

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE  
M.Sc.A.

PAR  
Alexandre FILION

ÉTALONNAGE DE ROBOTS INDUSTRIELS À L'AIDE D'UN SYSTÈME PORTABLE  
DE PHOTOGRAMMÉTRIE

MONTREAL, LE 9 SEPTEMBRE 2015



Alexandre Filion, 2015



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Ilian Bonev, directeur de mémoire  
Département de génie de la production automatisée, École de technologie supérieure

M. Vincent Duchaine, président du jury  
Département de génie de la production automatisée, École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, membre du jury  
Département de génie mécanique, École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 24 AOÛT 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## AVANT-PROPOS

L'étalonnage de robots industriels est un domaine étudié depuis plus de vingt ans. De nos jours, les travaux qui sont publiés présentent généralement des notions très approfondies du sujet. Bien qu'ils soient très pertinents pour la communauté, ces ouvrages sont trop complexes pour les nouveaux arrivants dans le domaine. Des textes d'introduction plus accessibles datent généralement de plus de 10 ans. Quoique ceux-ci permettent au lecteur d'acquérir les notions de base, la différence d'époque fait que les considérations pratiques qui y sont présentées sont désuètes.

Le présent document tente de fournir une introduction adéquate pour le néophyte d'aujourd'hui. Bien que le mémoire ne traite pas de tous les sujets, la revue de littérature tentera de présenter la plupart de ceux-ci. Ainsi, l'auteur espère que ce travail permettra aux futurs chercheurs dans le domaine de comprendre rapidement la théorie pour pouvoir pousser les concepts dans leur travail respectif.



## REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, le Pr Ilian Bonev, pour sa disponibilité et la confiance qu'il a fait preuve tout au long de mon projet de recherche. Je suis très reconnaissant de son soutien et sa compréhension de mon besoin de perfectionnement. Je tiens aussi à remercier Dr Ahmed Joubair pour avoir été mon mentor dans le domaine de l'étalonnage de robots industriels, pour son soutien tout au long de la rédaction, pour m'avoir aidé à organiser mes idées et pour tout l'encouragement qu'il m'a prodigué. Je remercie Dr Albert Nubiola pour son soutien dans le domaine, pour son aide pratique en programmation et pour l'exemple de dépassement de soi qu'il représente.

Ensuite, je remercie le Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (CRIAQ), l'École de technologie supérieure ainsi que le laboratoire de commande et robotique (CoRo) pour le financement accordé avec lequel mon expérience en recherche fut grandement plus satisfaisante.

J'aimerais aussi remercier M. Yanick Noiseux pour son soutien technique et le partage de son expérience dans le domaine de la robotique, MM. Jean-Philippe Roberge et Jean-Baptiste Chossat pour m'avoir transmis leur motivation et pour les discussions intéressantes qui m'ont permis de garder ma curiosité en alerte. Finalement, je remercie M. Martin Gaudreault pour toutes les discussions que nous avons eues durant lesquelles j'ai pu valider mes concepts à l'aide de son esprit critique.



# ÉTALONNAGE DE ROBOTS INDUSTRIELS À L'AIDE D'UN SYSTÈME PORTABLE DE PHOTOGRAMMÉTRIE

Alexandre FILION

## RÉSUMÉ

Le présent travail a pour objectif de valider la pertinence de l'utilisation d'un appareil de photogrammétrie portable dans le domaine de l'étalonnage de robots industriels. L'appareil à l'étude est le système MaxSHOT 3D de Creaform. L'étalonnage est un procédé permettant l'identification d'un modèle géométrique ou non géométrique. Celui-ci permet d'améliorer le contrôle d'un robot afin d'augmenter sa précision de positionnement. Ce mémoire présente le processus d'étalonnage non géométrique d'un robot de petite taille, le LR Mate 200iC de la compagnie FANUC. À des fins de comparaison, la procédure d'étalonnage est adaptée pour considérer un deuxième appareil de mesures 3D, soit le Laser Tracker ION de la compagnie FARO. Ce dernier est aussi utilisé pour construire une banque de validation d'environ 1000 configurations.

Les efforts sont d'abord dirigés vers la modélisation du robot à l'étude. Des modèles cinématiques direct et inverse sont présentés respectant le standard de Denavit-Hartenberg modifié (DHM). L'algorithme de Newton-Euler est utilisé pour ajouter une considération non géométrique qui estime les articulations telles des ressorts de torsion.

Dans un volet subséquent, l'appareil de photogrammétrie portable et le laser de poursuite sont présentés. Les fonctionnements de ces deux systèmes diamétralement opposés à plusieurs niveaux sont comparés. En effet, le système de photogrammétrie portable est abordable (environ 27 000 \$ CA), simple d'utilisation et permet l'observation d'une scène. Par contre, il nécessite que les objets à mesurer soient immobiles, requiert un grand nombre de manipulations et n'est pas autonome. En contrepartie, le laser de poursuite permet de mesurer des trajectoires en continu et permet l'automatisation du processus d'acquisition. Néanmoins, l'appareil est très dispendieux (100 000 \$ CA et plus), ne permet la mesure que d'un seul point à la fois et est sensible aux conditions de l'environnement (température, vibrations, courants d'air, etc.). En prenant compte des contraintes des deux appareils, un algorithme générant des configurations partiellement aléatoires est utilisé pour préparer un bassin de 1000 configurations du robot. L'algorithme s'assure que l'orientation de l'effecteur permet l'acquisition de données par les deux appareils de mesure pour chaque configuration proposée. Dans la phase suivante, une sélection par indice d'observabilité est utilisée afin de déterminer les meilleures configurations à utiliser pour l'identification des paramètres du robot. Le nombre de configurations sélectionnées est de 34, laissant les 966 autres configurations disponibles pour la phase de validation.

Le dernier volet du mémoire présente la procédure d'identification de paramètres du robot par la méthode des moindres carrés. Les modèles identifiés sont présentés et leurs performances sont validées. Lorsque les données acquises à partir du MaxSHOT 3D sont utilisées, la précision de positionnement obtenue est de 0.469 mm, tandis qu'elle est de 0.365 mm en utilisant

les données du Laser Tracker ION. Néanmoins, comme les mesures utilisées en validation sont issues du laser de poursuite, un biais favorise ce dernier. Pour cette raison et la proximité qui existe entre la précision obtenue avec les deux appareils, il est conclu que relativement à la précision absolue, les deux appareils sont similaires. Il est toutefois suggéré de prendre en compte toutes les autres caractéristiques de chaque appareil, car leur intégration possède des défis bien différents.

**Mot-clés :** robots sériels, manipulateurs, étalonnage, indices d'observabilité, photogrammétrie, laser de poursuite

# INDUSTRIALS ROBOTS CALIBRATION USING PORTABLE PHOTOGRAMMETRY SYSTEM

Alexandre FILION

## ABSTRACT

The present work intends to analyze the use of a portable photogrammetric system for industrial robot calibration. The device used in this study is the MaxSHOT 3D system provided by Creaform. Robot calibration consists in identifying a geometric or non-geometric mathematical model of the robot in order to improve the control of the robot and increase its positioning accuracy. The following thesis presents a non-geometric calibration of a relatively small robot, the FANUC LR Mate 200iC. For comparative purposes, the calibration procedure is also used with a second device, the FARO Laser Tracker ION. This laser tracker is also used to acquire a validation dataset of approximately 1,000 measurements.

First, the robot mathematical model is elaborated. Forward and inverse kinematic models are presented following the modified Denavit-Hartenberg method (DHM). In addition, joint compliance is modeled using the Newton-Euler algorithm that considers the joints as torsion springs. This yields a category 3 model in order to proceed to a non-geometric calibration.

Next, the portable photogrammetry system and the laser tracker are introduced. Being that these two devices are diametrically opposite in their function, the typical usage is compared. The portable photogrammetry system is affordable (approximately CA\$ 27,000), easy to use, and allows the observation of a scene (hundreds of 3D point). However, it requires that the measured objects be stationary, it calls for a large number of manipulations and is nearly impossible to use in an automated manner. In contrast, the laser tracker can measure continuous trajectories and allows full automation of the measurement process. Yet, it is very expensive (more than CA\$ 100,000), allows the measurement of only one 3D point at a time, and is very sensitive to environmental conditions (e.g. temperature, vibrations, air currents, etc.).

Taking the limitations of both measurement devices into consideration, a pseudo-random algorithm was used to generate a 1 000 robot poses. This algorithm ensures that for each proposed configuration, the measurement targets on the robot end-effector are visible by both measuring devices. Subsequently, an observability analysis is performed to select the poses most appropriate for calibration in order to identify the robot's parameters. A set of only 34 configurations are used for the identification process, leaving the other 966 configurations for the validation phase.

The final section of the thesis presents the least squares robot parameter identification method. The identified models are presented and their performance is analyzed. Calibration using data from the MaxSHOT 3D gives a robot's positioning accuracy of 0.469 mm, while 0.365 mm is obtained by using data from the laser tracker. Admittedly, as the validation measurements were

acquired with the laser tracker, bias favors this device. Due to this bias and because there is a similarity between the accuracy obtained with both devices, relative to absolute precision, their calibration performance is concluded to be similar. Nevertheless, it is suggested to consider all other features, as they these are still two very different devices.

**Keywords:** serials robots, manipulator, calibration, observability indexes, photogrammetry, laser tracker

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Intérêt de l'étalonnage .....	3
1.3 Précision absolue .....	7
1.4 Photogrammétrie .....	8
1.5 Conclusion .....	10
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	11
2.1 Introduction .....	11
2.2 Les types de robots .....	12
2.3 Types d'erreurs .....	12
2.3.1 Niveau 1 : Erreurs articulaires .....	13
2.3.2 Niveau 2 : Erreurs géométriques .....	13
2.3.3 Niveau 3 : Erreurs non géométriques .....	14
2.4 Catégories d'étalonnage .....	14
2.4.1 Catégorie 1 .....	14
2.4.2 Catégorie 2 .....	15
2.4.3 Catégorie 3 .....	15
2.4.4 Étalonnage combiné .....	16
2.5 Méthodes d'étalonnage .....	16
2.6 Processus d'étalonnage .....	18
2.6.1 Modélisation .....	18
2.6.2 Choix des configurations d'étalonnage .....	21
2.6.3 Appareils de mesure .....	22
2.6.4 Identification des paramètres .....	26
2.6.5 Compensation .....	27
2.7 Conclusion .....	28
CHAPITRE 3 MODÉLISATION DU ROBOT : LR Mate 200iC DE FANUC .....	29
3.1 Introduction .....	29
3.2 Description du robot expérimental .....	29
3.3 Modélisation géométrique directe .....	30
3.3.1 Attribution des référentiels .....	30
3.3.2 Modélisation géométrique directe .....	32
3.4 Modélisation géométrique inverse .....	34
3.4.1 Articulation 1 .....	35
3.4.2 Articulations 2 et 3 .....	36
3.4.3 Articulations 4, 5 et 6 .....	37

3.4.4	Conversion vers le vrai robot .....	39
3.5	Modélisation non géométrique .....	39
3.5.1	Élasticité des composantes mécaniques .....	40
3.5.2	Algorithme dynamique par itération de Newton-Euler .....	40
3.6	Modélisation cinématique nominale .....	42
3.7	Modélisation cinématique d'étalonnage .....	43
3.8	Conclusion .....	44

#### CHAPITRE 4 SYSTÈMES DE MESURE ET CHOIX DES CONFIGURATIONS

	.....	45
4.1	Introduction .....	45
4.2	Système de photogrammétrie portable .....	46
4.2.1	Méthode d'acquisition de données .....	49
4.2.2	Analyse des mesures du système de photogrammétrie .....	51
4.3	Système de mesure par le laser de poursuite .....	53
4.3.1	Méthode d'acquisition .....	54
4.3.2	Analyse des mesures sur laser de poursuite .....	55
4.4	Sélection des configurations .....	56
4.4.1	Détermination des configurations candidates .....	57
4.4.2	Analyse d'observabilité .....	58
4.5	Processus d'acquisition des données .....	60
4.5.1	Algorithme de transposition .....	62
4.5.1.1	Analyse de transposition des appareils de mesures .....	63
4.6	Conclusion .....	64

#### CHAPITRE 5 IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES .....

5.1	Introduction .....	67
5.2	Méthode des moindres carrés .....	67
5.2.1	Définition du problème à résoudre .....	67
5.2.2	Considérations pratiques .....	69
5.3	Expérimentations pratiques .....	72
5.3.1	Méthode d'évaluation de la précision absolue .....	72
5.3.2	Résultats des expérimentations .....	74
5.3.2.1	Analyse et comparaison des modèles identifiés .....	78
5.4	Conclusion .....	83

#### CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS .....

ANNEXE I	ALGORITHMES D'HOMOGENÉISATION DE MATRICE DE ROTATION .....	89
----------	---	----

BIBLIOGRAPHIE .....	91
---------------------	----

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Définition des paramètres DHM modifiés ..... 32
Tableau 3.2	Paramètres nominaux du LR Mate 200iC ..... 32
Tableau 3.3	Compilation des configurations moteurs possibles ..... 38
Tableau 3.4	Centre de masse des articulations et de l'outil. .... 41
Tableau 3.5	Modèle cinématique nominal. .... 42
Tableau 3.6	Modèle cinématique d'étalonnage. .... 43
Tableau 3.7	Paramètres des référentiels externes. .... 43
Tableau 4.1	Comparaison des valeurs mesurées par le MaxSHOT 3D et celles du certificat ..... 53
Tableau 4.2	Comparaison des valeurs mesurées par le Laser Tracker ION et celle du certificat ..... 55
Tableau 4.3	Erreur des mesures du MaxSHOT 3D et du Laser Tracker ION dans le référentiel unique. .... 64
Tableau 5.1	Comparaison des paramètres nominaux et identifiés du robot ..... 75
Tableau 5.2	Paramètres des référentiels externes. .... 75
Tableau 5.3	Statistiques descriptives des erreurs résultantes de l'analyse absolue. .... 76
Tableau 5.4	Statistiques descriptives des erreurs absolues résultantes de l'analyse relative. .... 78



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Laser Tracker ION de FARO. .... 5
Figure 1.2	MaxSHOT 3D de Creaform. .... 6
Figure 1.3	LR Mate 200iC de FANUC..... 7
Figure 1.4	C-Track de Creaform. .... 10
Figure 3.1	Attribution des référentiels sur le LR Mate 200iC..... 31
Figure 3.2	Schéma des angles des articulations 2 et 3 pour les calculs de la cinématique inverse. .... 36
Figure 4.1	Système de photogrammétrie MaxSHOT 3D de Creaform. .... 46
Figure 4.2	Module VXShot du logiciel VXelements de Creaform. .... 47
Figure 4.3	Installation du système de photogrammétrie dans l'environnement du LR Mate 200iC. .... 48
Figure 4.4	Segmentation de la scène du robot. Partie fixe en bleu et partie mobile en rouge. .... 50
Figure 4.5	Plaque triangulaire munie de trois socles magnétiques..... 51
Figure 4.6	Expérimentation avec les barres étalons des C-Track de Creaform..... 52
Figure 4.7	Distances certifiées des barres étalons des C-Track de Creaform..... 53
Figure 4.8	Principe de réflexion avec des miroirs orthogonaux..... 54
Figure 4.9	Comportement tridimensionnel des mesures du Laser Tracker ION. .... 56
Figure 4.10	Distributions des indices d'observabilité..... 61
Figure 4.11	Référentiels utilisés pour l'expérimentation. .... 62
Figure 5.1	Comparaison des distributions de l'analyse absolue (vue globale). .... 76
Figure 5.2	Comparaison des distributions de l'analyse absolue (vue rapprochée). .... 77
Figure 5.3	Comparaison des distributions de l'analyse relative (vue globale). .... 77

Figure 5.4	Comparaison des distributions de l'analyse relative (vue rapprochée). . . . .	78
Figure 5.5	Dispersion de la précision absolue avec le modèle de l'appareil de photogrammétrie. a. Vue de plan. b. Vue d'élévation. . . . .	80
Figure 5.6	Dispersion de la précision absolue avec le modèle du laser de poursuite. a. Vue de plan. b. Vue d'élévation. . . . .	81
Figure 5.7	Différence respective des erreurs point à point. . . . .	82

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

CMM	Machine de mesures des coordonnées
DHM	Modélisation de Denavit-Hartenberg modifiée
ETS	École de Technologie Supérieure
ISO	Organisation internationale de normalisation
MGD	Modélisation géométrique directe
MGI	Modélisation géométrique inverse
MPV	Système photogrammétrique à multiples points de vue
SMR	Sphère creuse munie de trois miroirs orthogonaux
SPV	Système photogrammétrique à simple point de vue



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$AP$	Précision de position
$\mathcal{F}_i$	Référentiel $i$
$\{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}\}$	Axes X,Y et Z
$c\{\theta_i, \alpha_i\}$	Cosinus de $\theta_i$ ou $\alpha_i$
$s\{\theta_i, \alpha_i\}$	Sinus de $\theta_i$ ou $\alpha_i$
$\theta_i$	Position articulaire du joint $i$
$O_i$	Indice d'observabilité $i$
$\alpha_i$	Vecteur des paramètres $\alpha$ de Denavit-Hartenberg
$\theta_i$	Vecteur des paramètres $\theta$ de Denavit-Hartenberg
$\Theta$	Vecteur des positions articulaires des joints
$\tau_i$	Vecteur des torques appliqués sur les moteurs
$\mathbf{a}_i$	Vecteur des paramètres $a$ de Denavit-Hartenberg
$\mathbf{c}_i$	Vecteur des constantes d'élasticité des composantes mécaniques
$\mathbf{d}_i$	Vecteur des paramètres $d$ de Denavit-Hartenberg
$\mathbf{f}_i$	Vecteur des forces exercées sur l'articulation $i$ par l'articulation $i + 1$
$\mathbf{m}_i$	Vecteur des masses de l'articulation sur lequel est attaché le référentiel $i$
$\mathbf{n}_i$	Vecteur des torques exercés sur l'articulation $i$ par l'articulation $i + 1$
$\mathbf{q}_i$	Vecteur des forces d'inertie appliquées au centre de masse de l'articulation $i$
$\dot{\mathbf{v}}_i$	Vecteur des accélérations linéaires du référentiel $i$
$\mathbf{H}_i^j$	Matrice homogène représentant le référentiel $i$ dans le référentiel $j$
$\mathbf{R}_i^j$	Matrice de rotation représentant le référentiel $i$ dans le référentiel $j$
$\mathbf{R}_{\{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}\}}$	Matrice de rotation autour d'un axe X,Y ou Z
$\mathbf{T}_{\{\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}\}}$	Matrice de translation sur l'axe X,Y ou Z
$\mathbf{T}_{i+1}^i$	Matrice de translation représentant le référentiel $i + 1$ dans le référentiel $i$
$\mathbf{Tc}_i$	Matrice de translation centre de masse de l'articulation $i$



## INTRODUCTION

Dans certains domaines de l'industrie, la précision nécessaire pour réaliser certaines tâches peut parfois dépasser les capacités des robots manipulateurs. Le phénomène est surtout présent dans le domaine de l'aérospatiale où les tolérances sont peu permissives. L'étalonnage robotique est une technique qui a démontré son efficacité pour augmenter la précision des robots dans ce type d'application. Néanmoins, les équipements nécessaires à la réalisation du processus d'étalonnage engendrent des coûts parfois faramineux. L'un des appareils utilisés fréquemment est le laser de poursuite Laser Tracker ION de FARO (Figure 1.1) dont le coût dépasse facilement les 100 000 \$ CA. L'une des alternatives peu coûteuses à cet appareil est le MaxSHOT 3D de Creaform (Figure 1.2) dont l'acquisition nécessite un budget plus raisonnable d'environ 27 000 \$ CA. Ce dernier est un système de photogrammétrie portable dont la précision est de 0.025 mm/m (0.049 mm à 10 m pour le Laser Tracker ION). Ce mémoire présente un travail qui fait la comparaison des performances des appareils Laser Tracker ION de FARO et MaxSHOT 3D de Creaform dans un processus d'étalonnage non géométrique effectué sur un robot de petite taille, le FANUC LR Mate 200iC (Figure 1.3).

Dans le Chapitre 1, il est présenté la problématique générale associée au problème d'étalonnage de robots industriels. Il est considéré l'utilisation de l'appareil de photogrammétrie comme remplaçant sur système de laser de poursuite. Le concept de la précision absolue est clarifié suivit d'une introduction au domaine de la photogrammétrie.

Le Chapitre 2 contient la revue de littérature. Parmi les thèmes abordés, on retrouve les types de robots, les types d'erreurs, les catégories d'étalonnage et les éléments typiques nécessaires au processus d'étalonnage, soit la modélisation, les choix de configurations, l'identification des paramètres et la compensation.

Le Chapitre 3 présente la modélisation du robot LR Mate 200iC de FANUC. D'abord, la modélisation géométrique directe et inverse est présentée. Elle est suivie de la modélisation non géométrique qui permettra de compenser l'élasticité des composantes mécaniques. Finalement, une compilation des modèles géométrique et non géométrique est présentée.

Dans le Chapitre 4, les informations sur le système de photogrammétrie portable et le laser de poursuite sont présentées. Il est aussi abordé les équipements additionnels et les logiciels nécessaires à l'utilisation de ceux-ci. Le chapitre se poursuit avec des méthodes d'acquisition proposées dans le cadre de l'étalonnage et d'analyses qui permettent de valider la précision des appareils. Le chapitre continue avec une méthode de génération de configuration. Puis, la méthode utilisée pour la sélection des configurations d'étalonnage par indice d'observabilité est introduite. Le chapitre se termine en présentant le processus d'acquisition des données utilisées dans le cadre de présent projet.

Le Chapitre 5 contient le cœur du principe d'étalonnage, soit la méthode des moindres carrés. Cette méthode permet d'identifier les paramètres du modèle du robot. Par la suite, on retrouve les analyses qui ont été effectuées.

La section Conclusion générale et recommandations présente un résumé de la tâche accomplie. Un retour sur les différents points marquants de la démarche est suivi par un retour sur les résultats et analyses de l'expérimentation. La clôture du mémoire consiste en les recommandations qui sont tirées de l'ensemble du projet.

# CHAPITRE 1

## PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

### 1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'introduire les concepts utilisés dans ce mémoire. Tout d'abord, il est introduit l'intérêt de l'étalonnage dans le système robotique. Ensuite, il est couvert brièvement la notion de précision absolue du point de vue des normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Finalement, un aperçu des systèmes de photogrammétrie est présenté.

### 1.2 Intérêt de l'étalonnage

Les robots sériels, appelés aussi manipulateurs, sont très présents dans le domaine industriel. Leur flexibilité et leur répétabilité font de ces machines des outils indispensables pour exécuter des tâches telles que la palettisation, la soudure, la peinture ou tout simplement de la manipulation. L'avantage principal de l'utilisation de ces manipulateurs est leur faculté à pouvoir retourner dans des configurations connues avec très grande précision, qu'on appelle la répétabilité. La répétabilité de ces manipulateurs est assurée entre autres par la précision des différents encodeurs qui leur permet de replacer avec précision chacun des articulations qui le composent et ainsi obtenir la configuration précédemment enseignée. Ces configurations sont la représentation physique d'un ensemble de position des moteurs des articulations d'un robot. À chaque configuration est associé la position et l'orientation de l'effecteur du robot qu'on appelle la pose de l'effecteur. Le travail d'un robot sériel s'effectuant généralement à partir de son effecteur ; la précision de cette pose est importante.

Il existe deux méthodes de programmation de robot industriel. La première est nommée la programmation par enseignement. Lorsqu'un robot est programmé par cette méthode, les configurations sont enregistrées par lecture des encodeurs directement à partir du contrôleur physique du robot. Il est donc nécessaire de placer ce dernier dans chaque configuration avant de procéder à l'enregistrement. L'un des avantages associés à ce type de programmation est que la

précision de la pose est principalement due à la répétabilité du robot, qui est généralement très bonne. Par contre, l'un des désavantages est que durant la phase d'enseignement, qui peut s'avérer très longue, le robot est indisponible à la production.

Dans la majorité des applications, la deuxième méthode de programmation est utilisée : la programmation hors-ligne. Comme l'évoque le nom de la méthode, elle ne nécessite pas d'être en ligne avec le contrôleur du robot. Les valeurs des encodeurs sont acquises par une méthode alternative ; elles sont calculées à partir de la physionomie du robot que l'on appelle le modèle robotique. Il permet de trouver les valeurs des encodeurs nécessaires pour obtenir une pose souhaitée. Comme principal avantage, cette méthode permet de minimiser le temps de non-production d'un manipulateur. De plus, la programmation est généralement plus rapide, car l'enseignement est fait avec un modèle tridimensionnel de l'espace de travail de la cellule robotisée. Néanmoins, l'un des inconvénients majeurs de ce type de programmation est l'augmentation de l'imprécision dans les poses. Cette augmentation est causée par les erreurs qui peuvent exister entre le modèle robotique et le robot physique.

Les erreurs qui existent dans le modèle robotique sont associées à trois catégories d'erreurs. La première catégorie concerne la résolution et le déphasage qui peut exister dans les encodeurs. Les erreurs de ce type sont appelées les erreurs articulaires. La deuxième catégorie concerne les erreurs dites géométriques telles que les distances entre les axes des articulations et l'orientation de ceux-ci. La dernière catégorie est composée des erreurs causées par la dilatation thermique, les jeux dans les engrenages et la rigidité des composantes mécaniques. Ce sont des erreurs non géométriques. Chacune de ces catégories d'erreur peut être compensée dans le modèle. Pour compenser les erreurs des deux premières catégories, un processus d'identification des variations de ces paramètres appelés étalonnage est utilisé. Lorsque les erreurs non géométriques doivent être aussi compensées, il est nécessaire de modifier le modèle en y ajoutant des relations supplémentaires. L'étalonnage permet ensuite de trouver les paramètres du modèle qui représente le mieux le robot physique.



Figure 1.1 Laser Tracker ION de FARO.

