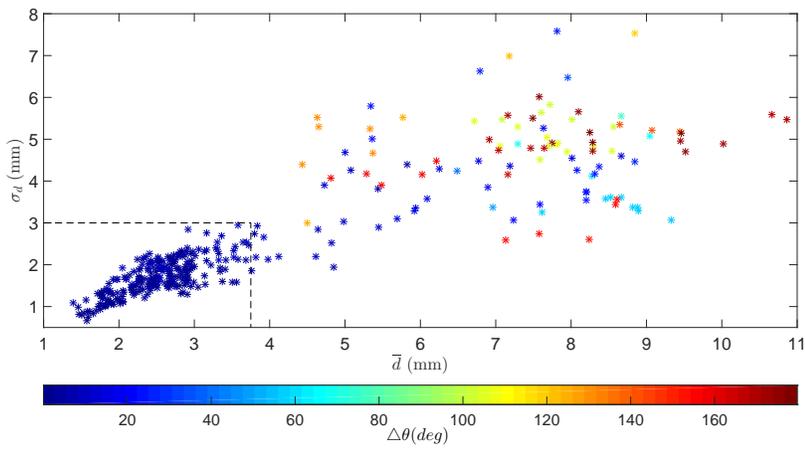
Les valeurs seuils choisies pour chaque objet apparaissent au tableau 3.1. En observant les trois graphiques, il est possible de constater que ces valeurs seuils délimitent assez bien les hypothèses de pose qui ont une faible erreur de celles qui en ont une grande. Les hypothèses avec une erreur sous les  $20^\circ$  sont considérées comme des hypothèses ayant une faible erreur angulaire. Lorsqu'une hypothèse satisfait les deux critères de distance, en plus des critères précédents, il est conclu que cette pose représente le scénario réel et ses paramètres de pose sont désignés comme les paramètres de pose de l'objet.



(a) Objet 1.



(b) Objet 2.



(c) Objet 3.

FIGURE 3.15 – Écart type de la distance ( $\sigma_d$ ) selon la distance moyenne ( $\bar{d}$ ) et l'erreur angulaire ( $\Delta\theta$ ).

	Objet 1	Objet 2	Objet 3
$\bar{d}_{seuil}$ (mm)	5	3.75	3.75
$\sigma(d_{seuil})$ (mm)	4	3	3

TABLE 3.1 – Valeurs seuils de la distance moyenne  $\bar{d}_{seuil}$  et de l'écart type de la distance  $\sigma(d_{seuil})$  pour les trois objets testés.

### 3.6.3 Algorithme temps écoulé $> T_{seuil}$

Contrairement à l'algorithme d'estimation de la pose développé dans un environnement de simulation au chapitre 2, celui présenté dans ce chapitre conserve l'historique de toutes les hypothèses de pose testées pour ne pas évaluer plus d'une fois une mauvaise hypothèse. Cette technique permet en général de diminuer le temps requis pour estimer la pose, mais peut avoir l'effet inverse pour certains cas. Parfois, une pose est telle que pour toutes les hypothèses de pose formulées, au moins un des critères d'évaluation est légèrement insatisfait et cela empêche de trouver la pose de l'objet saisi.

Pour contrer cela, une règle a été implémentée. Cette règle mentionne que si le temps écoulé depuis la formulation d'hypothèses excède un certain temps seuil, c'est que la bonne hypothèse a probablement été éliminée et qu'il faut procéder autrement pour converger vers la pose de l'objet. Le temps seuil est fixé arbitrairement à 15 *secondes*, puisqu'il est observé pour les expérimentations, avec l'algorithme et le montage expérimental décrits, que le temps requis pour déterminer la pose est habituellement d'au maximum quelques secondes. Ainsi, après 15 *secondes* la pose de l'objet devrait être connue et c'est pourquoi un algorithme alternatif est lancé à ce moment.

Cet algorithme compare l'image tactile et les mesures des encodeurs actuelles à une base de données pour en identifier la pose la plus probable. L'image tactile représente la distribution des contacts et leur force. Plus précisément, la force relative à la force maximale de chaque élément tactile est enregistrée dans un vecteur de taille 99 (nombre total de tactel). Logiquement, deux poses similaires ont des images tactiles et des mesures d'encodeurs elles aussi similaires, d'où cette comparaison pour déterminer la pose. La base de données comprend l'image tactile et les mesures des encodeurs associées à 19 poses différentes pour chaque objet. Parmi ces 19 fichiers, les trois dont l'image tactile ressemble le plus à l'actuelle selon un critère de distance euclidienne sont trouvés, de même pour les mesures d'encodeurs.

Ensuite, les deux ensembles de trois hypothèses de pose sont comparés. Si jamais une même hypothèse apparaît dans les deux ensembles, il est fort probable que la pose actuelle soit similaire à celle de l'hypothèse et elle est donc désignée comme la pose de l'objet. Dans le scénario où plus d'une hypothèse est commune et que les poses respectives de ces deux hypothèses se ressemblent, elle sont moyennées et assignées comme la pose de l'objet. Le même

principe s'applique si trois hypothèses sont communes. Dans le cas où aucune hypothèse de pose n'est commune, celle qui possède l'image tactile la plus similaire à l'image tactile actuelle est choisie pour représenter la pose.

Peu importe le nombre d'hypothèses communes, seul le paramètre de l'orientation est conservé et la position appropriée est ensuite cherchée. Pour positionner l'objet, la technique de correction de la position présentée à la page 61 est utilisée. De cette façon, les trois paramètres de pose sont obtenus, même si aucune hypothèse de pose n'a satisfait tous les critères d'évaluation énoncés.

### 3.7 Résultats

L'algorithme présenté dans ce chapitre a été soumis à plusieurs tests pour valider son fonctionnement et quantifier ses performances. Les trois objets présentés à la section 3.2.4 ont été orientés et positionnés aléatoirement puis saisis à 10 reprises chacun et les données tactiles et des encodeurs ont été enregistrées. La pose réelle de l'objet a aussi été notée à partir de l'image obtenue de la caméra web pour des fins de comparaison.

L'algorithme de la figure 3.9 a ensuite été exécuté 20 fois pour chaque acquisition. L'algorithme développé est non-déterministe, c'est-à-dire que pour une même entrée il y a plusieurs sorties possibles. Donc, si les mesures reliées à une saisie d'objet sont utilisées plusieurs fois par l'algorithme pour estimer la pose de l'objet, la pose obtenue peut être légèrement différente à chaque fois. Conséquemment, exécuter l'algorithme à 20 répétitions pour chaque saisie d'objet permet d'obtenir une représentation satisfaisante de son comportement.

À chaque exécution de l'algorithme, l'erreur angulaire et en positionnement entre la pose réelle et celle estimée a été notée, ainsi que le temps requis pour estimer la pose à l'aide du logiciel Matlab 2011b et d'un processeur de 2.4 GHz. Les résultats présentés sont les suivants : l'erreur angulaire est présentée au tableau 3.2, l'erreur de positionnement à la figure 3.16 et le temps de calcul à la figure 3.17. L'erreur de positionnement est définie comme la distance qui sépare le centre géométrique de l'objet dans sa pose réelle et dans sa pose estimée.

D'abord, la pose a été correctement estimée dans la majorité des cas. Par rapport à l'erreur angulaire, la performance est très bonne. Pour plus de 60% des essais elle se situe sous la barre des 5° et environ 89% des essais sont sous les 10°. 9% des estimations sont moins précises et ont une erreur angulaire qui se situe entre 10°–20°. De mauvaises estimations sont observées pour 1.66% des tentatives de l'algorithme.

Encore une fois par rapport à l'erreur angulaire d'estimation, les performances sont similaires pour les trois objets. Toutefois, seuls les objets 2 et 3 affichent des estimations avec une erreur importante. Ces mauvaises estimations sont dues à des poses dites miroir. Certaines configurations d'objet sont telles qu'elles partagent pratiquement la même configuration de

TABLE 3.2 – Fréquence de l’erreur angulaire entre la pose estimée et la pose réelle pour 200 estimations de la pose pour chacun des trois objets.

Erreur angulaire	Objet 1	Objet 2	Objet 3	Total
[°]	[%]	[%]	[%]	[%]
[0 - 5[	47.00	72.50	62.50	60.67
[5 - 10[	38.50	17.50	30.00	28.67
[10 - 20[	14.50	5.50	7.00	9.00
[20 - 180]	0.00	4.50	0.50	1.66

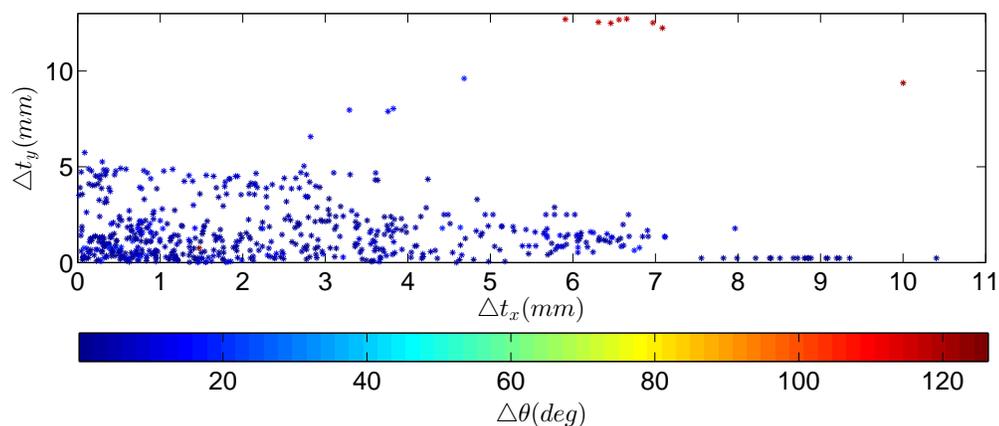


FIGURE 3.16 – Erreur de positionnement selon les axes  $x$  ( $\Delta t_x$ ) et  $y$  ( $\Delta t_y$ ) et l’erreur angulaire ( $\Delta\theta$ ).

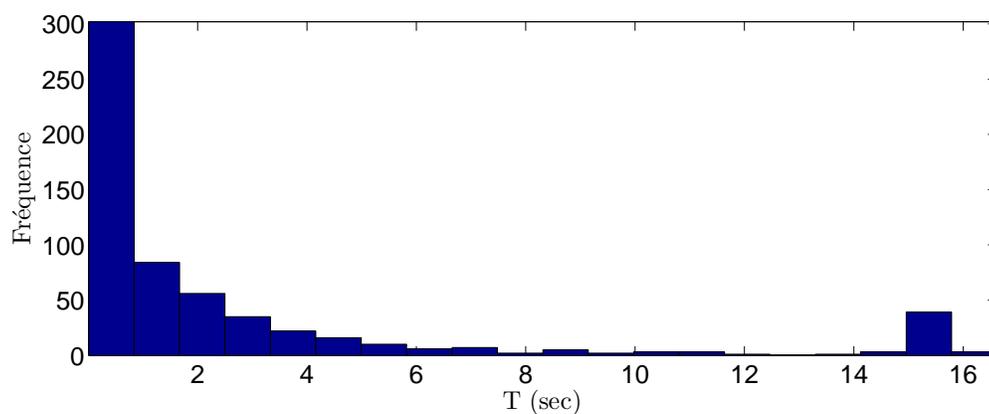


FIGURE 3.17 – Fréquence du temps requis ( $T$ ) pour obtenir la pose pour les 600 exécutions de l’algorithme.

préhenseur et génèrent sensiblement les mêmes contacts. Conséquemment, une pose miroir peut satisfaire tous les critères d'évaluation et être désignée comme la pose de l'objet si cette hypothèse est évaluée avant l'hypothèse qui représente réellement la pose. Un exemple de pose miroir est présenté à la figure 3.18 où la pose réelle est représentée par le trait continu noir et la pose miroir par la ligne brisée orange. Pour cet exemple, les contacts générés (points bleus sur l'image) par la saisie de l'objet (trait noir) sont pratiquement les mêmes que ceux que généreraient la pose miroir (trait brisé). De plus, les deux configurations d'objet partagent très bien la même configuration de préhenseur, cela démontre bien qu'il est compliqué de déterminer entre les deux poses celle qui est bonne de celle qui est la pose miroir.

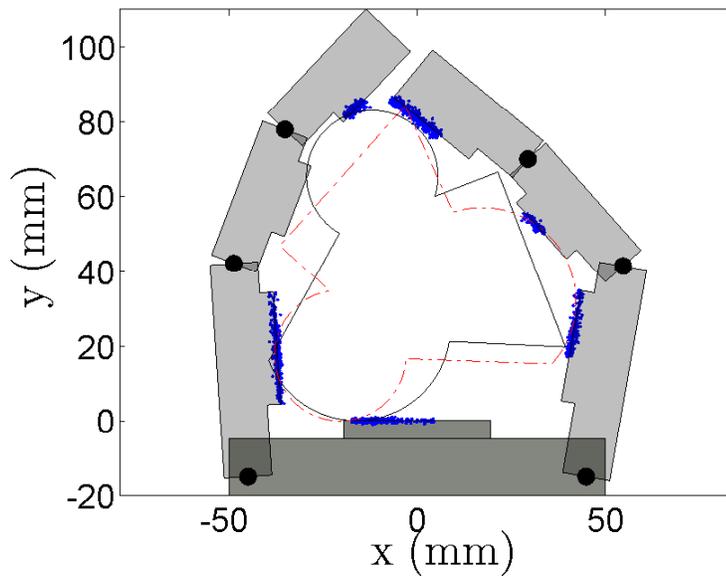


FIGURE 3.18 – Exemple d'une pose miroir (trait brisé rouge) et de la pose réelle (trait plein noir).

Pour ce qui est de l'erreur en translation, elle se situe généralement sous les  $10\text{ mm}$  dans la direction  $x$  et est inférieure à  $5\text{ mm}$  en  $y$ , lorsque l'erreur angulaire est faible. Cette erreur est plus importante lorsque l'orientation de la pose est mal estimée. Puisque l'orientation des phalanges est connue avec une bonne précision, la position de l'objet pour une orientation donnée est bien contrainte et plus aisée à trouver.

Le temps requis pour estimer la pose est, pour la grande majorité des essais effectués, inférieur à  $6\text{ secondes}$ . Il est donc intéressant de constater qu'il est possible de trouver la pose d'un objet, à partir de données tactiles et d'encodeurs, avec une bonne précision et dans un délai raisonnable.

L'algorithme alternatif, qui entre en jeu lorsque la pose n'est pas trouvée après un certain temps seuil, est intervenu à 42 reprises, soit 11 fois pour l'objet 1, 22 pour le deuxième et

9 fois pour le troisième objet. Parmi tous ces cas, la pose a mal été estimée à seulement 2 reprises alors qu'une pose miroir a été sélectionnée. Pour les 40 autres fois, l'erreur d'estimation angulaire est inférieure à  $10^\circ$  et l'erreur en positionnement est similaire aux autres résultats. Ces résultats confirment l'utilisation de l'image tactile et des mesures d'encodeurs de la base de données comme technique alternative. Toutefois, cette technique n'est pas robuste pour des poses qui n'ont jamais été testées et doit donc être utilisé en dernier recours. Plus cette base de données, qui compte actuellement 19 poses différentes par objet, sera complète, moins il y aura de mauvaises estimations et plus l'estimation sera précise.

### 3.8 Conclusion

Le but de ce chapitre était de développer un algorithme d'estimation de la pose dans un espace à deux dimensions, à partir de mesures expérimentales venant de capteurs tactiles et d'encodeurs. Certains éléments de l'algorithme développé au chapitre 2 dans un environnement de simulations ont pu être utilisés, mais les différences entre les deux systèmes empêche l'utilisation directe.

Pour atteindre le but visé, le système expérimental a d'abord été modélisé. Sur le système retenu, des capteurs tactiles, qui détectent les contacts avec les objets saisis et leur force, sont installés sur les surfaces internes du préhenseur. Une caméra web est aussi installée face au préhenseur et fait office d'encodeurs. Une méthode a ensuite été présentée pour convertir les signaux des capteurs en des données utiles pour l'estimation de la pose. Pour cette étape, la précision respective des capteurs a été prise en compte pour générer un nuage de points représentatif de la distribution et de la force des contacts enregistrés.

Par la suite, toutes les étapes de l'algorithme développé ont été présentées. L'algorithme se divise en deux étapes, l'une formule des hypothèses cohérentes avec les mesures des capteurs et l'autre évalue les hypothèses. L'algorithme a finalement été évalué en effectuant un total de 600 estimations de la pose pour les trois objets. Pour pratiquement 90% des essais, la pose a été estimée correctement avec une erreur angulaire inférieure à  $10^\circ$  et seulement 1.66% des estimations sont problématiques et ont convergé vers une pose miroir. L'erreur en translation est faible et généralement sous le centimètre, tout comme le temps de calcul qui est de quelques secondes.

Finalement, un algorithme qui intervient quand le temps de calcul est trop important a été présenté comme alternative. Ce dernier compare l'image tactile et les mesures des encodeurs à celles de la base de données. Cette technique a permis d'atteindre un taux de succès élevé. Les résultats pourraient être encore meilleurs si la base de données était plus grande. Également, la base de données pourrait être exploitée pour confirmer la pose estimée par le premier algorithme présenté et pourrait aider à distinguer les poses miroir.



## Chapitre 4

# Développement d'un algorithme d'estimation de la pose dans l'espace et validation expérimentale

Le quatrième chapitre de ce mémoire présente le développement d'un algorithme permettant d'estimer la pose d'un objet dans l'espace tridimensionnel. Autrement dit, cet algorithme a pour but d'identifier les six paramètres qui caractérisent la pose d'un objet saisi par un préhenseur robotique. Le problème visé est d'abord formulé dans la première partie du chapitre. Dans la deuxième partie, le montage expérimental qui est utilisé pour la validation de l'algorithme est présenté. Par la suite, l'algorithme de Levenberg-Marquardt est présenté. Ce dernier est utilisé par l'algorithme d'estimation de la pose développé dans ce chapitre. Ensuite, toutes les facettes de l'algorithme d'estimation de la pose sont expliquées. Finalement, le bon fonctionnement de l'algorithme développé est validé expérimentalement.

## 4.1 Formulation du problème

Aux chapitres 2 et 3, deux algorithmes destinés à estimer la pose d'objets saisis par un préhenseur robotique sont présentés. Dans les deux cas, seules les informations de capteurs tactiles et d'encodeurs sont utilisées pour l'estimation de la pose. Le premier algorithme est développé dans un environnement de simulation et le deuxième utilise directement les mesures des capteurs d'un montage expérimental. Pour les deux scénarios étudiés jusqu'à présent, l'algorithme a atteint les objectifs d'estimation de la pose, tant au niveau de la précision de l'estimation qu'au niveau du temps requis pour y arriver.

La prochaine étape, qui est abordée dans ce quatrième chapitre, est d'estimer la pose d'objets connus dans l'espace tridimensionnel. L'algorithme développé s'appuie sur les forces des deux algorithmes précédents et les éléments requis pour l'adapter à la dimensionnalité supérieure sont déterminés.

Encore une fois, un préhenseur sous-actionné fait partie du montage expérimental, de même que des capteurs tactiles et des encodeurs rotatifs. En réalité, le montage expérimental utilisé ici est le même qu'au chapitre précédent. Le seul changement est l'addition d'une seconde caméra. Les objets qui étaient les sujets d'expérimentations du chapitre 3 le sont encore une fois et un quatrième objet qui n'est pas une extrusion s'ajoute à la banque d'objets. Le modèle CAO de chacun est disponible et utilisé pour l'estimation de la pose.