L'étalonnage robotique est un service proposé par les fabricants (FANUC, ABB, Kuka). Ce service est généralement onéreux. Leur procédure d'étalonnage est généralement composée d'une procédure fixe où les configurations à mesurer nécessitent que le robot n'ait pas d'obstacle dans sa zone de travail. Pour cette raison, l'étalonnage par le fabricant d'un robot déjà installé est rarement possible ; il est généralement nécessaire de transporter le robot chez celui-ci. En plus d'arrêter la production, les coûts de transport rendent le service encore plus coûteux. Comme l'étalonnage est requis périodiquement, ces procédures deviennent rapidement une dépense considérable. Pour ces raisons, l'étalonnage de robots industriels sur un robot installé est un besoin justifié.

Une procédure où les configurations peuvent être modifiées en fonction de l'encombrement de la zone de travail est requise. Ensuite, dans la majorité des applications, on désire améliorer la précision absolue de l'effecteur du robot. Pour être conséquentes, les mesures qui sont prises doivent être effectuées sur celui-ci et dans son espace de travail. Une fois les mesures terminées, l'identification des paramètres est faite à partir d'une linéarisation du modèle robotique.



Figure 1.2 MaxSHOT 3D de Creaform.

La procédure nécessite des appareils de mesure dont la précision est suffisante. Le choix de l'appareil utilisé pour faire le relevé des positions tridimensionnel de l'effecteur est important. Ainsi, les mesures sont généralement prises à partir d'un appareil dont la précision dépasse largement celle visée par robot étalonné et par le fait même, onéreux. Un exemple de ces appareils est le Laser Tracker ION de FARO (Figure 1.1). En plus de leur prix élevé, ces appareils ont des conditions d'utilisation spécifiques, ce qui rend leur rentabilité incertaine. De plus, leur précision est affectée par plusieurs facteurs, dont les courants d'air, les vibrations, les changements de température. Pour s'assurer d'obtenir la précision prescrite, l'environnement doit être contrôlé et il n'est pas toujours possible d'obtenir de bons paramètres dans le voisinage d'un robot industriel. Comme autre possibilité, il existe des appareils de photogrammétrie peu coûteux dont la précision est similaire. Les appareils de photogrammétrie peuvent être utilisés pour plusieurs applications de métrologie, telles que la modélisation et l'inspection de pièce complexe.

Dans ce mémoire, il sera présenté la première utilisation du MaxSHOT 3D de Creaform (Figure 1.2), un système portable de photogrammétrie, pour faire l'étalonnage d'un robot sériel 6 axes, le LR Mate 200iC de FANUC (Figure 1.3). Cet appareil est un produit dont l'utilisation a nécessité une adaptation au problème de l'étalonnage. Ces considérations seront présentées dans le corps de ce travail.



Figure 1.3 LR Mate 200iC de FANUC.

### 1.3 Précision absolue

Il a été spécifié que l'objectif de l'étalonnage est d'augmenter la précision absolue des poses d'un robot. Cette valeur représente une évaluation de la capacité de s'arrêter avec exactitude dans une pose commandée, peu importe la trajectoire d'approche. Rappelons que la pose est la combinaison de la position et l'orientation de l'effecteur. La mesure de la précision absolue de pose telle que définie dans la norme ISO9283 (ISO, 1998) contient deux valeurs : la précision de position et la précision d'orientation.

La précision de position ( $AP$ ) est la distance entre la position commandée  $(x_c, y_c, z_c)$  et la position moyenne (ou barycentre) des positions atteintes  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  après des mouvements répétitifs

de l'effecteur à cette position. La valeur de la précision est la norme du vecteur reliant ces deux points. Celle-ci peut s'écrire comme suit :

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - x_y)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (1.1)$$

La précision d'orientation est décomposée selon trois axes. Chacune de ces valeurs résulte de la différence de la moyenne d'orientation obtenue et l'orientation commandée. Elles sont trouvés à partir de ces équations :

$$AP_{rx} = \bar{r}x - rx_c \quad (1.2)$$

$$AP_{ry} = \bar{r}y - ry_c \quad (1.3)$$

$$AP_{rz} = \bar{r}z - rz_c \quad (1.4)$$

Dans ce mémoire, uniquement la précision de position sera considérée. Par contre, comme plusieurs points de mesure sur l'outil sont utilisés, l'orientation sera contrôlée. Néanmoins, celle-ci ne sera pas analysée.

#### 1.4 Photogrammétrie

Les systèmes de photogrammétrie exploitent l'information contenue dans plusieurs images d'une même scène pour en faire la modélisation. Ils fonctionnent par triangulation de manière similaire à la stéréoscopie. Ce principe est utilisé, entre autres, par l'humain pour reproduire la perception des profondeurs en utilisant deux images légèrement décalées. Les caméras utilisées dans ces systèmes sont adaptées pour dissocier des cibles disposées dans la scène. La modélisation qui résulte de l'acquisition de la scène est présentée sous la forme d'un nuage de point représentant les positions de ces cibles. Ces cibles peuvent être actives ou passives. Une cible active est munie d'une alimentation, ce qui lui permet d'émettre une forte luminosité qui sera captée par les caméras de l'appareil de photogrammétrie. L'activation des cibles peut-être fait dans une séquence déterminée qui permet d'identifier chaque cible de manière individuelle.

À l'inverse, les cibles passives sont composées d'une surface réfléchissante inerte. Pour que celles-ci soient détectables, l'appareil de photogrammétrie émet une forte quantité de lumière qui sera réfléchi par les cibles. Comme toutes les cibles sont détectées en même temps, il est nécessaire d'avoir un modèle prédéfini de la position des cibles pour les identifier. Généralement, l'utilisation de cibles passives permet l'acquisition de manière plus rapide, ce qui donne la capacité au système de faire du suivi de trajectoire. Les appareils de la compagnie Creaform utilisent tous la technologie à cible passive.

De plus, dans le domaine de la photogrammétrie, deux grandes familles existent : les systèmes à multiples points de vue (*MPV*) et des systèmes à point de vue unique (*SPV*).

Les systèmes *MPV* possèdent plusieurs capteurs. Leur position et orientation sont connues avec précision, ce qui leur permet de positionner les objets dans l'espace tridimensionnel. Les systèmes de ce type sont capables de prendre des lectures très rapidement, ce qui leur permet généralement de faire des lectures de déplacement (*Tracking*). Par contre, les angles de vue de ces appareils sont limités par la position de leurs capteurs. Des exemples d'appareils *MPV* sont le C-Track de Creaform (Figure 1.4) ou encore OPTOTRAK de Northern Digital.

Les systèmes *SPV* possèdent un seul capteur. La complexité du capteur étant réduite considérablement comparé au système *MPV*, leur coût est généralement plus faible. Leur utilisation se fait en captant plusieurs images d'une même scène en déplaçant le capteur. La possibilité de déplacer ce dernier permet généralement l'obtention de mesures plus précises que les systèmes *MPV*. De plus, il possède l'avantage de pouvoir prendre la scène sous des points de vue très éloignés. Ainsi, ils sont souvent utilisés avec de grandes pièces ou pour modéliser des objets qui comportent des éléments qui ne peuvent être observés d'un seul point de vue. Par contre, ces manipulations rendent le processus d'acquisition plus lent. Cela empêche de faire des lectures de déplacement (*Tracking*). De plus, la scène doit rester immobile durant le temps d'acquisition. L'appareil utilisé pour la prise de mesure dans ce travail, le MaxSHOT 3D de Creaform (Figure 1.2), est de ce type. D'autres appareils tels que le TRITOP de Capture3D et le Photogrammetry System de Linearis3D en font aussi parti.



Figure 1.4 C-Track de Creafom.

## 1.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer, à la Section 1.2, brièvement les motivations des travaux dans le domaine de l'étalonnage, soit le désir d'augmenter la précision absolue des robots industriels. Comme il est spécifié à la Section 1.3, le travail qui suit est dédié à la précision de position. Le principe des appareils de photogrammétrie a été présenté à la Section 1.4.

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 2.1 Introduction

Pour améliorer la précision absolue d'un robot industriel sériel ou parallèle, il existe principalement deux types d'approches : l'utilisation d'un système de correction en temps réel, ou l'amélioration du modèle de contrôle. La première approche nécessite l'utilisation constante d'un système de mesure en collaboration avec le robot. En plus d'engendrer des coûts supplémentaires en matériel, cette solution peut s'avérer difficilement réalisable (synchronisation, mesure, espace de travail, etc.). Quant à la deuxième approche, son implémentation a été explorée dans plusieurs travaux depuis les années 1980.

Ces différents travaux ont présenté que l'étalonnage de robot industriel nécessite une bonne connaissance du comportement physique de ces derniers. Différents types d'erreurs affectant la cinématique sont progressivement introduits. Ceux-ci diffèrent en comportement, ce qui nécessite parfois d'adapter le procédé d'identification. Par contre, dans la majorité des cas, le déroulement du processus d'étalonnage est similaire. Tout d'abord, la modélisation nominale du robot est effectuée. Ensuite, considérant l'appareil de mesure qui sera utilisé, une série de configuration est générée, triée et finalement mesurée. Ces données sont confrontées au modèle afin d'ajuster celui-ci. Finalement, ce modèle alternatif est utilisé pour faire la compensation des erreurs du robot.

Dans ce chapitre, il est présenté ces étapes en parcourant les éléments marquants de la littérature s'y rattachant. De tels tours d'horizon peuvent d'ailleurs être retrouvés dans plusieurs ouvrages, dont Karan et Vukobratović (1994), Elatta *et al.* (2004) et Joubair (2012).

## 2.2 Les types de robots

Peu importe s'ils sont de fabrication commerciale ou non, la majorité des robots industriels sont classifiés dans l'une des grandes familles : sériels ou parallèles. Chacun possédant des avantages et des inconvénients par rapport à l'autre, les deux divisions ont évolué côte à côte pendant plusieurs années.

Les robots sériels sont caractérisés par leur conception : il possède un seul enchaînement d'articulation de leur base jusqu'à la plaque de montage de l'outil. Leurs mouvements sont similaires à ceux d'un bras humain. Ils possèdent l'avantage d'avoir une grande enveloppe de travail. Par contre, l'enchaînement de leur mécanique diminue leur précision et leur répétabilité. Ces robots sont principalement utilisés comme manipulateur dans les domaines de la soudure, la palettisation ou encore la peinture.

Les robots parallèles, aussi appelés les machines à cinématique parallèle, possèdent plusieurs enchaînements d'articulation de leur base jusqu'à la plaque de montage de l'outil. Cette caractéristique leur permet d'avoir une grande rigidité structurale, une grande capacité de charge, de haute vitesse et accélération de l'effecteur et une grande précision de l'effecteur. Ils sont utilisés principalement dans les domaines tels la chirurgie, l'usinage, la manufacture de composante électronique ou encore l'assemblage.

## 2.3 Types d'erreurs

Peu importe la méthode de fabrication, les dimensions des composants mécaniques des robots industriels ne sont pas exactes et risquent d'évoluer avec l'usure. Les variations qui existent entre les valeurs nominales et réelles affectent la précision du contrôle du robot. Déjà, au début des années 1990, Everett (1993) tente une approche pour utiliser des modèles d'erreurs dans l'intention de prédire les sources des erreurs d'un manipulateur. Maintenant, les causes de cette imprécision qu'on nomme les types d'erreurs sont classifiées en trois niveau : les erreurs articulaires (niveau 1), les erreurs géométriques (niveau 2) et les erreurs non géométriques

(niveau 3). Des bilans très précis de ces sources d'erreurs sont d'ailleurs présentés dans Bryan (2000) et Gong *et al.* (2000).

Bien que la provenance des imprécisions soit toujours à l'étude dans plusieurs ouvrages, les principales causes sont connues et sont présentées dans la suite de cette section. Il est intéressant de noter que leur importance relative est encore à l'étude. Par exemple, Abele *et al.* (2007) reprennent dans leur article que 50% à 75% des erreurs sont causés par les engrenages (géométrique et non géométrique). Quant à Gong *et al.* (2000), ils affirment que les erreurs sont à 95% d'origine géométrique. Malgré ces divergences, dans la majorité des travaux, la tendance à ordonnancer l'importance des types erreurs selon les trois niveaux présentés ci-dessous est maintenue.

### **2.3.1 Niveau 1 : Erreurs articulaires**

Les erreurs articulaires sont causées par l'imprécision qui peut exister dans les encodeurs des articulations actives. Il existe toujours une erreur de déphasage, si faible, soit telle, entre la valeur de l'encodeur et la position du moteur qu'elles représentent. Bien entendu, l'ampleur des erreurs articulaire augmente avec ce déphasage. Néanmoins, ce niveau d'erreur est normalement très faible, car, comme l'affirme Bryan (2000), les méthodes de fabrication d'encodeur sont très robustes et matures. Néanmoins, les erreurs articulaires restent l'une des plus grandes sources d'erreur qui affecte la répétabilité d'un robot.

### **2.3.2 Niveau 2 : Erreurs géométriques**

Les erreurs géométriques sont causées par des différences entre les valeurs qui décrivent les composantes du robot dans le contrôleur (les paramètres nominaux du modèle cinématique) et leur valeur réelle. Le résultat de ces écarts est inmanquablement reporté sur la précision du robot. Ces variations peuvent être causées par une imprécision de fabrication ou encore par l'usure. Elles affectent les caractéristiques géométriques (le parallélisme, l'orthogonalité, la planéité, etc.) des composantes mécaniques.

Une autre source d'erreur géométrique est la précision de la localisation du référentiel de la base du robot par rapport aux référentiels de travail. Quoique cette erreur ne soit pas intégrée à la cinématique du robot, elle ne doit pas être négligée. Il existe la même incertitude en ce qui a trait à la précision de point central de l'outil.

### **2.3.3 Niveau 3 : Erreurs non géométriques**

Les erreurs non géométriques, généralement plus faibles, sont aussi causées par les composantes mécaniques du robot. Tandis que les erreurs de niveau 2 concernent les différences dites statiques des paramètres du modèle cinématique, ces erreurs concernent leurs variations dynamiques. Il sera alors question de l'élasticité des composantes mécaniques, des jeux mécaniques et la dilatation des composantes causés par la température.

## **2.4 Catégories d'étalonnage**

Les sources d'erreurs, s'ils sont bien étudiés, peuvent être modélisées puis compensées. Considérant la nature différente de chaque niveau, il existe aussi plusieurs catégories d'étalonnage. À chacun des niveaux d'erreurs est associé une catégorie d'étalonnage. Par exemple, la catégorie d'étalonnage 1 permet de compenser les erreurs de niveau 1 et ainsi de suite. De plus, à cause de la progression qui existe entre les niveaux, il est commun que chaque catégorie d'étalonnage contienne également les niveaux de source d'erreur inférieure. Bien que la catégorie 1 existe, elle n'est pas fréquente dans l'étalonnage de robot sériel. Il est alors beaucoup plus fréquent de faire l'étalonnage de catégorie 2 ou 3.

### **2.4.1 Catégorie 1**

Comme il a été présenté dans les sections précédentes, les erreurs de niveau 1 sont liées aux encodeurs des articulations. Leur compensation se fait en modélisant la relation entre la valeur de l'encodeur et la position réelle de l'articulation. De nos jours, les encodeurs nécessitent

rarement de procéder à cette modélisation. Ainsi, l'étalonnage de catégorie est souvent limité uniquement à ajouter des paramètres de gain et d'offset.

D'ailleurs, Roth *et al.* (1987) mentionnent que cette catégorie d'étalonnage est souvent implicite dans l'étalonnage géométrique (Catégorie 2). Quelques exceptions, tel que Heping *et al.* (2008), ont procédé uniquement à l'étalonnage de catégorie 1 d'un robot ABB IRB4400 (6 d.d.l.). Il mentionne en conclusion l'intention de progresser vers l'étalonnage de catégorie supérieure.

### 2.4.2 Catégorie 2

L'étalonnage de catégorie 2, aussi nommé l'étalonnage géométrique ou encore l'étalonnage cinématique, consiste à considérer l'imprécision des paramètres de la cinématique, c'est-à-dire les erreurs de niveau 2, comme unique source du manque de précision absolue. Il est inclus dans ces paramètres le déphasage des encodeurs, soit les erreurs de niveau 1.

La plupart du temps, ce type d'étalonnage est effectué à partir de mesure de poses statique. L'effet du mouvement sur la précision absolue est négligé. Il est aussi exclu les erreurs liées à la répétabilité.

Plusieurs travaux ont été faits sur l'étalonnage de catégorie 2. Dès les débuts, on retrouve Hayati (1983) et Mooring *et al.* (1991), puis des travaux tel que In-Won et Jong-Hwan (2011) ou encore Ruibo *et al.* (2010) dont l'étalonnage se fait sur une modélisation de type P.O.E. (voir Section 3.). Dans le domaine des robots parallèles, on retrouvera des travaux de ce type dans ces ouvrages tels que Durango *et al.* (2010), Joubair *et al.* (2012) et Jwu-Sheng *et al.* (2012).

### 2.4.3 Catégorie 3

L'étalonnage de catégorie 3 ou l'étalonnage non géométrique considère la non-rigidité des composantes mécaniques, soit les erreurs de niveau 3. Comme il a été présenté par Whitney *et al.* (1986), l'un des premiers facteurs à être considérés est l'erreur de transmission des

engrenages. Il présente une modélisation expérimentale basée sur des fonctions sinusoïdales. Dans les mêmes années, Khosla et Kanade (1985) et Khosla (1987) présentent un algorithme Newton-Euler qui permet d'identifier certains paramètres non géométriques liés aux moments de forces. Plusieurs articles, dont Feng *et al.* (2013), modélisent la rigidité des joints telle la loi de Hook.

Les travaux plus récents ont démontré l'avantage de l'étalonnage de catégorie 3. D'ailleurs, on le retrouve dans Abele *et al.* (2007), Gong *et al.* (2000), Dumas *et al.* (2011), Feng *et al.* (2013), Gonzalez-Hernandez et Castillo-Castaneda (2013) et Lubrano *et al.* (2011).

#### **2.4.4 Étalonnage combiné**

Tandis que la majorité des travaux tentent d'étalonner les modèles en travaillant avec les catégories qui sont présentées aux Sections 2.4.1 à 2.4.3, Zhang et Gao (2012) présentent un travail qui concatène les différentes sources d'erreurs dans une pseudo-erreur. Celle-ci est ensuite utilisée dans un réseau de neurones coévolutif coopératif qui permet une approximation des erreurs dans l'espace de travail. Cette dernière est utilisée pour compenser l'erreur de positionnement. Bien que la méthode a été testée sur un robot parallèle, l'auteur indique la possibilité de l'utiliser dans le domaine de l'étalonnage de robots sériels.

#### **2.5 Méthodes d'étalonnage**

Les méthodes pour appliquer les différentes catégories d'étalonnage peuvent varier beaucoup. Déjà, dans les premiers travaux, il est souvent présenté des méthodes qui permettent de simplifier au maximum la partie computationnelle. Par exemple, Wu (1983) présente une méthode pour modéliser les erreurs de manière linéaire. Aussi, Driels *et al.* (1993) présentent une méthode qui considère chaque configuration de manière itérative. Celle-ci utilise l'algorithme du moindre carré qui sera présenté dans la Section 5, mais une configuration à la fois plutôt que tous ensemble.

Une autre méthode qui revient de manière systématique est de procéder joint par joint. On retrouve des variantes de cette procédure. Dans ces articles, ils utilisent des cercles pour retrouver l'axe de chaque joint pour ensuite l'analyser et identifier les paramètres du modèle.

La méthode la plus fréquente est d'utiliser un appareil de mesure externe pour trouver la position de l'outil. Cette dernière est ensuite comparée avec la position désirée de l'outil afin de déduire la variation à apporter au modèle. C'est d'ailleurs ce type d'étalonnage qui sera employé de l'avant dans ce travail.

D'ailleurs, Traslosheros *et al.* (2013) présentent aussi plusieurs autres méthodes. L'une d'elles fait l'utilisation de capteur à faible coût pour faire la lecture incrémentale des positions des décodeurs des moteurs des articulations actives d'un robot parallèle. La méthode permet de faire une réduction de 40% de l'erreur de positionnement. Ensuite, il est présenté une méthode qui utilise un élément mécanique pour contraindre la position de l'outil pendant le processus d'identification. Par exemple, Joubair et Bonev (2014) utilisent un marbre Datum (1 400 \$ CA) et une probe Renishaw pour faire la calibration non géométrique d'un robot FANUC LR Mate 200iC. Cette méthode est peu coûteuse et simple à implémenter.

Traslosheros *et al.* (2013) proposent aussi des méthodes en boucle fermée qui permettent un étalonnage automatique pendant le fonctionnement. Par contre, ce type de méthode est plus coûteux, car il requiert l'achat de matériel précis et les algorithmes sont plus complexes à développer.

Il existe aussi des méthodes qui permettent d'approximer les erreurs dans l'espace à partir d'un apprentissage d'un réseau de neurones. Les erreurs approximées peuvent être utilisées pour compenser les positions de manière approximative. On nomme ce type de compensation sans modèle. On peut voir ce type d'approche dans des travaux tel que Wang *et al.* (2012a).

## 2.6 Processus d'étalonnage

L'objectif du processus d'étalonnage est de trouver des valeurs pour les paramètres du modèle cinématique d'un robot qui permettent d'améliorer sa précision absolue. Ce processus est généralement présenté en quatre étapes, soit la modélisation, le choix et la mesure des configurations, l'identification des paramètres et la compensation. La modélisation permet d'identifier la physionomie du robot ainsi que les caractéristiques de sa cinématique. Elle peut inclure des composantes non géométriques telles que la rigidité des composantes mécanique. Pendant la deuxième étape, les configurations dans lesquelles va être mesuré le robot sont choisies puis mesurées. Cette étape doit considérer l'outil de mesure, l'espace de travail du robot et quelques autres facteurs. La troisième étape est la phase d'identification. Celle-ci permet d'obtenir des variations sur les paramètres du modèle qui minimise les erreurs relatives à la précision absolue. Pour dernière étape, ces nouveaux paramètres sont utilisés dans une procédure de compensation qui permet d'obtenir une meilleure précision du robot. Bien entendu, plusieurs méthodes et variations existent pour chacune des étapes.

### 2.6.1 Modélisation

La modélisation du robot consiste à mettre en relation les actions de ces articulations actives avec le mouvement de l'effecteur. Ainsi, à partir des positions des joints, on peut déduire la pose de l'effecteur. Dans la majorité des robots, une pose peut être réalisée par plusieurs configurations de joints. On doit alors considérer ces redondances dans la modélisation. Quelques approches de modélisation existent : les modèles de Denavit-Hartenberg, les modèles S., P.O.E, C.P.C..

#### 1. Modèles Denavit-Hartenberg

Les méthodes de Denavit-Hartenberg sont les plus communes. Les travaux d'étalonnage les utilisant sont innombrables de nos jours, mais parmi les premiers, on peut citer Everett et Hsu (1988). Plus récemment, Craig (2005) présente un ouvrage très souvent utilisé dans le domaine de la modélisation et du contrôle robotique. Des travaux de Hayati (1983) et

Wu (1983) proposent des améliorations de la modélisation de Denavit-Hartenberg.

En effet, Hayati (1983) présente une méthode embryonnaire d'identification des paramètres pour un robot possédant des joints rotatifs et/ou prismatiques. Cette méthode est limitée par la modélisation de Denavit-Hartenberg non modifié qui n'était pas proportionnel. En effet, parallèle à ces recherches, Mooring *et al.* (1991) réitèrent dans son ouvrage, l'importance du respect des trois critères d'un bon modèle robotique, présentée initialement par Everett. Ces trois critères sont l'intégralité (*completeness*), la proportionnalité ou continuité (*proportionality* ou *continuity*) et l'équivalence (*equivalence*). Un modèle ne respectant pas des critères se porterait mal à l'identification des paramètres par la méthode du moindre carré.

Très brièvement, l'intégralité est obtenue quand le modèle possède suffisamment de paramètres pour modéliser tous les comportements géométriques. L'Équation (2.1) est alors proposée pour déterminer le nombre de paramètres ( $N$ ) à respecter en fonction du nombre de joints rotoïdes ( $R$ ) et du nombre de joints prismatiques ( $P$ ). La proportionnalité d'un modèle est respectée si la grandeur d'une modification de la structure d'un robot est proportionnelle à son impact sur le modèle. Ainsi, une petite variation du robot engendre une petite variation d'un paramètre. Finalement, l'équivalence est obtenue s'il est possible de transformer les paramètres d'un type de modèle vers un autre.

$$N = 4R + 2P + 6 \quad (2.1)$$

## 2. Modèle S

Le modèle S est une variation des méthodes de Denavit-Hartenberg. Il possède six paramètres (Équation 2.2) au lieu de quatre. L'ajout de ces deux paramètres le rend moins restrictif, mais redondant. Celui-ci a été développé pour l'étalonnage ; il est utilisé uniquement pour l'identification des paramètres. Une fois ceux-ci identifiés, il est possible d'appliquer une conversion pour retourner vers le modèle de Denavit-Hartenberg.

$$\mathbf{H}_{i+1}^i = \mathbf{R}_{\hat{z}}(\beta_i) \mathbf{T}_{\hat{z}}(d_i) \mathbf{T}_{\hat{x}}(a_i) \mathbf{R}_{\hat{x}}(\alpha_i) \mathbf{R}_{\hat{z}}(\gamma_i) \mathbf{T}_{\hat{z}}(b_i) \quad (2.2)$$

Ce modèle est apparu en même temps que les premiers articles sur l'étalonnage. Il est d'ailleurs annoncé par Stone et Sanderson (1987). Le modèle sera ensuite critiqué par Everett et Hsu (1988), car il ne respecte pas le critère d'intégralité (Équation 2.1).

### 3. Modèle P.O.E.

Les modèles de la famille P.O.E. sont basés sur les produits d'exponentiel pour modéliser la cinématique des robots. Parmi les premiers travaux à le faire apparaître, Chen et Yang (1997) l'utilisent sur des robots modulaires. Plus récemment, le modèle a été encouragé par Ruibo *et al.* (2010) se basant sur les critères d'un bon modèle robotique. Ceux-ci varient légèrement de la version de Everett ; le dernier critère, tiré de Schroer *et al.* (1997), est nommé le minimaliste (*minimality*). Celle-ci est acquise lorsqu'un modèle ne contient aucun paramètre redondant. C'est pour respecter ce dernier critère que Ruibo *et al.* (2010) soutient l'utilisation de ce type de modélisation. De nos jours, ce modèle est encore étudié dans des travaux tels que Wang *et al.* (2012b).

### 4. Modèle C.P.C.

Les modèles C.P.C. ont été présentés par Zhuang *et al.* (1993) et Zhuang *et al.* (1995). L'acronyme signifie *Complete and parametrically continuous modeling technic*. Il propose d'ailleurs une modification, le M.C.P.C..

### 5. Autres

Des modèles moins courants sont aussi présents dans la documentation. Comme exemple de ceux-ci, Aoyagi *et al.* (2010) expriment les erreurs non géométriques par une somme de fonction sinusoïdale.

### 2.6.2 Choix des configurations d'étalonnage

Les configurations d'étalonnage sont les configurations dans lesquelles les mesures du robot seront prises. Leur choix implique de connaître l'espace de travail dans lequel elles devront être mesurées. De plus, il faut aussi considérer d'explorer plus d'une configuration de moteur. Bien qu'il soit possible de faire l'étalonnage à partir de n'importe laquelle ensemble de configuration, certaines considérations existent. Le choix des configurations est important, car c'est sur celles-ci que se baseront les variations des paramètres.

En plus de ces considérations, la diversité qui existe dans l'ensemble de configuration est importante. Cette diversité peut être étudiée à partir des indices d'observabilités. Bien qu'il existe plusieurs méthodes pour calculer ces indices, Joubair *et al.* (2013) présentent cinq des plus communs. D'ailleurs, il présente une analyse de ces indices pour classifier leur performance dans un contexte d'étalonnage géométrique et non géométrique. L'indice nommé  $O_1$  est caractérisé comme étant le meilleur indice à utiliser en étalonnage de niveau 3 fut aussi présenté par Hanqi *et al.* (1994) et Borm et Meng (1991). Ce dernier présente aussi une méthode pour déterminer les configurations d'étalonnage à l'aide de l'indice d'observabilité. D'ailleurs, Hanqi *et al.* (1994) introduit l'indice  $O_2$  que Joubair *et al.* (2013) caractérisent comme étant le meilleur indice à utiliser en étalonnage de niveau 2.

Les indices d'observabilités permettent uniquement de caractériser un ensemble de configuration donnée. Choisir le meilleur ensemble de configuration dans un ensemble de candidats représente une tâche d'exploration complexe. Pour se faire, Hanqi *et al.* (1994) présentent la méthode de *simulated annealing* (SA) pour faire la sélection des configurations basée sur un critère d'indice d'observabilité. Joubair *et al.* (2013) utilisent l'algorithme DETMAX qui est présenté à la Section 4.4.2. Li *et al.* (2011) présentent une méthode inédite de recherche de configuration, soit une variation de l'algorithme de classification DETMAX. Il la nomme *exchange-add-exchange algorithm*. Comparée à l'algorithme DETMAX, celle-ci possède une itération supplémentaire ainsi qu'une étape d'insertion additionnelle.

Il existe aussi des travaux utilisant une approche basée sur les algorithmes génétiques. Par exemple, Aoyagi *et al.* (2010) font évoluer une population de candidat en fixant le nombre de configurations recherchées. Dans la population, les chromosomes représentent la position X-Y-Z de toutes les configurations. Il n'indique pas si l'orientation est utilisée.

D'autres articles énoncent l'utilisation des indices d'observabilités : Driels *et al.* (1993) Mooring *et al.* (1991) Sun et Hollerbach (2008) Li *et al.* (2011).

### 2.6.3 Appareils de mesure

Durant l'étape de mesure, des données quantifiant différentes poses du robot sont relevées. Avec ceux-ci, il sera possible de procéder à l'identification des paramètres du modèle d'étalonnage. Il existe des méthodes de mesure dites internes et externes. Une méthode interne mesure les informations à partir des valeurs encodeuses ou d'autres dispositifs qui sont installés directement sur ou dans la structure du robot. À l'inverse, les méthodes externes utilisent des appareils qui procèdent à des mesures sous la forme de données cartésiennes. Une vaste sélection d'appareils de mesure est possible pour mesurer ces poses.

Malgré tous les appareils de mesures disponibles commercialement, plusieurs travaux sont effectués avec des dispositifs de mesure fabriqués en laboratoire. Ce choix est généralement motivé par l'obtention d'un plus grand contrôle et de flexibilité. Les sous-sections suivantes présentent une revue des appareils qui ont été utilisés dans des travaux d'étalonnage de robot industriel.

Voici une compilation de plusieurs travaux qui ont été classés selon le type d'appareil de mesure utilisé :

#### 1. Théodolite

Le théodolite est un instrument servant à mesurer des angles dans les plans horizontaux et verticaux. En plus du domaine de l'ingénierie, l'appareil est aussi utilisé dans les domaines de la topographie, l'astronomie, la géodésie et l'archéologie.

Driels et Pathre (1991) présentent la méthode nommée Vison-Based Automatic Theodolite (VBAT) qui est une méthode automatique de mesure partielle de la pose de l'effecteur. Ce système est fabriqué en laboratoire sans outil de précision. Il utilise une caméra dont l'orientation est contrôlée par un système de moteur pas-à-pas. Le système est capable de détecter des déplacements de l'ordre de 0.025 mm. Il précise que des paramètres du VBAT doivent aussi être étalonnés.

Dans l'article de Whitney *et al.* (1986), il est fait l'utilisation de théodolite dans une application de la méthode des moindres carrés dans le cadre d'un projet d'étalonnage de robots sériels. Son travail présente aussi des considérations non géométriques. Jarvis (1987) utilise le fonctionnement de théodolite dans un système qui à partir de la triangulation permet de mesurer avec précision une position tridimensionnelle permettant de faire la calibration de robot.

## 2. Capteur acoustique

Les systèmes de capteur acoustique permettent de mesurer la distance entre un émetteur et un récepteur en se basant sur la vitesse du son. Ces systèmes doivent prendre en compte que la vitesse du son varie en fonction de l'humidité, l'altitude, la fréquence, la pression barométrique et les courants d'air, mais majoritairement par la température.

Stone et Sanderson (1987) utilisent un système comportant cinq émetteurs et quatre récepteurs. Il permet une plage de mesure est de 30 cm à 250 cm avec une résolution de 0.1 cm. L'auteur spécifie que la précision du système est de  $\pm 0.02$  cm. Les mesures utilisent le principe de positionnement par triangulation.

## 3. Interféromètres

Un interféromètre permet de mesurer des distances en utilisant la vitesse de déplacement de la lumière (laser). On retrouve souvent des interféromètres couplés avec des servomoteurs, qui déplacent celui-ci en élévation et azimut. L'utilisation d'appareil de mesure au laser est fréquente depuis le début des années 2000.

Par contre, quelques travaux, comme Lau *et al.* (1985), l'ont introduit dès les années 1980. Celui-ci présente l'introduction des interféromètres laser pour lire la position et l'orientation de l'effecteur d'un robot. Ensuite, Gong *et al.* (2000), Newman *et al.* (2000), Alici *et al.* (2006), Ye *et al.* (2006) et Aoyagi *et al.* (2010) présentent une expérimentation d'étalement utilisant un appareil laser de poursuite. Leur utilisation de l'appareil est similaire dans ces travaux. Ceux-ci vont mesurer un artéfact ponctuel sur le poignet du robot. Ces données sont ensuite utilisées dans la procédure d'identification.

Dans l'article de Ha (2008), il est utilisé un interféromètre avec une surface de référence connue. Cette technique est aussi utilisée à l'aide de caméra CCD. Une approche similaire est utilisée dans l'article de English *et al.* (2002). Gatla *et al.* (2007) présentent une technique similaire, mais utilisant un pointeur laser simple. Il fait la lecture de la position du pointeur sur la surface pour en déduire les paramètres réels du robot.

Quelques rares travaux, dont Nubiola *et al.* (2013) et Nubiola et Bonev (2013), vont utiliser les interféromètres pour mesure plusieurs points sur l'effecteur.

#### 4. Capteur linéaire

Les capteurs linéaires ou LVDT permettent la mesure d'une distance avec une très grande précision et une très grande fiabilité malgré leur faible coût. Malheureusement, ces appareils ont généralement une faible course.

Goswami *et al.* (1993) puis Nubiola et Bonev (2014b) procèdent à la mesure de l'effecteur à l'aide de ces capteurs. La technique utilisée permet d'obtenir l'information sur la position et l'orientation de l'effecteur. Une variante est présentée dans Karlsson et Brogårdh (2001) où l'appareil est combiné avec un inclinomètre.

#### 5. Caméra

L'utilisation de caméra CCD (*charge-couple devise*) est fréquente dans le domaine. C'est un outil très versatile, dont l'interprétation de la sortie (c.-à-d. l'image obtenue), est laissée

à chacun. Par contre, l'analyse d'une image est plus demandant que l'utilisation de capteur dont la sortie est plus simple (c.-à-d. une position, une distance ou encore une force).

L'utilisation de caméra nécessite que celle-ci soit adéquatement calibrée. Des travaux, tels que Hanqi *et al.* (1995), Zhuang *et al.* (1995), Meng (2001), Motta *et al.* (2001) et Meng et Zhuang (2007) incluent les paramètres de la caméra dans l'équation cinématique pour qu'ils soient identifiés en même temps que ceux du robot. Ces travaux tentent d'améliorer la méthode d'identification des paramètres de la caméra CCD. D'autres travaux tels que Watanabe *et al.* (2006) contournent le problème en proposant des manipulations qui soustraient les paramètres intrinsèques de la caméra.

Leur utilisation est très diversifiée. Traslosheros *et al.* (2013) utilisent une caméra installée sur l'effecteur du robot pour déterminer la distance relative par rapport à un objet sphérique fixe. Wang *et al.* (2012a) l'utilisent pour mesurer la distance d'un cadre plantaire utilisé pour objet de référence pour l'étalonnage.

Une méthode moins conventionnelle est présentée par Ruther *et al.* (2010). La procédure met en œuvre une caméra montée comme effecteur qui fait l'observation de sa structure (robot lui-même) à l'aide d'un miroir. Selon l'auteur, l'avantage est de minimiser le nombre de référentiels externe impliqué dans l'identification des paramètres.

Jwu-Sheng *et al.* (2012), In-Won et Jong-Hwan (2011) et Park *et al.* (2012) proposent deux méthodes où des lasers sont émis à partir de l'effecteur et projetés sur un écran. La projection est observée par une caméra stationnaire.

## 6. Caméra stéréo

Déjà, au début des années 1990, les caméras stéréo sont utilisées dans le domaine d'étalonnage. Bennett *et al.* (1991) présentent une méthode où les paramètres de la caméra sont ajoutés au modèle d'identification.

Renaud *et al.* (2006) présentent une méthode pour utiliser une caméra 3D qui facilite le

problème de calibration de la caméra. Il utilise une plaque de calibration à partir de laquelle seulement huit photos sont nécessaires pour étalonner les paramètres de la caméra. Ensuite, celle-ci est attachée à l'effecteur pour effectuer la procédure d'étalonnage typique.

Boochs *et al.* (2010) proposent une solution utilisant la photogrammétrie pour améliorer la précision de positionnement. En utilisant plusieurs caméras fixes autour de la cellule robotique, l'effecteur muni de plusieurs cibles (D.E.L.) est observé. Avec un système en boucle fermé, le contrôle adapte la position du robot.

Une analyse de la rigidité d'un robot delta est faite dans Gonzalez-Hernandez et Castillo-Castaneda (2013) à partir d'images obtenues d'une caméra. La caméra a été utilisée à l'aide du MATLAB ToolBox - Camera Calibration ToolBox.

## 7. Machine à mesurer tridimensionnelle (CMM)

Driels *et al.* (1993) présentent une méthode d'étalonnage similaire au présent projet. L'outil de mesure utilisé permet la mesure de la pose complète. La motivation du travail est d'utiliser un maximum d'information à partir de chaque configuration.

Lightcap *et al.* (2008) utilisent une CMM pour l'acquisition de données dans le cadre de l'étalonnage non géométrique d'un robot sériel.

### 2.6.4 Identification des paramètres

Le processus d'identification des paramètres est essentiel à l'étalonnage. Cette étape permet de compiler les données pour proposer un modèle cinématique amélioré d'un robot. La méthode qui est utilisée dans la majorité des travaux est celle des moindres carrés (*Least-Square method*). En effet, les premiers articles des années 1980 présentent déjà son utilisation. Parmi ceux-ci, on retrouve Hayati (1983), Foulloy et Kelley (1984) et Everett et Hsu (1988). Comme les équipements de calcul n'avaient pas la puissance d'aujourd'hui, les applications de la méthode n'étaient pas les mêmes. Par exemple, Stone et Sanderson (1987) utilisent la méthode des moindres carrés dans la première phase de sa procédure d'identification. Celle-ci

lui permet d'identifier les paramètres des cercles pour ensuite retrouver les paramètres de son modèle.

De cette époque à aujourd'hui, la majorité des travaux vont utiliser la méthode d'identification pour faire l'identification des paramètres tel qu'elle est faite aujourd'hui. On retrouve la technique dans Bennett et Hollerbach (1991), Driels *et al.* (1993), Karan et Vukobratović (1994), Houde (2006), Aoyagi *et al.* (2010) et Joubair (2012).

D'autres travaux présentent des méthodes d'identification différentes. Par exemple, Aoyagi *et al.* (2010) utilisent des réseaux de neurones pour faire l'identification des paramètres non géométriques. Les réseaux de neurones sont aussi utilisés dans Wang *et al.* (2012a). Dolinsky *et al.* (2007) présentent une méthode basée sur les algorithmes génétiques.

### **2.6.5 Compensation**

Une fois que les erreurs des paramètres identifiés, le modèle sont mathématiquement plus précis. Toutefois, si le robot est d'origine commerciale, l'accès au modèle du contrôleur est fort probablement sécurisé. Dans ces cas, seuls les étalonnages par le fabricant pourront modifier directement le modèle interne du contrôleur. Néanmoins, pour certains robots, le modèle est disponible. Toutefois, la documentation n'est pas toujours fournie ; la signification des paramètres doit être explorée par expérimentation.

Dans ces cas, l'utilisation de fausse configuration (*fake target*) est souvent préférable lors de la compensation. Ces fausses configurations sont calculées en deux phases. Tout d'abord, à partir de la pose souhaitée, une configuration est calculée avec le modèle étalonné. Cette configuration est ensuite utilisée avec le modèle du contrôleur (le plus souvent, c'est le modèle nominal) pour trouver une pose compensée. L'idée générale est que l'erreur de positionnement appliqué à cette pose compensée devrait approcher de la pose souhaitée. Cette méthode est utilisée au Laboratoire de Commandes et Robotique de l'École de Technologie Supérieure.

Dans Alici *et al.* (2006), la compensation est faite directement à partir de fonction prédictive générée par la méthode *Particle Swarm Optimisation* (PSO) proposée par Eberhart et Kennedy (1995). L'auteur conclut que l'application de la méthode est une avancée significative dans le domaine de l'étalonnage automatique.

Dans Abele *et al.* (2007), une méthode est démontrée pour convertir l'effet non géométrique des joints dans un espace tridimensionnel sans avoir à utiliser des équations de la cinématique inverse. L'application de cette méthode tente d'améliorer la précision de positionnement dans un mouvement, l'un des problèmes majeurs des robots d'usinage.

Finalement, Boochs *et al.* (2010) présentent une méthode de compensation en temps réel à l'aide d'un appareil de photogrammétrie (NDI).

## **2.7 Conclusion**

Ce chapitre a présenté les bases de la théorie entourant l'étalonnage des robots industriels. Il est clair que la majorité des notions ont été fixées dès les premiers articles au début des années 1980. Les avancements dans le domaine résident surtout dans de nouvelles méthodes issues d'appareils de mesure toujours de plus en plus précis. Il existe aussi une tendance à chercher des procédures qui ne requièrent pas l'utilisation d'appareils de mesure coûteux. Les caméras, utilisées entre autres dans le domaine de la photogrammétrie, sont l'un des appareils qui semblent être l'un des favoris. L'un des intérêts de la technologie est qu'il existe maintenant beaucoup de caméras industrielles dont les paramètres internes ne nécessitent pas une calibration particulière.

## CHAPITRE 3

### MODÉLISATION DU ROBOT : LR Mate 200iC DE FANUC

#### 3.1 Introduction

La modélisation d'un robot permet de trouver les relations géométriques et non-géométriques de sa physionomie. Cette analyse permet de calculer la cinématique directe qui permet de déterminer la pose de l'effecteur du robot en fonction de la position de ces articulations. Elle permet aussi de trouver la cinématique inverse permettant de déterminer les positions des articulations en fonction d'une pose de l'effecteur du robot. Dans le cadre de ce projet d'étalonnage, la modélisation de la cinématique directe et inverse permettra de faire la génération des configurations d'étalonnage au Chapitre 4. De plus, au Chapitre 5, elle va permettre d'obtenir un modèle nominal dont les paramètres pourront ensuite être identifiés.

Ce chapitre présente le processus de modélisation géométrique directe et indirecte du robot LR Mate 200iC de FANUC. Des considérations non géométriques, soit l'élasticité des composantes mécaniques, sont ensuite introduites. Finalement, le modèle nominal qui sera utilisé dans le cadre de l'étalonnage est présenté.

#### 3.2 Description du robot expérimental

Le FANUC LR Mate 200iC (Figure 1.3) est un robot sériel à six axes rotatifs. Le fabricant l'a remplacé par le modèle LR Mate 200iD. Le robot à l'étude fait partie des robots de la plus petite gamme de FANUC. En effet, il pèse 27 kg et possède une capacité de charge de 5 kg. Sa répétabilité théorique est de l'ordre de 0.02 mm et sa portée est de 704 mm. Il a été conçu pour travailler dans des domaines tels que l'assemblage, l'usinage, le chargement, l'ébavurage, l'approvisionnement et la manipulation.

### 3.3 Modélisation géométrique directe

Comme il a été présenté à la Section 2.6.1, il existe plusieurs méthodes pour représenter la géométrie d'un robot sériel. Peu importe celle qui est choisie, l'objectif est de pouvoir mettre en relation les positions angulaires des articulations et cartésiennes de l'effecteur. L'action de calculer la pose de l'effecteur à partir du positionnement des articulations est appelée la modélisation géométrique directe (MGD). Tandis que calculer les positions des articulations à partir de la pose de l'effecteur se nomme la modélisation géométrique inverse (MGI). Avant d'entamer ces deux étapes, il est nécessaire de positionner les référentiels qui seront utilisés.

#### 3.3.1 Attribution des référentiels

La modélisation qui sera privilégiée est celle de Denavit-Hartenberg modifiée (DHM). Des référentiels sont attribués à chaque partie indépendante du robot et des relations sont trouvées deux à deux dans l'ordre d'enchaînement des joints à partir de la base et jusqu'à l'effecteur.

Pour fixer les référentiels ( $\mathcal{F}$ ), la procédure présentée par Craig (2005) a été respectée. Celle-ci se résume par les points suivants.

- a. Identifier les axes des joints par des droites infinies et les identifier par leur numéro de joint. Pour les étapes 2 à 5, considérez les axes consécutifs.
- b. Identifier soit la perpendiculaire commune ou le point d'intersection entre les droites  $i$  et  $i + 1$ . Sur la droite  $i$ , fixer l'origine du référentiel à l'intersection de la perpendiculaire commune ou au point d'intersection des axes.
- c. Fixer  $\hat{Z}_i$  sur la droite  $i$ .
- d. Si les droites  $i$  et  $i + 1$  s'intersectent, fixer  $\hat{X}_i$  normal sur le plan des deux droites. Sinon, fixer  $\hat{X}_i$  sur la perpendiculaire commune.
- e. Fixer  $\hat{Y}_i$  pour respecter le principe des systèmes de coordonnées de main droite.
- f. Le référentiel  $\mathcal{F}_0$  doit être confondu au référentiel  $\mathcal{F}_1$  lorsque l'angle du premier joint est nul.

- g. Pour le référentiel du dernier joint ( $\mathcal{F}_N$ ), l'origine et l'orientation de  $\hat{X}_N$  et  $\hat{Y}_N$  peut être placé de manière arbitraire. Toutefois, il est préférable de les placer de manière à rendre certains paramètres nuls.

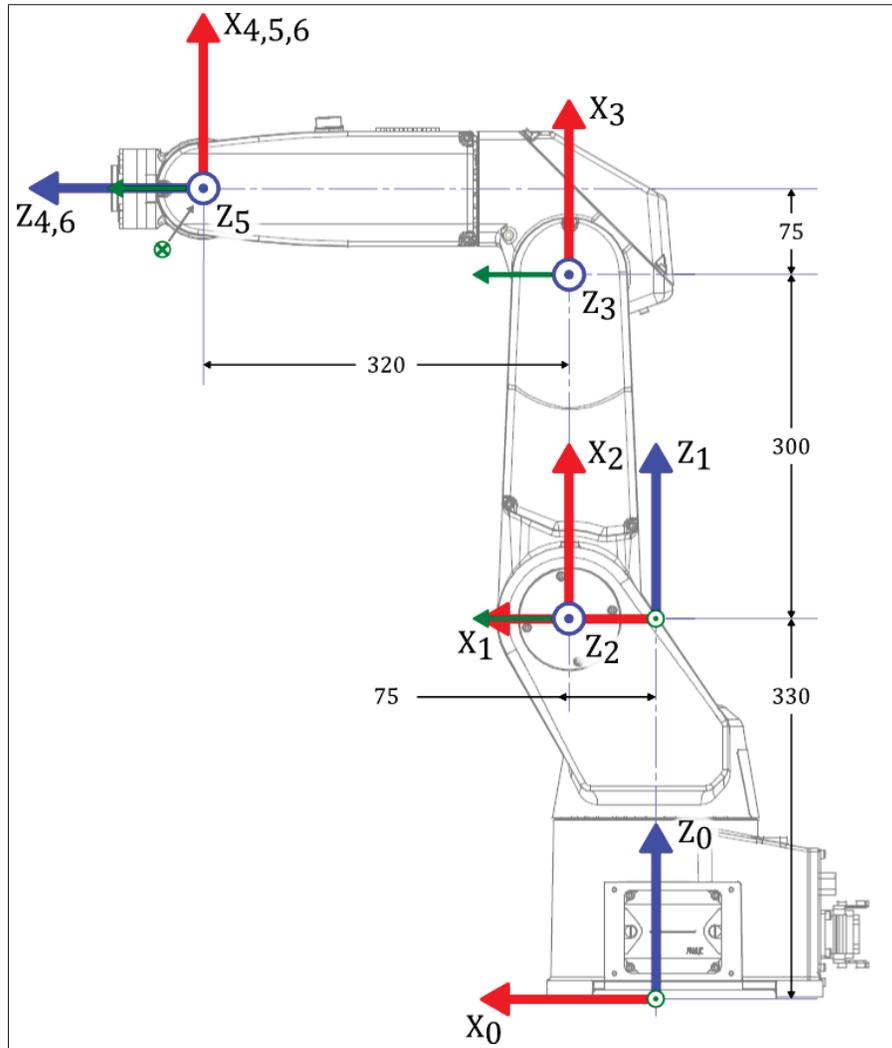


Figure 3.1 Attribution des référentiels sur le LR Mate 200iC.

La Figure 3.1 présente les référentiels après avoir appliqué ces étapes sur le LR Mate 200iC. Il est souvent plus simple d'orienter le sens positif des axes Z dans le sens de rotation positive des articulations. Par contre, dans le cas présent, il a été préféré d'autres orientations pour permettre des comparaisons plus aisées avec des travaux connexes.

### 3.3.2 Modélisation géométrique directe

Une fois que l'attribution des référentiels est effectuée, la modélisation géométrique directe est possible. Cette attribution peut s'écrire sous la forme de plusieurs matrices homogènes. Toutefois, il est plus simple de travailler à partir de paramètres. Comme énoncé plus tôt, la méthode exploitée est celle de DHM. Voici la définition des paramètres dans ce standard.

Tableau 3.1 Définition des paramètres DHM modifiés

Symbols	Definitions
$\alpha_i$	: Angle de $\hat{Z}_i$ à $\hat{Z}_{i+1}$ autour de $\hat{X}_i$
$a_i$	: Distance de $\hat{Z}_i$ à $\hat{Z}_{i+1}$ le long de $\hat{X}_i$
$\theta_i$	: Angle de $\hat{X}_{i-1}$ à $\hat{Z}_i$ autour de $\hat{Z}_i$
$d_i$	: Distance de $\hat{X}_{i-1}$ à $\hat{Z}_i$ le long de $\hat{Z}_i$

Les paramètres DHM issues de l'attribution des référentiels faite à la Section 3.3.1 sont présentés dans le Tableau 3.2. Comme le LR Mate 200iC possède un système qui lie la position des articulations 2 et 3, le modèle doit être ajusté. En effet, lorsque l'articulation 2 est déplacée, elle entraîne l'articulation 3 dans le sens inverse. La modélisation de cette caractéristique se solde par une addition de  $\theta_2$  à la valeur de  $\theta_3$  à la ligne 3 du Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Paramètres nominaux du LR Mate 200iC

$i$	$\alpha_i$ [°]	$a_i$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$d_i$ [mm]
1	0	0	$\theta_1$	330
2	-90	75	$\theta_2 - 90$	0
3	0	300	$\theta_2 + \theta_3$	0
4	-90	75	$\theta_4$	320
5	90	0	$\theta_5$	0
6	-90	0	$\theta_6$	80

Le Tableau 3.2 est alors transformé sous la forme de matrices homogènes ( $\mathbf{H}_{i+1}^i$ ). Ces matrices contiennent, dans la partie supérieure gauche, les éléments de la réorientation ( $\mathbf{R}_{i+1}^i$ ) et dans la

partie supérieure droite, les éléments de la translation ( $\mathbf{T}_{i+1}^i$ ).

$$\mathbf{H}_{i+1}^i = \begin{bmatrix} \left[ \mathbf{R}_{i+1}^i \right]_{3,3} & \left[ \mathbf{T}_{i+1}^i \right]_{3,1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\hat{X}}(\alpha_i) \mathbf{T}_{\hat{X}}(a_i) \mathbf{R}_{\hat{Z}}(\theta_i) \mathbf{T}_{\hat{Z}}(d_i) \quad (3.1)$$

$$= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_i \\ s\theta_i c\alpha_i & c\theta_i c\alpha_i & -s\alpha_i & -s\alpha_i d_i \\ s\theta_i s\alpha_i & c\theta_i s\alpha_i & c\alpha_i & c\alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

où  $c\theta_i = \cos(\theta_i)$  et  $s\theta_i = \sin(\theta_i)$  et ainsi de suite.