Dans la section 1.2, la pose en deux et en trois dimensions sont définies. En bref, en deux dimensions trois paramètres sont requis pour définir complètement la configuration d'un objet, soit un pour la rotation et deux pour la translation. Dans l'espace tridimensionnel, ce nombre grimpe à six, c'est-à-dire trois pour décrire la rotation et trois autres pour la translation. Bien que le nombre de paramètres double pour l'ajout d'une dimension au problème, il en est tout autre pour la complexité associée à cette dimension additionnelle. En effet, l'espace de recherche augmente significativement avec l'ajout d'une dimension et rend difficilement applicable certains principes exploités par les deux premiers algorithmes.

Les deux différents algorithmes développés en deux dimensions comportent beaucoup de similitudes au point de vue de l'approche utilisée. Plus spécifiquement, la méthode en deux temps de formulation d'hypothèses suivie de leur évaluation est appliquée dans les deux cas. Pour le type d'hypothèses formulées, elles portent sur des concordances possibles entre deux ensembles de points. Ce type d'hypothèse s'avère plus compliqué à appliquer dans l'espace tridimensionnel et cela est associé à la problématique de la malédiction de la dimensionnalité.

D'une part, pour un objet tridimensionnel représenté par un ensemble de facettes triangulaires ou encore par un nuage de points, le nombre d'hypothèses de concordance explose par rapport à un problème en deux dimensions. Effectivement, pour bien représenter un objet en trois dimensions un grand nombre de facettes ou de points est requis par rapport au cas

bidimensionnel. En ayant un nombre plus élevé d'éléments qui représentent l'objet, le nombre d'hypothèses possibles se voit lui aussi augmenté. Par exemple, si un ensemble de trois points est utilisé pour formuler les hypothèses de concordance et que  $n$  points décrivent l'objet, il y aura un maximum de  $3^n$  hypothèses de générées. Puisque le nombre  $n$  est largement plus grand pour un cas en trois dimensions qu'en deux dimensions, le nombre d'hypothèses est beaucoup plus élevé en trois dimensions. Par rapport au temps requis pour estimer la pose, plus le nombre d'hypothèses est grand, plus il sera grand, ce qui n'est pas avantageux ici.

D'autre part, pour formuler des hypothèses de concordance, la distance entre des points de contact est comparée à la distance entre des points générés à la surface de l'objet. Pour compenser pour le bruit dans les données et l'incertitude des capteurs utilisés, une certaine tolérance est permise. Dans le cas tridimensionnel, la tolérance doit être augmentée par rapport au cas en deux dimensions, car les incertitudes sont plus nombreuses. L'augmentation de cette tolérance fait que le nombre d'hypothèses de concordance jugées probables est plus important. De ce fait, le temps de calcul augmente également.

Il est donc nécessaire de trouver le compromis optimal entre le nombre d'hypothèses générées, la tolérance acceptée et le temps de calcul et cela n'est pas une tâche simple. Pour illustrer cette difficulté, imaginons une situation où les points de contact sélectionnés pour formuler les hypothèses sont distants des points de contact réels. Dans ces circonstances, il est peu probable qu'une hypothèse qui représente bien la pose réelle de l'objet soit formulée. Pour qu'il y en ait au moins une, une tolérance élevée serait requise et impliquerait la formulation d'un nombre élevé d'hypothèses, ce qui est associé à un temps de calcul important pour toute les évaluer.

Pour pallier ces difficultés, une approche différente de celles des autres chapitres est testée pour le scénario tridimensionnel. Les étapes principales de l'algorithme restent inchangées et sont, dans un ordre chronologique, le traitement des mesures des capteurs, la formulation d'hypothèses et finalement leur évaluation. Cependant, le contenu des étapes est différent. Ce qui diffère dans l'étape de formulation d'hypothèses est le type d'hypothèses formulées. Lors de celle-ci, des hypothèses de poses sont générées directement. Les hypothèses d'orientation sont formulées aléatoirement, tandis que les hypothèses sur la position sont trouvées suite à une recherche rapide. Pour ce qui est de l'évaluation des hypothèses, elle n'utilise pas de valeurs seuils pour identifier l'hypothèse qui représente la pose de l'objet. Plutôt, les hypothèses générées compétitionnent les unes contre les autres et la plus probable parmi ces dernières est identifiée comme la pose de l'objet.

En ce qui concerne la structure du chapitre, le montage expérimental est survolé à la section 4.2. La section 4.3 étale des notions théoriques mises à profit par l'algorithme d'estimation de la pose. Ensuite, l'algorithme est introduit de manière très sommaire à la section 4.4. Les deux aspects principaux de cet algorithme sont expliqués en détails dans les deux sections qui

suivent, soit les sections 4.5 et 4.6. Finalement, la performance de l'algorithme est évaluée à la section 4.7 et les conclusions sont présentées à la section 4.8.

## 4.2 Présentation du montage expérimental

Le montage expérimental sélectionné pour les expérimentations est sensiblement le même que celui du chapitre 3. Il comprend un préhenseur robotique sous-actionné, des capteurs tactiles et des encodeurs. La main Robotiq à 3 doigts est utilisée, ainsi que les capteurs tactiles développés par l'École de Technologie Supérieure (voir section 3.2). Pour faire office d'encodeurs, deux caméras web sont utilisées. Les caractéristiques de précision des encodeurs, la dimension et la quantité d'éléments tactiles sont les mêmes qu'au chapitre précédent. Plus précisément, les encodeurs sont jugés précis à  $\pm 2^\circ$ , les éléments tactiles des phalanges mesurent  $5.5mm \times 6mm$  et ceux de la paume  $9mm \times 18mm$ . Chaque phalange proximale et la paume comptent 12 tactels, les phalanges médianes 8, puis les distales 9.

Puisque l'objectif du chapitre est d'estimer la pose d'objets dans l'espace, l'hypothèse que les deux doigts à la droite du préhenseur conservent la même configuration ne tient plus. Pour obtenir l'orientation des phalanges du deuxième doigt de droite, une caméra est installée face à la première. L'une permet d'identifier la configuration des doigts à l'avant du préhenseur et l'autre permet d'identifier celle du deuxième doigt de droite, en plus de confirmer celle du doigt de gauche.

Le montage apparaît à la figure 4.1. Les deux caméras sont à l'extrême gauche et droite de la figure et le préhenseur équipé de capteurs tactiles est au centre. La hauteur des caméras est choisie pour que l'axe optique coïncide avec le centre du préhenseur, afin de limiter la déformation des images. Également, le positionnement des caméras par rapport à la main Robotiq respecte tous les éléments évoqués à la section 3.2.2.

Quatre objets sont les sujets d'expérimentation pour l'algorithme présenté dans ce chapitre, soit les trois utilisés pour l'estimation de la pose dans le plan qui apparaissent à la figure 3.6 et un autre objet qui n'est pas une extrusion et qui est présenté à la figure 4.2. Contrairement au chapitre précédent, il n'y a pas de stratégie de saisie spécifique puisqu'il est souhaité d'estimer les six paramètres de pose de l'objet.

## 4.3 Algorithme de Levenberg-Marquardt

Cette section présente une notion théorique qui est exploitée par l'algorithme d'estimation de la pose et qui concerne l'algorithme Levenberg-Marquardt. L'algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) est une méthode d'optimisation de fonction itérative (Marquardt, 1963). Plus précisément, il permet de minimiser des fonctions non-linéaires qui dépendent de plusieurs paramètres et de trouver une solution numérique à faible coût. Le plus souvent, il est

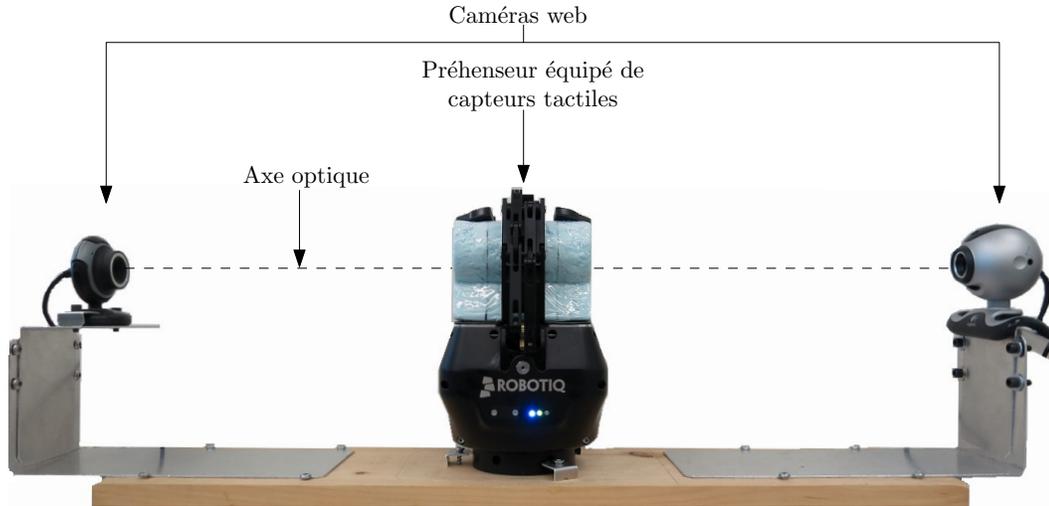


FIGURE 4.1 – Schéma du montage expérimental.



(a) Vue générale.

(b) Vue de face.

FIGURE 4.2 – Le quatrième objet dont la pose est à estimer.

utilisé pour résoudre des problèmes de moindres carrés et permet d'obtenir les paramètres qui minimisent la fonction non-linéaire.

Un estimé initial de la solution au problème visé est requis. De plus, l'algorithme est sensible aux minima locaux, il est donc préférable que l'estimé initial soit près de la solution pour obtenir le minimum global de la fonction.

Soit  $\beta_{m \times 1}$  le vecteur contenant les  $m$  paramètres dont dépend une fonction  $e(\beta)$ . L'objectif de l'algorithme LM est de trouver les paramètres  $\beta$  qui minimisent la fonction non linéaire  $e(\beta)$ . Les paramètres initiaux sont fournis et corrigés itérativement pour minimiser la fonction  $e(\beta)$ . La fonction non-linéaire à minimiser s'exprime

$$e(\beta) = \sum_{i=1}^n \| \mathbf{y}_i - \mathbf{f}_i(\beta) \|^2 = \sum_{i=1}^n \eta_i . \quad (4.1)$$

Tel que mentionné, les paramètres optimaux qui minimisent la somme des carrés des distances entre les fonctions  $\mathbf{f}_i$  et les objectifs  $\mathbf{y}_i$  sont cherchés. Pour y arriver, de manière itérative,

l'estimé du vecteur des paramètres est corrigé à chaque itération selon la règle

$$\widehat{\boldsymbol{\beta}}_{j+1} = \widehat{\boldsymbol{\beta}}_j - \boldsymbol{\delta}_j \quad (4.2)$$

où  $\widehat{\boldsymbol{\beta}}_j$  est l'estimé du vecteur des paramètres à l'itération  $j$  et  $\boldsymbol{\delta}_j$  est la correction appliquée à l'itération  $j$ . Pour estimer la correction à appliquer, les fonctions  $\mathbf{f}_i$  sont approximées par leur linéarisation, l'équation 4.1 devient donc

$$e(\boldsymbol{\beta}) \approx \sum_{i=1}^n \|\mathbf{y}_i - \mathbf{f}_i(\boldsymbol{\beta}) - \mathbf{J}_i \boldsymbol{\delta}_i\|^2 \quad (4.3)$$

où  $\mathbf{J}_i$  est la jacobienne; une matrice qui indique la variation de la fonction selon chaque paramètre. Cette dernière s'exprime

$$\mathbf{J}_i = \frac{\partial \mathbf{f}_i(\boldsymbol{\beta})}{\partial \boldsymbol{\beta}}. \quad (4.4)$$

En dérivant l'équation 4.3 par rapport à  $\boldsymbol{\delta}$  et en ajoutant un facteur d'amortissement  $\lambda$ , l'équation 4.2 devient

$$\widehat{\boldsymbol{\beta}}_{j+1} = \widehat{\boldsymbol{\beta}}_j - [\mathbf{J}_j^T \mathbf{J}_j + \lambda_j \text{diag}(\mathbf{J}_j^T \mathbf{J}_j)]^{-1} \mathbf{J}_j^T \boldsymbol{\eta}_j \quad (4.5)$$

où le vecteur  $\boldsymbol{\eta}_j$  est de dimension  $n \times 1$  et dont le  $i$ -ème élément est le carré de la norme de la différence entre les vecteurs  $\mathbf{f}_i$  et  $\mathbf{y}_i$ , c'est-à-dire

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} (\mathbf{f}_1 - \mathbf{y}_1)^T (\mathbf{f}_1 - \mathbf{y}_1) \\ (\mathbf{f}_2 - \mathbf{y}_2)^T (\mathbf{f}_2 - \mathbf{y}_2) \\ \vdots \\ (\mathbf{f}_n - \mathbf{y}_n)^T (\mathbf{f}_n - \mathbf{y}_n) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

La règle de mise-à-jour de l'équation 4.5 dirige la fonction  $e(\boldsymbol{\beta})$  vers sa valeur minimale. La rapidité de l'atteinte du minimum dépend du facteur d'amortissement  $\lambda$ . Plus il est faible, plus la grandeur du pas est petite et les pas sont plus grossiers pour les grandes valeurs de  $\lambda$ .

Sommairement, la valeur de la fonction  $e(\boldsymbol{\beta})$  pour l'estimé initial du vecteur des paramètres  $\boldsymbol{\beta}$  est d'abord calculée. Ensuite, le vecteur  $\boldsymbol{\beta}$  est corrigé selon l'équation 4.5 et la valeur de la fonction  $e(\widehat{\boldsymbol{\beta}})$  pour cet estimé est calculée. Si la valeur de la fonction diminue grâce aux paramètres estimés, la mise-à-jour est acceptée et le facteur d'amortissement est diminué. Dans le cas contraire, les paramètres n'optimisent pas la fonction alors le facteur  $\lambda$  est augmenté pour converger plus rapidement vers la solution. Cela est répété pour un nombre prédéterminé d'itérations pour obtenir les paramètres qui minimisent la fonction.

## 4.4 Présentation de l’algorithme

L’algorithme présenté dans ce chapitre a comme objectif de déterminer la pose d’un objet tridimensionnel saisi par un préhenseur robotique équipé de capteurs tactiles et d’encodeurs rotatifs. Le schéma global des étapes de l’algorithme est présenté à la figure 4.3. Il peut être décomposé en deux étapes distinctes. Avant tout, les signaux des deux types de capteurs sont analysés lors de l’étape de traitement des données. Cette étape résulte en un nuage de points qui représente la distribution et la force relative des contacts mesurés. Ce nuage de points est l’intrant de l’algorithme.

La première phase exploite le nuage de points précédemment généré pour générer des hypothèses de poses pondérées. L’orientation hypothétique est générée aléatoirement et les hypothèses de positions associées, si elles existent, sont calculées. Par la suite, toutes les hypothèses générées sont comparées entre elles et les meilleures sont soumises à une évaluation plus poussée. Cette évaluation plus poussée constitue la deuxième étape de l’algorithme. Au cours de cette seconde passe d’évaluation, les hypothèses sont à nouveau comparées et celle qui se distingue le plus du lot est désignée comme celle qui représente la pose réelle de l’objet.

Le traitement des données des capteurs est présenté à la section 4.5 et toutes les étapes relatives à l’estimation de la pose à la section 4.6.

## 4.5 Traitement des données

Afin de pouvoir estimer la pose d’un objet, un traitement préliminaire doit être effectué une fois. Les objets saisis par le préhenseur en vue d’estimer leur pose sont tous connus. De plus, leur modèle en trois dimensions est disponible via leur fichier CAO. Plus précisément, l’information exploitée pour l’estimation de la pose présentée dans ce chapitre est contenue dans le fichier *.STL* des objets, fichier qui comprend un ensemble de triangles générés à la surface de l’objet d’intérêt. Lors de cette étape de traitement préliminaire, le fichier STL est exploité pour générer plusieurs points à la surface et dans le volume de l’objet. Ces deux nuages de points sont utiles pour l’estimation de la pose et ils ne sont générés qu’une seule fois puis conservés en mémoire par la suite. La méthode employée pour générer les nuages de points est présentée à l’annexe A.2.

La pose des objets saisis par le préhenseur robotique est estimée à partir des signaux tactiles et de l’orientation des phalanges. L’objectif du traitement des données des deux types de capteurs est d’obtenir des données utiles pour l’estimation. Comme cela a été fait aux deux chapitres précédents, la méthode utilisée pour représenter les mesures des capteurs consiste à générer un nuage de points, où chaque point du nuage représente une position probable d’un point de contact entre l’objet saisi et le préhenseur. Ce nuage est généré car la position exacte des points de contact sur un élément tactile ne peut pas être connue uniquement à partir de

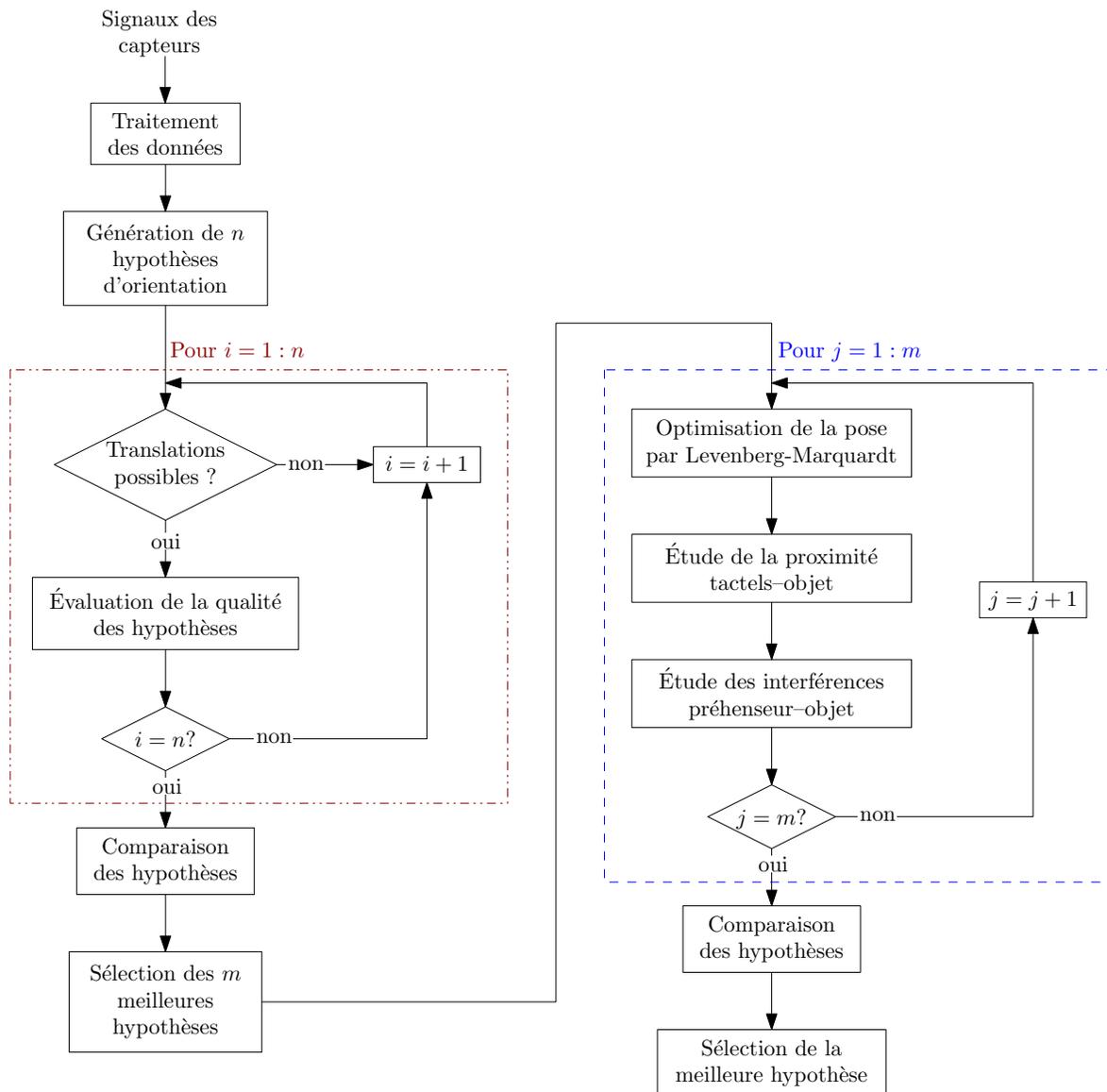


FIGURE 4.3 – Diagramme de l’algorithme d’estimation de la pose dans l’espace en trois dimensions développé pour les expérimentations avec la Main Robotiq 3 Doigts.

la mesure de la capacité des capteurs tactiles.