Pour trouver le MGD, il suffit de procéder aux multiplications successives des matrices homogènes dans leur ordre d'enchaînement.

$$\mathbf{H}_6^0 = \mathbf{H}_1^0 \mathbf{H}_2^1 \mathbf{H}_3^2 \mathbf{H}_4^3 \mathbf{H}_5^4 \mathbf{H}_6^5 = \prod_{i=1}^6 (\mathbf{H}_i^{i-1}) \quad (3.3)$$

Comme illustré à la Figure 3.1, le référentiel  $\mathcal{F}_0$  appartient à la base du robot, tandis que le référentiel  $\mathcal{F}_6$  appartient au poignet du robot. La partie variable du modèle ( $\mathbf{H}_6^0$ ) est contenue entre ces deux référentiels. Toutefois, pour que le modèle soit complet, il faut ajouter le référentiel de travail ( $\mathcal{F}_W$ ) en amont du référentiel  $\mathcal{F}_0$  et le référentiel de l'outil ( $\mathcal{F}_T$ ) en aval du référentiel  $\mathcal{F}_6$ . La cinématique qui inclut ces derniers référentiels est présentée sous cette forme :

$$\mathbf{H}_T^W = \mathbf{H}_0^W \mathbf{H}_6^0 \mathbf{H}_T^6 \quad (3.4)$$

Les relations  $\mathbf{H}_0^W$  et  $\mathbf{H}_T^6$  diffèrent des autres ; leur position et orientation possèdent six degrés de liberté. Pour refléter ceci, les matrices homogènes qui les composent sont calculées à partir

de six paramètres de la manière suivante :

$$\mathbf{H}_0^W = \mathbf{T}_{\hat{X}}(x_W)\mathbf{T}_{\hat{Y}}(y_W)\mathbf{T}_{\hat{Z}}(z_W)\mathbf{R}_{\hat{X}}(\alpha_W)\mathbf{R}_{\hat{Y}}(\beta_W)\mathbf{R}_{\hat{Z}}(\gamma_W) \quad (3.5)$$

$$\mathbf{H}_T^6 = \mathbf{T}_{\hat{X}}(x_T)\mathbf{T}_{\hat{Y}}(y_T)\mathbf{T}_{\hat{Z}}(z_T)\mathbf{R}_{\hat{X}}(\alpha_T)\mathbf{R}_{\hat{Y}}(\beta_T)\mathbf{R}_{\hat{Z}}(\gamma_T) \quad (3.6)$$

Si seule la position du point central de l'outil importe, les paramètres d'orientation peuvent être retirés de  $\mathbf{H}_T^6$ . Dans le cadre du présent travail, cette considération est appliquée. L'Équation (3.6) est remplacée par l'Équation (3.7).

$$\mathbf{H}_T^6 = \mathbf{T}_{\hat{X}}(x_T)\mathbf{T}_{\hat{Y}}(y_T)\mathbf{T}_{\hat{Z}}(z_T) \quad (3.7)$$

### 3.4 Modélisation géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse, ou cinématique inverse permet de trouver les configurations qui permettent d'obtenir une pose désirée de l'effecteur ( $\mathbf{H}_{d6}^0$ ), présentée à l'Équation (3.8). Cette pose est présentée par une matrice homogène subdivisée en quatre vecteurs (trois vecteurs pour la réorientation des axes et un vecteur pour la translation de l'origine). Il existe plusieurs méthodes pour trouver ces relations. Les deux principales sont l'analyse algébrique et l'analyse géométrique. La méthode qui a été développée pour résoudre la cinématique inverse du robot LR Mate 200iC permet de trouver toutes les configurations possibles. Elle s'inspire partiellement de la méthode de Pieper's présentée dans Craig (2005) et de la méthode présentée dans Nubiola et Bonev (2014a).

$$\mathbf{H}_{d6}^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

L'approche utilise une méthode géométrique pour résoudre les trois premières articulations. En effet, il est exploité que les articulations 2 et 3 travaille dans un plan, tandis que les trois dernières articulations sont trouvées en procédant à l'analyse algébrique.

### 3.4.1 Articulation 1

La position de l'articulation 1 dépend directement de la position du référentiel de l'articulation 4 ( $\mathbf{T}_4^0$ ). Comme les référentiels des articulations 4, 5 et 6 sont confondus, cette position peut être obtenue à partir  $\mathbf{H}_{d6}^0$ .

$$\mathbf{T}_4^0 = \begin{bmatrix} t_{x4}^0 \\ t_{y4}^0 \\ t_{z4}^0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{d6}^0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_6 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

La position de l'articulation 1 peut prendre deux valeurs. Lorsque le robot travaille de face (*Front*), on utilise  $\theta_{1,1}$ . Lorsque celui-ci travaille de dos (*Back*), on utilise  $\theta_{1,2}$ . Ensuite, considérant que les articulations 1 jusqu'à 4 présentent leur référentiels dans un plan, on peut trouver ces valeurs directement à partir de  $\mathbf{T}_4^0$ .

$$\theta_{1,1} = \text{atan2}(t_{y4}^0 - d_6 a_y, t_{x4}^0 - d_6 a_x) \quad (3.10)$$

$$\theta_{1,2} = \text{atan2}(d_6 a_y - t_{y4}^0, d_6 a_x - t_{x4}^0) \quad (3.11)$$

Notez qu'il est possible de tomber dans un cas de singularité, lorsque  $t_{y4}^0 = d_6 a_y$  et que  $t_{x4}^0 = d_6 a_x$ . Dans ce cas,  $\mathbf{T}_4^0$  est alignée avec l'axe de rotation de l'articulation 1 ; la valeur de l'articulation est arbitraire.

### 3.4.2 Articulations 2 et 3

Les valeurs des articulations 2 et 3 sont trouvées à partir de la géométrie du triangle illustré à la Figure 3.2. Notez que le côté  $A$  du triangle est différentié de l'axe  $X_2$ . Ainsi, on peut remarquer que l'angle  $\gamma$  est l'angle entre  $C$  et  $X_2$  tandis que pour  $\beta$ , l'angle est entre  $C$  et  $A$ .

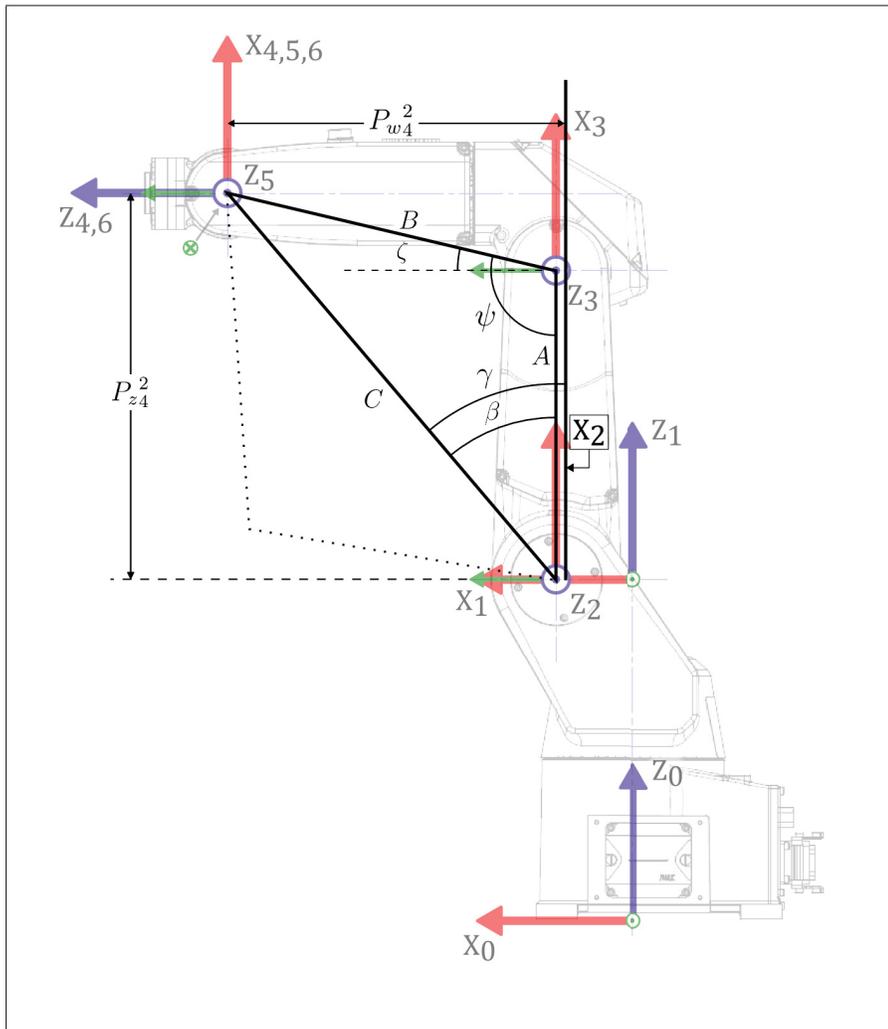


Figure 3.2 Schéma des angles des articulations 2 et 3 pour les calculs de la cinématique inverse.

Les valeurs des Équations (3.12) à (3.16) sont utilisés pour l'obtention des valeurs des articulations 2 et 3. Les dimensions  $A$  et  $B$  sont obtenues à partir des paramètres du robot tandis que

les autres doivent être calculés en fonction de la pose désirée. Les Équations (3.12) et (3.13) permettent de trouver  $P_{z_4}^2$  et  $P_{w_4}^2$ . Ce dernier est la distance de  $\hat{X}_2$  à  $\hat{X}_4$  dans la direction  $\hat{Y}_2$ . Notez que le signe  $\pm$  de l'Équation (3.13) doit être  $+$  lorsque  $\theta_1$  est en position de type *front* et  $-$  pour le type *back*.

$$P_{z_4}^2 = P_{z_4}^0 - d_1 \quad (3.12)$$

$$P_{w_4}^2 = \sqrt{(P_{x_4}^0)^2 + (P_{y_4}^0)^2} \pm d_1 \quad (3.13)$$

$$A = a_3 \quad (3.14)$$

$$B = \sqrt{(a_4)^2 + (d_4)^2} \quad (3.15)$$

$$C = \sqrt{(P_{z_4}^2)^2 + (P_{w_4}^2)^2} \quad (3.16)$$

Les angles du triangle sont ensuite calculés à partir de ces dimensions. Les équations sont présentées comme suit :

$$\gamma = \text{atan2}(P_{w_4}^2, P_{z_4}^2) \quad (3.17)$$

$$\beta = \text{acos}\left(\frac{A^2 + C^2 - B^2}{2AC}\right) \quad (3.18)$$

$$\psi = \text{acos}\left(\frac{A^2 + B^2 - C^2}{2AB}\right) \quad (3.19)$$

$$\zeta = \text{asin}\left(\frac{a_4}{B}\right) \quad (3.20)$$

Finalement, les valeurs de  $\theta_2$  et  $\theta_3$  dépendent de la configuration moteur désirée. Il est nécessaire d'adapter les calculs suivants selon celle-ci. Le Tableau 3.3 présente la compilation des quatre possibilités.

### 3.4.3 Articulations 4, 5 et 6

Le calcul de valeur des trois dernières articulations utilise une analyse algébrique de la matrice de rotation entre l'articulation 4 et 6 ( $\mathbf{R}_{d_6}^4|_{\theta_4=0}$ ). Cette matrice sera nommée  $\mathbf{R}$  pour alléger la notation. Ses valeurs sont obtenues à partir de  $\mathbf{R}_{d_0}^4|_{\theta_4=0}$  et de  $\mathbf{R}_{d_6}^0$ .  $\mathbf{R}_{d_0}^4|_{\theta_4=0}$  est calculé avec les

Tableau 3.3 Compilation des configurations moteurs possibles

$\theta_2$	$\theta_3$	Mode $\theta_1$	Mode $\theta_{2-3}$
$\gamma - \beta$	$\frac{\pi}{2} - \psi + \zeta$	<i>Front</i>	<i>Elbow up</i>
$\gamma + \beta$	$\frac{\pi}{2} + \psi + \zeta - 2\pi$	<i>Front</i>	<i>Elbow down</i>
$-\gamma + \beta$	$\frac{\pi}{2} + \psi + \zeta - 2\pi$	<i>Back</i>	<i>Elbow up</i>
$-\gamma - \beta$	$\frac{\pi}{2} - \psi + \zeta$	<i>Back</i>	<i>Elbow down</i>

valeurs de  $\theta_1$  à  $\theta_3$  déterminées lors des étapes précédentes.  $\mathbf{R}_{d6}^0$  est la sous-matrice de rotation à l'Équation (3.8).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{d6}^4|_{\theta_4=0} = \mathbf{R}_{d0}^4|_{\theta_4=0} \mathbf{R}_{d6}^0 \quad (3.21)$$

La matrice  $\mathbf{R}$  prend la forme présentée à l'Équation (3.22) où  $\theta_5$  peut être déduit à l'aide de l'Équation (3.23). Selon le signe utilisé pour la racine carrée, le robot travaillera avec le poignet non retourné (*non-flip*) ou retourné (*flip*).

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_6 s_4 - c_4 c_5 s_6 & -c_4 s_5 \\ c_4 s_6 + c_5 c_6 s_4 & c_4 c_6 - c_5 s_4 s_6 & -s_4 s_5 \\ c_6 s_5 & -s_5 s_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\theta_5 = \text{atan2} \left( \pm \sqrt{\mathbf{R}_{3,1}^2 + \mathbf{R}_{3,2}^2}, \mathbf{R}_{3,3} \right) \quad (3.23)$$

Ensuite,  $\theta_4$  et  $\theta_6$  sont obtenus à partir des Équations (3.24) et (3.27). Notez que si  $\theta_5$  prend la valeur de 0 ou  $\pi$ , le sinus de celui-ci devient nul rendant l'Équation (3.24) impossible à solutionner. Ainsi, si  $\theta_5 = 0$ , on utilise les Équations (3.25) et (3.28) tandis que si  $\theta_5 = \pi$ , on

utilise les Équations (3.26) et (3.29).

$$\theta_{4,1} = \text{atan2} \left( \frac{-\mathbf{R}_{2,3}}{s_5}, \frac{-\mathbf{R}_{1,3}}{s_5} \right) \quad (3.24)$$

$$\theta_{4,2} = 0 \quad (3.25)$$

$$\theta_{4,3} = 0 \quad (3.26)$$

$$\theta_{6,1} = \text{atan2} \left( \frac{-\mathbf{R}_{3,2}}{s_5}, \frac{-\mathbf{R}_{3,1}}{s_5} \right) \quad (3.27)$$

$$\theta_{6,2} = \text{atan2} (-\mathbf{R}_{1,2}, \mathbf{R}_{1,1}) \quad (3.28)$$

$$\theta_{6,3} = \text{atan2} (\mathbf{R}_{1,2}, -\mathbf{R}_{1,1}) \quad (3.29)$$

### 3.4.4 Conversion vers le vrai robot

Une fois avoir déterminées les valeurs de  $\theta_1$  à  $\theta_6$  dans le modèle robotique, elles doivent être converties pour correspondre au robot physique si on les utiliser directement dans le contrôleur. Pour les convertir, on doit changer les valeurs selon les relations suivantes.

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1^R \\ \theta_2^R \\ \theta_3^R \\ \theta_4^R \\ \theta_5^R \\ \theta_6^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ -\theta_3 - \theta_2 \\ -\theta_4 \\ -\theta_5 \\ -\theta_6 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

### 3.5 Modélisation non géométrique

Par définition, le modèle géométrique tient compte uniquement de la géométrie de la physionomie du robot. Pour obtenir un modèle plus complet, il est nécessaire de prendre en compte certaines considérations non géométriques, telles que l'élasticité des composantes mé-

caniques, l'effet de la température, le frottement et les jeux d'engrenage. Toutefois, plusieurs de ces phénomènes sont si faibles qu'ils peuvent être négligés. Pour la modélisation du robot LR Mate 200iC, l'élasticité des composantes mécaniques sera la seule caractéristique non géométrique modélisée.

### 3.5.1 Élasticité des composantes mécaniques

Les moteurs des articulations sont contraints à travailler contre la gravité. Ainsi, il existe une déformation qui peut être approximée par une fonction linéaire et proportionnelle au torque appliquée sur un moteur. Cette relation est la suivante :

$$\delta\theta_i = c_i\tau_i \quad (3.31)$$

où  $c_i$  est une constante et  $\tau_i$  est le torque appliqué sur un moteur de l'articulation  $i$ . Quoique la constante  $c_i$  peut être trouvée par expérimentation, il est aussi possible de poser sa valeur à 0. Elle pourra être trouvée durant la phase d'identification des paramètres. Quant au torque  $\tau_i$ , s'il ne peut pas être lu directement dans le contrôleur du robot, il doit être calculé théoriquement. La méthode de Newton-Euler (Section 3.5.2) est utilisée pour faire cette approximation.

### 3.5.2 Algorithme dynamique par itération de Newton-Euler

Cette méthode tirée de Craig (2005) permet de faire le contrôle de mouvement dynamique de robot. Elle permet de trouver les équations dynamiques qui servent entre autres au contrôle de trajectoire. Il est toutefois possible de considérer le non-mouvement du robot comme un cas particulier de trajectoire dont la vitesse est nulle ainsi que accélération. Ces considérations permettront d'ailleurs de simplifier les équations de l'algorithme pour obtenir ceux qui seront présentés. Les considérations à prendre en compte sont les suivantes.

- a. La force gravitationnelle sera considérée en l'intégrant au vecteur d'accélération linéaire de l'articulation 0.

$$\dot{\mathbf{v}}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

- b. Les vitesses et les accélérations angulaires de toutes les articulations sont nulles.

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \forall i = [1; 6] \quad (3.33)$$

- c. Les masses des articulations et les positions des centres de masses des articulations sont présentées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Centre de masse des articulations et de l'outil.

$i$	$\mathbf{m}_i [kg]$	$\mathbf{Tc}_i$		
		$x [mm]$	$y [mm]$	$z [mm]$
1	0	0	0	0
2	10	150	0	0
3	0	0	0	0
4	10	0	0	160
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
$T$	2.7	50	-25	-100

Les premiers calculs de l'algorithme permettent de trouver les vecteurs des forces d'inertie appliquées au centre de masse de chaque articulation ( $\mathbf{q}$ ) à partir des masses de ceux-ci ( $\mathbf{m}$ ), des matrices de rotations ( $\mathbf{R}$ ) et des vecteurs d'accélération linéaires ( $\dot{\mathbf{v}}$ ). Les calculs doivent être faits de la base vers le dernier joint :

Pour  $i = 0$  à 5

$$\mathbf{q}_{i+1} = \mathbf{m}_{i+1} \mathbf{R}_i^{i+1} \dot{\mathbf{v}}_i \quad (3.34)$$

Par la suite, aux Équations (3.35) et (3.36), ces forces sont compilées à partir du dernier joint jusqu'à la base pour obtenir les vecteurs des forces exercées sur chaque articulation venant des autres articulations ( $\mathbf{f}$ ). Ensuite, le torque ( $\mathbf{n}$ ) appliqué à chaque articulation est déduit à partir de ces forces, de la position du centre de gravité de l'articulation ( $\mathbf{Tc}$ ). La composante

en  $\hat{Z}$  du torque de chaque articulation est le torque appliqué au moteur de l'articulation. Elle est calculée à l'Équation (3.37).

Pour  $i = 6$  à 1

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{R}_{i+1}^i \mathbf{f}_{i+1} + \mathbf{q}_{i+1} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{R}_{i+1}^i \mathbf{n}_{i+1} + \mathbf{T} \mathbf{c}_i \mathbf{q}_{i+1} + \mathbf{T}_{i+1}^i (\mathbf{R}_{i+1}^i \mathbf{f}_{i+1}) \quad (3.36)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{n}_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Ainsi, à partir de  $\boldsymbol{\tau}_i$  obtenu à l'Équation (3.37) et des constantes  $c_i$ , on peut modéliser l'élasticité des composantes mécaniques tel que proposé à l'Équation (3.31).

### 3.6 Modélisation cinématique nominale

Le modèle cinématique nominal comporte les paramètres géométriques et non géométriques. L'ajout de l'élasticité des composantes mécaniques se fait en l'additionnant aux positions des articulations. Le Tableau 3.5 présente les paramètres géométriques et non géométriques du modèle du FANUC LR Mate 200iC, soit le modèle cinématique nominale.

Tableau 3.5 Modèle cinématique nominal.

$i$	$\alpha_i$ [°]	$a_i$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$d_i$ [mm]
1	0	0	$\theta_1 + c_1 \tau_1$	330
2	-90	75	$\theta_2 - 90 + c_2 \tau_2$	0
3	0	300	$\theta_2 + \theta_3 + c_3 \tau_3$	0
4	-90	75	$\theta_4 + c_4 \tau_4$	320
5	90	0	$\theta_5 + c_5 \tau_5$	0
6	-90	0	$\theta_6 + c_6 \tau_6$	80

### 3.7 Modélisation cinématique d'étalonnage

Le modèle cinématique d'étalonnage sera utilisé pour identifier les paramètres au Chapitre 5. À cette fin, des paramètres de variations sont ajoutés aux paramètres nominaux. Comme plusieurs d'entre eux sont redondants ou non identifiable, ceux-ci sont ignorés. Le sujet de la redondance des paramètres est présenté à la Section 5.2. Le Tableau 3.6 contient le modèle cinématique d'étalonnage.

Tableau 3.6 Modèle cinématique d'étalonnage.

$i$	$\alpha_i [^\circ]$	$a_i [mm]$	$\theta_i [^\circ]$	$d_i [mm]$
1	0	0	$\theta_1 + c_1\tau_1$	330
2	$-90 + \delta\alpha_2$	$75 + \delta a_2$	$\theta_2 + \delta\theta_2 + c_2\tau_2$	$\delta d_2$
3	$\delta\alpha_3$	$300 + \delta a_3$	$\theta_3 + \delta\theta_3 + c_3\tau_3$	0
4	$-90 + \delta\alpha_4$	$75 + \delta a_4$	$\theta_4 + \delta\theta_4 + c_4\tau_4$	$320 + \delta d_4$
5	$90 + \delta\alpha_5$	$\delta a_5$	$\theta_5 + \delta\theta_5 + c_5\tau_5$	$\delta d_5$
6	$-90 + \delta\alpha_6$	$\delta a_6$	$\theta_6 + \delta\theta_6 + c_6\tau_6$	$320 + \delta d_6$

Des paramètres de variations sont aussi ajoutés aux référentiels externes. Ainsi, les paramètres des Équations (3.5) et (3.7) sont présentés dans la Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Paramètres des référentiels externes.

	$x [mm]$	$y [mm]$	$z [mm]$	$\alpha [^\circ]$	$\beta [^\circ]$	$\gamma [^\circ]$
$\mathbf{H}_0^W$	$x_W + \delta x_W$	$y_W + \delta y_W$	$z_W + \delta z_W$	$\alpha_W + \delta\alpha_W$	$\beta_W + \delta\beta_W$	$\gamma_W + \delta\gamma_W$
$\mathbf{H}_T^6$	$x_T + \delta x_T$	$y_T + \delta y_T$	$z_T + \delta z_T$	N/A	N/A	N/A

Tandis que les valeurs nominales du modèle robotique (Tableau 3.6) ont pu être déterminées à l'aide de l'analyse faite dans ce chapitre, celles des référentiels externes (Tableau 3.7) seront trouvées une fois l'installation physique préparée.

### 3.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les étapes essentielles de la modélisation robotique. Dans un premier temps, à la Section 3.3.1, les référentiels ont été attribués aux différentes articulations du robot. Ensuite, dans le cadre de la modélisation géométrique directe (Section 3.3.2), les paramètres DHM ont été présentés. Les matrices homogènes de transformation sont ensuite calculées à partir de ceux-ci. À ceci est ajoutée la modélisation de référentiels externes pour le référentiel de travail et celui de l'outil. Par la suite, à la Section 3.4, une présentation de la modélisation géométrique inverse est faite. Cette portion du modèle est uniquement géométrique. Elle sera utilisée au Chapitre 4.4 lors de la génération des configurations d'étalonnage.

Le modèle géométrique est complété par une modélisation non géométrique qui prend en considération l'élasticité des composantes mécaniques (Section 3.5). La méthode présentée est une variante simplifiée de l'algorithme dynamique par itération de Newton-Euler. Considérant tous ces aspects, un modèle cinématique nominal est présenté à la Section 3.6. Dans la Section 3.7, des paramètres de variation sont ajoutés à ce modèle pour qu'il soit compatible avec l'algorithme d'identification des paramètres de la Section 5.2.

## CHAPITRE 4

### SYSTÈMES DE MESURE ET CHOIX DES CONFIGURATIONS

#### 4.1 Introduction

L'étalonnage nécessite comme données des mesures de la position de l'effecteur du robot. Dans ce projet, deux types d'appareils seront utilisés à cette fin. Ils seront utilisés de manière à pouvoir comparer les performances respectives dans une application d'étalonnage géométrique. Il s'agit du MaxSHOT 3D de Creaform et du Laser Tracker ION de FARO. Le premier est un appareil de photogrammétrie portable qui, à ce jour, n'a pas encore été utilisé dans le domaine de l'étalonnage de robots industriels. Le deuxième est un laser de poursuite dont l'utilisation a été fait plusieurs fois dans le passé pour ce genre de travaux.

L'une des caractéristiques marquant du MaxSHOT 3D face au Laser Tracker ION est qu'il doit observer les éléments à mesurer selon un grand nombre de points de vue pour compléter le processus de mesure. Quant à lui, le Laser Tracker ION doit impérativement rester au même endroit. Ainsi, peu importe si l'on utilise l'un ou l'autre de ces appareils, on doit considérer son mode de fonctionnement lors de la sélection des configurations à mesurer. En effet, certaines configurations peuvent placer l'effecteur du robot dans une position qui rendent impossible la prise de mesure. Ainsi, un algorithme de génération de configurations est nécessaire pour s'assurer d'éviter de telles situations.

Dans le cadre du présent travail, l'algorithme de génération de configurations a l'objectif de fournir uniquement des mesures mesurable à partir des deux appareils. Pour tenter de maximiser l'objectivité de la comparaison, la mesure de l'effecteur dans une configuration donnée est effectuée à partir des deux appareils dans la même séquence. C'est-à-dire qu'une fois le robot dans une configuration, les deux appareils seront utilisés avant que le robot se déplace vers la prochaine configuration.

Pour faire un choix optimal quant aux configurations à mesurer, une sélection de celles-ci sera effectuée. L'analyse par indices d'observabilité est utilisée à cette fin. Celle-ci permet de quantifier la performance d'identification d'un ensemble de configurations.

Ce chapitre présente une description de l'appareil de photogrammétrie portable, son fonctionnement, une brève analyse de sa précision ainsi qu'une méthode proposée pour optimiser l'acquisition des données. Les mêmes sujets seront couverts concernant l'appareil laser de poursuite. Ensuite, le chapitre se consacre à présenter une méthode de génération de configurations. Finalement, les configurations d'étalonnages sont sélectionnées à l'aide d'une analyse par indices d'observabilité.

## 4.2 Système de photogrammétrie portable

Le système de photogrammétrie portable MaxSHOT 3D de Creaform (Figure 4.1) est composé d'un logiciel, VXelements, d'un cadre de référence (*reference frame*), de deux barres étalons (*scale bar*), de cibles encodées (*coded target*) et de l'appareil MaxSHOT 3D (Figure 1.2). Tous ces éléments doivent être utilisés ensemble pour faire la modélisation d'une scène.



Figure 4.1 Système de photogrammétrie MaxSHOT 3D de Creaform.

Lorsqu'on souhaite utiliser l'appareil, on doit lancer le module de VXshot du logiciel VXelements (Figure 4.2) qui permet de guider la modélisation. Ce module permet de prendre des photos de la scène et de voir apparaître les éléments qui la composent dans le visualisateur du logiciel. Chaque élément est d'abord de teinte rouge puis transite vers le jaune et le vert selon la qualité de leur observation ; le rouge et le jaune indiquent une faible et moyenne qualité tandis que le vert représente la qualité est recherchée. Pour augmenter la qualité d'observation d'un objet, il suffit de le prendre en photo avec le plus d'autres éléments possible et en couvrant un grand spectre d'angle. Le module est aussi muni d'un indicateur de distance qui guide l'opérateur dans sa prise de photo. En respectant celui-ci, les photos sont prises entre environ 1.5 et 3.5 mètres de la scène.



Figure 4.2 Module VXShot du logiciel VXelements de Creaform.

Lorsque la qualité d'observation des éléments souhaités est satisfaisante, la phase d'acquisition peut être arrêtée. Le modèle de la scène doit être affiné en utilisant l'option de finalisation du

modèle. Ceci permet d'exporter le modèle vers VXelements. À partir de celui-ci, un rapport contenant tous les éléments du modèle avec les informations sur leur position tridimensionnel peut être généré.

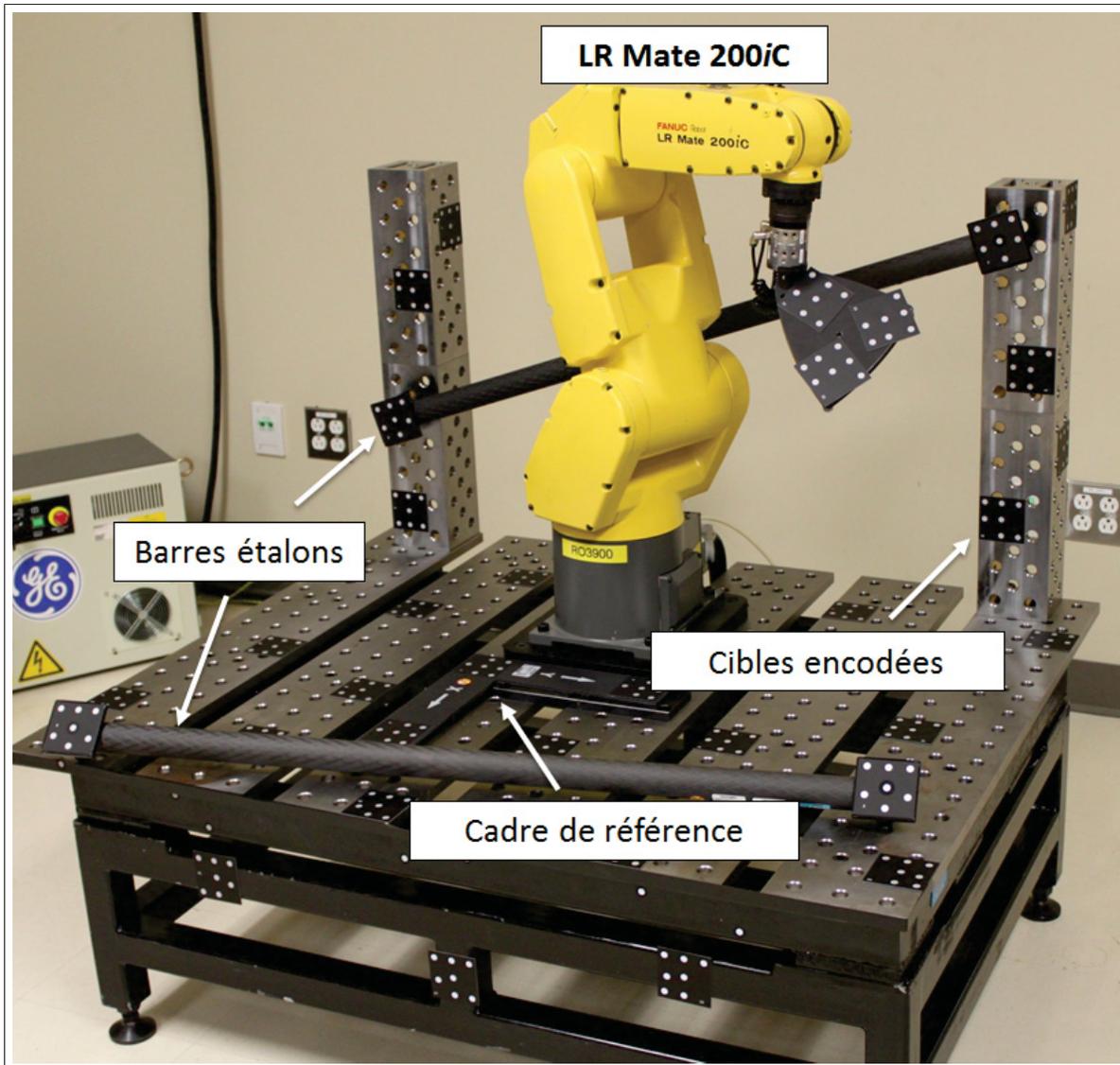


Figure 4.3 Installation du système de photogrammétrie dans l'environnement du LR Mate 200iC.

En ce qui concerne le matériel, le cadre de référence permet au logiciel d'avoir une géométrie connue. De plus, il fixe le système de référence du modèle. Celui-ci et tous les autres élé-

ments à fixer sur la scène sont magnétiques. Ensuite, les barres étalons permettent de mettre à l'échelle la scène. Il est recommandé de les installer dans des orientations pertinentes ; les disposer de manière perpendiculaire est généralement souhaitable. Finalement, les cibles encodées permettent de situer l'appareil MaxSHOT 3D dans l'espace tridimensionnel. Pour positionner celles-ci, la règle qui a été utilisée pour les scènes du projet est d'avoir des espacements d'environ 30 centimètres entre des cibles voisines.

#### **4.2.1 Méthode d'acquisition de données**

Le processus d'acquisition des mesures de l'effecteur à partir de ce système nécessite de faire la modélisation de chaque scène où le robot présente une nouvelle configuration. Cette méthode permet d'obtenir toutes les mesures nécessaires. Le nombre de photos à prendre lors de la modélisation, soit environ 60, représente un temps d'exécution de 3 à 5 minutes par configuration. La modélisation de l'ensemble de configuration prend alors plus d'une heure. Néanmoins, il est possible d'accélérer le processus en fragmentant la scène (Figure 4.4). En effet, l'ensemble des composantes posées dans l'espace de travail (cadre de référence, barres étalons, cibles encodées excluant celles de l'outil) est fixe tandis que les cibles de l'effecteur sont les seules à être mobile. La partie fixe fait partie de toutes les scènes des configurations. Elle peut être acquise une fois dans VXshot et être ensuite utilisée comme canevas de départ pour l'acquisition de toutes les configurations.

Quant à elle, la partie mobile peut contenir soit des cibles codées (Figure 4.3), des cibles non codées (Figure 4.5) ou les deux. Si on utilise des cibles codées, le traitement des données est plus rapide, car chaque cible est unique. Quant aux cibles non codées, elles sont numérotées dans l'ordre d'acquisition qui n'est pas le même à chaque fois. L'identification des cibles non-codées doit être faite de manière manuelle dans vxElement. Néanmoins, il est possible d'automatiser cette reconnaissance à l'aide d'un algorithme basé sur la distance entre celles-ci.

Dans le cadre du projet, l'outil est une plaque triangulaire (Figure 4.5) sur lequel a été placé fixé trois socles magnétiques. Pour les mesures à partir de l'appareil de photogrammétrie, trois

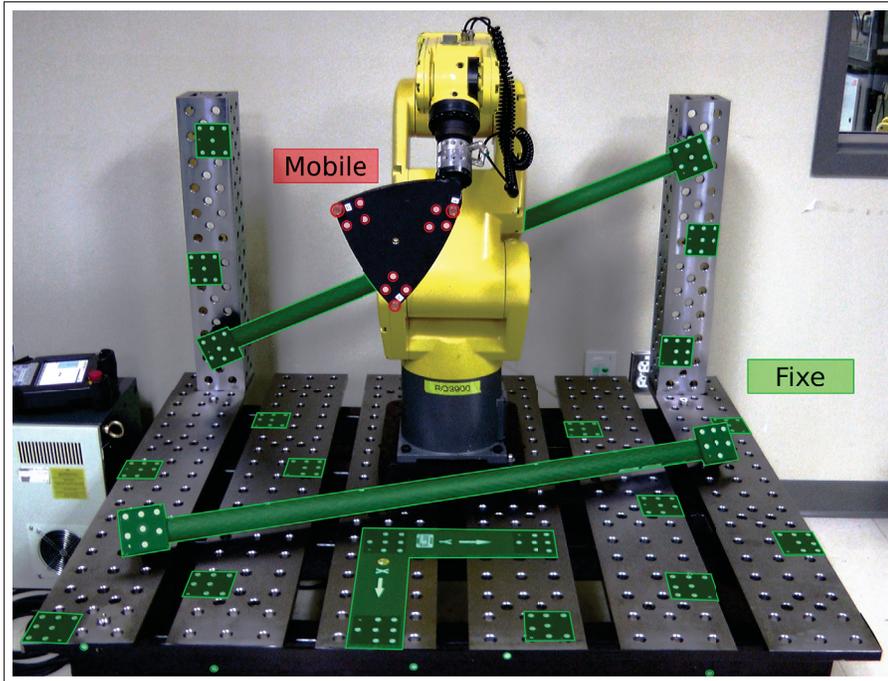


Figure 4.4 Segmentation de la scène du robot.  
Partie fixe en bleu et partie mobile en rouge.

cibles non codées montées sur des demi-sphères ont été placées sur des socles magnétiques. Sur la Figure 4.5, le socle 1 est vide, le socle 2 est muni d'une demi-sphère à miroirs orthogonaux (SMR) pour le laser de poursuite et une demi-sphère avec cible non codée pour le MaxSHOT 3D est installée sur le socle 3.

Ainsi, les manipulations pour faire l'acquisition des mesures des configurations se résument par les étapes suivantes :

1. (5 min.) Installation des composants du système de photogrammétrie (Figure 4.3) excluant l'outil ;
2. (5 min.) Modéliser dans vxElement la partie fixe de la scène. Dupliquer les données de la scène pour chaque configuration à mesurer ;
3. (1 min.) Installer l'outil muni des cibles non codées ;
4. (0.5 min.) Déplacer le robot dans une configuration à mesurer ;
5. (1 min.) Continuer la modélisation jusqu'à ce que l'outil soit ajouté ;

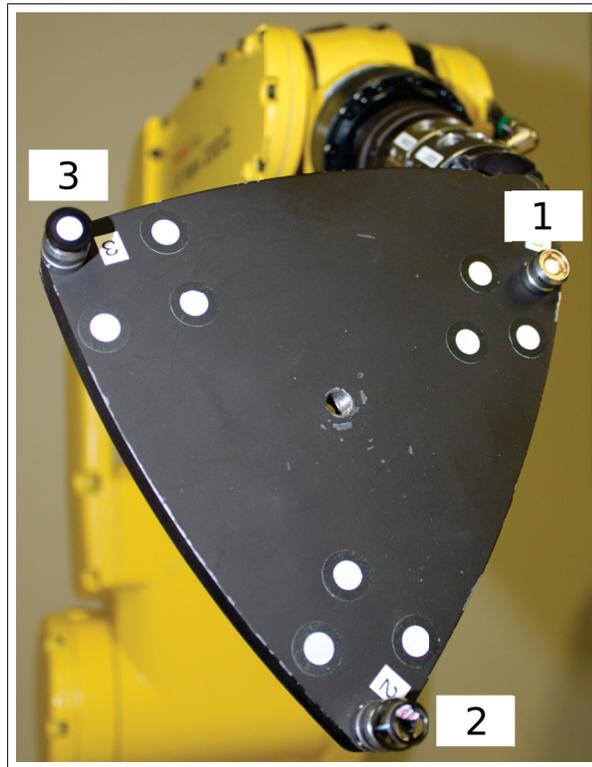


Figure 4.5 Plaque triangulaire munie de trois socles magnétiques.

6. (0.5 min) Finaliser le modèle et extraire les positions des cibles vers un fichier texte ;
7. (30 min.) Répéter les étapes 4. à 6. jusqu'à ce que toutes les configurations soient mesurées ;
8. (5 min.) Compiler les résultats.

Les temps présentés peuvent varier si des macros ou des algorithmes sont développés. Creaform propose un interface de programmation qui offre quelques fonctionnalités qui peuvent aider à accélérer le processus.

#### 4.2.2 Analyse des mesures du système de photogrammétrie

Selon les spécifications de Creaform, le MaxSHOT 3D possède une précision volumétrique de l'ordre de 0.025 mm/m, fonction de la distance des deux cibles les plus éloignées. Avant d'utiliser l'appareil pour faire la prise de mesure de l'étalonnage, une brève analyse de répétabilité

a été effectuée. Celle-ci consiste à modéliser et évaluer la distance entre les cibles des barres étalons des deux appareils C-Track de Creafom, et ce, à 30 reprises. Les barres étalons appartiennent à deux générations de C-Track différent. Le plus vieux modèle sera identifié comme étant le modèle 1, le plus récent sera le modèle 2. L'installation utilisée pour cette expérimentation est présentée à la Figure 4.6. Cette installation permettra de prendre les mesures des distances  $d_1$  et  $d_2$  des deux barres au même moment. Ensuite, les barres seront retournées pour faire les mesures des distances  $d_3$  et  $d_4$ . Ces barres étalons possèdent 8 cibles dont quatre à plat (C0 à C3) et quatre à 45 degrés (C4 à C7). Quatre distances sont certifiées par barre, ce qui fait un total de 8 distances. Celles-ci sont disponibles à la Figure 4.7.

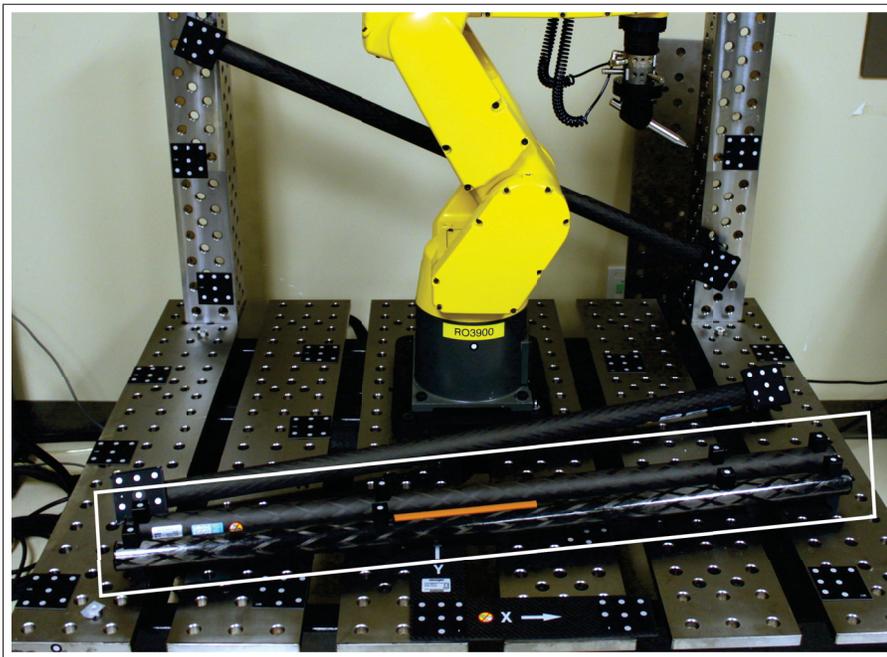


Figure 4.6 Expérimentation avec les barres étalons des C-Track de Creafom.

Le Tableau 4.1 présente les distances du certificat d'étalonnage ainsi que les valeurs résultantes de la distribution de mesures prises.

En analysant ces résultats, on remarque d'abord que les erreurs de mesures faites sur la barre étalon du modèle 1 sont généralement le double des erreurs faites sur l'autre barre. L'écart-

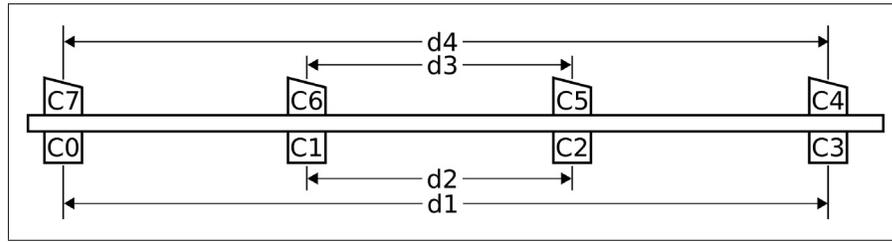


Figure 4.7 Distances certifiées des barres étalons des C-Track de Creaform.

Tableau 4.1 Comparaison des valeurs mesurées par le MaxSHOT 3D et celles du certificat

C-Track	Distance	Certificat		Mesurées		
		Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Erreur maximale [mm]
Modèle 1	d1	958.321	0.010	958.252	0.018	0.104
	d2	479.624	0.009	479.616	0.043	0.100
	d3	959.396	0.018	959.328	0.019	0.105
	d4	160.065	0.016	160.092	0.011	0.046
Modèle 2	d1	959.208	0.010	957.240	0.010	0.059
	d2	479.307	0.009	479.343	0.010	0.067
	d3	958.892	0.010	958.911	0.016	0.044
	d4	159.982	0.016	159.965	0.008	0.035

type des mesures aussi est plus grand. Cette différence nous laisse croire que la barre étalon du modèle 1 est en moins bonne qualité. Ceci a été constaté visuellement ; les cibles qui la composent sont usées.

En excluant les données faites sur la barre usée, on remarque que les écarts-types des mesures sont de l'ordre de 0.010 mm, ce qui donne une dispersion statistique de  $\pm 0.030$  mm. De plus, la mesure la plus éloignée est 0.067 mm.

### 4.3 Système de mesure par le laser de poursuite

Le laser de poursuite est composé du logiciel *Tracker Utilities*, de sphères creuses munies de trois miroirs orthogonaux (SMR) et de plusieurs accessoires de fixation. Le logiciel permet

d'utiliser les nombreuses fonctions de l'appareil et de procéder à certaines configurations. Il peut toutefois être partiellement remplacé par des bibliothèques dynamiques (fichiers dll) qui permettent la communication avec l'appareil. Par contre, on y retrouve uniquement les fonctions de base.

### 4.3.1 Méthode d'acquisition

La méthode d'acquisition du laser de poursuite est plus rigide que celle du MaxSHOT 3D ; l'appareil permet la mesure d'une seule position à la fois. La méthode conventionnelle pour faire ces mesures est d'exploiter la fonctionnalité de poursuite de l'appareil. Celle-ci permet d'ajuster le point de vue (orientation du laser) en temps réel pour suivre le déplacement d'une cible. Ceci est possible, car les cibles sont munies de trois miroirs orthogonaux (Figure 4.8). Cette géométrie permet de retourner la lumière dans la direction opposée, et ce, peu importe l'orientation, du prisme. De plus, lorsque le rayon ne frappe pas le prisme en son centre, sa position est située au milieu des deux faisceaux. Ceci permet au laser de poursuite de s'ajuster en temps réel. Cette méthode est facile à implémenter, mais elle requière des manipulations tout au long du processus.

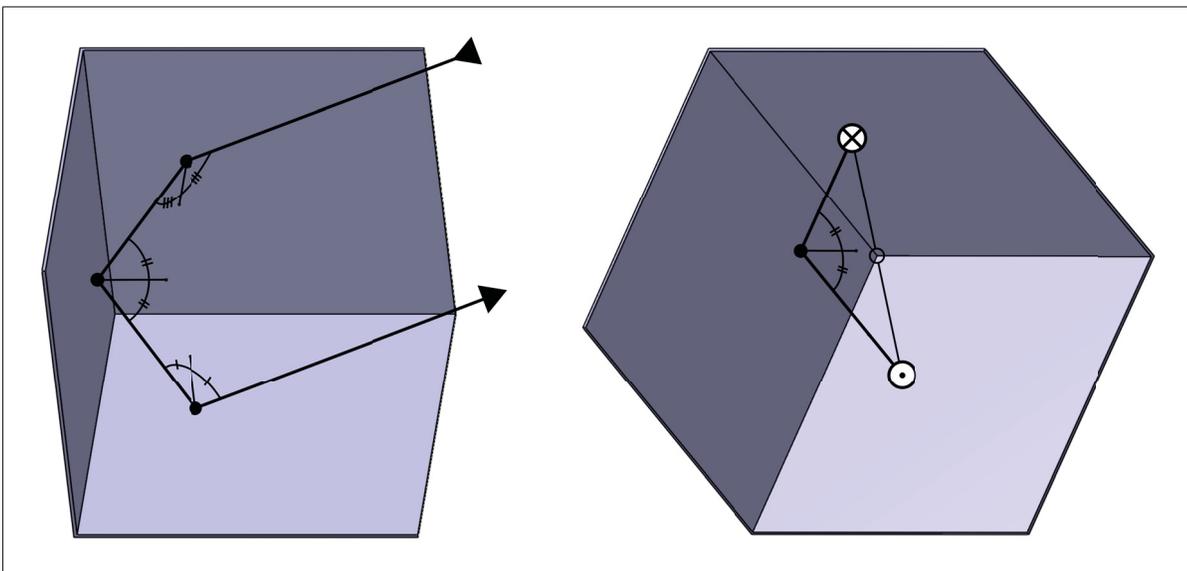


Figure 4.8 Principe de réflexion avec des miroirs orthogonaux.

Une méthode plus avancée est aussi disponible, soit la recherche par coordonnée. Si la position de la cible est connue moyennant une certaine précision, il est possible de lancer une recherche de cible dans une zone circulaire autour d'un point tridimensionnel. Ainsi, si une position a déjà été mesurée, il est facile d'y retourner.

Dans le cadre du projet, l'outil présenté à la Section 4.2.1 sera muni de trois demi-sphères à miroirs orthogonaux pour la mesure de l'effecteur à partir du laser de poursuite.

### 4.3.2 Analyse des mesures sur laser de poursuite

La précision volumétrique de l'appareil de mesure fourni par le fabricant est de 0.049 mm à une distance de 10 m. Une information intéressante concernant l'appareil est que considérant sa conception, les encodeurs qui mesurent l'orientation du module mobile sont moins précis que la précision du laser. Ainsi, il est généralement préférable de mesurer des distances parallèles à l'axe optique plutôt que perpendiculaire.

Une brève analyse a été effectuée pour valider la précision de l'appareil en plus de se familiariser avec son comportement. Elle consiste à la mesure à 50 répétitions de la barre étalon de l'appareil. La barre étalon est munie de deux socles magnétiques sur lesquels il est déposé deux SMR. La distance entre les centres de ces cibles a été certifiée.

Tableau 4.2 Comparaison des valeurs mesurées par le Laser Tracker ION et celle du certificat

	Certificat		Mesurées		
	Moyenne [mm]	Incertitude [mm]	Moyenne [mm]	Écart-type [mm]	Erreur maximale [mm]
Avant calibration	1050.688	$\pm 0.003$	1050.739	0.003	0.057
Après calibration	1050.688	$\pm 0.003$	1050.718	0.004	0.038

Les résultats présentés au Tableau 4.2 montrent que l'appareil possède une très bonne répétabilité et une précision très acceptable, même avant la calibration. À partir des mesures prises, une analyse supplémentaire a été effectuée pour observer le comportement tridimensionnel

des mesures (Figure 4.9). Celle-ci démontre que les mesures sont regroupées en trois nuages distincts. En observant l'ordre des mesures, on remarque que les premières mesures sont effectuées dans le cercle rouge, puis le vert et le bleu. Comme l'effet est présent en même temps et dans la même direction sur les deux SMR de la barre étalon, on peut attribuer le phénomène à un déplacement de l'appareil de mesure ou de la barre étalon.