La distribution des points qui forment ce nuage de points dépend de la force enregistrée par chacun des éléments tactiles, de la dimension des ceux-ci, puis de l'incertitude des mesures angulaires des phalanges. La figure 4.4 illustre les facteurs qui influencent la position de chaque point généré pour représenter un contact entre un élément tactile et un objet et toutes les explications relatives à la méthode sont données dans les paragraphes qui suivent. La méthode appliquée ici pour la génération du nuage de points est essentiellement comme la méthode présentée à la section 3.5, sauf qu'il y a une dimension supplémentaire à considérer. À la gauche de la figure, les trois distributions sélectionnées pour générer un point dans l'espace d'un tactel sont présentées. À la droite, la distribution qui représente l'imprécision des encodeurs est présentée, de même que les positions extrêmes que peut prendre une phalange lorsque la mesure a une erreur égale à la précision du capteur.

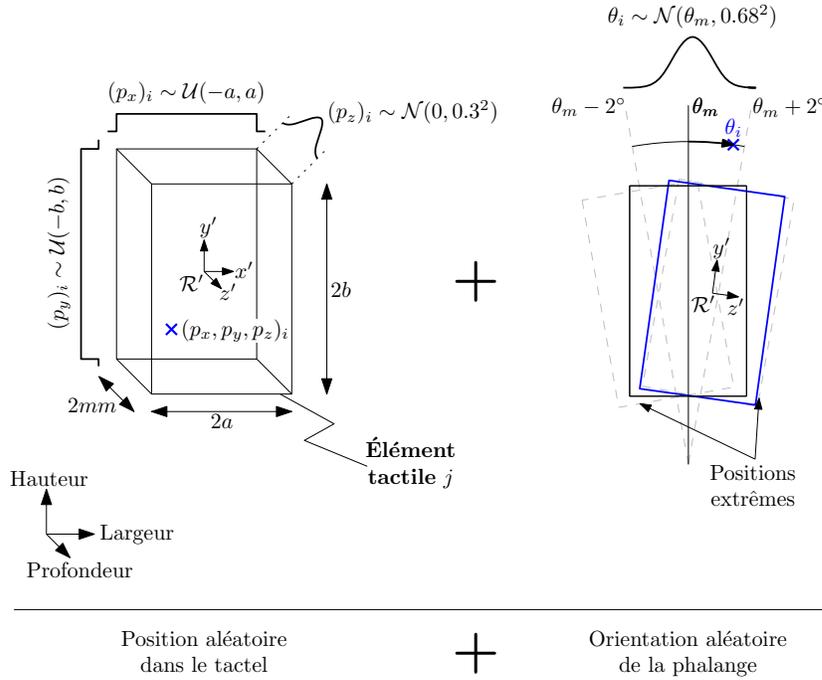


FIGURE 4.4 – Distributions utilisées pour la génération d'un point  $\mathbf{p}_i$  dans l'espace d'un élément tactile  $j$ , où  $i = 1, 2, \dots, n_j$ ,  $n_j$  est le nombre de points à générer pour le tactel  $j$  et  $j = 1, 2, \dots, m$  avec  $m$  le nombre de tactels qui détectent un contact.

Soit un point  $\mathbf{p}_i$  généré à proximité de l'élément tactile  $j$ , où  $j = 1, 2, \dots, m$  et  $m$  est le nombre total de tactels qui ont détecté un contact. Le nombre de points générés pour le tactel  $j$  est proportionnel au signal mesuré, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la force qui lui a été appliquée. Le signal  $s_j$  de tous les éléments tactiles est normalisé par le plus grand signal mesuré  $s_{max}$ , donnant la force relative, notée  $f_j$ , enregistrée à chaque tactel, soit

$$f_j = \frac{s_j}{s_{max}} . \quad (4.7)$$

Le nombre de points générés au tactel qui a mesuré le plus grand signal  $s_{max}$  est de 250. Ce nombre maximal de points à générer pour un tactel a été sélectionné arbitrairement en requérant que l'espace de ce tactel soit bien couvert par les points. Pour les autres éléments tactiles, le nombre de points  $n_j$  est proportionnel à la force relative calculée

$$n_j = 250f_j . \quad (4.8)$$

Pour ce qui est de la position de chacun des points  $\mathbf{p}_i$  générés pour l'élément tactile  $j$ , elle est tirée de quatre distributions. En se référant au dessin à la gauche de la figure 4.4, la position de  $\mathbf{p}_i = [p_x, p_y, p_z]_i^T$  dans la direction  $x'$  et  $y'$  est tirée des distributions uniformes

$$(p_x)_i \sim \mathcal{U}(-a, a) \quad (4.9)$$

et

$$(p_y)_i \sim \mathcal{U}(-b, b) . \quad (4.10)$$

Ici, l'élément tactile est de largeur  $2a$  et de hauteur  $2b$ . Comme il n'y a pas a priori un endroit sur la surface d'un tactel plus probable qu'un autre pour expliquer le contact détecté, les distributions uniformes sont appropriées pour la répartition des points dans ces directions.

La position dans la direction de l'axe  $z'$  de l'élément tactile, c'est-à-dire dans la direction normale de l'élément tactile, est quant à elle tirée d'une distribution normale de moyenne nulle et d'écart type égal à  $0.3mm$ , c'est-à-dire

$$(p_z)_i \sim \mathcal{N}(0, 0.3^2) . \quad (4.11)$$

Comme il avait été discuté à la section 3.5.2, cette distribution a été sélectionnée pour représenter la compression d'un tactel en contact avec un objet. En toute logique, la position d'un point de contact dans cette direction dépend directement de la force appliquée. Toutefois, l'étalonnage de la compression en fonction de la force appliquée n'a pas été effectué, puisque la compression maximale du capteur n'est que de  $2mm$ . Comme la dimension est très petite, la position du point de contact obtenue de l'étalonnage ne serait pas significativement différente de celle obtenue de la distribution uniforme de l'équation 4.11, d'où son utilisation ici.

Le dernier élément qui influence la position de  $\mathbf{p}_i$  est l'incertitude des mesures de la position angulaire des phalanges, notée  $\theta_m$ . Cette incertitude est évaluée à  $\pm 2^\circ$  et pour la considérer une distribution normale est choisie. La distribution est centrée sur la valeur mesurée  $\theta_m$  et s'étend au maximum à  $\pm 2^\circ$  de cette valeur ce qui équivaut à un écart type d'environ  $0.68^\circ$ , à savoir

$$\theta_i \sim \mathcal{N}(\theta_m, 0.68^2) . \quad (4.12)$$

Les trois premières distributions sont combinées à la dernière donnant ainsi la position finale de  $\mathbf{p}_i$

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{Q}_x(\theta_i) \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}_i \quad (4.13)$$

où  $\mathbf{Q}_x(\theta_i)$  est la matrice de rotation élémentaire autour de l'axe des  $x$  d'un angle  $\theta_i$ .

La procédure décrite ci-haut est répétée  $n_j$  fois pour chacun des  $m$  tactels qui ont détecté un contact. Cela a pour résultat un nuage de points qui représente bien la distribution de tous les contacts détectés et de leur force relative, tout en respectant la précision des capteurs. Ce nuage de points est utilisé comme point de départ pour l'estimation de la pose présentée dans la section qui suit.

## 4.6 Estimation de la pose

À ce point, les mesures des capteurs sont traitées résultent en un nuage de points représentatif de la distribution et de la force des contacts détectés. Également, le traitement préliminaire appliqué aux objets fournit un nuage de points qui couvre la surface de l'objet saisi et un deuxième nuage confiné dans le volume de l'objet. La figure 4.5 présente un exemple des éléments disponibles jusqu'ici. Plus précisément, une image de la saisie d'un objet est montrée à la figure 4.5a. La configuration du préhenseur et le nuage de points résultant du traitement de données apparaissent à la figure 4.5b. Les nuages de points générés à la surface et à l'intérieur de l'objet saisi sont respectivement aux figures 4.5c et 4.5d, où l'objet a également été tracé par souci de clarté. Ces éléments sont tous utilisés pour tenter d'identifier la pose de l'objet saisi et seront discutés plus en détails au moment opportun.

Avant d'entrer dans le détail de l'estimation de la pose, deux autres éléments qui servent aussi à estimer la pose sont introduits. D'abord, à partir des mesures d'orientation des phalanges, un nuage de points est généré à l'intérieur du préhenseur, près de la surface interne qui interagit avec les objets saisis. Un total de 94 points sont produits, soit 8 par phalange distale et médiane, 10 par phalange proximale et 16 pour la région de la paume. Le résultat apparaît à la figure 4.6a, où les 94 points sont illustrés par des sphères turquoise.

Également, un point par tactel qui détecte un contact est sélectionné du nuage de la figure 4.5b et un exemple des points sélectionnés est montré à la figure 4.6b. Chaque losange mauve est associé à un des points sélectionnés. Sur cette figure, trois vecteurs sont aussi tracés en rouge. Ces derniers relient des paires de points de contact relativement distants l'un de l'autre et sont utilisés plus loin par l'algorithme.

La stratégie appliquée pour estimer la pose implique encore une fois la génération d'hypothèses, puis leur vérification, tel que cela peut être observé à la figure 4.3. Contrairement aux deux

autres algorithmes d'estimation de la pose présentés jusqu'ici, le type d'hypothèse posé ici varie. Cette fois, des hypothèses de pose sont directement formulées de manière aléatoire et elles sont également pondérées. Les détails de cette étape sont exposés à la section 4.6.1. Les hypothèses les mieux pondérées sont sélectionnées pour passer à l'étape suivante qui consiste en une évaluation plus poussée des hypothèses, cela est discuté à la section 4.6.2.

#### 4.6.1 Formulation des hypothèses

Dans l'espace tridimensionnel, le nombre de paramètres à déterminer pour représenter complètement la configuration d'un corps solide est de six. Pour la formulation d'hypothèses dans ce chapitre, il est souhaité qu'elles soient des hypothèses de pose, où trois paramètres indiquent l'orientation du corps rigide et trois autres indiquent sa position. De surcroît, il est souhaité qu'elles soient générées aléatoirement, par opposition aux hypothèses de concordance posées dans les deux autres chapitres. Puisque l'espace formé par les six paramètres de pose est de grande dimensionnalité, il serait très coûteux de formuler aléatoirement suffisamment d'hypothèses de pose en six dimensions pour espérer que toutes les poses possibles soient représentées. De plus, comme chaque hypothèse formulée doit être évaluée, le temps de traitement serait onéreux.

Pour simplifier le tout, deux problèmes à trois dimensions sont plutôt considérés. L'orientation de l'objet est générée aléatoirement et il est ensuite vérifié s'il est possible de saisir l'objet dans cette orientation à partir des mesures des capteurs. Les trois paramètres associés à l'orientation de l'objet sont donc générés aléatoirement et s'ils existent, les paramètres de positionnement sont trouvés de manière logique. En combinant ces paramètres, des hypothèses de pose en six dimensions sont obtenues. Quelques vérifications rapides sont ensuite effectuées pour chacune de ces hypothèses afin d'identifier les plus prometteuses. L'étape de la génération aléatoire d'orientation, de la recherche de translations possibles et l'évaluation rapide sont détaillées dans les sections qui suivent.

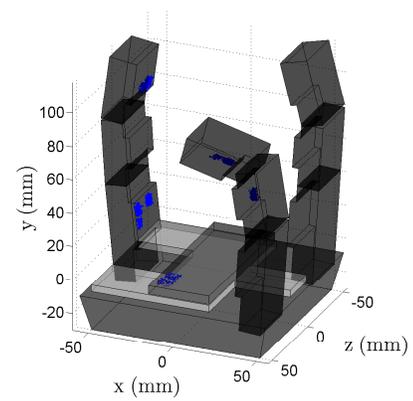
#### Génération d'hypothèses d'orientation

L'orientation d'un corps rigide peut être représentée par une matrice de rotation. Pour générer des hypothèses d'orientation de l'objet, la représentation des matrices de rotation est ici employée. Puisque l'approche utilisée par l'algorithme d'estimation de la pose consiste à générer des hypothèses et de sélectionner la plus prometteuse suite à l'évaluation, il est primordial que toutes les orientations possibles de l'objet soient représentées pour que la pose de l'objet soit trouvée.

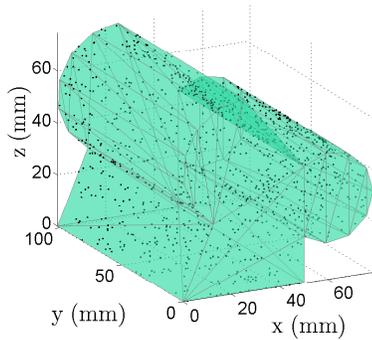
Pour que tout l'espace des rotations soit représenté, il faut que les matrices de rotation soient uniformément distribuées dans cet espace tridimensionnel. La méthode de (Miles, 1965) est exploitée à cet effet pour générer les matrices de rotation. Une matrice de rotation peut être définie selon plusieurs conventions. Une convention pratique décrit l'orientation d'un corps



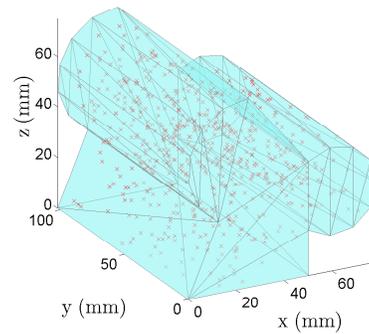
(a) Saisie de l'objet.



(b) Configuration du préhenseur et le nuage complet des points de contact en bleu.

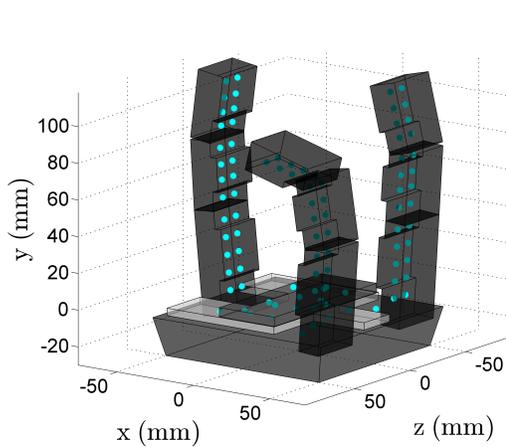


(c) Nuage de points de surface de l'objet.

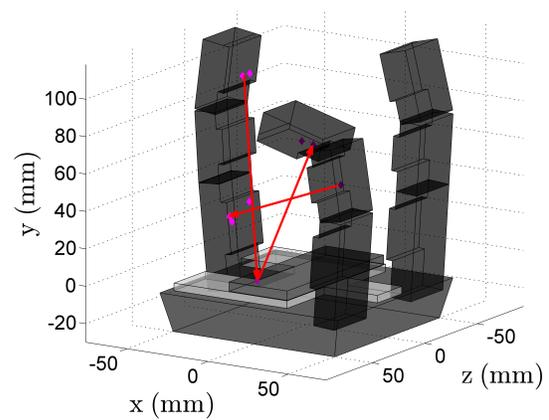


(d) Nuage de points interne de l'objet.

FIGURE 4.5 – Éléments disponibles pour l'estimation de la pose.



(a) Nuage de points interne du préhenseur.



(b) Nuage partiel des points de contact et trois vecteurs contact-contact.

FIGURE 4.6 – Points générés à l'intérieur et à la surface du préhenseur.

rigide à l'aide d'un axe de rotation unique et d'une amplitude de rotation unique autour de cet axe. La matrice de rotation  $\mathbf{Q}$  définie selon cette convention s'écrit

$$\mathbf{Q} = \mathbf{e}\mathbf{e}^T + \cos\theta(\mathbf{I} - \mathbf{e}\mathbf{e}^T) + \sin\theta(\mathbf{I} \times \mathbf{e}) . \quad (4.14)$$

Ici,  $\mathbf{I}$  est la matrice identité de dimension 3,  $\mathbf{e}$  est un vecteur colonne unitaire qui est défini dans la direction de l'axe de rotation et  $\theta$  est l'amplitude de la rotation autour de l'axe  $\mathbf{e}$ . L'exposant  $(\cdot)^T$  indique la transposée du vecteur et le symbole  $\times$  le produit vectoriel.

La méthode proposée dans (Miles, 1965) indique comment générer le vecteur unique  $\mathbf{e}$  et l'angle de rotation unique  $\theta$  pour obtenir une distribution uniforme des matrices de rotation. Plus spécifiquement, les règles suivantes sont respectées pour la génération aléatoire des matrices de rotation

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \cos\phi \sin\psi \\ \sin\phi \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$(\theta, \phi) \sim \mathcal{U}(0, 2\pi) \quad (4.16)$$

$$\psi = \arccos(2\alpha - 1) \quad (4.17)$$

$$\alpha \sim \mathcal{U}(0, 1) \quad (4.18)$$

où  $\mathcal{U}(a, b)$  indique une distribution uniforme entre les valeurs  $a$  et  $b$ .

La procédure expliquée aux paragraphes précédents est effectuée à  $n$  reprises, formant  $n$  hypothèses d'orientation pour l'objet saisi. Cela correspond au troisième bloc de la figure 4.3 nommé *Génération de  $n$  hypothèses d'orientation*. La prochaine étape, décrite à la section suivante, complète les hypothèses d'orientation avec des hypothèses de translation, formant des hypothèses de pose.

## Recherche de translations possibles

Chaque hypothèse générée doit être testée pour déterminer celle qui concorde le mieux avec les mesures des capteurs. Les hypothèses sont pour le moment partielles, c'est-à-dire qu'elles concernent uniquement trois des six paramètres de pose. Avant de compléter les hypothèses par les trois paramètres de position manquants, une vérification est effectuée pour éliminer d'emblée les hypothèses qui concernent des orientations impossibles. Par orientation impossible, il est entendu que certaines orientations de l'objet sont incohérentes avec la configuration du préhenseur. En d'autres mots, il n'est pas possible que l'objet ait été saisi dans cette orientation et ça ne vaut pas la peine d'approfondir l'évaluation de cette hypothèse. Un exemple illustrant cela est présenté à la figure 4.7. À la gauche de l'image, le préhenseur est dans la configuration conforme aux mesures des encodeurs et, au centre ainsi qu'à la droite de l'image, l'objet apparaît dans deux orientations aléatoires. Celle du centre est impossible car elle occasionnerait une interférence importante avec les phalanges alors que celle de droite est a priori probable.

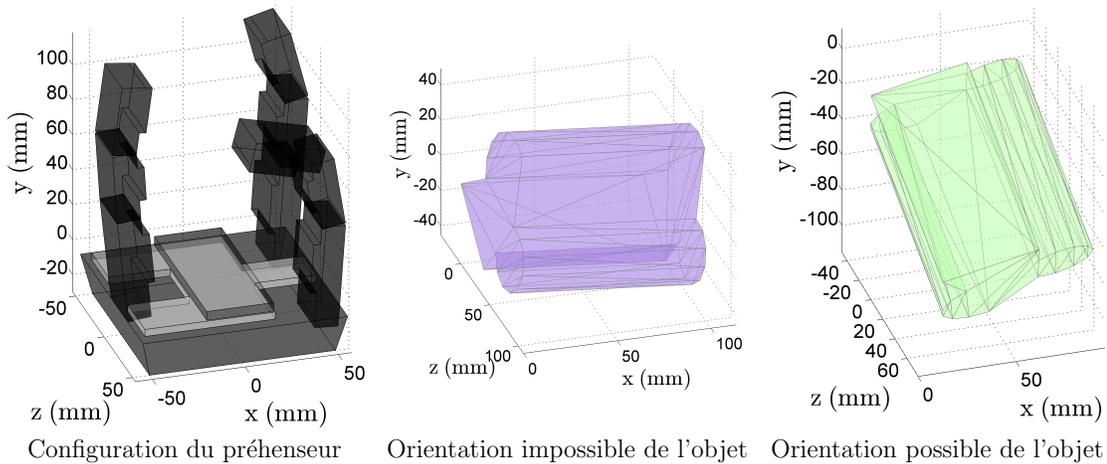


FIGURE 4.7 – Exemple d'une hypothèse d'orientation impossible (centre) et une autre possible (droite) compte tenu de la configuration du préhenseur (gauche).

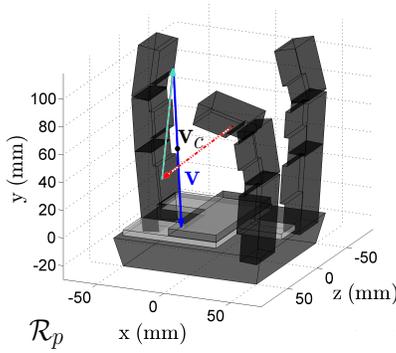
Afin d'éliminer rapidement les hypothèses d'orientation peu probables sachant la configuration du préhenseur, il est vérifié s'il y a un ou des endroits où peut être saisi l'objet pour chaque orientation hypothétique. Cette recherche permet d'atteindre deux objectifs du même coup, soit d'éliminer les hypothèses d'orientation impossibles et dans l'autre cas de compléter les hypothèses de pose avec les positions possibles de l'objet.

La méthode développée pour atteindre ces objectifs utilise la distance et l'orientation de trois paires de points de contact. Un exemple des trois vecteurs dont il est question est présenté à la figure 4.6b. Un point par tactel en contact est sélectionné et, parmi ceux-ci, six points distants sont sélectionnés et forment les trois vecteurs de la figure 4.6b. Également, il est supposé que les six points (trois vecteurs) sont causés par un contact entre le préhenseur et l'objet.

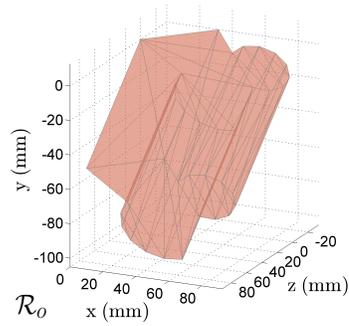
Pour qu'une orientation hypothétique soit probable, il faut qu'il y ait au moins une position sur l'objet qui permette d'accueillir chacun de ces vecteurs. Pour vérifier s'il y a de telles positions pour l'objet dans une orientation hypothétique, une projection de l'objet est effectuée dans trois plans perpendiculaires aux trois vecteurs. Un exemple de projection dans un plan perpendiculaire à l'un des trois vecteurs est présenté à la figure 4.8.

À la figure 4.8a, les trois vecteurs *contact-contact* apparaissent de couleurs et styles de ligne différents. Celui qui est utilisé pour la suite de l'exemple est le vecteur en ligne pleine bleue noté  $\mathbf{v}$ . À la figure 4.8b, l'objet est dans une orientation hypothétique et pour savoir si cette orientation a du potentiel, l'objet est projeté dans le plan perpendiculaire au vecteur  $\mathbf{v}$ . Le résultat de cette opération apparaît à la figure 4.8c. Le plan de projection, noté  $x'y'$ , est défini dans un repère  $\mathcal{R}'$  et la direction de  $\mathbf{v}$  figure aussi sur cette image.

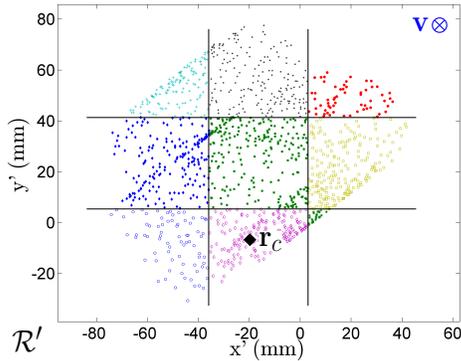
Le plan de projection est divisé en neuf régions, où les régions sont séparées sur l'image par un trait noir et différents styles de points et différentes couleurs sont utilisés pour les points



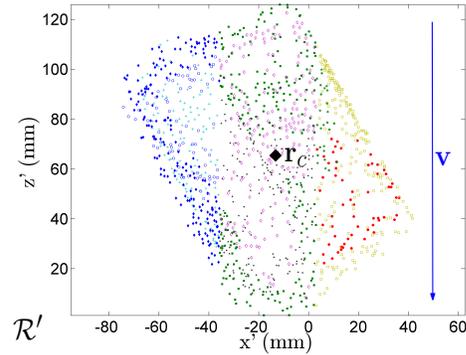
(a) Configuration du préhenseur et les trois vecteurs *contact-contact*.



(b) Orientation hypothétique de l'objet.



(c) Plan de projection  $x'y'$  perpendiculaire au vecteur  $\mathbf{v}$ .



(d) Plan concourant au vecteur  $\mathbf{v}$  et perpendiculaire au plan de projection.

FIGURE 4.8 – Procédure de recherche de translations possibles.

des diverses régions. Pour chacune des régions, on vérifie si l'écart entre la valeur minimale et maximale selon l'axe  $z'$  est similaire à la grandeur du vecteur  $\mathbf{v}$ . À la figure 4.8d, l'objet apparaît dans son orientation hypothétique projetée dans le plan  $x'z'$ , où l'axe  $z'$  est parallèle à  $\mathbf{v}$  mais de direction opposée. Si l'écart entre la valeur minimale et maximale dans la direction de l'axe  $z'$  d'une région est similaire à la norme de  $\mathbf{v}$ , il est probable que cette région ait causé les points de contacts qui forment les extrémités de  $\mathbf{v}$ . À ce moment, la position moyenne de la région, notée  $\mathbf{r}_c$ , est calculée et il est supposé qu'elle concorde avec le centre du vecteur  $\mathbf{v}$ , noté  $\mathbf{v}_c$ . La position de  $\mathbf{v}_c$  apparaît à la figure 4.8a et le centre  $\mathbf{r}_c$  d'une des régions qui peut accueillir  $\mathbf{v}$  apparaît aux figures 4.8c et 4.8d.

Cette procédure est effectuée pour les trois vecteurs *contact-contact*. Lorsqu'une région semble probable, la translation  $\mathbf{t}_{rv}$  qui sépare  $\mathbf{r}_c$  de  $\mathbf{v}_c$  est calculée et enregistrée en prenant soin de trouver la position  $\mathbf{r}_c$  dans le repère de l'objet  $\mathcal{R}_o$ , car elle est actuellement définie dans le repère de projection  $\mathcal{R}'$ .

Finalement, pour qu'une hypothèse d'orientation soit complétée d'une hypothèse de position, il faut que les translations  $\mathbf{t}_{rv}$  trouvées pour les trois vecteurs *contact-contact* soient

similaires. Si les trois translations trouvées diffèrent trop, cette orientation ne permet pas de satisfaire les exigences des trois vecteurs à la fois, ce qui revient à dire que l'orientation hypothétique de l'objet ne lui permet pas d'être saisi par le préhenseur dans cette configuration.

## Évaluation de la qualité des hypothèses

À ce point, les hypothèses de pose en six dimensions sont complètes : les hypothèses d'orientation aléatoires probables sont complétées par une ou des hypothèses de position. Dans l'autre cas, les hypothèses d'orientation ont été abandonnées. Pour compléter les hypothèses de pose, il est souhaité d'effectuer une évaluation rapide et partielle de la qualité de chacune pour par la suite pouvoir concentrer les efforts sur celles qui semblent les plus prometteuses.

Avant tout, dans cette section, cinq nuages de points sont utilisés et il est important de bien les différencier. Un exemple de tous les nuages a été présenté aux figures 4.5 et 4.6. Par souci de clarté, chacun d'eux est revu sommairement ici. D'abord, à la figure 4.5b est présenté le nuage de points représentatif des contacts détectés par les capteurs, celui-ci est appelé *nuage complet des points de contact*. Ce dernier permet de créer le *nuage partiel des points de contacts* qui compte uniquement un point appartenant à chaque élément tactile qui détecte un contact. Un exemple d'un tel nuage est présenté à la figure 4.6b. Également, deux nuages de points représentent la géométrie de l'objet saisi, soit le *nuage de points de surface de l'objet* et le *nuage de points interne de l'objet* qui apparaissent respectivement aux figures 4.5c et 4.5d. Finalement, le nuage de points qui apparaît à la figure 4.6a est appelé *nuage de points interne du préhenseur*. L'implication de chacun de ces nuages est discutée dans les paragraphes qui suivent.

Avant l'évaluation des hypothèses, la position hypothétique est corrigée à l'aide du *nuage partiel des points de contact*. La translation qui relie chacun de ces points à leur plus proche homologue à la surface de l'objet est calculée et l'objet est déplacé selon la moyenne de toutes ces translations. Cette correction repositionne l'objet pour limiter les interférences et rendre l'évaluation subséquente plus représentative.

Concernant l'évaluation sommaire de la qualité des hypothèses, elle porte sur la proximité entre les points de contact et l'objet dans sa pose hypothétique, puis sur l'interférence possible entre le préhenseur et l'objet. Plus précisément, sept éléments sont étudiés et concernent trois distances différentes. Ces dernières sont introduites ci-dessous et un exemple qui explicite chacune apparaît à la figure 4.9 :

- $\mathbf{d}_{\text{contact-objet}}$  : vecteur qui contient la distance entre chaque point du *nuage partiel des points de contact* et le plus proche voisin du *nuage de points de surface de l'objet* ;
- $\mathbf{d}_{\text{interne-objet}}$  : vecteur qui contient la distance entre tous les points du *nuage de points interne de l'objet* et la surface de l'objet ;

—  $\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}}$  : vecteur qui contient la distance entre tous les points du *nuage de points interne du préhenseur* et le plus proche voisin du *nuage de points interne de l'objet*.

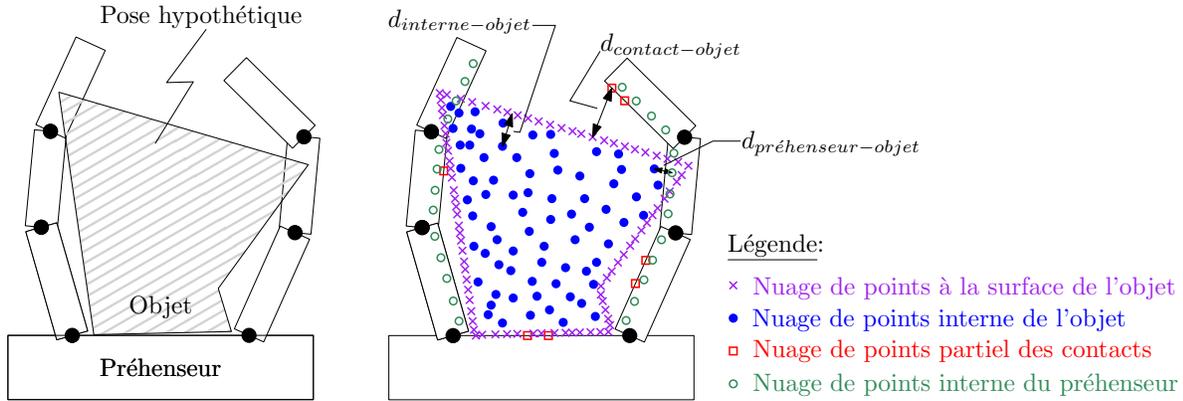


FIGURE 4.9 – Explication des trois distances utilisées pour l'évaluation rapide des hypothèses de pose et des divers nuages de points.

Sur la figure 4.9, un exemple en deux dimensions est présenté par simplicité. Un objet quelconque dans une pose hypothétique est présenté à la gauche, de même qu'une schématisation du préhenseur dans une configuration conforme aux mesures des encodeurs. Au centre, quatre nuages de points apparaissent avec des marqueurs de différents styles et de différentes couleurs. Un exemple de chacune des distances énoncées plus haut apparaît aussi.

Chacune de ces distances informe grandement sur la qualité d'une prise. Rapidement, la signification de chacune d'elles est discutée pour mieux comprendre le sens des sept critères d'évaluation qui sont énoncés dans les prochains paragraphes. D'abord, une faible distance  $\mathbf{d}_{\text{contact-objet}}$  indique que les tactels qui ont détecté des contacts sont près de l'objet. Sachant que le *nuage partiel des points de contact* est causé par des contacts entre l'objet et le préhenseur, cette proximité est souhaitée. Ensuite, une grande distance  $\mathbf{d}_{\text{interne-objet}}$  indique qu'un point du *nuage de points interne de l'objet* est loin de la surface de cet objet. Ainsi, si un point du *nuage de points interne du préhenseur* est à proximité d'un point de l'objet loin de sa surface, une interférence importante est présagée. D'autre part, une faible distance  $\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}}$  implique qu'au moins une zone interne du préhenseur est très près de l'intérieur de l'objet. Il y a donc présence d'une interférence qui est plus ou moins grave tout dépendant de si elle survient avec un point près ou loin de la surface de l'objet.

Les sept critères, qui concernent les trois distances décrites ci-haut, étudiés pour chaque hypothèse sont les suivants :

1.  $\bar{\mathbf{d}}_{\text{contact-objet}}$  : distance moyenne entre les points de contact et l'objet ;
2.  $\max(\mathbf{d}_{\text{contact-objet}})$  : distance maximale entre les points de contact et l'objet ;
3.  $\#(\mathbf{d}_{\text{contact-objet}} \leq 10\text{mm})$  : nombre de points de contact à moins de 10 mm de l'objet ;

4.  $\#(\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}} \leq 5\text{mm})$  : nombre de paires de points *intérieur du préhenseur-intérieur de l'objet* distantes de moins de 5mm ;
5.  $\bar{\mathbf{d}}_{\text{interne-objet}}(\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}} \leq 5\text{mm})$  : pour les points du *nuage de points interne de l'objet* à moins de 5mm d'un point appartenant au *nuage de points interne du préhenseur*, distance moyenne entre ces points et la surface de l'objet ;
6.  $\max(\mathbf{d}_{\text{interne-objet}}(\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}} \leq 5\text{mm}))$  : pour les points du *nuage de points interne de l'objet* à moins de 5mm d'un point appartenant au *nuage de points interne du préhenseur*, distance maximale entre ces points et la surface de l'objet ;
7.  $\#(\mathbf{d}_{\text{interne-objet}}(\mathbf{d}_{\text{préhenseur-objet}} \leq 5\text{mm}) > 5\text{mm})$  : nombre de points du *nuage de points interne de l'objet* à moins de 5mm d'un point appartenant au *nuage de points interne du préhenseur* et qui sont eux même à plus de 5mm de la surface de l'objet.

En résumé, les trois premiers critères caractérisent la distance entre les points de contact détectés et la surface de l'objet. Le quatrième critère vérifie s'il y a une interférence entre le préhenseur et l'objet. Les trois derniers critères sont nuls si aucune interférence n'est notée au quatrième critère. Dans le cas où l'objet et le préhenseur interfèrent, la position des points à l'intérieur de l'objet par rapport à la surface de l'objet est étudiée par les critères 5 à 7.

Pour faciliter la compréhension des trois derniers critères, un exemple est présenté à la figure 4.10. Sur celle-ci, une section d'un doigt du préhenseur et une section d'un objet dans une pose hypothétique apparaissent. Également, trois points appartenant au *nuage de points interne de l'objet* et trois points du *nuage de points interne du préhenseur* sont présentés. Pour cet exemple, une importante interférence entre le préhenseur et l'objet est notée au critère 4. D'ailleurs, les paires de points *préhenseur-objet* qui sont à proximité sont encerclées. La proximité entre les points  $O_2 - P_2$  et  $O_3 - P_3$ , qui apparaissent sur l'image, n'est par critique, puisque  $O_2$  et  $O_3$  sont très près de la surface de l'objet. La proximité entre  $O_1 - P_1$  est quant à elle plutôt problématique, car  $O_1$  est loin de la surface de l'objet. Ainsi, au cinquième critère la moyenne de la distance entre les points  $O_1, O_2$  et  $O_3$  et la surface de l'objet serait calculée car ils sont très près des phalanges. Pour le sixième critère, la distance maximale correspondrait à celle entre  $O_1$  et la surface de l'objet. Finalement, pour le dernier critère seul  $O_1$  serait visé car il est loin de la surface de l'objet.

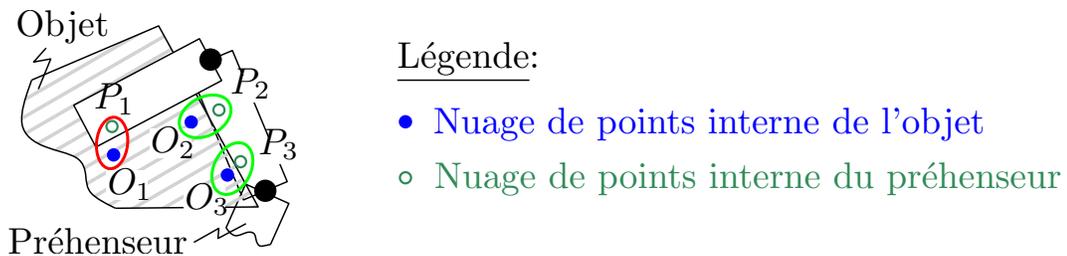


FIGURE 4.10 – Exemple de points du *nuage de points interne du préhenseur* à proximité de points du *nuage de points interne de l'objet*.

Pour toutes les poses hypothétiques, la performance face aux sept critères énoncés est notée. Par la suite, la qualité de chaque hypothèse par rapport aux autres est calculée en comparant le résultat obtenu pour les sept critères d'évaluation de toutes les hypothèses. Plus précisément, les valeurs obtenues pour chacun des critères sont pondérées pour que la variation soit sur une échelle 0 – 1, où 0 indique que l'hypothèse est très peu probable selon ce critère et les valeurs près de 1 indiquent le contraire. Le résultat normalisé pour les sept critères est ensuite additionné et donne la qualité relative des hypothèses. Plus le chiffre obtenu est grand, plus une hypothèse performe bien par rapport aux autres. Les meilleures sont donc sélectionnées pour passer à l'étape suivante qui évalue plus en profondeur la probabilité de ces hypothèses.