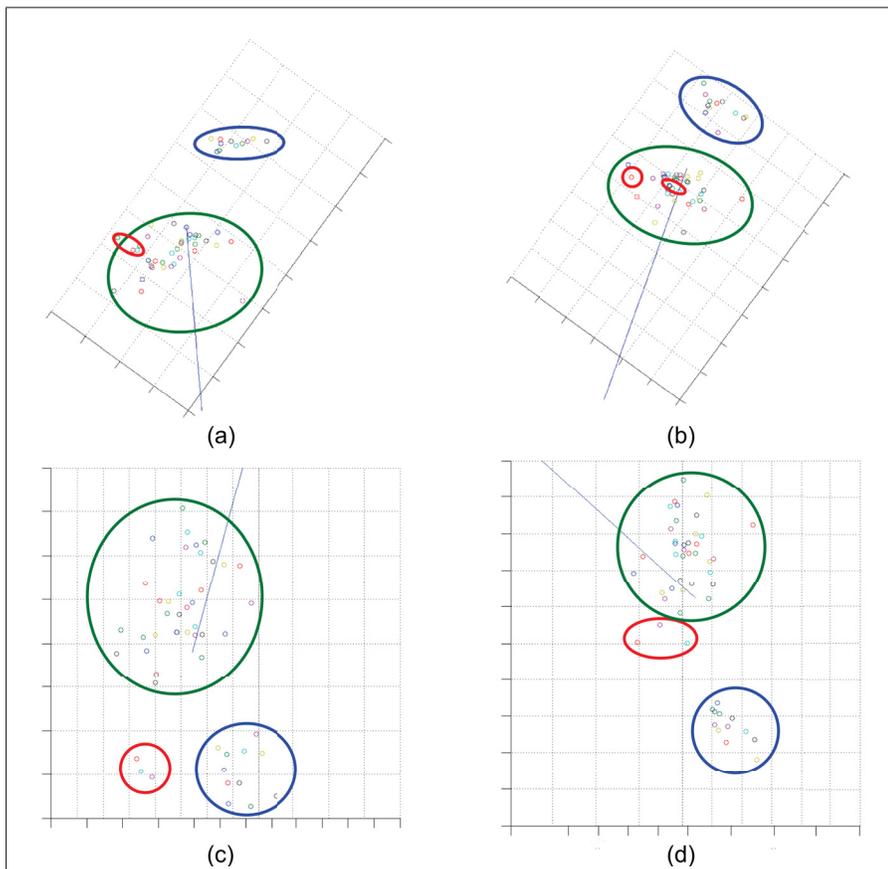


Figure 4.9 Comportement tridimensionnel des mesures du Laser Tracker ION.

#### 4.4 Sélection des configurations

La sélection des configurations est essentiellement un processus en deux étapes. La première est générer un grand nombre de configurations potentielles. En plus d'éviter d'être en collision avec le matériel, ces configurations doivent permettre la mesure de l'effecteur de l'outil. Il

est présenté à la Section 4.4.1 l'algorithme qui a été exploité dans le cadre du présent travail. Une fois ces configurations candidates préparées, il est nécessaire de faire une sélection d'un nombre raisonnable qui sera mesuré. Ce traitement est effectué à partir d'algorithme utilisant les indices d'observabilités. L'algorithme utilisé dans le cadre du projet est présenté à la Section 4.4.2.

#### **4.4.1 Détermination des configurations candidates**

La sélection des configurations qui seront utilisées pour faire l'étalonnage se fait dans un ensemble de configuration d'une grande dimension, qu'on nommera l'ensemble primaire. La dimension de cet ensemble primaire est importante ; un ensemble trop petit limite les possibilités tandis qu'un ensemble trop grand ajoute du temps de calcul et contient beaucoup de redondance. Tandis que la présence de redondance n'est pas problématique, l'augmentation du temps de calcul n'est pas significative avec une bonne méthode de programmation. Somme tout, les désavantages d'avoir un ensemble surdimensionné ne sont pas significatifs, car cette tâche est effectuée hors ligne. On préférera avoir un ensemble primaire d'une grande dimension.

Les configurations qui vont peupler l'ensemble primaire doivent respecter deux critères.

1. La configuration doit permettre la mesure de la position de l'outil selon le fonctionnement de l'appareil de mesure choisi ;
2. La configuration doit n'engendrer aucune collision (pendant le mouvement et à destination) ;

La méthode de génération utilisée est une recherche aléatoire à orientation contrôlée. Elle permet de générer des configurations dont l'orientation de l'outil est contrôlée pour permettre de prendre les mesures. La procédure à suivre est la suivante :

1. La position (X,Y,Z) de l'outil est déterminée de manière aléatoire (uniforme) dans une enveloppe de travail déterminé ;
2. L'orientation de l'outil (Équation 4.1) est calculée pour que l'outil permette la mesure.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

où  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{o}$  et  $\mathbf{a}$  sont respectivement les vecteurs des axes  $x, y$  et  $z$  du référentiel de l'outil. Elle est définie à partir de cette position et de la position de l'appareil de mesure. Il est souhaitable d'homogénéiser les vecteurs entre eux. Une méthode d'homogénéisation est présentée à l'Annexe I.

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{P}_L - \mathbf{P}_T}{\|\mathbf{P}_L - \mathbf{P}_T\|} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{a} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

$$\mathbf{o} = \mathbf{a} \mathbf{n} \quad (4.4)$$

3. L'orientation peut être modifiée autour de l'axe de mesure ( $\hat{Z}$ ) pour générer de la diversité.
4. Faire le calcul de la cinématique inverse (Section 3.4) pour déterminer une configuration, s'il y en existe une. Dans le cas où il en existe plusieurs, une sélection aléatoire a été faite.

#### 4.4.2 Analyse d'observabilité

Les indices d'observabilités permettent de caractériser un ensemble de configuration. L'indice d'observabilité qui est utilisé dans le projet est le  $O_1$  tiré de Joubair *et al.* (2013). Celui-ci a été présenté comme performant dans le cadre de l'étalonnage non géométrique.

$$O_1 = \frac{(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m)^{\frac{1}{m}}}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

où les variables  $\sigma$  représente les valeurs singulières de la matrice jacobienne d'un ensemble de configuration. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir du procédé algébrique de décomposition en valeurs singulières (*SVD*). La matrice jacobienne à décomposer est construite tel qu'il sera présenté à l'Équation 5.4. En comparant plusieurs ensembles, il est possible de trouver un ensemble de configurations maximisant l'observabilité des paramètres. Comme un très

grand nombre d'ensembles potentiels différents est possible, il n'est pas souhaitable de faire une recherche exhaustive pour trouver le meilleur ensemble. Le temps de calcul associé à un tel traitement est extrêmement long pour le gain potentiel à trouver le meilleur candidat.

Il est préféré des algorithmes de recherche heuristique qui propose une solution intéressant dans un délai acceptable. L'algorithme de classification utilisé est basé sur l'algorithme DETMAX présent dans Joubair *et al.* (2013).

1. Calculer  $J_i$ , la matrice jacobienne de chaque configuration ;
2. Définir  $n$ , la taille de l'ensemble d'étalonnage souhaité ;
3. Initialiser un ensemble  $Q$  contenant les index de  $n$  configurations dans l'ensemble primaire ;
4. Initialiser un ensemble  $R$  contenant les index des configurations dont l'index n'est pas présent dans  $Q$  ;
5. Initialiser les ensembles  $Q'_i$  qui contiennent l'ensemble  $Q$  et l'élément  $i$  de l'ensemble  $R$  ;
6. Concaténer dans  $J_Q$  les matrices jacobienes de tous les ensembles dont l'index est présent dans  $Q$  et dans  $J_{Q'_i}$  les matrices jacobienes de tous les ensembles dont l'index est présent dans  $Q'_i$ .
7. Calculer  $OI_Q$ , l'indice d'observabilité à partir de  $J_Q$  et  $OI_{Q'_i}$ , l'indice d'observabilité à partir de  $J_{Q'_i}$  ;
8. Si,
  - a. le plus grand  $OI$  est  $OI_Q$ , arrêté ;
  - b. le plus grand  $OI$  est dans  $OI_{Q'_i}$ , sauvegarder  $Q$  dans  $S$  et remplacer  $Q$  par  $Q_i$
9. Initialiser les ensembles  $Q'_i$  qui contiennent l'ensemble  $Q$  en excluant l'élément  $i$  de l'ensemble  $Q$  ;
10. Concaténer dans  $J_{Q'_i}$  les matrices jacobienes de tous les ensembles dont l'index est présent dans  $Q'_i$ .

11. Calculer  $OI_{Q'_i}$ , l'indice d'observabilité à partir de  $J_{Q'_i}$  ;
12. Si,
  - a. le plus grand  $OI$  est  $OI_{Q'_i}$  où  $Q'_i$  est égal à  $S$ , remplacer  $Q$  par  $Q_i$  et arrêté ;
  - b. le plus grand  $OI$  est dans  $OI_{Q'_i}$  où  $Q'_i$  n'est pas égal à  $S$ , remplacer  $Q$  par  $Q_i$

Une brève analyse a été effectuée pour tenter de qualifier l'impact de l'ensemble de départ sur l'algorithme de recherche. Sur les cas qui ont été étudiés, la majorité des itérations suivaient une tendance. Par contre, des cas aberrants étaient présents. Pour cette raison, il est recommandable d'effectuer au moins quelques itérations puis sélectionner celui dont les résultats sont les plus intéressants.

#### 4.5 Processus d'acquisition des données

Les données qui ont été acquises permettront de faire l'identification des paramètres du robot au Chapitre 5. De plus, ceux-ci ont permis de validation que l'expérimentation ait bien fonctionné. Pour s'assurer d'avoir un échantillon représentatif, un grand nombre de données est nécessaire pour ces analyses. Le nombre de configurations générées a été inspiré des travaux similaires, soit 1000 configurations. Dans cet ensemble, chaque configuration générée a été contrainte afin qu'elle considère que la prise de mesure doit être possible avec les deux appareils de mesure. Ensuite, l'algorithme de sélection par l'indice d'observabilité a été utilisé. Une représentation similaire est présentée à la Figure 4.10. On peut y voir que l'analyse a débuté avec la taille de l'ensemble d'étalonnage fixé à 20. Chaque taille est testée 20 fois avant de passer au suivant. L'algorithme a obtenu une convergence autour d'une taille de 35. Néanmoins, le meilleur ensemble trouvé est de taille 34 (identifié par le losange rouge).

Comme deux appareils de mesure ont été utilisés, il a été déterminé qu'il serait intéressant de procéder à des mesures simultanées pour ces 34 configurations. Les trois cibles de l'outil seront mesurées par le laser de poursuite avec les SMR, puis après avoir remplacé les demi-sphères par celle à cible non codée, les mesures à partir de l'appareil de photogrammétrie seront prises.

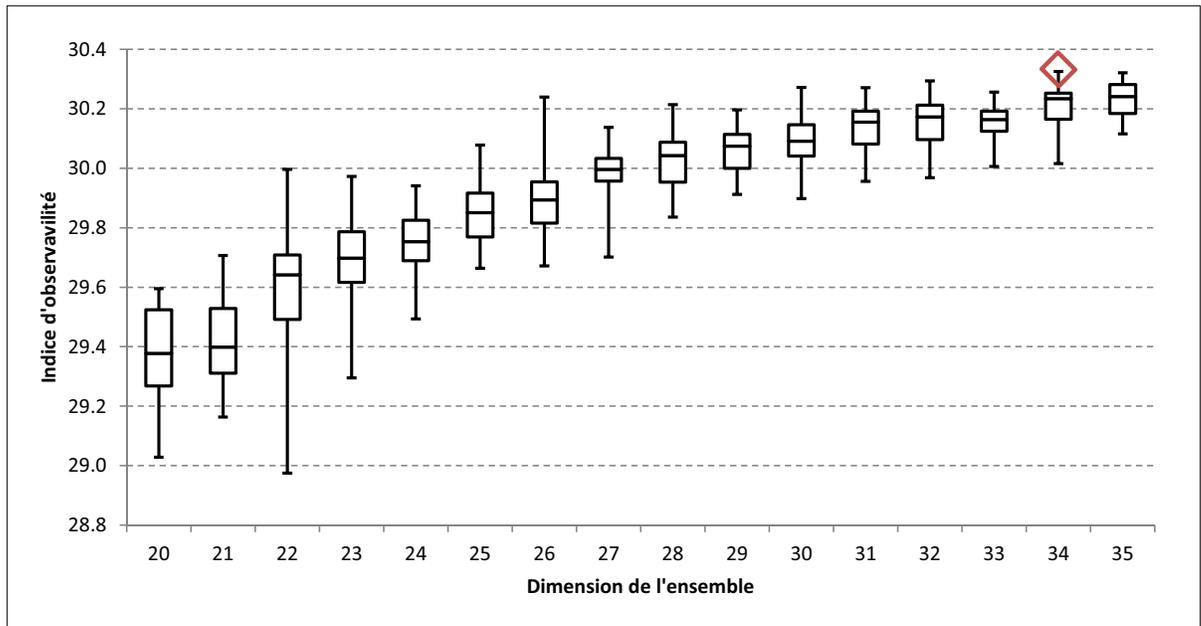


Figure 4.10 Distributions des indices d'observabilité.

Suivant ces 34 configurations d'étalonnage, les configurations de validation seront mesurées par le laser de poursuite.

L'installation de l'équipement est illustrée à la Figure 4.11. Pour transposer les mesures dans le même système de référence, trois socles magnétiques ont été déposés sur la table de travail du robot. Ceux-ci forment le référentiel "Unique". Pour transposer les mesures des deux appareils, ce référentiel a été mesuré à l'aide de chacun. Ainsi, celui-ci sera utilisé pour représenter les données des deux appareils de mesure.

En plus des mesures des configurations, la position du référentiel "Base" est mesurée. Pour ce faire, les articulations 1 et 2 du robot sont déplacées et mesurées dans plusieurs positions. Les mesures recueillies forment des cercles dont le centre coïncide avec l'axe de l'articulation. À partir de ces informations, la position du référentiel de l'articulation 1 ( $\mathcal{F}_1$ ) est approximée. À l'aide des paramètres nominaux du Tableau 3.2, le référentiel "Base" est déduit de  $\mathcal{F}_1$ .

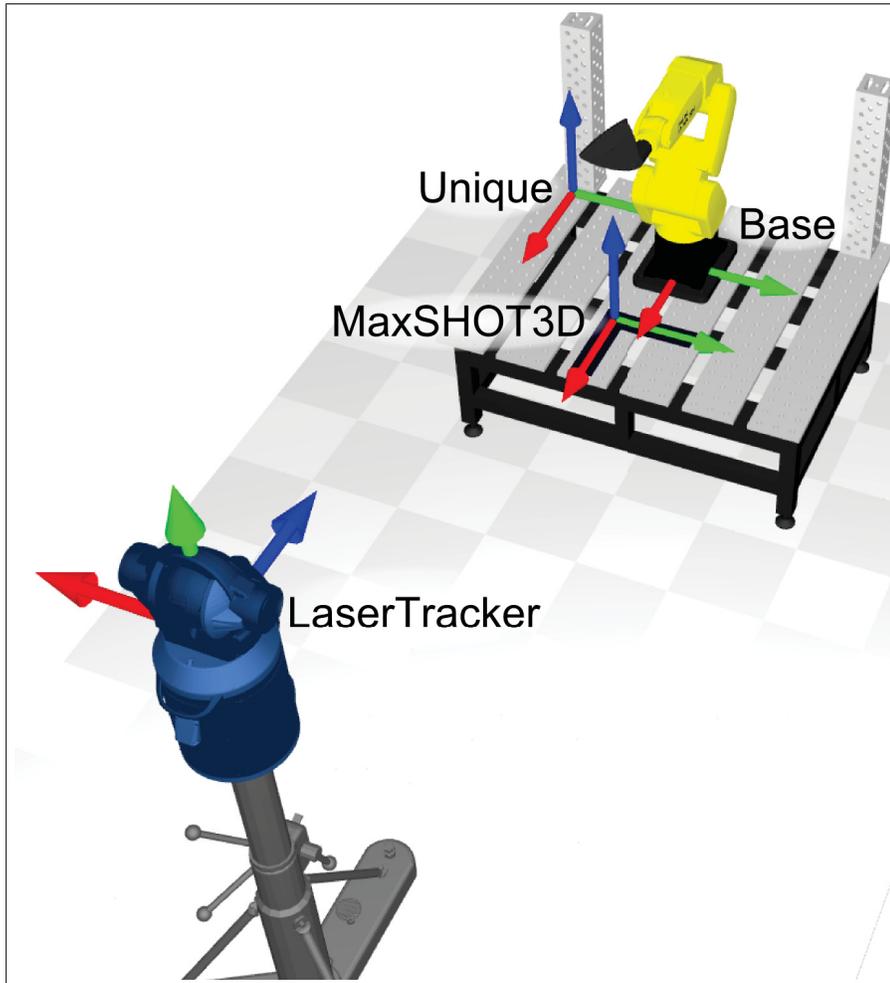


Figure 4.11 Référentiels utilisés pour l'expérimentation.

#### 4.5.1 Algorithme de transposition

L'algorithme de transposition permet de calculer la matrice de transformation qui doit être appliquée à n'importe quel vecteur dans un référentiel A pour qu'il soit représenté dans un référentiel B, défini par trois points connus. La matrice est obtenue à l'aide de trois points mesurés dans le référentiel A.

$$P_0^A = \begin{bmatrix} P_{0,x}^A \\ P_{0,y}^A \\ P_{0,z}^A \end{bmatrix} \quad P_1^A = \begin{bmatrix} P_{1,x}^A \\ P_{1,y}^A \\ P_{1,z}^A \end{bmatrix} \quad P_2^A = \begin{bmatrix} P_{2,x}^A \\ P_{2,y}^A \\ P_{2,z}^A \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Posons  $P_0^A$  comme étant l'origine du référentiel B,  $P_1^A$  comme l'axe X+ et  $P_2^A$  comme l'axe Y+. L'axe Z+ du référentiel B sera obtenu à partir de la multiplication vectorielle de l'axe X+ et de l'axe Y+.

$$H_B^A = \begin{bmatrix} N_B^A & O_B^A & A_B^A & P_B^A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$N_B^A = \frac{P_1^A - P_0^A}{|P_1^A - P_0^A|} \quad O_B^A = \frac{P_2^A - P_0^A}{|P_2^A - P_0^A|} \quad A_B^A = N_B^A O_B^A \quad P_B^A = P_0^A \quad (4.8)$$

Ainsi, un point quelconque dans le référentiel A peut être interprété dans le référentiel B en le pré multipliant par l'inverse de la matrice  $H_B^A$ .

$$P^B = (H_B^A)^{-1} P^A \quad (4.9)$$

Cette méthode assume que les coordonnées des points sont exactes. Il est aussi possible d'utiliser plus de points mesurés afin de diminuer les incertitudes. À ce moment, une des méthodes pour considérer la surabondance de données est d'utiliser une méthode d'optimisation.

#### 4.5.1.1 Analyse de transposition des appareils de mesures

Lors de la collecte de données, les configurations d'étalonnage ont été mesurées à partir des deux appareils simultanément. Ces mesures ont ensuite été transposées dans le référentiel unique à l'aide de l'algorithme de transposition (Section 4.5.1). Les deux ensembles de données, dont les coordonnées sont très proches, sont comparés pour qualifier leur cohésion. Ainsi, chaque coordonnée d'un ensemble est comparée avec celle de l'autre ensemble. La distribution de ces distances est présentée à la ligne "Brut" du Tableau 4.3.

Les distances trouvées durant l'analyse sont explicables par plusieurs phénomènes dont voici les principaux :

1. Le bruit des appareils de mesure ;
2. L'erreur induite en changeant les SMR par les cibles à cible réfléchissante ;
3. L'erreur dans la transposition des données vers le référentiel unique ;
4. Les mouvements involontaires de l'outil entre les deux séances de mesure.

Le bruit des deux appareils de mesure ensemble ne dépasse pas 0.030 mm. L'erreur induite en changeant les SMR n'a pas été mesurée. Par contre, l'erreur dans la transposition des données peut être approximée en appliquant l'algorithme des moindres carrés (Section 5.2). Une transposition additionnelle a été faite sur les mesures d'un des appareils pour minimiser la distance entre les coordonnées. L'analyse faite précédemment a été reconduite avec ces nouvelles valeurs. Les résultats sont présentés à la ligne "Min." du Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Erreur des mesures du MaxSHOT 3D et du Laser Tracker ION dans le référentiel unique.

	Moyenne ( $\bar{x}$ ) [mm]	Écart-type ( $S'$ ) [mm]	Maximum statistique ( $\bar{x} + 3S'$ ) [mm]	Minimum ( $x_{min}$ ) [mm]	Maximum ( $x_{max}$ ) [mm]
Brut	0.1175	0.0534	0.2778	0.0282	0.2629
Min.	0.0732	0.0352	0.1788	0.0060	0.1980

Le maximum statistique ( $\bar{x} + 3S'$ ) a diminué d'environ 0.100 mm, ce qui porte à croire que ceci correspond à l'ordre de grandeur de l'erreur induite lors de transposition. Le reste de l'erreur est attribuable aux autres facteurs présentés dont les principaux ont été énoncés plus haut.

#### 4.6 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, le système de photogrammétrie portable (Section 4.2) et le système de laser de poursuite (Section 4.3) ont été présentés. Pour ces deux appareils, une brève description a d'abord été présentée. Elle a été suivie d'une proposition de méthode d'acquisition adaptée au problème d'étalonnage de robots industriels. La présentation des appareils se termine par des analyses au cours desquelles leurs performances sont observées.

La deuxième partie du chapitre a été consacré aux configurations. Tout d'abord, la Section 4.4.1 présente une méthode pour générer des configurations. Ensuite, la méthode de classification dont le critère est les indices d'observabilité est présentée dans la Section 4.4.2.

Le chapitre se termine avec la concrétisation de la prise de mesure. La Section 4.5 présente le processus d'acquisition ainsi l'algorithme de transposition qui a été utilisé sur les données brutes. Les données transposées sont analysées dans la Section 4.5.1.1.

L'un des points marquants qui différencient les deux appareils est la capacité d'automatisation de la prise de mesure par le laser de poursuite. En effet, à l'aide de celui-ci, il est possible de lancer une séquence de mesure sur plusieurs milliers de configurations sans avoir à faire plus de manipulation. Avec l'appareil de photogrammétrie portable, chaque nouvelle configuration doit être mesurée manuellement. Ceci justifie l'utilisation du Laser Tracker ION pour faire l'acquisition des nombreuses configurations de validation qui seront utilisé pour analyser la performance des modèles identifiés par le processus d'étalonnage. De plus, comme les manipulations du laser de poursuite sont minimales, il serait possible de négliger la phase de sélection par indice d'observabilité si la mesure d'un très grand nombre de configurations est prévue. Par contre, cette phase de sélection est plus que pertinente lors qu'on souhaite utiliser un appareil dont les manipulations sont proportionnelles au nombre de configurations à mesurer, tel que la MaxSHOT 3D.



## CHAPITRE 5

### IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES

#### 5.1 Introduction

L'identification des paramètres d'un modèle cinématique d'un robot est le cœur de l'étalonnage. Cette étape permet de trouver les modifications à apporter au modèle nominal pour qu'il se rapproche du robot physique. La méthode d'identification est basée sur la méthode des moindres carrés. Bien que cette méthode soit souvent utilisée, plusieurs considérations sont présentées dans ce chapitre pour permettre son implémentation. Ces notions théoriques sont suivies des résultats expérimentaux ainsi que quelques analyses.

#### 5.2 Méthode des moindres carrés

Étant donné que les valeurs disponibles des paramètres du modèle cinématique sont des valeurs nominales (Tableau 3.6), il est nécessaire de procéder à procédure d'identification afin d'améliorer ce modèle. Cette procédure utilise la méthode des moindres carrés qui permet de trouver des valeurs de paramètres. Celles-ci permettront d'obtenir un modèle qui minimise les erreurs de positionnement de l'effecteur.