En comparant la qualité des hypothèses les unes face aux autres, il n'est pas nécessaire d'établir des valeurs seuils comme c'était le cas pour les deux autres algorithmes. Les valeurs seuils sont souvent spécifiques aux objets saisis et dépendent de plusieurs facteurs, il est donc avantageux de ne pas en dépendre.

#### 4.6.2 Évaluation des hypothèses

À la section 4.6.1, des hypothèses d'orientation ont d'abord été générées. L'étape suivante consistait à vérifier pour chaque hypothèse s'il était possible que l'objet dans cette orientation ait été saisi connaissant la configuration du préhenseur. Pour les cas où c'était possible, des hypothèses de position de l'objet ont été formulées. Lorsqu'une orientation n'était pas possible, l'hypothèse était éliminée évitant ainsi des efforts de calculs inutiles. La dernière étape présentée dans cette section décrit l'évaluation sommaire des hypothèses de pose formulées. Cette évaluation, qui est basée sur la proximité des capteurs tactiles et de l'objet puis sur l'interférence entre l'objet et le préhenseur, permet d'identifier les hypothèses les plus prometteuses.

Une évaluation plus complète destinée aux hypothèses les plus prometteuses est présentée ici. Premièrement, les hypothèses de pose sont optimisées à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt introduit à la section 4.3. Ensuite, la proximité entre les points de contact et l'objet, l'interférence entre l'objet et le préhenseur et les corrections angulaires à appliquer aux phalanges pour éliminer les interférences sont étudiées pour identifier l'hypothèse de pose la plus probable parmi celles qui ont été générées. Chacune de ces étapes d'évaluation est discutée plus en détails dans les paragraphes qui suivent.

#### Optimisation Levenberg-Marquardt

La méthode de Levenberg-Marquardt optimise une fonction non-linéaire en minimisant un critère d'erreur qui dépend des paramètres de la fonction. Cette optimisation mène aux paramètres qui minimisent le critère d'erreur et requiert un estimé initial des paramètres de la fonction. La procédure est itérative ; à chaque itération les paramètres sont modifiés selon une jacobienne (équation 4.4) et la modification est enregistrée seulement si ces paramètres

permettent de diminuer l'erreur par rapport à l'itération précédente. Ici, la fonction dépend de six paramètres, qui sont contenus dans le vecteur des paramètres  $\boldsymbol{\beta}$ , soit ceux associés à la pose hypothétique

$$\boldsymbol{\beta} = [t_x, t_y, t_z, \phi, \theta, \psi]^T \quad (4.19)$$

où  $t_x$ ,  $t_y$  et  $t_z$  sont les trois composantes qui indiquent la position hypothétique de l'objet et  $\phi$ ,  $\theta$  et  $\psi$  sont les trois angles qui définissent son orientation selon la convention *ZYZ* (voir section 1.2.2).

Le critère d'erreur développé dépend de la proximité des points de contact et de l'objet ainsi que de l'interférence entre l'objet et le préhenseur. Le critère d'erreur introduit à l'équation 4.1 s'écrit

$$e(\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \| (\mathbf{y}_p)_i - (\mathbf{f}_o(\boldsymbol{\beta}))_i \|^2 = \sum_{i=1}^n \eta_i \quad (4.20)$$

avec  $(\mathbf{y}_p)_i$  l'objectif à atteindre et qui concerne le préhenseur et  $(\mathbf{f}_o(\boldsymbol{\beta}))_i$  la fonction qui dépend des paramètres de la pose et qui doit tendre vers l'objectif  $(\mathbf{y}_p)_i$  pour minimiser le critère d'erreur.

Une hypothèse de pose qui représente bien la pose réelle de l'objet doit être à proximité des éléments tactiles qui détectent un contact et ne doit pas interférer avec le préhenseur. Ces deux éléments sont donc intégrés au critère d'erreur de l'équation 4.20. Soit le vecteur  $\boldsymbol{\eta}$  de dimension  $n \times 1$  pour lequel chaque élément est le carré de la norme de la différence entre l'objectif et la fonction qui dépend de la pose. Les  $k$  premiers éléments du vecteur concernent la proximité entre l'objet et le préhenseur et les  $l$  derniers concernent l'interférence, où  $k + l = n$ . Ce vecteur s'écrit

$$\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\beta}) = [\eta_i]_{n \times 1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{\eta}_a)_{k \times 1} \\ (\boldsymbol{\eta}_b)_{l \times 1} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

et ses deux composantes sont définies ci-dessous.

D'abord, les  $k$  points du *nuage partiel des points de contact* sont utilisés. Pour chacun d'eux, notés  $(\mathbf{y}_p)_k$ , le plus proche voisin du *nuage de points de surface de l'objet*, noté  $(\mathbf{p}_o)_k$  dans le repère local de l'objet, est trouvé. La transformation qui minimise la distance entre  $(\mathbf{y}_p)_k$  et  $(\mathbf{p}_o)_k$  est recherchée. De plus, plus la force de contact enregistrée à un tacle est grande, plus il est important que l'objet soit à proximité dans cette région. À la section 4.5, les forces de contact enregistrées ont été normalisées et sont notées  $f_k$ . En combinant tous ces éléments, il est possible de définir mathématiquement la minimisation de la distance *tactel-objet* souhaitée et qui constitue le premier bloc de l'équation 4.21, soit

$$\boldsymbol{\eta}_a = \begin{bmatrix} f_1 \|(\mathbf{y}_p)_1 - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_1 + \mathbf{t})\|^2 \\ f_2 \|(\mathbf{y}_p)_2 - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_2 + \mathbf{t})\|^2 \\ \vdots \\ f_k \|(\mathbf{y}_p)_k - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_k + \mathbf{t})\|^2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

où  $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$  et  $\mathbf{Q}$  est la matrice de rotation obtenue selon la convention  $ZYZ$  et les paramètres hypothétiques  $\phi$ ,  $\theta$  et  $\psi$ , ces six paramètres sont ceux qui constituent le vecteur  $\boldsymbol{\beta}$ .

Pour ce qui est du deuxième bloc de l'équation 4.21, il concerne la possible interférence entre l'objet dans sa pose hypothétique et le préhenseur. Pour chacune des neuf phalanges, si l'objet est dans une pose qui interfère avec une phalange, le point appartenant au *nuage de points de surface de l'objet* qui s'éloigne le plus de la surface interne des phalanges est trouvé et est noté  $(\mathbf{p}_o)_l$  dans le repère local de l'objet. Ensuite, le point appartenant à la surface de la phalange qui en est le plus près est trouvé et noté  $(\mathbf{y}_p)_l$ . Pour éliminer l'interférence observée et ainsi minimiser le critère d'erreur,  $(\mathbf{y}_p)_l$  et  $(\mathbf{p}_o)_l$  doivent être près l'un de l'autre. Mathématiquement, cela s'écrit

$$\boldsymbol{\eta}_b = \begin{bmatrix} \|(\mathbf{y}_p)_1 - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_1 + \mathbf{t})\|^2 \\ \|(\mathbf{y}_p)_2 - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_2 + \mathbf{t})\|^2 \\ \vdots \\ \|(\mathbf{y}_p)_l - (\mathbf{Q}(\mathbf{p}_o)_l + \mathbf{t})\|^2 \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

En résumé, pour les hypothèses les plus prometteuses selon les critères établis à la section 4.6.1, l'optimisation Levenberg-Marquardt est effectuée. Les paramètres initiaux à optimiser sont les six paramètres de pose de chaque hypothèse. Ces paramètres initiaux donnent l'erreur initiale calculée avec l'équation 4.20. À chaque itération, les paramètres sont modifiés selon l'équation 4.5 qui est réécrite ici

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_{j+1} = \hat{\boldsymbol{\beta}}_j - [\mathbf{J}_j^T \mathbf{J}_j + \lambda_j \text{diag}(\mathbf{J}_j^T \mathbf{J}_j)]^{-1} \mathbf{J}_j^T \boldsymbol{\eta}_j \quad (4.24)$$

où la Jacobienne s'écrit

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial \boldsymbol{\beta}} \quad (4.25)$$

avec  $\boldsymbol{\beta}$  est tel que définit à l'équation 4.19 et le vecteur  $\boldsymbol{\eta}$  est défini à l'aide des équations 4.21, 4.22 et 4.23. Les paramètres sont modifiés dans la direction du gradient, afin de trouver les paramètres qui minimisent la fonction de l'équation 4.20. Lorsque des paramètres diminuent l'erreur, ils sont conservés en mémoire jusqu'à ce que de nouveaux paramètres minimisent plus le critère d'erreur, ou encore jusqu'à ce que le nombre maximal d'itérations soit atteint.

### Étude de la proximité *objet-préhenseur*

L'optimisation Levenberg-Marquardt effectuée à l'étape précédente a permis de corriger les hypothèses de pose en positionnant l'objet de manière optimale par rapport aux éléments tactiles qui ont détecté des contacts et en cherchant à éliminer l'interférence avec le préhenseur. Cette évaluation est néanmoins très locale, puisqu'elle ne considère qu'un point de contact par élément tactile et un point de l'objet qui interfère avec chaque phalange. L'étude effectuée ici considère une plus grande quantité de données pour évaluer si globalement les hypothèses de pose correspondent avec les mesures des capteurs.

Pour chaque hypothèse de pose, 300 points sont pigés du *nuage complet des points de contact* de manière aléatoire. Le plus proche voisin de ces 300 points est trouvé dans le *nuage de points de surface de l'objet* et la distance séparant les 300 paires de points est calculée puis enregistrée dans le vecteur  $\mathbf{d}_{tactel-objet}$ . Diverses caractéristiques de ce vecteur sont étudiées pour identifier l'hypothèse la plus probable :

1.  $\bar{\mathbf{d}}_{tactel-objet}$  : distance moyenne entre les éléments tactiles et le plus proche point sur l'objet ;
2.  $\sigma(\mathbf{d}_{tactel-objet})$  : écart type de la distance entre les éléments tactiles et le plus proche point sur l'objet ;
3.  $\max(\mathbf{d}_{tactel-objet})$  : distance maximale entre les éléments tactiles et le plus proche point sur l'objet ;
4.  $\#(\mathbf{d}_{tactel-objet} \leq 5mm)$  : nombre de paires *point de contact-objet* distantes de moins de 5mm ;
5.  $\#(\mathbf{d}_{tactel-objet} \leq 10mm)$  : nombre de paires *point de contact-objet* distantes de moins de 10mm.

D'abord, la distance moyenne entre les tactels et l'objet, l'écart type de la distance et la distance maximale devraient toutes être faibles pour une hypothèse qui représente bien la pose réelle de l'objet (critères 1, 2 et 3). D'autre part, de telles hypothèses devraient avoir un nombre élevé de paires de points distantes de moins de 5mm et 10mm (critères 4 et 5).

### Étude de l'interférence entre l'objet et le préhenseur

En toute logique, une hypothèse probable ne devrait pas causer d'interférence avec le préhenseur. L'étude de l'interférence pour l'objet dans une pose hypothétique et le préhenseur est donc un bon indicatif de la qualité d'une hypothèse. Ainsi, pour les points du *nuage de points de surface de l'objet* qui interfèrent le plus avec chacune des phalanges du préhenseur, la distance est calculée et inscrite dans le vecteur  $\mathbf{d}_{itf}$ . Également, la correction angulaire qui devrait être appliquée aux phalanges proximales pour éliminer ces interférences non-souhaitables est calculée et enregistrée dans la matrice  $\boldsymbol{\theta}_{itf}$ . Seule la correction angulaire pour les phalanges proximales est calculée, car ce sont les interférences les plus critiques et elles sont un bon indicatif de la qualité d'une hypothèse de pose.

Les caractéristiques étudiées pour identifier la pose de l'objet et qui concernent l'interférence entre l'objet et le préhenseur sont les suivantes :

1.  $\bar{\mathbf{d}}_{itf}$  : distance d'interférence moyenne entre le préhenseur et l'objet ;
2.  $\max(\mathbf{d}_{itf})$  : distance d'interférence maximale entre le préhenseur et l'objet ;
3.  $\text{dimension}(\mathbf{d}_{itf})$  : nombre de points en interférence détectés ;
4.  $\bar{\boldsymbol{\theta}}_{itf}$  : correction angulaire moyenne à appliquer aux phalanges proximales pour éliminer les interférences entre l'objet et le préhenseur.

Par rapport aux trois premiers paramètres, une hypothèse de pose qui représente bien la pose réelle devrait générer peu d'interférences avec le préhenseur, donc la distance moyenne d'interférence devrait être la plus petite possible, tout comme la distance maximale. Dans le même ordre d'idées, les corrections angulaires à apporter aux phalanges proximales pour qu'il n'y ait plus d'interférence devraient être minimales.

## Évaluation de la qualité des hypothèses

Aux pages précédentes, les trois étapes d'évaluation de l'algorithme d'estimation de la pose sont présentées, soit l'optimisation Levenberg-Marquardt, l'étude de la proximité entre les capteurs tactiles et l'objet, ainsi que l'interférence entre le préhenseur et l'objet saisi. Il est maintenant souhaité de comparer entre elles les hypothèses de pose par rapport à leur performance aux diverses étapes d'évaluation, pour identifier celle qui satisfait le mieux les critères établis. Pour résumer ces critères, pour un objet dans une pose hypothétique qui représente bien la pose réelle de l'objet, il est attendu que les éléments tactiles qui détectent un contact soient près de l'objet. De même, une telle hypothèse n'occasionne pas d'interférence entre l'objet et le préhenseur. Cela se traduit entre autres par l'obtention d'une faible erreur lors de l'optimisation Levenberg-Marquardt.

À ce point, plusieurs indicatifs de la qualité d'une hypothèse de pose sont disponibles et il faut déterminer la façon de les exploiter et de les combiner. L'évaluation sommaire présentée à la section 4.6.1 informe au préalable sur la qualité d'une hypothèse. La première étape d'évaluation de la section 4.6.2 donne accès à un élément de comparaison supplémentaire pour les hypothèses : l'erreur Levenberg-Marquardt associée à chacune. Par rapport à la proximité *objet-préhenseur*, cinq caractéristiques ont été notées et peuvent être exploitées ici. Également, trois caractéristiques sont disponibles suite à l'étude des interférences, en plus de la correction angulaire moyenne requise pour éliminer les interférences.

Les résultats obtenus pour chaque étape sont normalisés pour que les variations soient sur une échelle unitaire comprise entre 0 et 1. Par la suite, les résultats sont combinés pour former le poids final associé à chaque hypothèse. Plus précisément, le poids de chaque hypothèse, noté  $W$ , est calculé en additionnant la performance moyenne normalisée à chaque étape d'évaluation, soit

$$W = a + b + c + d + e \quad (4.26)$$

où  $a$  est le poids de l'hypothèse qui a été calculé suite à sa génération,  $b$  est l'erreur Levenberg-Marquardt normalisée,  $c$  est la performance moyenne des cinq critères de proximité normalisée,  $d$  est la performance moyenne des trois critères d'interférence normalisée et  $e$  est la correction angulaire moyenne normalisée. Il est important de mentionner que la combinaison linéaire est ici sélectionnée arbitrairement en supposant que chaque facteur est d'une importance égale aux autres. En pratique, il est fort probable que l'utilisation de combinaisons non-linéaires et

d’algorithmes d’apprentissage automatique permettrait d’obtenir une combinaison optimale des divers paramètres et d’identifier plus nettement les meilleures hypothèses.

## 4.7 Résultats

Pour valider le bon fonctionnement de l’algorithme décrit aux sections précédentes, ce dernier a été exécuté à de multiples reprises. D’abord, à l’aide du montage expérimental présenté à la section 4.2, les objets présentés aux sections 3.2.4 et 4.2 ont été saisis de diverses façons et les signaux tactiles générés ont été acquis, puis la configuration du préhenseur notée. Les trois objets présentés à la section 3.2.4 ont été saisis à 19 reprises chacun, selon la stratégie décrite à la section 3.2.5. Pour ces saisies, l’axe principal des extrusions et l’axe de rotation des liaisons rotoïdes du préhenseur sont parallèles, permettant la résolution du problème d’estimation de la pose avec uniquement trois paramètres de pose. Ces trois mêmes objets et le quatrième ont aussi été saisis dans cinq poses différentes chacun, sans stratégie de saisie particulière. Dans ce cas, les six paramètres de pose sont nécessaires pour décrire la configuration de l’objet.

Pour chacune de ces acquisitions de données, l’algorithme d’estimation de la pose présenté dans ce chapitre a été exécuté cinq fois. À la suite d’une exécution de l’algorithme, un poids est associé aux hypothèses de pose. Ce poids, noté  $W$ , indique la qualité d’une hypothèse de pose sur une échelle comprise entre 0 et 1 et est calculé comme il est décrit dans la dernière partie de la section 4.6.2. Le poids maximal est associé à l’hypothèse qui a le mieux satisfait les critères d’évaluation établis et le plus faible à l’hypothèse de pose la moins probable parmi celles qui ont été évaluées. Pour les simulations effectuées, les paramètres de pose de l’hypothèse associée au poids  $W = 1$  sont sélectionnés comme ceux qui représentent la pose de l’objet saisi.

À des fins de comparaison, les paramètres de pose réels de l’objet ont été notés pour chaque saisie. Ainsi, à chaque exécution de l’algorithme il est possible de calculer l’erreur angulaire entre les hypothèses de pose et la pose réelle de l’objet, puis de déterminer si la pose a été correctement estimée. Il a été établi qu’une erreur angulaire inférieure à  $20^\circ$  est acceptable. Conséquemment, pour que la pose soit correctement estimée, il faut que l’hypothèse de pose associée au poids maximal  $W = 1$  ait une erreur angulaire plus petite que  $20^\circ$ .

Les quatre paramètres de simulation apparaissent au tableau 4.1 et les deux premiers apparaissent également sur la figure 4.3. Le premier paramètre, noté  $n$ , indique le nombre d’hypothèses d’orientation aléatoires qui sont générées par l’algorithme (première étape de la section 4.6.1). Suite à la bonification des hypothèses d’orientation par des hypothèses de position (deuxième étape de la section 4.6.1), les hypothèses de pose sont évaluées sommairement et triées selon leur performance aux sept critères établis (troisième étape de la section 4.6.1). Les  $m$  hypothèses qui satisfont le mieux ces critères sont sélectionnées pour passer à l’étape suivante. Le nombre  $m$  est le deuxième paramètre présenté au tableau 4.1. Plus spécifiquement, le nombre d’hypothèses conservées ( $m$ ) est la plus petite valeur entre 500 et 10% du

nombre d’hypothèses de pose générées ( $n$ ). Finalement, les deux paramètres de l’algorithme Levenberg-Marquardt sont donnés, soit le nombre d’itération maximal et le facteur d’amortissement initial, notés  $iter_{LM}$  et  $\lambda_{LM}$  respectivement.

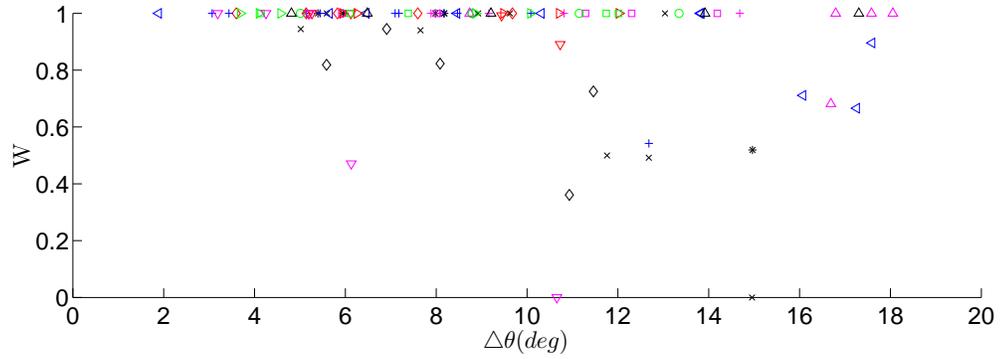
TABLE 4.1 – Paramètres de simulation pour la validation expérimentale de l’algorithme.

Paramètre	Valeur
$n$	12 500
$m$	$\min(0.1n, 500)$
$iter_{LM}$	30
$\lambda_{LM}$	$1 \times 10^5$

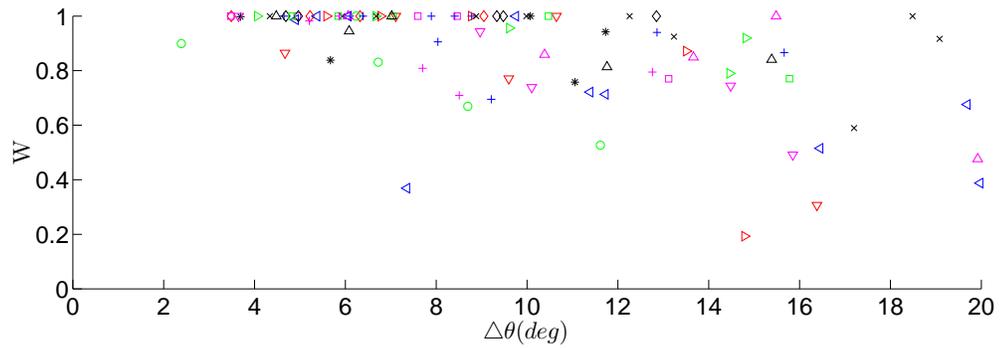
Les résultats des simulations apparaissent aux figures 4.11 et 4.13. La première figure concerne les 3 extrusions saisies 19 fois conformément à la stratégie de la section 3.2.5 et la deuxième figure concerne les quatre objets saisies cinq fois sans stratégie. Chaque graphique correspond à un objet et présente le poids  $W$  des hypothèses de pose ayant une erreur angulaire acceptable ( $\Delta\theta < 20^\circ$ ). Une combinaison d’un symbole et d’une couleur différente pour chaque saisie d’un même objet est utilisée sur les graphiques pour faciliter l’interprétation.

Concernant la figure 4.11, l’hypothèse ayant le poids maximal a une erreur angulaire inférieure à  $20^\circ$  pour 75 des 95 exécutions de l’algorithme avec l’objet 1, 48/95 pour l’objet 2 et 55/95 pour l’objet 3. La première constatation est que le taux de réussite est nettement moins élevé qu’au chapitre 3, alors que la pose en trois dimensions était estimée pour des saisies d’objet similaires. Dans ce cas, pratiquement 100% des exécutions de l’algorithme estimaient la pose avec moins de  $20^\circ$  d’erreur angulaire. Ce taux de réussite plus faible s’explique entre autres par les trois paramètres de pose supplémentaires à déterminer ici. Bien que seulement trois paramètres de pose sont requis pour caractériser la configuration de l’objet, cette information n’est pas connue à priori. L’espace de recherche est donc beaucoup plus important qu’au chapitre précédent et il est plus fastidieux d’obtenir une erreur aussi faible.

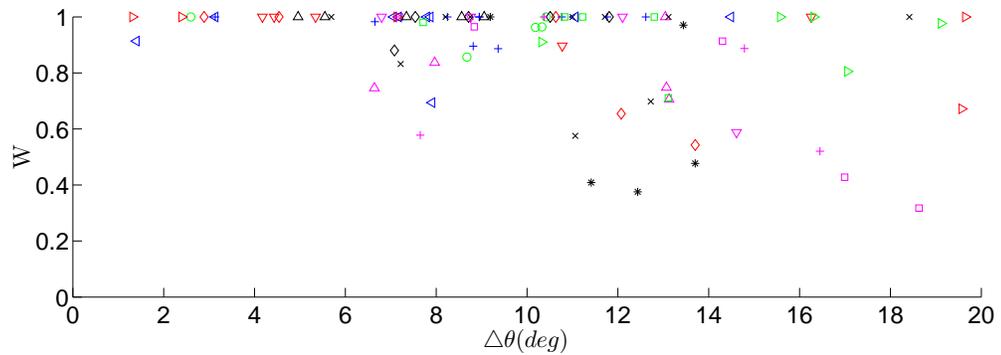
D’autre part, il est intéressant de constater que pour plus de 60% des estimations, l’hypothèse qui satisfait le mieux les critères d’évaluation est très similaire à la pose réelle de l’objet. Généralement, quand l’hypothèse qui a un poids maximal a une grande erreur angulaire (supérieure à  $20^\circ$ ), même pour un humain il serait difficile de distinguer la bonne de la mauvaise hypothèse de pose. En effet, il n’est pas rare qu’une configuration de préhenseur combinée aux éléments tactiles activés par une saisie puissent être causés par plusieurs poses de l’objet. Un exemple d’une telle situation est d’ailleurs présenté à la figure 4.12. À la figure 4.12a est présentée la distribution du poids  $W$  des hypothèses en fonction de l’erreur angulaire  $\Delta\theta$ . Bien que l’hypothèse avec le poids le plus élevé ait une erreur angulaire de près de  $180^\circ$ , des hypothèses avec moins de  $20^\circ$  d’erreur ont un poids très élevé. Deux hypothèses de pose dont



(a) Objet 1.



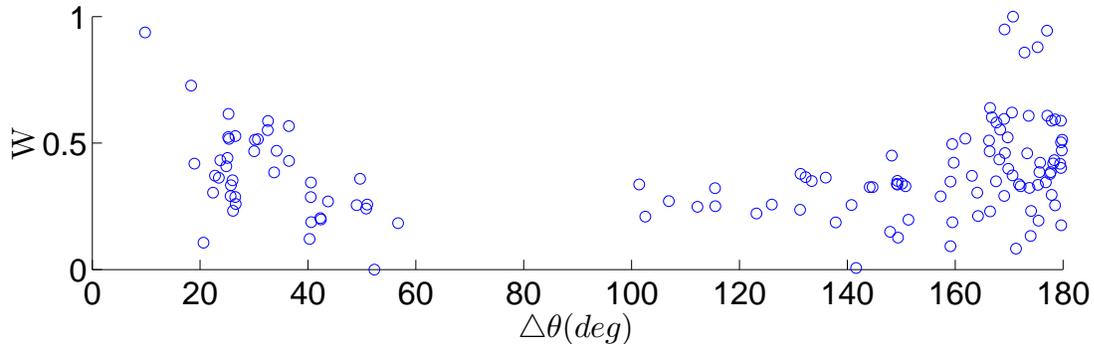
(b) Objet 2.



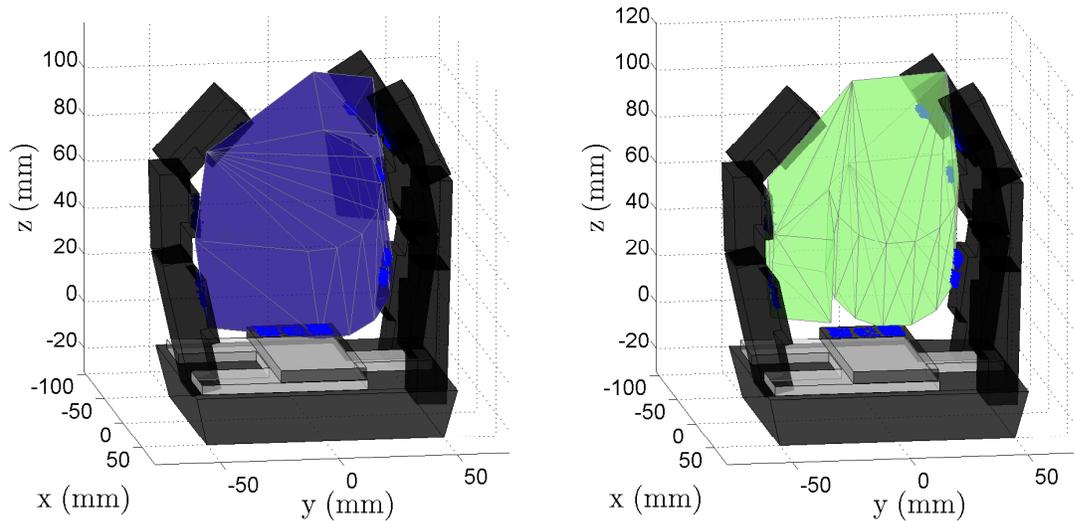
(c) Objet 3.

FIGURE 4.11 – Poids  $W$  en fonction de l'erreur angulaire  $\Delta\theta$  pour 19 poses différentes par objet, avec cinq exécutions de l'algorithme pour chacune.

le poids a été évalué apparaissent aux figures 4.12b et 4.12c. Ne connaissant pas la pose réelle, il est difficile de départager entre ces deux hypothèses celle qui représente le mieux la pose réelle de l'objet, puisqu'elles satisfont aussi bien l'une que l'autre les critères d'interférence et de proximité établis. Pour cet exemple, l'hypothèse de pose de la figure 4.12b est celle qui est associée au poids  $W = 1$  et elle a une grande erreur angulaire. L'hypothèse de pose qui représente le mieux la pose réelle et qui a un poids élevé mais inférieur à 1 est celle présentée à la figure 4.12c.



(a) Résultat d'une exécution de l'algorithme d'estimation de la pose.



(b) Hypothèse de pose avec une grande erreur angulaire. (c) Hypothèse de pose avec une faible erreur angulaire.

FIGURE 4.12 – Exemple d'une estimation de la pose où une hypothèse avec une forte erreur angulaire performe mieux que des hypothèses similaires à la pose réelle de l'objet saisi.

En général, pour chacune des 19 saisies par objet, il est possible d'estimer correctement la pose. Le plus souvent, l'erreur angulaire est sous la barre des  $10^\circ$ . Pour certaines saisies, les cinq essais d'estimation de la pose échouent et une mauvaise hypothèse de pose est sélectionnée. Autrement, s'il est tenté plus d'une fois d'estimer la pose, il y a de fortes chances qu'une bonne

hypothèse soit nommée gagnante, augmentant le taux de réussite de l'algorithme.

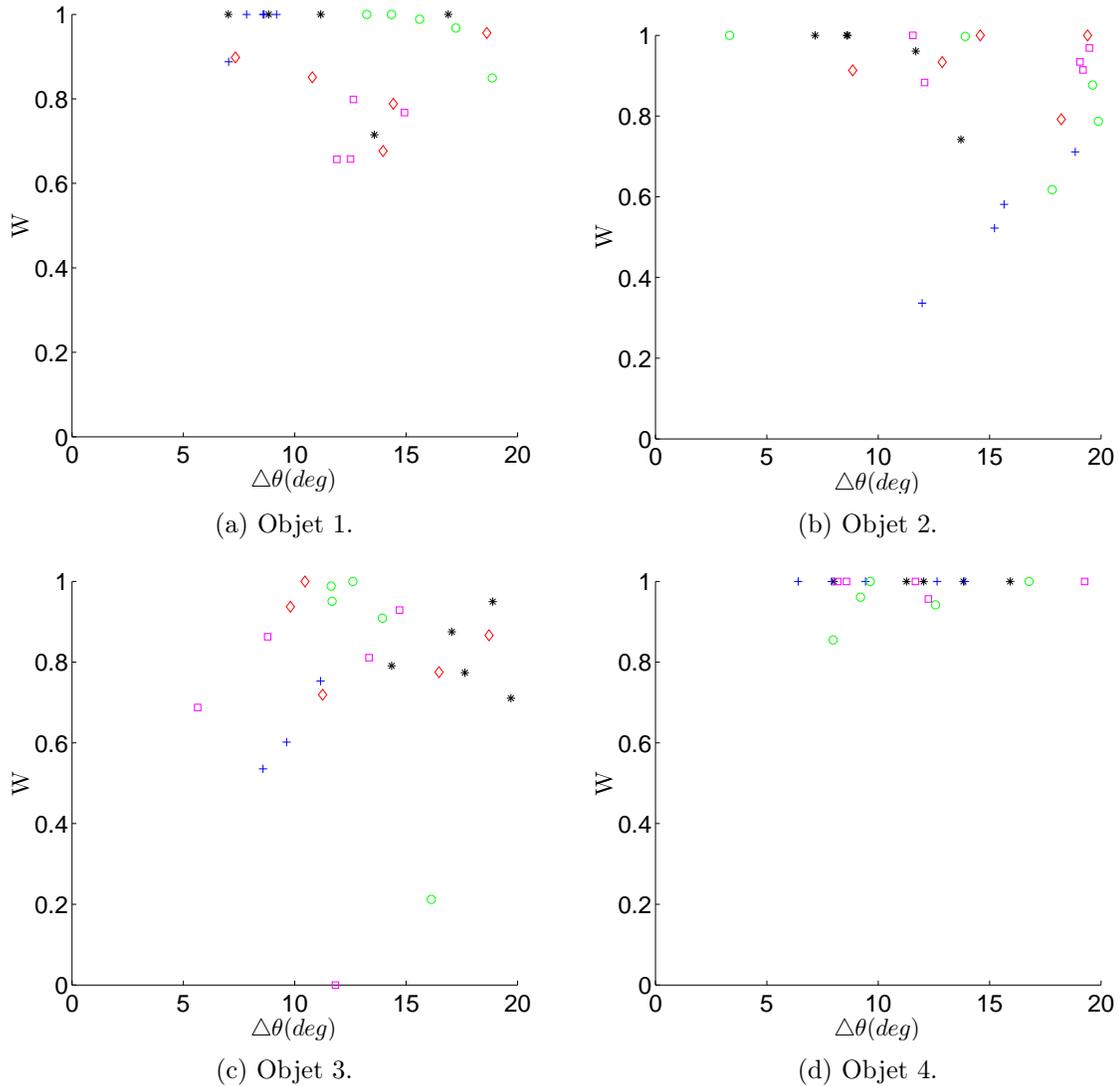


FIGURE 4.13 – Poids  $W$  en fonction de l'erreur angulaire  $\Delta\theta$  pour 5 poses différentes par objet, avec cinq exécutions de l'algorithme pour chacune.

En ce qui concerne les résultats présentés à la figure 4.13, où il n'y a pas de stratégie de saisie, les performances varient d'un objet à l'autre. Pour l'objet 1, l'hypothèse de pose qui a le poids le plus élevé a une erreur angulaire acceptable dans uniquement 10/25 cas. En d'autres mots, à seulement 10 reprises l'hypothèse la plus probable a une erreur angulaire inférieure à  $20^\circ$ . Pour le deuxième objet, ce rapport est de 7/25, 2/25 pour le troisième objet et 16/25 pour l'objet 4.

L'objet pour lequel l'algorithme performe le mieux est le quatrième. Le poids associé aux hypothèses de pose qui ont une faible erreur angulaire est généralement très près de 1 et toujours supérieur à 0.85. Pour cet objet, peu d'ambiguïtés de pose sont possibles, résultant

en de bonnes performances. Un comportement similaire est observé avec l'objet 1. Pour trois des cinq saisies effectuées, le poids est généralement égal ou très près de 1. Les deux autres saisies performant moins bien face aux critères établis. Ces deux saisies pour lesquelles la pose est plus difficile à estimer ont comme point commun que peu de contacts sont générés avec les phalanges et les capteurs tactiles. De plus, les quelques contacts surviennent souvent avec les pourtours des capteurs tactiles. Les zones où les contacts surviennent sont donc peu représentées par les nuages de points générés (section 4.5). Les hypothèses de pose qui sont plus près de la surface des capteurs tactiles performeront mieux au point de vue des critères d'évaluation établis et une mauvaise estimation de la pose en résultera souvent.

Pour l'objet 2, quatre des cinq saisies ont généralement un poids supérieur à 0.80 et pour au moins une des exécutions de l'algorithme pour chaque saisie, la pose est correctement estimée. La saisie pour laquelle l'algorithme n'arrive pas à estimer correctement la pose est similaire aux deux cas évoqués pour l'objet 1. Encore une fois, les contacts surviennent principalement sur les surfaces externes des phalanges et non sur la facette interne où les capteurs tactiles sont installés. Dans les cas similaires à ceux-ci, il est difficile d'estimer la pose uniquement avec une saisie et les deux types de capteurs sélectionnés.

Les performances de l'algorithme avec le troisième objet sont beaucoup moins constantes et peu de succès sont observés. Ce comportement non-souhaité peut s'expliquer par la géométrie de l'objet. Les trois autres objets qui ont été utilisés pour tester l'algorithme ont une géométrie plus irrégulière que l'objet 3. Ces géométries permettent d'éliminer certaines ambiguïtés de pose alors que ce n'est pas le cas pour le troisième objet qui est de forme plutôt régulière. Ce comportement permet de mettre en lumière une catégorie d'objets pour laquelle il est difficile d'estimer la pose en utilisant la formulation du problème présentée en début de chapitre.

Jusqu'ici la discussion sur la performance de l'algorithme est principalement au niveau de l'erreur angulaire entre la pose estimée et la pose réelle. La pose d'un objet en trois dimensions est totalement décrite par six paramètres, dont trois pour le positionnement. Les performances au niveau du positionnement sont omises parce que l'erreur en orientation est beaucoup plus représentative de la qualité d'une estimation de pose ici. Par exemple, si la pose est estimée avec une erreur angulaire de  $40^\circ$ , calculer l'erreur de positionnement n'aurait aucun sens car le repère de référence serait arbitraire. L'erreur en positionnement prend du sens lorsque la pose estimée de l'objet est orientée de manière similaire à la pose réelle. Également, la configuration des doigts et la position des points de contact contraignent la position de l'objet et le positionnent naturellement près de sa position réelle.

Relativement au temps de calcul, une exécution de l'algorithme pour obtenir les résultats de la figure 4.11 prend en moyenne  $(111 \pm 34)$  secondes et  $(94 \pm 23)$  secondes pour la figure 4.13 à l'aide du logiciel Matlab 2011b et d'un processeur de 2.4 GHz. Tel que cela peut être constaté à la figure 4.3, avant d'obtenir un résultat il faut traverser toutes les étapes de l'algorithme pour

être en mesure de comparer les différentes hypothèses et sélectionner la meilleure. Le temps de calcul dépend directement du nombre d'hypothèses qui sont générées. Pour les saisies d'objet de la figure 4.11, il est fréquent que plusieurs hypothèses de position satisfassent une même hypothèse d'orientation. Cela implique l'évaluation d'un plus grand nombre d'hypothèses de pose et rend donc l'obtention du résultat un peu plus long que pour les saisies de la figure 4.13 qui ont moins d'hypothèses de positionnement valables.

## 4.8 Conclusion

Ce quatrième chapitre a comme objectif le développement d'un algorithme permettant d'estimer les six paramètres de pose d'objets connus dans l'espace tridimensionnel et de valider son fonctionnement expérimentalement. Le montage est composé d'un préhenseur robotique sous-actionné, de capteurs tactiles et de deux caméras web qui permettent d'identifier la configuration du préhenseur lors d'une saisie. Quatre différents objets sont saisis par ce système expérimental. L'algorithme a comme paramètres d'entrée les signaux tactiles générés par les contacts entre l'objet saisi et le préhenseur robotique, puis la configuration finale du préhenseur lors de la saisie.