##### 5.2.1 Définition du problème à résoudre

Comme les données utilisées sont des mesures de position, la fonction cinématique utilisée pour l'étalonnage comporte uniquement la position de l'effecteur. Ainsi, pour chaque configuration  $\mathbf{q}^i$ , la fonction cinématique ( $\mathbf{t}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)$ ) permet de déterminer la position de l'effecteur à l'aide des paramètres  $\mathbf{p}$  :

$$\mathbf{t}(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i) = \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Il existe un modèle alternatif qui possède une fonction cinématique dont les paramètres ( $\mathbf{p}_r$ ) diffèrent légèrement de celle du modèle nominal ( $\mathbf{p}_n$ ). La variation  $\Delta \mathbf{t}^i$  peut être associée à une certaine variation des paramètres ( $\mathbf{p}$ ) du modèle nominale ou encore à un ensemble restreint de ces paramètres ( $\mathbf{v}$ ) :

$$\Delta \mathbf{t}^i = \mathbf{t}(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}^i) - \mathbf{t}(\mathbf{p}_r, \mathbf{q}^i) \quad (5.2)$$

En linéarisant la fonction cinématique autour du point d'évaluation représenté par cet ensemble de paramètres, celle-ci peut être présenté sous la forme d'une matrice jacobienne :

$$\mathbf{J}^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_1} & \cdots & \frac{\partial f_x(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_m} \\ \frac{\partial f_y(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_1} & \cdots & \frac{\partial f_y(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_m} \\ \frac{\partial f_z(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_1} & \cdots & \frac{\partial f_z(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)}{\partial \mathbf{v}_m} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Chaque configuration  $\mathbf{q}^i$  est considérée conjointement en concaténant leur matrice tel que présenté à l'équation suivante :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^1 \\ \dots \\ \mathbf{J}^n \end{bmatrix} \quad \Delta \mathbf{t} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{t}^1 \\ \dots \\ \Delta \mathbf{t}^n \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Il est maintenant possible de présenter le problème tel qu'à l'Équation (5.5), où la variation  $\Delta \mathbf{t}$  est en relation avec une variation des paramètres  $v$  de la fonction cinématique. Cette représentation est comme suit :

$$\Delta \mathbf{t} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{v} \quad (5.5)$$

Comme le problème ne possède pas de solution unique, le problème est présenté sous la forme de la minimisation des carrés des erreurs :

$$\min (\Delta \mathbf{t} - \mathbf{J} \Delta \mathbf{v})^T (\Delta \mathbf{t} - \mathbf{J} \Delta \mathbf{v}) \quad (5.6)$$

La solution de ce problème de minimisation est présentée dans plusieurs ouvrages dont Moorring *et al.* (1991). Il en résulte l'Équation (5.7) qui est le coeur du processus d'identification. Cette formulation utilise l'opérateur pseudo-inverse de Moore-Penrose ( $^+$ ) :

$$\Delta \mathbf{v} = (\mathbf{J}^t \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^t \Delta \mathbf{t} = \mathbf{J}^+ \Delta \mathbf{t} \quad (5.7)$$

### 5.2.2 Considérations pratiques

La première étape pour procéder à l'identification consiste à trouver les valeurs des erreurs de positionnement pour chaque configuration ( $i \in [1 \dots n]$ ). Ainsi, la position tridimensionnelle calculée par le modèle ( $\mathbf{t}_{model}^i$ ) peut être trouvée à partir de la fonction cinématique ( $f(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i)$ ). Cette dernière requiert l'utilisation des meilleurs paramètres connus ( $\mathbf{p}$ ) ainsi que du vecteur des valeurs des joints ( $\mathbf{q}$ ) de la  $i$ -ième configuration. Comme ces étapes sont répétées plusieurs fois, à la première itération, les paramètres nominaux sont utilisés pour le vecteur  $\mathbf{p}$ . Ensuite, les paramètres résultants de l'itération précédente sont utilisés.

$$\mathbf{t}_{model}^i = \begin{bmatrix} x_{model}^i \\ y_{model}^i \\ z_{model}^i \end{bmatrix} = f(\mathbf{p}, \mathbf{q}^i) \quad i \in [1 \dots n] \quad (5.8)$$

La position calculée doit être confrontée à la position mesurée pour obtenir l'erreur de positionnement de l'effecteur. Le calcul est présenté à l'Équation (5.9). Le résultat de ces opérations est  $n$  vecteurs colonnes  $\Delta \mathbf{t}^i$  de dimension 3.

$$\Delta \mathbf{t}^i = \begin{bmatrix} x_{meas}^i \\ y_{meas}^i \\ z_{meas}^i \end{bmatrix} - \mathbf{t}_{model}^i \quad i \in [1 \dots n] \quad (5.9)$$

La prochaine étape consiste à faire la linéarisation de la fonction cinématique autour du point d'évaluation représenté par tous les paramètres du modèle cinématique ( $\mathbf{p}$ ) et un vecteur joints ( $\mathbf{q}$ ). La linéarisation est faite en dérivant partiellement de la fonction cinématique par rapport à tous les paramètres à identifier ( $\mathbf{v} = [v_1 \dots v_m]$ ). Le résultat est exprimé sous la forme de  $n$  matrices jacobiniennes  $\mathbf{J}^i$  ( $i \in [1 \dots n]$ ), présentées à l'Équation 5.3.

Une fois que les  $n$  matrices  $\Delta \mathbf{t}^i$  et les  $n$  vecteurs  $\mathbf{J}^i$  sont calculées, ceux-ci doivent être concaténés pour faire la régression linéaire de ce système d'équations. Ces concaténations sont effectuées telles que présentées à l'Équation (5.4). Il en résulte la matrice  $\mathbf{J}$  de dimension  $3n \times m$  et le vecteur colonne  $\Delta \mathbf{t}^i$  de dimension  $3n$ .

Quoiqu'il soit possible de procéder directement à l'identification à partir de  $\mathbf{J}$  et  $\Delta \mathbf{t}$ , une étape de mise à l'échelle est peut être préférable. En effet, Sun et Hollerbach (2008) proposent cette mise à l'échelle pour lorsque les paramètres évoluent dans des ordres de grandeur différents. Celle-ci est effectuée sur les colonnes de la matrice jacobienne concaténée  $\mathbf{J}$ . La mise à l'échelle requiert de calculer un vecteur de facteur  $\mathbf{d}$ . Celui-ci est construit tel que présenté à l'Équation (5.10).

$$\mathbf{d}_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{3 \times n} ((\mathbf{J}_{i,j})^2)} \quad j \in [1 \dots m] \quad (5.10)$$

La matrice jacobienne  $\mathbf{J}$  est ensuite multiplié par le vecteur  $\mathbf{d}$  diagonalisé (diag) pour obtenir  $\mathbf{J}_S$ , de mêmes dimensions que  $\mathbf{J}$ .

$$\mathbf{J}_S = \mathbf{J} \text{diag}(\mathbf{d}) \quad (5.11)$$

Le vecteur  $\Delta \mathbf{v}_S$  est trouvé à partir de l'Équation (5.12), soit une équivalent de l'Équation (5.7). Celui-ci représente les variations à apporter aux paramètres actuels du modèle.

$$\Delta \mathbf{v}_S = (\mathbf{J}_S^t \mathbf{J}_S)^{-1} \mathbf{J}_S^t \Delta \mathbf{t} = \mathbf{J}_S^+ \Delta \mathbf{t} \quad (5.12)$$

La mise à l'échelle effectuée à l'Équation (5.11) affectant aussi le vecteur  $\mathbf{v}_S$ , on doit effectuer le procédé inverse en divisant terme à terme (symbolisé ici par "•") le vecteur  $\mathbf{v}_S$  par rapport au vecteur  $\mathbf{d}$ . Le vecteur  $\Delta \mathbf{v}$  est ainsi obtenu à partir de l'Équation (5.13).

$$\Delta \mathbf{v} = \bullet \frac{\Delta \mathbf{v}_S}{\mathbf{d}} \quad (5.13)$$

Il a été mentionné en début de section qu'une linéarisation n'est valable que localement autour du point d'évaluation. Dans notre cas, le point d'évaluation était la valeur des paramètres  $\mathbf{v}$ . Si la variation  $\Delta \mathbf{v}$  est grande, l'éloignement du point d'évaluation est tel qu'on devra répéter le processus d'identification avec comme point d'évaluation  $\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \Delta \mathbf{v}$ , jusqu'à l'obtention d'une stabilité. Il faut noter que toutes les équations à partir de l'Équation (5.8) seront affectées par la modification de  $\mathbf{v}$ .

À cette étape de la procédure d'identification, si les itérations se succèdent sans obtenir de convergence, il est possible que des paramètres redondants soient présents dans le vecteur  $\mathbf{v}$ . Plus ample information sur les paramètres redondants du modèle utilisé dans le cadre du projet est faite à la Section 5.3.

### 5.3 Expérimentations pratiques

Les expérimentations consistent à appliquer la théorie d'identification de paramètre sur le robot FANUC LR Mate 200iC. Les données acquises à la Section 4.5 sont utilisées. En premier lieu, la méthode d'évaluation de la précision absolue est définie, puis les résultats seront présentés.

#### 5.3.1 Méthode d'évaluation de la précision absolue

La méthode d'évaluation de la précision absolue permet d'obtenir une quantification de la précision avant et après l'étalonnage. Deux analyses principales sont faites, soit une analyses absolue et l'autre relative.

L'analyse absolue exploite les positions acquises à partir d'un appareil de mesure et les confronte aux positions obtenues à l'aide d'un modèle cinématique. Ainsi, pour chaque configuration de validation mesurée (966 configurations), la position des trois sphères de l'outil du robot est comparée à celle obtenue par le modèle cinématique dans la même configuration. L'Équation (5.8) présentée plus tôt est utilisée à cette fin. Les résultats de cette analyse seront présentés sous la forme de distributions de 2898 ( $3 \times 966$ ) valeurs.

L'analyse relative est faite en comparant les distances euclidiennes entre chaque paire de configurations possibles. Chaque distance est calculée à partir d'un modèle puis comparée avec la distance mesurée. Considérant que les positions des trois sphères de l'outil sont connues, pour chaque paire de configurations, il existe neuf distances pouvant être comparées. Comme avec 966 configurations de validation, il existe 466 095 ( $966(966 - 1)/2$ ) combinaisons possibles, cela fait un total de 4 194 855 distances.

Il est fait l'hypothèse que ces distributions se comportent telles des distributions normales. Ainsi, l'évaluation de la précision absolue d'un modèle est faite à partir de la valeur de la borne supérieure qui contient 99.9%, soit trois écarts-types ajoutés à la moyenne.

Pour obtenir la précision avant étalonnage, les paramètres nominaux sont utilisés dans le modèle cinématique. Pour les référentiels externes, soit le référentiel de l'outil  $\mathcal{F}_T$  et le référentiel de travail  $\mathcal{F}_W$ , les paramètres nominaux sont aussi utilisés.

Dans le cas présent, les paramètres de  $\mathcal{F}_T$  ont été mesurés avec précision à l'aide du laser de poursuite tandis que ceux de  $\mathcal{F}_W$  ont été calculés à partir d'un modèle acquis avec l'appareil de photogrammétrie. Toutefois, les manipulations qui ont permis l'estimation des paramètres de  $\mathcal{F}_W$  sont basées sur certaines hypothèses géométriques qui en réduisent la qualité. Bien que ces valeurs nominales ont permis de procéder au procédé d'étalonnage avec succès, elles ne représentent pas fidèlement la réalité. Ainsi, pour approximer la précision avant étalonnage, une procédure d'étalonnage sera effectuée au cours de laquelle les six paramètres du référentiel de travail seront identifiés. Ces paramètres formeront le vecteur  $v$  de l'Équation (5.3). Tous les autres paramètres seront conservés aux valeurs nominales. Cette manipulation engendre fort probablement un biais qui améliore la précision.

Dans le cas de la précision après étalonnage, 29 paramètres seront identifiés par le processus d'étalonnage. Ainsi, le vecteur  $v$  de l'Équation (5.3) contiendra les 6 paramètres du référentiel de travail  $\mathcal{F}_W$ , 18 paramètres géométriques et 5 paramètres non géométriques du modèle cinématique du robot.

Les paramètres du référentiel de l'outil n'ont pas été identifiés. En effet, les paramètres de positionnement en X et Y sont redondants avec le paramètre  $\delta\theta_6$ . Comme  $\mathcal{F}_T$  a été mesurée à partir du laser de poursuite, ses paramètres ont été exclus du processus d'identification pour permettre l'identification de  $\delta\theta_6$ .

Une redondance est aussi présente entre les paramètres de  $\mathcal{F}_W$  et les paramètres de la première articulation du modèle cinématique. Dans ce cas, ce sont les derniers qui ont été exclus du modèle. Ce choix a été inspiré de travaux connexes.

Deux autres paramètres ont été exclus du processus d'identification. Le premier est le paramètre non géométrique associé à la torsion de l'articulation 1. En effet, seule la gravité est considérée comme force externe et que cette articulation y est théoriquement parallèle. Cette exclusion permet de simplifier le modèle. Le second est paramètres  $\delta d_3$ . À cause du parallélisme de l'articulation 2 et 3, les paramètres  $\delta d_2$  et  $\delta d_3$  sont redondants. Ceci n'est plus vrai si les paramètres de rotation changent au cours des itérations du processus d'identification. Néanmoins,  $\delta d_3$  a été exclu du modèle pour éviter la redondance.

Il est connu que les redondances présentes dans un modèle mathématique peuvent être identifiées à l'aide du rang de la matrice jacobienne. La qualité d'un modèle mathématique peut aussi être qualifiée à l'aide du conditionnement. À partir de ces deux outils, il est possible de retrouver un modèle dont toutes les colonnes de la matrice jacobienne soit linéairement indépendantes. En effet, le rang de la matrice jacobienne permet de déterminer le nombre de paramètres linéairement dépendant. Il suffit de quelques manipulations pour identifier les paramètres qui ne diminuent pas le rang, lorsque retirés. En ce qui concerne le conditionnement, cette valeur peut être calculée à partir de la matrice jacobienne. De manière générale, la meilleure valeur de conditionnement est 1. Par exemple, les matrices identités possèdent une valeur de conditionnement de 1. À l'inverse, un modèle mal conditionné engendre une valeur de conditionnement de l'ordre de  $1 \times 10^{15}$  et plus. Une telle situation indique qu'un ou plusieurs paramètres redondants sont présents.

### 5.3.2 Résultats des expérimentations

Le protocole présenté à la Section 5.3.1 a permis l'élaboration de 3 modèles : le modèle nominal (N), ou avant étalonnage, et deux modèles après étalonnage. L'un d'eux est obtenu à partir des mesures prises par la MaxSHOT 3D (M) tandis que l'autre est basé sur les mesures du

Laser Tracker ION (L). Le Tableau 5.1 contient les valeurs des paramètres du modèle cinématique de ces trois modèles. Le Tableau 5.2 contient les valeurs des paramètres des référentiels externes. Le référentiel  $\mathcal{F}_T$  possède trois ensembles de valeur, un pour chaque cible mesurable sur l'effecteur. Aussi, comme l'orientation des cibles n'est pas considérée, seuls trois paramètres sont utilisés. Finalement, comme ses valeurs ne sont pas identifiées, seules les valeurs nominales sont présentées.

Tableau 5.1 Comparaison des paramètres nominaux et identifiés du robot

i	Mod.	$\alpha_i$ [°]	$a_i$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$d_i$ [mm]
1	N	0.000	0.000	$\theta_1 + 0.000 + 0.000\tau_1$	330.000
	M	*	*	*	*
	L	*	*	*	*
2	N	-90.000	75.000	$\theta_2 - 90.000 + 0.000\tau_2$	0.000
	M	-89.985	74.992	$\theta_2 - 89.984 + 2.413 \times 10^{-8}\tau_2$	-0.006
	L	-89.984	75.031	$\theta_2 - 89.988 + 2.497 \times 10^{-8}\tau_2$	0.000
3	N	0.000	300.000	$\theta_3 + 0.000 + 0.000\tau_3$	0.000
	M	-0.024	300.105	$\theta_3 + 0.017 + 5.544 \times 10^{-8}\tau_3$	*
	L	-0.024	300.102	$\theta_3 + 0.016 + 5.490 \times 10^{-8}\tau_3$	*
4	N	-90.000	75.000	$\theta_4 + 0.000 + 0.000\tau_4$	320.000
	M	-89.992	75.020	$\theta_4 - 0.108 + 1.959 \times 10^{-7}\tau_4$	320.123
	L	-89.995	75.009	$\theta_4 - 0.112 + 1.768 \times 10^{-7}\tau_4$	320.148
5	N	90.000	0.000	$\theta_5 + 0.000 + 0.000\tau_5$	0.000
	M	90.033	0.025	$\theta_5 + 0.169 + 3.178 \times 10^{-7}\tau_5$	0.042
	L	90.033	0.034	$\theta_5 + 0.165 + 3.108 \times 10^{-7}\tau_5$	0.039
6	N	-90.000	0.000	$\theta_6 + 0.000 + 0.000\tau_6$	80.000
	M	-90.001	-0.022	$\theta_6 - 0.816 + 1.191 \times 10^{-6}\tau_6$	79.909
	L	-90.001	-0.032	$\theta_6 - 0.814 + 9.179 \times 10^{-7}\tau_6$	79.934

Tableau 5.2 Paramètres des référentiels externes.

	Mod.	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$z$ [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]
$\mathcal{F}_W$	N	226.660	486.423	11.307	0.000	0.003	-0.011
	M	226.815	486.598	12.090	0.000	0.001	-0.011
	L	226.689	486.594	12.055	0.000	0.001	-0.011
$\mathcal{F}_T$	N(1)	0.307	-2.786	129.570	-	-	-
	N(2)	150.782	-3.353	131.035	-	-	-
	N(3)	75.007	88.443	222.594	-	-	-

La précision absolue des trois modèles a été analysée telle que présentée à la Section 5.3.1. La distribution des erreurs issues de l'analyse absolue est présentée à la Figure 5.1. Une vue rapprochée est faite à la Figure 5.2 afin d'illustrer une meilleure comparaison des deux modèles à l'étude. Par le même principe, les Figures 5.3 et 5.4 sont issues de l'analyse relative. Notez qu'à la Figure 5.4, l'étendue des valeurs est d'environ -0.700 à 0.700 mm. Les catégories extrêmes sont relativement très peu peuplées, ce qui donne l'impression qu'elles sont vides. Quelques statistiques descriptives des analyses, absolue et relative, sont présentés respectivement dans les Tableaux 5.3 et 5.4.

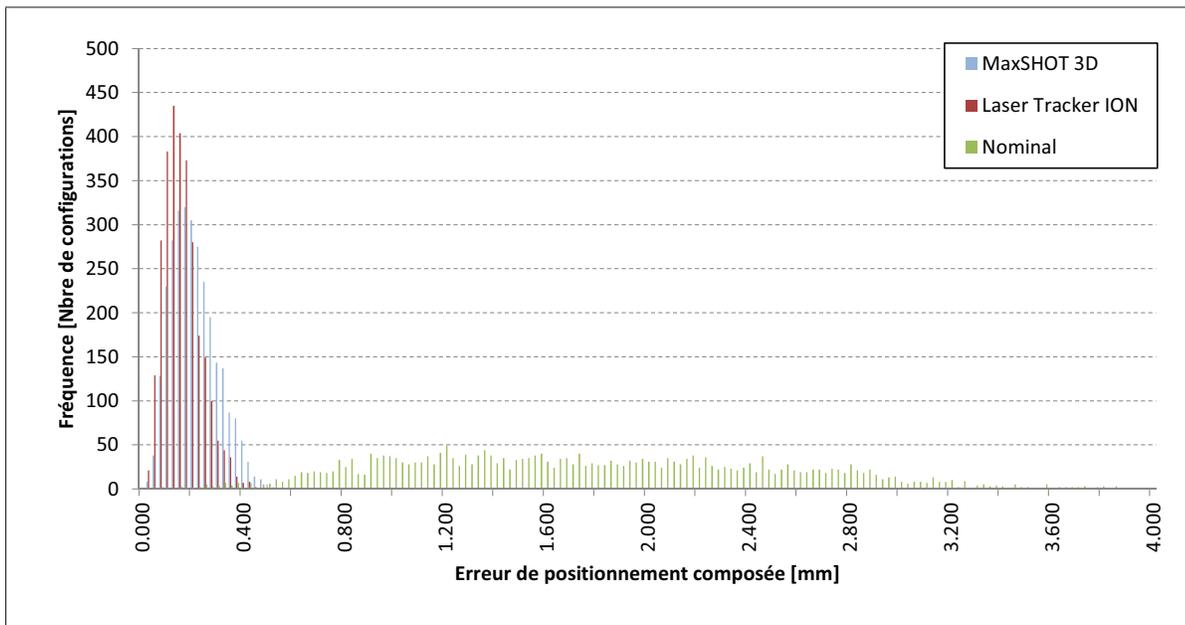


Figure 5.1 Comparaison des distributions de l'analyse absolue (vue globale).

Tableau 5.3 Statistiques descriptives des erreurs résultantes de l'analyse absolue.

no.	Moyenne ( $\bar{x}$ ) [mm]	Écart-type ( $S'$ ) [mm]	Maximum statistique ( $\bar{x} + 3S'$ ) [mm]	Minimum ( $x_{min}$ ) [mm]	Maximum ( $x_{max}$ ) [mm]
N	1.744	0.742	3.970	0.070	3.841
M	0.197	0.091	0.469	0.005	0.619
L	0.147	0.073	0.365	0.008	0.589

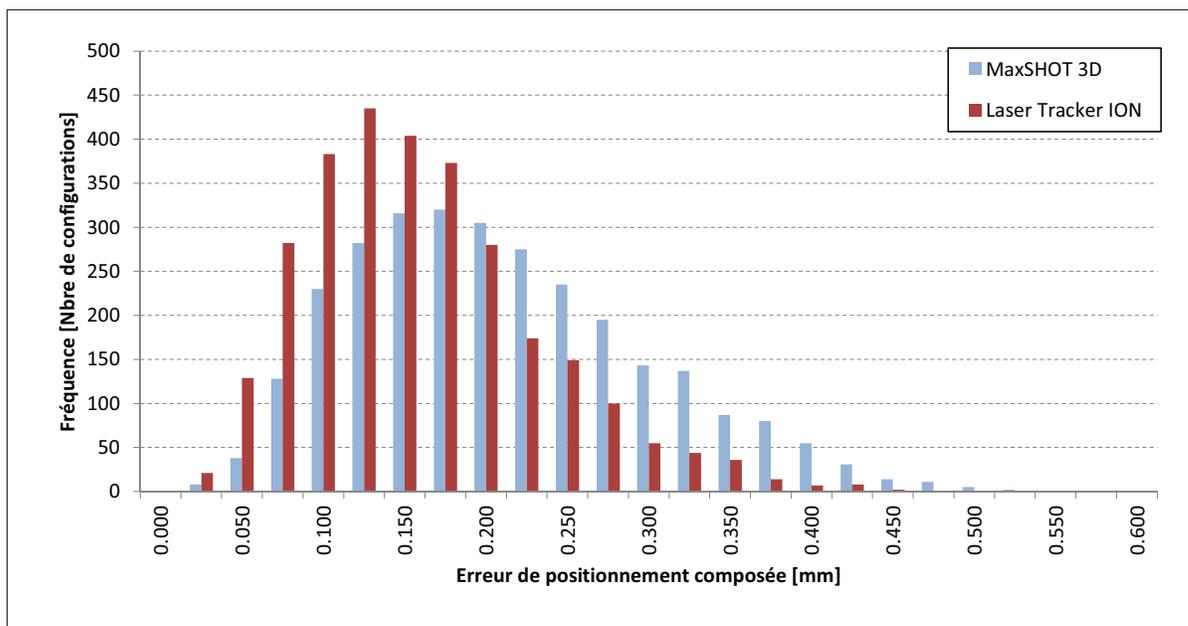


Figure 5.2 Comparaison des distributions de l'analyse absolue (vue rapprochée).

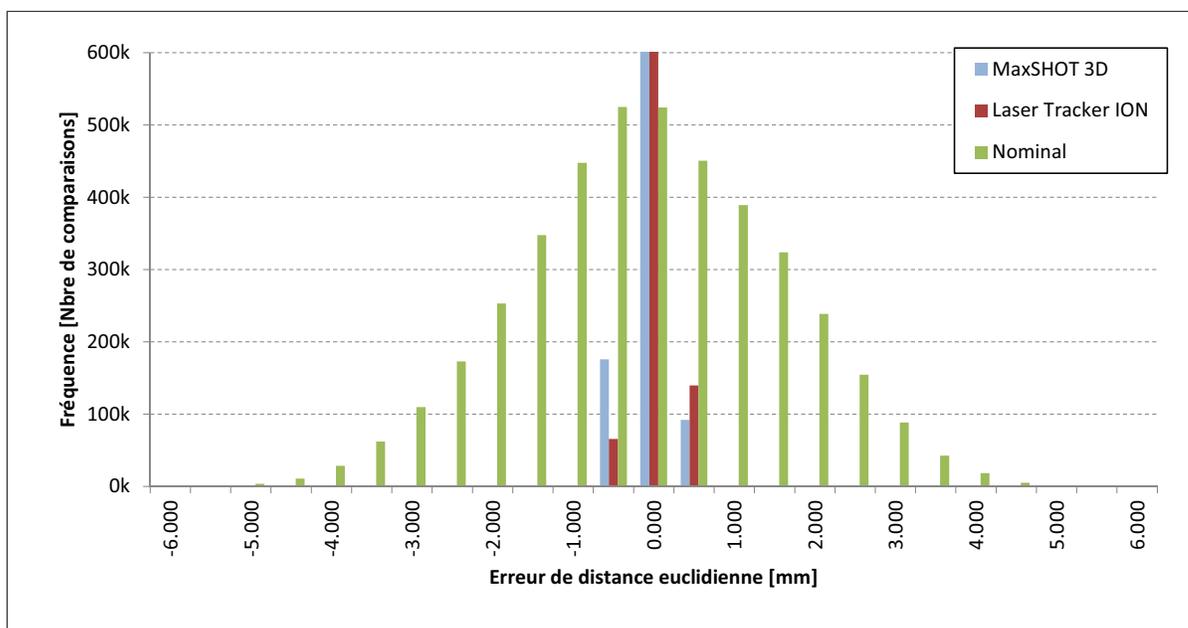


Figure 5.3 Comparaison des distributions de l'analyse relative (vue globale).

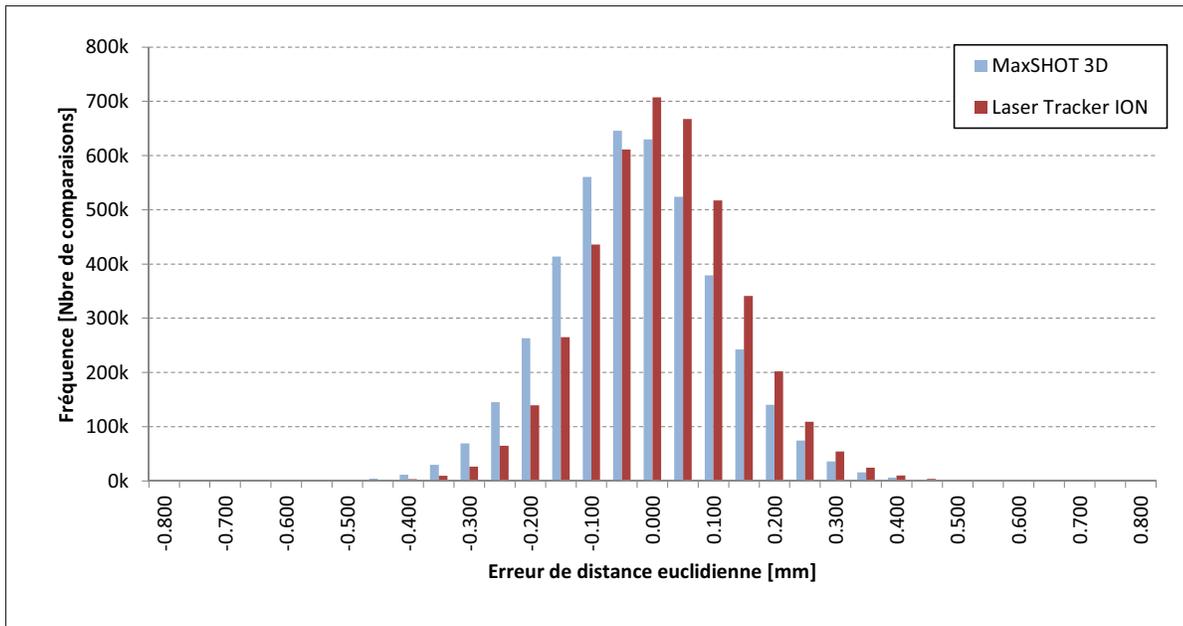


Figure 5.4 Comparaison des distributions de l’analyse relative (vue rapprochée).