La première étape pour l'atteinte de l'objectif a été de modéliser le système expérimental. Les contacts entre l'objet et le préhenseur sont représentés par un nuage de points. Ce dernier est représentatif de la force des contacts, de leur position, de la dimension des éléments tactiles, puis de l'incertitude sur la configuration finale du préhenseur. Ce traitement des données correspond d'ailleurs à la première étape de l'algorithme développé.

L'algorithme compte deux autres étapes principales : la génération d'hypothèses de pose et leur évaluation. Les hypothèses d'orientation sont générées aléatoirement et lorsque ces orientations d'objet concordent avec les contacts mesurés, les hypothèses de position sont trouvées. Divers critères basés sur la proximité de l'objet et des points de contact ainsi que sur l'interférence entre l'objet et le préhenseur ont été établis. Les hypothèses de pose sont évaluées selon ces critères en utilisant entre autres l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

En vue d'estimer les performances de l'algorithme développé, le préhenseur robotique équipé a saisi les quatre objets dans plusieurs configurations. L'algorithme a ensuite été sollicité à plusieurs reprises pour chaque saisie afin d'estimer la pose de l'objet saisi. Une partie des saisies, soit un total de 285 saisies, sont conformes à la stratégie présentée à la section 3.2.5 et l'autre partie, totalisant 100 saisies, sont saisies par le préhenseur sans une technique particulière.

L'algorithme s'est montré plus efficace pour l'estimation de la pose des 285 premières saisies que pour les 100 autres. En effet, la pose est correctement estimée pour le premier groupe pour plus de 60% des essais. Pour le deuxième groupe, le taux de succès chute à 35%. Ce comportement peu être expliqué entre autres par la contrainte imposée par la configuration du préhenseur

lors d'une saisie. Dans le premier cas, les objets sont très contraints par la configuration du préhenseur et cela permet d'éliminer d'emblée des hypothèses d'orientation impossibles. Dans l'autre situation le préhenseur est généralement moins fermé et la contrainte qui en découle est moins efficace. D'autre part, sans nécessairement identifier la pose avec la plus faible erreur angulaire comme celle représentant le cas réel, ce type d'hypothèses a généralement un poids très élevé et se démarque de la majorité des hypothèses montrant tout de même la pertinence des critères d'évaluation sélectionnés.

Un autre élément qui limite les performances d'estimation de la pose est le nombre et la qualité des contacts entre le préhenseur et l'objet. En toute logique, avec un nombre élevé de contacts et des contacts qui persistent, la saisie est bien représentée et il est plus aisé d'estimer la pose de l'objet. Pour le premier scénario étudié (avec stratégie de saisie), les contacts surviennent uniquement sur les facettes internes du préhenseur robotique, c'est-à-dire sur les surfaces où sont installés les capteurs tactiles. Pour le scénario sans stratégie de saisie, il est fréquent que l'objet touche la surface latérale d'un doigt (et d'un capteur tactile) et qu'un contact soit détecté. Le nuage de points généré pour représenter les contacts n'est pas très représentatif de la situation réelle dans ce cas et résulte souvent en une mauvaise estimation de la pose. En effet, une hypothèse de pose avec une grande erreur angulaire qui est près de la surface de l'élément tactile répond souvent mieux aux divers critères établis et se voit attribuer un meilleur poids.

Pour augmenter les chances de bien estimer la pose avec l'algorithme actuel, une solution serait d'installer quelques éléments tactiles sur les surfaces latérales des doigts. Cela permettrait d'identifier les situations où un contact survient principalement sur une facette latérale d'un doigt et de générer un nuage de points plus représentatif des contacts détectés. Un autre élément qui pourrait augmenter le taux de succès de l'estimation de la pose serait d'avoir des éléments tactiles de plus petite dimension. La position des contacts serait connue avec une meilleure résolution et permettrait de diminuer l'erreur angulaire et de positionnement, tout en limitant les ambiguïtés de pose.

À la vue des résultats, il est plus facile d'estimer la pose d'un objet qui a une géométrie irrégulière à l'aide des capteurs utilisés. En n'effectuant qu'une saisie unique de l'objet et n'ayant pas d'information visuelle, plusieurs configurations peuvent être très similaires au niveau des signaux tactiles générés et de la configuration du préhenseur. Cela laisse donc place à une possibilité d'estimer la pose avec une grande erreur angulaire ou avec une mauvaise précision.

D'autre part, si le temps le permet, en exécutant l'algorithme d'estimation de la pose à plusieurs reprises pour une même saisie, il est plus probable de sélectionner une hypothèse avec une faible erreur angulaire pour représenter la pose de l'objet. Dans le même ordre d'idées, une autre option serait de générer des hypothèses de pose dans le voisinage des hypothèses de

pose qui ont le mieux performé selon le poids  $W$ . En se concentrant dans un deuxième temps sur ces régions de l'espace des poses qui sont les plus probables, les hypothèses de pose avec de faibles erreurs angulaires auraient plus de chance de se démarquer.

Somme toute, il est intéressant d'observer que la pose en six dimensions d'un objet peut être estimée à partir de capteurs tactiles, de la configuration finale du préhenseur robotique et de l'algorithme développé. Le taux de succès n'est pas des plus élevé, mais démontre bien le potentiel et les limitations d'un tel système. Le système expérimental se voulait simple, rapide et tout en un, c'est-à-dire sans système de mesure externe tel qu'un système de vision et sans temps d'attente pour une palpation de l'objet par exemple. Ces requis permettent l'estimation de la pose d'objets pendant leur transport vers leur destination finale, ce qui constitue un avantage notable. En contrepartie, la précision et le taux de succès de cette technique très locale peuvent difficilement compétitionner avec des techniques globales. Les données tactiles et la configuration du préhenseur sont des données locales qui permettent principalement des analyses de distance, de force de contact, etc. Ces informations sont moins riches que les informations globales obtenues lorsqu'un objet est palpé ou encore quand la configuration de l'objet est préalablement acquise par une caméra. Ces techniques globales ouvrent la porte entre autres aux méthodes de suivi (*tracking*) qui peuvent atteindre un très haut taux de succès.



# Conclusion

Les travaux présentés dans ce mémoire contribuent aux avancées dans le domaine de la préhension en robotique. Plus spécifiquement, les efforts ont été concentrés sur le développement d'algorithmes permettant l'estimation de la pose d'objets saisis par un préhenseur robotique. L'un des objectifs de la recherche était d'évaluer le taux de réussite atteignable pour un système minimaliste doté d'un certain sens du toucher et qui ne comprend que des capteurs tactiles et des encodeurs rotatifs comme capteurs. Les seules informations disponibles pour l'estimation de la pose étaient les signaux des deux types de capteurs lors d'une unique saisie d'un objet d'intérêt.

Au chapitre 1, les notions élémentaires concernant la pose d'un objet et son estimation ont été abordées. Les techniques d'estimation de la pose répertoriées dans la littérature ont été résumées. Certains éléments sont ressortis de cette revue littéraire et ont été utilisés pour les algorithmes développés lors des travaux de recherche. Entre autres, les arbres d'interprétation, l'algorithme RANSAC et l'idée de formuler des hypothèses et de les vérifier par la suite sont d'un grand intérêt pour le scénario étudié.

Les premiers travaux présentés dans ce mémoire visaient un système plan de deux doigts à deux phalanges chacun. Le préhenseur équipé a été modélisé dans un environnement de simulation en s'inspirant d'un système réel et en prenant également soin de simuler des capteurs bruités. L'algorithme développé pour le système virtuel combine soigneusement deux techniques connues, soit les arbres d'interprétation et l'algorithme de RANSAC. L'algorithme résultant a comme but d'identifier les segments de l'objet qui ont causé les contacts détectés pour ensuite estimer la pose de l'objet. Quelques critères ont été formulés pour caractériser une pose juste et permettre la convergence de l'algorithme. Son évaluation a ensuite été effectuée en simulant à de multiples reprises la saisie de quatre objets et en tentant d'estimer la pose à chaque fois. Pour le système modélisé qui inclut des capteurs tactiles ayant une résolution spatiale de 2 mm et des encodeurs rotatifs précis au degré près et avec l'algorithme développé, la pose a pu être estimée très précisément. En effet, l'erreur angulaire entre l'orientation réelle de l'objet et son orientation estimée est en moyenne près de  $2^\circ$ . Au niveau de l'erreur de positionnement, elle est en général sous le millimètre.

L'étape suivante a été de développer un algorithme d'estimation de la pose d'objets plans pour

un système expérimental. Le système sélectionné est similaire à celui modélisé au chapitre 2, mais chaque doigt a une phalange de plus, les capteurs tactiles ont une résolution de l'ordre de 5-6 mm et les encodeurs rotatifs sont précis à  $\pm 2^\circ$ . Ce nouveau système a d'abord été modélisé et une méthode pour convertir les signaux enregistrés en des données pertinentes pour l'estimation de la pose est présentée. L'algorithme développé pour ce système s'appuie sur quelques éléments de celui développé au chapitre 2, en plus de combler des lacunes de ce dernier. D'abord, un historique des hypothèses de pose testées a été mis en place pour éviter d'évaluer plus d'une fois des hypothèses semblables. Ensuite, un plus grand ensemble de données générées par les capteurs est utilisé pour l'évaluation de la pose. De plus, des données expérimentales issues de plusieurs saisies d'objet ont été étudiées pour identifier les paramètres qui sont usuellement associés à une pose de bonne qualité. Les valeurs seuils ainsi trouvées ont été implémentées dans l'algorithme pour aider l'estimation. Un algorithme complémentaire a aussi été développé pour les cas où une solution n'est pas trouvée rapidement et compare les mesures actuelles à des mesures précédemment acquises et qui se trouvent dans une base de données. L'algorithme complet a été validé en saisissant à plusieurs reprises quelques objets et dans près de 90% des cas, l'erreur angulaire entre la pose réelle et estimée est inférieure à  $10^\circ$ . En positionnement, l'erreur est inférieure au centimètre. Lorsque l'algorithme complémentaire était appelé pour l'estimation de la pose, l'erreur d'orientation était de moins de  $10^\circ$  et de moins d'un centimètre en positionnement pour 95% des essais. À quelques reprises, la pose a été estimée avec une très grande erreur angulaire en raison du fait que les mesures tactiles et des encodeurs peuvent être très similaires pour quelques poses d'un objet. Cela met en évidence une des limitations du système étudié qui est basé sur la perception tactile.

La troisième étape des travaux de recherche concerne un algorithme d'estimation de la pose pour un système plus complexe que les deux précédemment étudiés. Pour bien maîtriser les rudiments de l'estimation de la pose, deux systèmes plans ont d'abord été analysés. Toutefois, en pratique les systèmes plans sont plutôt rares d'où l'intérêt de concentrer les efforts sur un système spatial, c'est-à-dire en trois dimensions au lieu de deux. La dimension supplémentaire nécessite de trouver six paramètres pour caractériser la configuration d'un objet, par rapport à trois paramètres pour le cas en deux dimensions. Les premiers efforts se sont concentrés sur la modélisation de ce système. Par la suite, une nouvelle méthode de génération d'hypothèses a été considérée pour le cas tridimensionnel. Cette méthode génère des hypothèses de pose directement, au lieu de d'abord générer des hypothèses de concordance. Les orientations hypothétiques sont formulées aléatoirement et les positions hypothétiques sont proposées uniquement lorsque l'orientation semble plausible selon quelques critères. Pour l'étape d'évaluation, les hypothèses compétitionnent entre elles pour identifier la meilleure, en comparaison avec les valeurs seuils utilisées aux autres chapitres. Pour la validation du fonctionnement de l'algorithme, quatre différents objets ont été saisis et la pose a été estimée. Deux types de saisie ont été pratiqués : pour l'une la pose résultante de l'objet peut être décrite avec trois paramètres de pose et pour l'autre six paramètres sont requis. Lorsque l'objet est saisi selon la

première méthode, les résultats d'estimation de la pose sont meilleurs que pour les cas où six paramètres sont nécessaires pour décrire la pose. Dans le premier cas, la pose est estimée avec moins de  $20^\circ$  d'erreur angulaire pour plus de 60% des essais. Pour le deuxième cas, seulement 35% des essais résultent en une erreur angulaire inférieure à  $20^\circ$ . Pour les deux types de prises, l'hypothèse avec la plus faible erreur angulaire a généralement un poids très élevé. Toutefois, une pose avec une grande erreur angulaire a mieux satisfait les critères d'évaluation car les deux catégories de pose ne se distinguent pas suffisamment au niveau tactile.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire mettent en évidence qu'il est possible d'estimer la pose avec un système simpliste basé sur un sens du toucher primitif et une unique saisie d'objet. Le taux de succès est cependant limité et quelques améliorations au système pourraient augmenter le taux de réussite et la précision d'estimation des algorithmes développés. Par exemple, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique pourraient permettre d'identifier les caractéristiques qui distinguent les bonnes des mauvaises hypothèses de pose. Lors des expérimentations, il est malheureusement observé que des hypothèses semblables à la pose réelle de l'objet ont souvent une performance similaire à des hypothèses très erronées, car les données tactiles et la configuration du préhenseur se ressemblent pour les deux types d'hypothèses. Outre l'apprentissage automatique, des éléments tactiles d'une meilleure résolution permettraient de diminuer l'erreur angulaire et de positionnement, tout en augmentant les chances de distinguer une bonne hypothèse d'une mauvaise. Également, en installant des éléments tactiles sur les faces latérales des doigts du préhenseur, l'estimation de la pose serait plus aisée et juste. D'autre part, pour les scénarios où le robot connaît approximativement la configuration de l'objet avant de le saisir, le système tactile permettrait de raffiner la précision de la pose de l'objet à partir de l'algorithme développé.

Une autre difficulté avec les algorithmes développés vient du fait que l'hypothèse de pose la plus probable est sélectionnée pour représenter la pose de l'objet. Donc, pour bien estimer la pose, il faut qu'une hypothèse semblable à la pose réelle de l'objet ait été générée. Cependant, il n'y a aucune certitude qu'une telle hypothèse sera générée et la précision et le succès de l'estimation en sont directement affectés. Sachant que plus il y a un grand nombre d'hypothèses de générées, plus il y a d'hypothèses erronées, plus il faut en évaluer et plus cela est long. En trouvant le compromis optimal entre le nombre d'hypothèses générées et le temps de calcul disponible, la pose pourrait être estimée avec une plus grande constance. Lorsqu'un taux de succès satisfaisant sera atteint par l'algorithme, il serait intéressant de l'inclure dans un système de saisie automatique et éventuellement permettre au robot d'effectuer un plus grand nombre de tâches de façon autonome.



## Annexe A

# Compléments au chapitre 4

Cette annexe présente des notions théoriques exploitées par l'algorithme du chapitre 4. D'abord, le calcul de l'erreur angulaire entre deux matrices de rotation est expliqué. Ensuite, une notion théorique utilisée lors de l'étape de traitement préliminaire de la section 4.5 est introduite. Plus précisément, une méthode permettant de trouver le point d'intersection entre un triangle et un segment semi-infini est présentée. Également, le traitement préliminaire destiné à tous les objets dont la pose est à estimer est décrit en détails dans cette annexe. Ce dernier consiste en la génération de deux nuages de points, l'un à la surface d'un objet quelconque et l'autre dans le volume de l'objet.

## A.1 Notions théoriques

Dans cette section sont présentées deux éléments théoriques qui sont utilisés par l'algorithme du chapitre 4. Premièrement, le changement d'orientation entre deux matrices de rotation est calculé. Cet écart angulaire est utilisé par l'algorithme pour trouver l'erreur angulaire d'estimation de la pose. Dans la deuxième partie, une méthode pour trouver l'intersection entre un triangle et un segment semi-infini est décrite.

### A.1.1 Erreur angulaire entre deux matrices de rotation

L'orientation d'un corps rigide dans l'espace tridimensionnel peut être représentée par une matrice de rotation. Pour évaluer l'algorithme du chapitre 4, il est nécessaire de pouvoir quantifier la différence angulaire entre deux matrices de rotation. Pour ce faire, certaines propriétés des matrices sont exploitées.

D'abord, le produit d'une matrice carrée et de son inverse, notées  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{A}^{-1}$ , a comme résultat la matrice identité  $\mathbf{I}$  de même dimension que  $A$ , soit

$$\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{I} . \quad (\text{A.1})$$

Pour une matrice de rotation  $\mathbf{Q}$ , la transpose et l'inverse, notées  $\mathbf{Q}^T$  et  $\mathbf{Q}^{-1}$  respectivement, sont égales puisqu'une matrice de rotation est par définition une matrice orthogonale. Ainsi, l'équation A.1 s'écrit

$$\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T = \mathbf{I} . \quad (\text{A.2})$$

Soit deux matrices de rotation  $\mathbf{Q}_1$  et  $\mathbf{Q}_2$ . Le résultat de la multiplication de la première avec la transposée de la deuxième est noté  $\mathbf{Q}_3$

$$\mathbf{Q}_3 = \mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_2^T . \quad (\text{A.3})$$

En toute logique, si ces deux matrices de rotation représentent une même rotation, le résultat de l'équation A.3 sera la matrice identité, conformément à l'équation A.2. Toutefois, si elles représentent des changements d'orientation différents,  $\mathbf{Q}_3$  sera seulement une nouvelle matrice de rotation qui représente le changement d'orientation entre  $\mathbf{Q}_1$  et  $\mathbf{Q}_2$ .

Un changement d'orientation peut être représenté par trois rotations successives autour de trois axes prédéfinis, tel que présenté à la section 1.2.2. La matrice de rotation associée à cette transformation peut aussi être représentée par une rotation d'un certain angle autour d'un axe prédéfini. Cet axe de rotation et angle uniques sont appelés les invariants naturels de la rotation et sont notés  $\mathbf{e}$  et  $\phi$  respectivement.

L'axe de rotation  $\mathbf{e}$  associé la matrice  $\mathbf{Q}_3$  s'écrit

$$\mathbf{e} = \frac{\text{vect}(\mathbf{Q}_3)}{\|\text{vect}(\mathbf{Q}_3)\|} \quad (\text{A.4})$$

où  $\| \cdot \|$  désigne la norme euclidienne et  $\text{vect}(\mathbf{Q}_3)$  est l'invariant vectoriel de la matrice  $\mathbf{Q}_3$ , soit

$$\text{vect}(\mathbf{Q}_3) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Q_{32} - Q_{23} \\ Q_{13} - Q_{31} \\ Q_{21} - Q_{12} \end{bmatrix} . \quad (\text{A.5})$$

Quant à lui, l'angle de rotation  $\phi$  qui représente la différence angulaire entre les matrices de rotation  $\mathbf{Q}_1$  et  $\mathbf{Q}_2$  s'écrit

$$\phi = \text{atan2}(\sin \phi, \cos \phi) , \quad (\text{A.6})$$

avec

$$\sin \phi = \| \text{vect}(\mathbf{Q}_3) \| \quad (\text{A.7})$$

et

$$\cos \phi = \frac{\text{trace}(\mathbf{Q}_3) - 1}{2} . \quad (\text{A.8})$$

### A.1.2 Intersection entre un rayon semi-infini et un triangle

Considérant un espace tridimensionnel défini à l'aide d'un repère  $\mathcal{R}$  et en se référant à la figure A.1, un triangle  $\mathcal{T}$  est mathématiquement défini par

$$\mathcal{T} = \mathbf{b} + u\mathbf{e}_0 + v\mathbf{e}_1 \quad (\text{A.9})$$

où  $\mathbf{b}$  est l'origine du triangle,  $\mathbf{e}_0$  et  $\mathbf{e}_1$  sont des vecteurs dont la longueur est égale aux dimensions du triangle et les paramètres  $u$  et  $v$  respectent les conditions  $0 \leq (u, v) \leq 1$  et  $0 \leq (u + v) \leq 1$ .

Un segment semi-infini  $\mathcal{L}$  est quand à lui décrit par

$$\mathcal{L} = \mathbf{c} + t\mathbf{e}_2 , \quad 0 \leq t < \infty \quad (\text{A.10})$$

où  $\mathbf{c}$  est l'origine du segment semi-infini et  $\mathbf{e}_2$  est le vecteur dans la direction du segment.

L'intersection entre un segment semi-infini et un triangle, décrits mathématiquement comme ci-haut, est obtenue en égalant d'abord les deux quantités mathématiques, soit

$$\mathcal{T} = \mathcal{L} , \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbf{b} + u\mathbf{e}_0 + v\mathbf{e}_1 = \mathbf{c} + t\mathbf{e}_2 , \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{0} = (\mathbf{b} - \mathbf{c}) + u\mathbf{e}_0 + v\mathbf{e}_1 - t\mathbf{e}_2 \quad (\text{A.13})$$

où  $\mathbf{0}$  est le vecteur nul. En réorganisant les termes, on obtient

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_0, \mathbf{e}_1, -\mathbf{e}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix} = \mathbf{c} - \mathbf{b} . \quad (\text{A.14})$$

Les paramètres du triangle et du segment qui décrivent l'intersection sont trouvés en inversant le système d'équation de l'équation A.14

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ t \end{bmatrix}_{intersection} = [\mathbf{e}_0, \mathbf{e}_1, -\mathbf{e}_2]^{-1} [\mathbf{c} - \mathbf{b}] \quad (\text{A.15})$$

où les paramètres  $[u, v, t]_{intersection}^T$  sont soumis mêmes conditions que les équations A.9 et A.10.

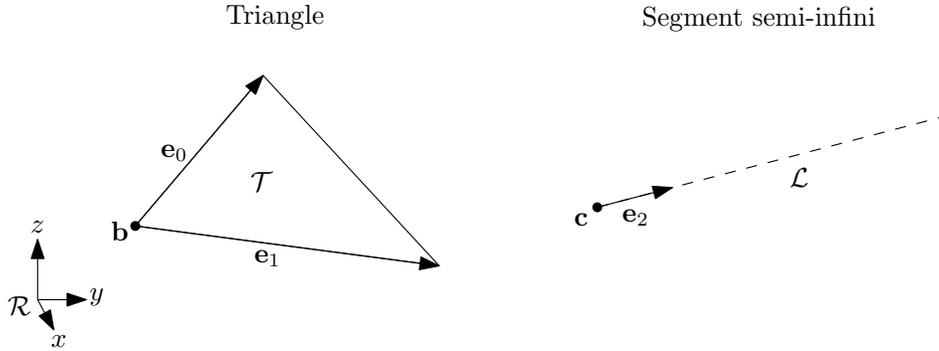


FIGURE A.1 – Modélisation mathématique d'un triangle  $\mathcal{T}$  et d'un segment semi-infini  $\mathcal{L}$  dans un repère orthonormé  $\mathcal{R}$ .

## A.2 Traitement préliminaire

Cette section présente le traitement préliminaire effectué au chapitre 4 qui est appliqué à tous les objets saisis par le préhenseur robotique et dont la pose est à estimer. Ce traitement consiste à transformer le fichier *.STL* de chaque objet en un nuage de points à la surface de l'objet et en un deuxième nuage de points à l'intérieur de l'objet.

### A.2.1 Génération de points à la surface de l'objet

Un objet de forme simple peut avoir des milliers de triangles générés à sa surface pour le représenter. Le nombre de triangles varie d'un objet à l'autre et augmente généralement plus l'objet est de forme complexe. Par la complexité, on entend des objets qui comportent des surfaces courbes, qui sont de grande dimension ou qui comportent beaucoup de détails par exemple.

L'algorithme développé au chapitre 4 s'exécute en deux temps, où des hypothèses sont posées puis évaluées. Au chapitre 3, les hypothèses formulées initialement étaient pour identifier le trio de segments qui accueille un trio de points de contact sélectionné, où l'objet était décrit par une série de segments. En trois dimensions, l'équivalent serait de poser des hypothèses sur l'ensemble de trois facettes de l'objet qui a causé un ensemble de points de contact. À ce moment, le temps d'exécution de l'algorithme développé dépend directement du nombre

de facettes (triangles) qui composent l'objet saisi. Puisque le nombre de triangles varie selon plusieurs paramètres incontrôlables, il est préférable d'avoir une représentation d'objet plus constante pour qu'il en soit de même pour le temps de calcul.

Une option alternative consiste à transformer les triangles qui recouvrent l'objet en un nuage de points. Plusieurs paramètres peuvent être contrôlés en fonction de la précision souhaitée pour la représentation. La technique utilisée pour créer le nuage de points est celle présentée dans (Saff et Kuijlaars, 1997). En résumé, cet article présente une méthode pour répartir uniformément  $N$  points à la surface d'une sphère. En utilisant les coordonnées sphériques  $\theta$  et  $\phi$  où  $0 \leq \theta \leq \pi$  et  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ , les paramètres suivants sont fixés

$$\theta_k = \arccos(h_k), \quad (\text{A.16})$$

$$h_k = -1 + 2 \frac{(k-1)}{(N-1)}, \quad 1 \leq k \leq N, \quad (\text{A.17})$$

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \frac{3.6}{\sqrt{N(1-h_k^2)}} \pmod{2\pi}, \quad 2 \leq k \leq N-1, \quad \phi_1 = \phi_N = 0. \quad (\text{A.18})$$

Pour obtenir la position cartésienne  $(x,y,z)_k$  des  $N$  points répartis uniformément à la surface de la sphère de rayon  $\rho$ , les trois relations suivantes sont utilisées

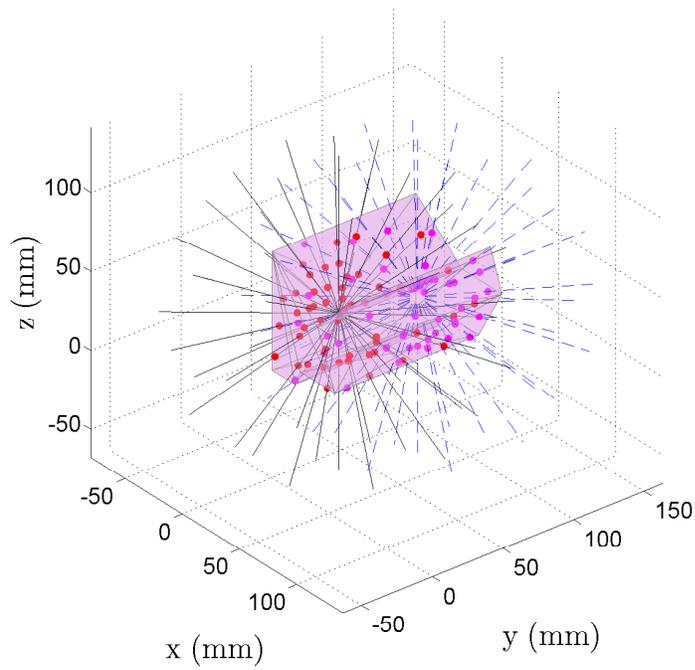
$$x_k = \rho \sin \theta_k \cos \phi_k, \quad (\text{A.19})$$

$$y_k = \rho \sin \theta_k \sin \phi_k, \quad (\text{A.20})$$

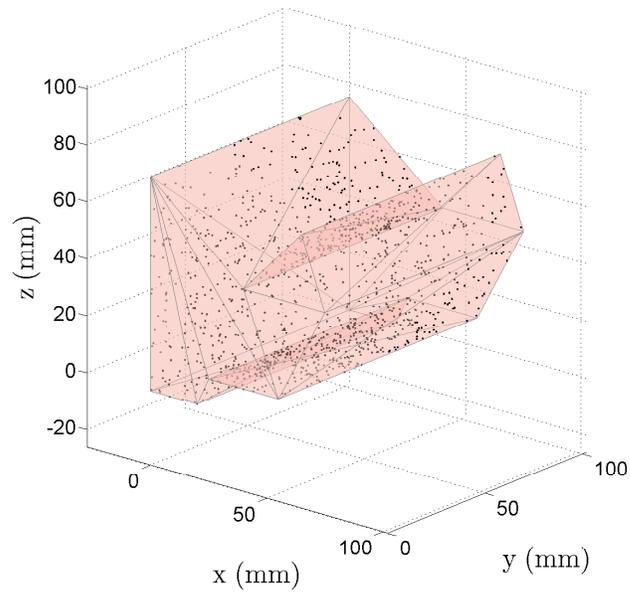
$$z_k = \rho \cos \theta_k. \quad (\text{A.21})$$

Un total de  $k$  sphères de rayon  $\rho$  dont le centre est positionné dans l'espace formé par le volume de l'objet saisi sont générées. Ensuite,  $N_k$  points uniformément distribués sont créés à la surface de chaque sphère. En reliant le centre d'une sphère aux points à sa surface,  $N_k$  segments semi-infinis sont définis pour chaque sphère. L'origine d'un segment est le centre de la sphère et sa direction est donnée par le vecteur reliant le centre à un point de sa surface. L'étape suivante est de trouver l'intersection entre les segments semi-infinis et les triangles qui composent l'objet. Cette étape est achevée à l'aide de la technique présentée à la section A.1.2. À chaque intersection entre les deux entités mathématiques, un point est généré. Ainsi, une grande quantité de points sont créés à la surface de l'objet et en donnent une bonne représentation. Un exemple de cette procédure est illustré à la figure A.2.

D'abord, sur la figure A.2a, deux sphères dont le centre est situé à l'intérieur du volume de l'objet no 1 sont présentées. Par simplicité, les sphères ne sont pas tracées, mais les vecteurs reliant le centre de la sphère aux points générés à sa surface apparaissent. Ces vecteurs ont la même origine que les segments semi-infinis et la même direction. Pour la première sphère, les vecteurs sont en trait continu noir et pour la deuxième le trait est bleu pointillé. Les



(a) Exemple de deux sphères générées et les intersections entre les segments semi-infinis et les facettes qui en résultent.



(b) Exemple du nuage de points résultant.

FIGURE A.2 – Exemple de la transformation des triangles qui forment un objet en un nuage de points à sa surface.

intersections entre les facettes de l'objet et les segments semi-infinis sont également tracées ; les points rouges sont associés à la première sphère et les points magenta à la deuxième. Le résultat de la procédure, soit le nuage de points à la surface de l'objet généré par les  $k$  sphères de  $N_k$  segments semi-infinis chacun, est illustré à la figure A.2b. Un point noir est positionné à chaque endroit où il y a eu intersection entre un segment semi-infini et une facette.

En procédant ainsi, une représentation de l'objet satisfaisante pour l'estimation de la pose est obtenue. Certains désavantages associés à cette méthode sont tout de même à noter. Notamment, les points ne sont pas uniformément répartis sur la surface de l'objet et cela rend difficile l'utilisation de distances seuils lors de certaines étapes de l'estimation de la pose. De plus, il est possible que certaines caractéristiques de l'objet ne soient pas représentées par le nuage de points vu l'aspect aléatoire de la méthode, ce qui peut également rendre ardue l'estimation de la pose.

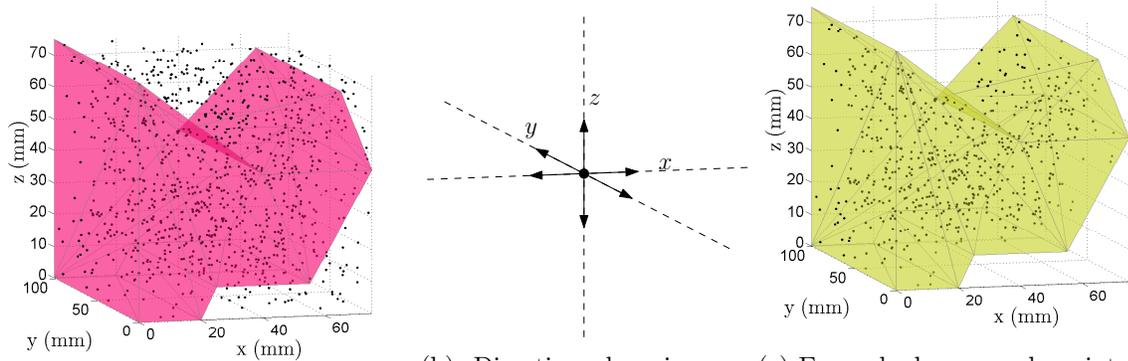
### A.2.2 Génération de points dans le volume de l'objet

Pour évaluer la validité de certaines hypothèses de pose, la proximité entre des points de contacts détectés par les capteurs tactiles et l'intérieur de l'objet est vérifiée. Une méthode simple pour effectuer cette vérification consiste à évaluer la distance entre les points de contacts et des points générés à l'intérieur du volume de l'objet.

Ces points sont d'abord générés aléatoirement selon les dimensions de l'objet. La valeur minimale et maximale selon les trois axes du repère local de l'objet sont trouvées. Un millier de points sont ensuite générés selon une distribution uniforme dans le volume du prisme rectangulaire limité par les valeurs minimales et maximales notées. Le nombre de 1000 points a été sélectionné arbitrairement pour obtenir une représentation grossière de l'intérieur d'un objet de taille convenable pour être saisi par le préhenseur. Un exemple du résultat de la génération de points est présenté à la figure A.3a. Il peut être observé que l'objet est contenu dans le prisme, mais certains points générés ne sont pas contenus dans le volume de l'objet.

Pour éliminer les points qui ne sont pas à l'intérieur du volume de l'objet, la méthode présentée à la section A.1.2 est exploitée. Pour chaque point généré dans le volume du prisme, six segments semi-infinis ayant comme origine la position du point sont générés. La direction des six segments est selon le sens positif et négatif des trois axes du repère local de l'objet, tel que présenté à la section A.3b.

Si un point est à l'intérieur du volume de l'objet, chaque segment semi-infini intersectera au moins une facette triangulaire de l'objet. Pour chacun des 1000 points générés, l'intersection entre les six segments semi-infinis et les facettes de l'objet est donc vérifiée et les points pour lesquels il y a moins de six intersections sont éliminés. Le résultat de cette procédure apparaît à la figure A.3.



(a) Points dans l'espace du prisme. (b) Direction des six segments semi-infinis. (c) Exemple du nuage de points résultant.

FIGURE A.3 – Exemple de la génération de points à l'intérieur d'un objet.

# Bibliographie

- Aggarwal, A. et P. Kampmann. 2012, «Tactile sensors based object recognition and 6d pose estimation», dans *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, p. 406–416.
- Besl, P. et N. D. McKay. 1992, «A method for registration of 3-d shapes», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, n° 2, p. 239–256.
- Bimbo, J., P. Kormushev, K. Althoefer et H. Liu. 2015, «Global estimation of an object’s pose using tactile sensing», *Advanced Robotics*, vol. 29, n° 5, p. 363–374.
- Bimbo, J., S. Rodriguez-Jimenez, H. Liu, X. Song, N. Burrus, L. Senerivatne, M. Abderrahim et K. Althoefer. 2012, «Object pose estimation and tracking by fusing visual and tactile information», dans *IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, p. 65–70.
- Bimbo, J., L. Seneviratne, K. Althoefer et H. Liu. 2013, «Combining touch and vision for the estimation of an object’s pose during manipulation», dans *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, p. 4021–4026.
- Birglen, L., T. Laliberté et C. Gosselin. 2008, *Underactuated Robotic Hands*, Springer Berlin Heidelberg.
- Chalon, M., J. Reinecke et M. Pfanne. 2013, «Online in-hand object localization», dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2977–2984.
- Chen, Y. et G. Medioni. 1991, «Object modeling by registration of multiple range images», dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, p. 2724–2729.
- Cutkosky, M., R. Howe et W. Provancher. 2008, «Force and tactile sensors», dans *Springer Handbook of Robotics*, Springer Berlin Heidelberg, p. 455–476.
- Duchaine, V. et A. Rana. 2014, «Dielectric geometry for capacitive-based tactile sensor», URL <http://www.google.com/patents/WO2014110683A1?cl=en>, WO Patent App. PCT/CA2014/050,040.

- Fischler, M. A. et R. C. Bolles. 1981, «Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography», *Communications of the ACM*, vol. 24, n° 6, p. 381–395.
- Fraden, J. 2004, *Handbook of Modern Sensors : Physics, Designs, and Applications*, Springer.
- Gaston, P. C. et T. Lozano-Pérez. 1984, «Tactile recognition and localization using object models : The case of polyhedra on a plane», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 6, p. 257–265.
- Haidacher, S. et G. Hirzinger. 2003, «Estimation of finger contact location and object pose from contact measurement in 3-d grasping», dans *International Conference on Robotics and Automation*, p. 1805–1810.
- Hebert, P., N. Hudson, J. Ma et J. Burdick. 2011, «Fusion of stereo vision, force-torque, and joint sensors for estimation of in-hand object location», dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 5935–5941.
- ImageJ. «An open platform for scientific image analysis», URL <http://imagej.net/>.
- Koval, M., M. Dogar, N. Pollard et S. Srinivasa. 2013, «Pose estimation for contact manipulation with manifold particle filters», dans *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 4541–4548.
- Kubus, D., R. Iser, S. Winkelbach et F. M. Wahl. 2009, «Efficient parallel random sample matching for pose estimation, localization, and related problems», dans *Advances in Robotics Research*, édité par T. Kröger et F. M. Wahl, Springer Berlin Heidelberg, p. 239–250.
- Lowe, D. 1999, «Object recognition from local scale-invariant features», dans *IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 2, p. 1150–1157.
- Mackenzie, P. et G. Dudek. 1994, «Precise positioning using model-based maps», dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, p. 1615–1621.
- Marquardt, D. W. 1963, «An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters», *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 11, p. 431–441.
- Miles, R. E. 1965, «On random rotations in  $r^3$ », *Biometrika*, vol. 52, n° 3/4, p. 636–639.
- Rispa, S. 2014, *Discrimination de textures et quantification de rugosité par algorithme d'apprentissage*, mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure.
- Robotiq. «Fabriquant de pinces et mains robotiques», URL <http://robotiq.com/>.
- Robotiq. 2013, «Robotiq adaptive gripper 2-finger model – 85», URL <http://robotiq.com/wp-content/uploads/2014/08/Robotiq-2-Finger-Adaptive-Gripper-Specifications.pdf>.

- Saff, E. et A. Kuijlaars. 1997, «Distributing many points on a sphere», *The Mathematical Intelligencer*, vol. 19, n° 1, p. 5–11.
- Shan, Y., B. Matei, H. S. Sawhney, R. Kumar, D. Huber et M. Hebert. 2004, «Linear model hashing and batch ransac for rapid and accurate object recognition», dans *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2, p. 121–128.
- Siegel, D. M. 1991, «Finding the pose of an object in a hand», dans *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, p. 406–411.
- Taylor, B. N. *The international system of units (SI)*, United States Department of Commerce, Technology Administration. National Institute of Standards and Technology.