Tableau 5.4 Statistiques descriptives des erreurs absolues résultantes de l’analyse relative.

no.	Moyenne ( $\bar{x}$ ) [mm]	Écart-type ( $S'$ ) [mm]	Maximum statistique ( $\bar{x} + 3S'$ ) [mm]	Minimum ( $x_{min}$ ) [mm]	Maximum ( $x_{max}$ ) [mm]
N	1.286	0.955	4.151	0.000	6.559
M	0.107	0.082	0.352	0.000	0.688
L	0.098	0.077	0.329	0.000	0.697

### 5.3.2.1 Analyse et comparaison des modèles identifiés

Pour commencer, en se référant aux Tableaux 5.1 et 5.2, la proximité entre les valeurs est des modèles “M” et “L” est notable. Néanmoins, il n’est pas possible d’affirmer leur performance uniquement par l’observation de ces valeurs. L’analyse absolue a révélé que les données du laser de poursuite ont permis une identification de meilleure qualité que les données du système de photogrammétrie ; la supériorité du maximum statistique est de l’ordre de 0.100 mm. Sous

le même principe, lors de l'analyse relative, le maximum statistique du modèle du laser de poursuite domine par environ 0.030 mm.

Ensuite, la dispersion des distributions des erreurs de positionnement est illustrée aux Figures 5.5 et 5.6. Les erreurs importantes y sont représentées par des points de plus grande taille. Les positions des configurations d'étalonnage sont présentées par les cercles vides rouges.

On y remarque que la proximité avec les positions d'étalonnage (cercle rouge) n'affecte pas l'amplitude des erreurs de positionnement. Une analyse similaire a été faite en regroupant les configurations d'une même configuration motrice sans qu'aucune corrélation évidente soit relevée. En se référant aux mêmes figures, on remarque aussi que pour chaque configuration, l'erreur avec le laser de poursuite est généralement plus faible que celle du système de photogrammétrie. Ce comportement a fait l'objet d'une étude additionnelle. Dans celle-ci, chaque configuration a été analysée une à une et l'erreur de cette configuration avec le MaxSHOT 3D a été comparé à celle du Laser Tracker ION. Les valeurs issues de ces comparaisons sont illustrées à la Figure 5.7. On y remarque que malgré la proximité entre les deux distributions constatable à la Figure 5.2, la précision de modèle "M" est très rarement meilleure que celle du modèle "L".

Ensuite, aux Figures 5.5 et 5.6, il peut être possible de voir une relation où les erreurs associées aux points plus près de l'origine semblent légèrement plus faibles. Néanmoins, une rapide analyse a démontré qu'une telle relation n'est pas confirmée. Cette analyse n'est pas présentée en détail dans le présent document.

Nonobstant l'avantage marqué du laser de poursuite constatée jusqu'à présent, celui-ci ne peut pas être affirmé supérieur. En effet, ce biais le favorisant peut en partie être expliqué. Les configurations de validation qui sont utilisées dans ces analyses ont été mesurées à partir de cet appareil. Comme l'amplitude qu'il est possible d'associer à un tel biais n'a pas été analysée et qu'il est raisonnable de penser que l'ordre de grandeur peut correspondre à la différence qui existe entre les modèles "M" et "L", leur performance ne peut être qualifiée que de similaire.

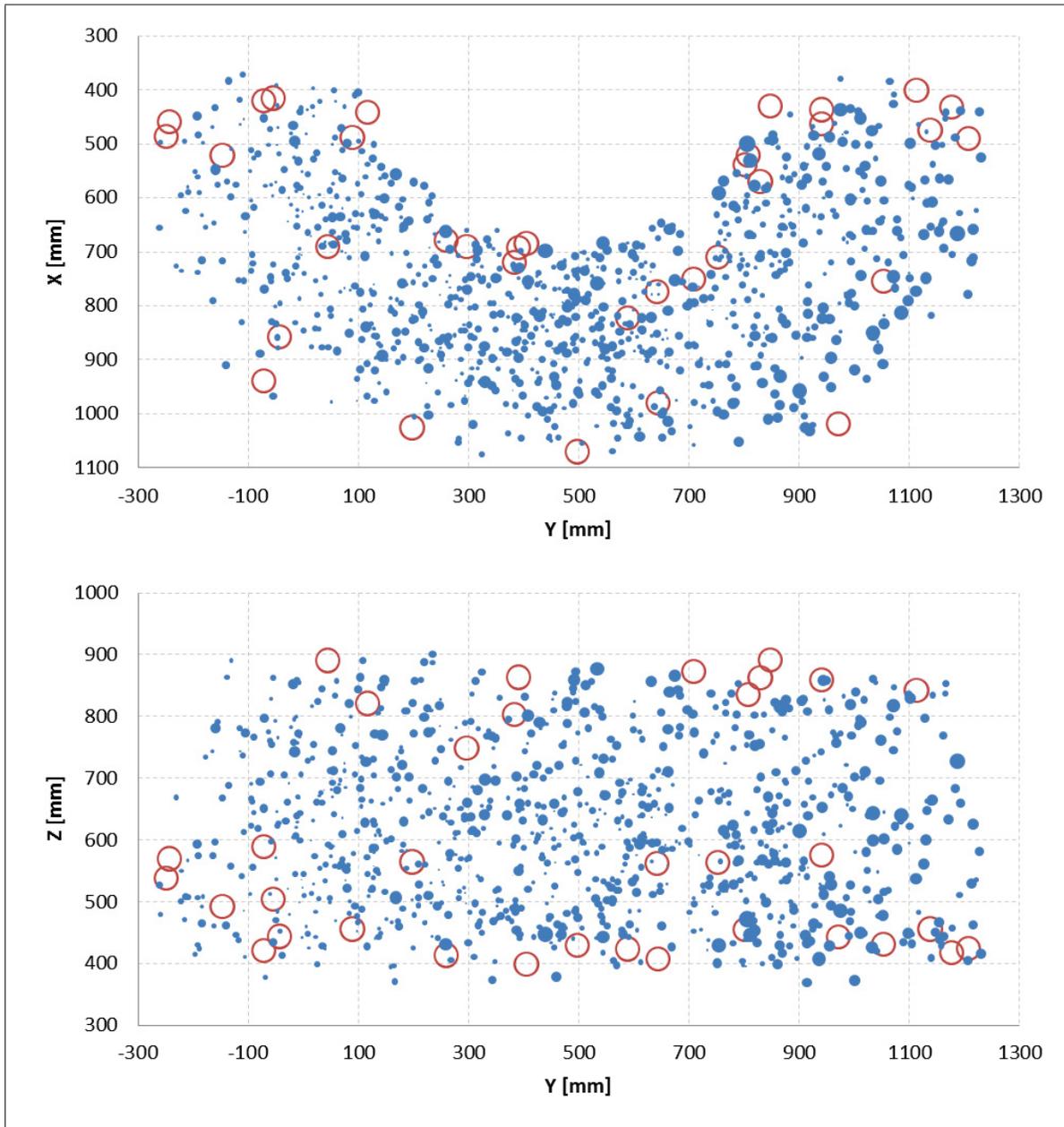


Figure 5.5 Dispersion de la précision absolue avec le modèle de l'appareil de photogrammétrie. a. Vue de plan. b. Vue d'élévation.

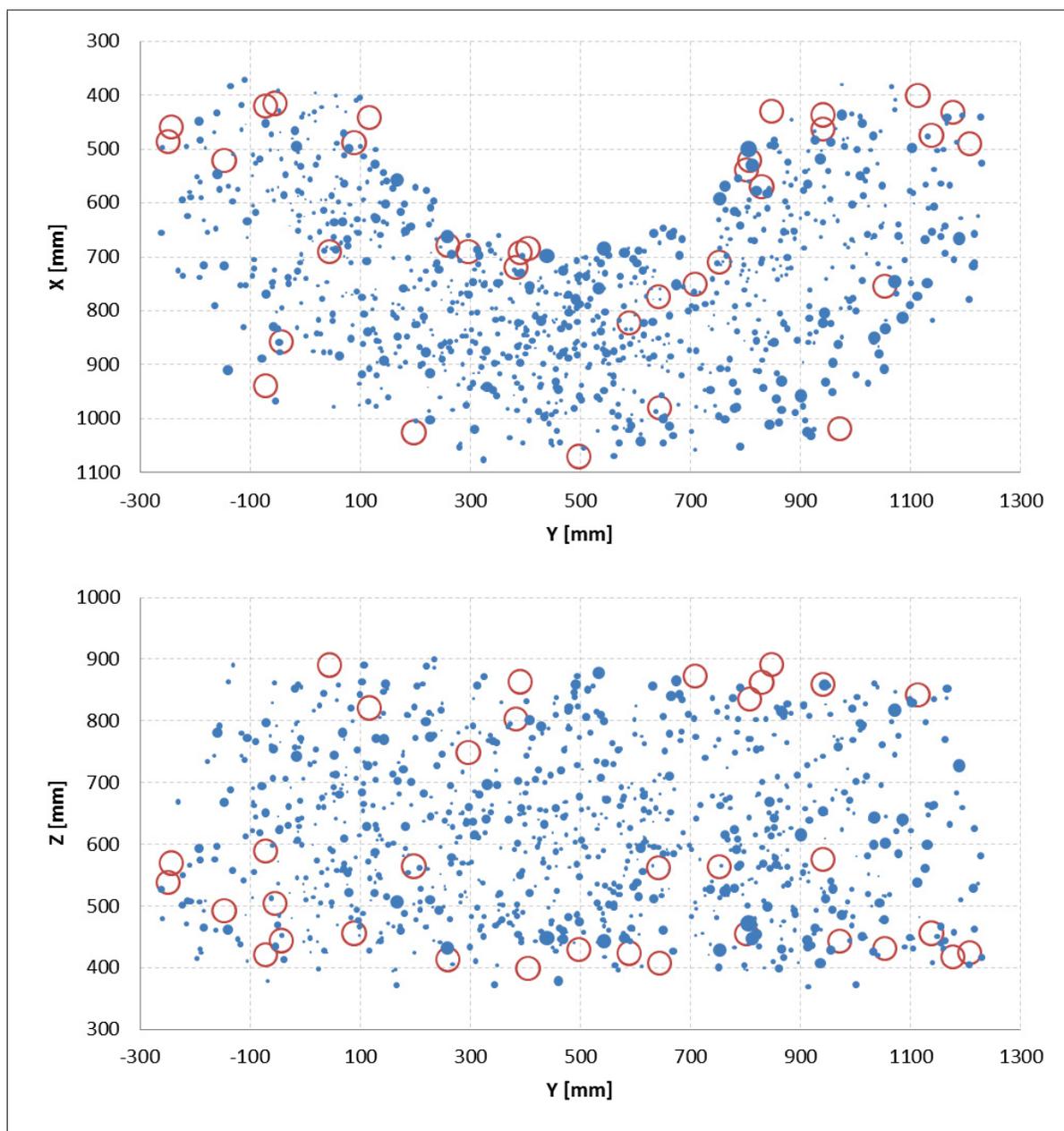


Figure 5.6 Dispersion de la précision absolue avec le modèle du laser de poursuite.  
a. Vue de plan. b. Vue d'élévation.

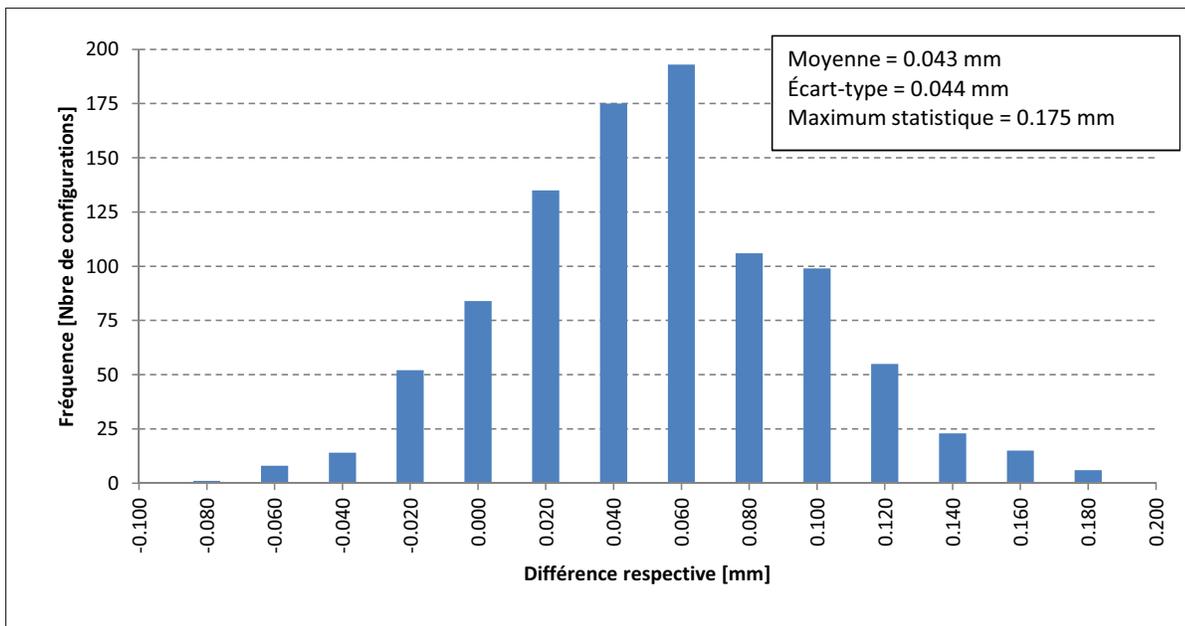


Figure 5.7 Différence respective des erreurs point à point.

## 5.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la méthode des moindres carrés appliquée à un problème d'étalonnage de robot industriel. Il a aussi présenté les diverses expérimentations de l'étalonnage qui ont été menées lors du projet. Ces expérimentations ont permis de déterminer que la performance des appareils de mesure MaxSHOT 3D et Laser Tracker ION s'équivalent dans ce type d'application. Néanmoins, comme les performances des deux appareils de mesures ont été validées à partir de données issues du laser de poursuite, il existe évidemment un biais dans les résultats qui empêche d'effectuer une analyse plus précise. Il serait ainsi possible de recommander l'utilisation de l'appareil de photogrammétrie portable, le MaxSHOT 3D de Creaform, dans une application d'étalonnage de robots industriels.



## CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Dans ce mémoire, la performance du système de photogrammétrie portable MaxSHOT 3D de Creaform a été explorée dans une application d'étalonnage de robots industriels. L'utilisation de ce type de système commercial dans le domaine est à première vue une nouveauté. Ce travail a consisté en une comparaison des performances de ce système avec celles d'un système de laser de poursuite, le Laser Tracker ION de Faro, dont la précision volumétrique est similaire. Cette comparaison a été effectuée dans le cadre de l'étalonnage non géométrique d'un robot de petite taille, le LR Mate 200iC de FANUC.

Tout d'abord, le processus d'étalonnage étant relativement standard, il a été nécessaire d'adapter qu'une seule section de la procédure habituelle pour considérer l'appareil. Cette adaptation est présentée au Chapitre 4. En effet, la génération des configurations candidates a été modifiée pour que chaque configuration générée soit mesurable par l'appareil de mesure. De plus, pour permettre la comparaison, ces configurations ont aussi été filtrées pour respecter les contraintes du laser de poursuite.

Ensuite, le contraste évident d'autonomie entre les appareils fut constaté. Le Laser Tracker ION a nécessité un certain temps de programmation afin de développer une interface de contrôle autonome directement dans MATLAB. Celle-ci a permis de mesurer un nombre illimité de mesures avec un minimum d'intervention. Une installation manuelle de quelques minutes suffit. Dans le cas du système de photogrammétrie portable, chaque mesure doit être acquise manuellement par plusieurs manipulations. Après avoir fait l'installation des composantes du système, chaque configuration doit être acquise à l'aide d'une dizaine de photos différentes. Ensuite, plusieurs manipulations sont nécessaires dans le logiciel pour obtenir les données pertinentes qui doivent ensuite être exportées vers MATLAB. Ce dernier peut ensuite procéder à l'identification des paramètres. Néanmoins, il serait possible d'accélérer ce processus avec la collaboration de Creaform. Certains de leurs appareils, tels que le C-Track, bénéficient actuellement d'une latitude plus importante qui serait intéressante d'obtenir pour le MaxSHOT 3D. Toujours dans le même ordre d'idée, si l'appareil permettait le déclenchement de la prise de photo via le logiciel ou à l'aide d'une entrée numérique, il serait possible d'exploiter la fonc-

tionnalité afin de diminuer les temps de manipulation. Ces améliorations feraient du système de photogrammétrie portable un concurrent intéressant au laser de poursuite d'un point de vue pratique.

Par la suite, une fois les paramètres identifiés à partir des données recueillies par les deux appareils de mesure, il a été observé, au cours de l'analyse de positionnement absolue, une précision absolue de l'ordre de 0.469 mm pour le système de photogrammétrie portable et de l'ordre de 0.365 mm pour le laser de poursuite. Dans le cadre d'une seconde analyse, basée sur l'erreur de distance euclidienne entre deux configurations, les performances des deux systèmes se rapprochent, soit une précision absolue de 0.352 mm pour le système photogrammétrique et de 0.329 mm pour le laser de poursuite. Toujours est-il que ces analyses ont été réalisées en utilisant des mesures prises à partir du laser de poursuite. Ceci favorise légèrement ce dernier. Par conséquent, la proximité évidente des performances ne permet pas de qualifier l'un ou l'autre des appareils comme étant supérieurs quant à la précision absolue qu'ils permettent d'obtenir.

Dans un autre ordre d'idée, s'il était nécessaire de procéder à l'étalonnage de robot à partir du MaxSHOT 3D, la procédure utilisée serait différente. En effet, afin de pouvoir procéder à une comparaison des deux appareils, plusieurs contraintes ont été appliquées. Par exemple, au lieu de mesurer uniquement une ou des positions sur l'outil, le système peut aisément faire la lecture de la pose de celui-ci. Cette simple considération pourrait améliorer la performance du système.

D'un point de vue pratique, notwithstanding les considérations de performance d'étalonnage, le laser de poursuite possède l'avantage de l'autonomie de fonctionnement tandis que l'appareil de photogrammétrie portable est sans conteste moins dispendieux (environ 27 000 \$ CA versus 100 000 \$ CA et plus pour le Laser Tracker ION). Par contre, s'il n'est pas utile de prendre un grand nombre de mesures comme il a été fait à des fins de validation, le système de photogrammétrie est un choix justifiable.

Tout compte fait, des recherches connexes pourraient être menées afin de déterminer la performance d'un tel système sur des robots d'envergure. En effet, il est mentionné que la précision de l'appareil décroît avec la distance des points de mesure les plus éloignés. Il serait intéressant d'analyser l'effet de cette caractéristique sur les performances d'étalonnage. Aussi, comme l'appareil permet de mesurer un nombre élevé de points lors de l'acquisition d'une scène, des recherches visant à intégrer des cibles sur toutes les articulations mobiles du robot pourraient être envisagées. En effet, comme les manipulations de l'appareil sont contraignantes, maximiser l'information acquise lors de celles-ci augmenterait certainement l'intérêt à l'employer dans le domaine de l'étalonnage de robots industriels. Dans le même ordre d'idée, comme il a été énoncé plus tôt, l'utilisation de la mesure de la pose de l'outil est un volet qui mérite d'être étudié.



## ANNEXE I

### ALGORITHMES D'HOMOGENÉISATION DE MATRICE DE ROTATION

Lorsque la matrice de rotation (A I-1) est construite par les vecteurs  $o$ ,  $a$ ,  $n$  et  $p$  qui représente respectivement l'orientation des trois axes (x,y,z) et la position de l'origine. Ainsi, comme le calcul de ces vecteurs peut se faire de manière individuelle, il se peut qu'elle ne soit pas parfaitement homogène.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A I-1})$$

Dans ce cas, il est possible de faire l'homogénéisation de celle-ci. La méthode proposée est d'en extraire les angles d'Euler et ensuite recalculer une matrice de rotation à partir de ces derniers. Si on utilise la conversion Z-Y-X, les équations pour faire cette manipulation sont présentées en (A I-2) et (A I-3).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\hat{Z}}(\alpha)\mathbf{R}_{\hat{Y}}(\beta)\mathbf{R}_{\hat{X}}(\gamma) \quad (\text{A I-2})$$

$$= \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix} \quad (\text{A I-3})$$

Alors, les angles d'Euler sont trouvés par les équations A I-4 à A I-6.

$$\beta = \text{atan2} \left( -\mathbf{R}_{3,1}, \sqrt{\mathbf{R}_{1,1}^2 + \mathbf{R}_{2,1}^2} \right) \quad (\text{A I-4})$$

$$\alpha = \text{atan2} (\mathbf{R}_{2,1}, \mathbf{R}_{1,1}) \quad (\text{A I-5})$$

$$\gamma = \text{atan2} (\mathbf{R}_{3,2}, \mathbf{R}_{3,3}) \quad (\text{A I-6})$$

Dans le cas où le  $\beta = \pm\frac{\pi}{2}$ , il faut utiliser les relations A I-7 et A I-8, car plusieurs termes ne seront plus exploitables.

$$\alpha = 0 \quad (\text{A I-7})$$

$$\gamma = s_{\beta} \text{atan2}(\mathbf{R}_{1,2}, \mathbf{R}_{2,2}) \quad (\text{A I-8})$$

Une fois que les angles d'Euler sont trouvés, la matrice de rotation homogène est obtenue à partir de l'équation (A I-2).

## BIBLIOGRAPHIE

- Abele, E, M Weigold, et S Rothenbücher. 2007. « Modeling and identification of an industrial robot for machining applications ». *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 56, n° 1, p. 387-390.
- Alici, Gürsel, Romuald Jagielski, Y. Ahmet Şekercioğlu, et Bijan Shirinzadeh. 2006. « Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimisation method ». *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, n° 12, p. 956-966.
- Aoyagi, S., A. Kohama, Y. Nakata, Y. Hayano, et M. Suzuki. 2010. « Improvement of robot accuracy by calibrating kinematic model using a laser tracking system-compensation of non-geometric errors using neural networks and selection of optimal measuring points using genetic algorithm ». In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*. p. 5660-5665.
- Bennett, D. J. et J. M. Hollerbach. 1991. « Autonomous calibration of single-loop closed kinematic chains formed by manipulators with passive endpoint constraints ». *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 7, n° 5, p. 597-606.
- Bennett, David J, Davi Geiger, et John M Hollerbach. 1991. « Autonomous robot calibration for hand-eye coordination ». *The International journal of robotics research*, vol. 10, n° 5, p. 550-559.
- Boochs, F., R. Schutze, C. Simon, F. Marzani, H. Wirth, et J. Meier. 2010. « Increasing the accuracy of untaught robot positions by means of a multi-camera system ». In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on*. p. 1-9.
- Borm, Jin-Hwan et Chia-Hsiang Meng. 1991. « Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure ». *The International Journal of Robotics Research*, vol. 10, n° 1, p. 51-63.
- Bryan, Greenway. 2000. « Robot accuracy ». *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 27, n° 4, p. 257-265.
- Chen, I-Ming et Guilin Yang. 1997. « Kinematic calibration of modular reconfigurable robots using product-of-exponentials formula ». *Journal of robotic systems*, vol. 14, n° 11, p. 807-821.
- Craig, John, 2005. *Introduction to robotics : mechanics and control*. éd. 3rd. Upper Sadder River : Prentice Hall, 408 p.
- Dolinsky, J. U., I. D. Jenkinson, et G. J. Colquhoun. 2007. « Application of genetic programming to the calibration of industrial robots ». *Computers in Industry*, vol. 58, n° 3, p. 255-264.

- Driels, Morris R et Uday S Pathre. 1991. « Vision-based automatic theodolite for robot calibration ». *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 7, n° 3, p. 351-360.
- Driels, MorrisR, W. Swayze, et S. Potter. 1993. « Full-pose calibration of a robot manipulator using a coordinate-measuring machine ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 8, n° 1, p. 34-41.
- Dumas, Claire, Stéphane Caro, Sébastien Garnier, et Benoît Furet. 2011. « Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, n° 4, p. 881-888.
- Durango, Sebastian, David Restrepo, Oscar Ruiz, John Dairo Restrepo-Giraldo, et Sofiane Achiche. 2010. « Kinematic identification of parallel mechanisms by a divide and conquer strategy ». In *International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. p. 167-173.
- Eberhart, Russ C et James Kennedy. 1995. « A new optimizer using particle swarm theory ». In *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. p. 39-43. New York, NY.
- Elatta, AY, Li Pei Gen, Fan Liang Zhi, Yu Daoyuan, et Luo Fei. 2004. « An overview of robot calibration ». *Information Technology Journal*, vol. 3, n° 1, p. 74-78.
- English, Kathleen, MJD Hayes, et Markus Leitner. 2002. « Kinematic calibration of six-axis robots ». KUKA KR-15/2, a camera and a laser distance sensor mounted on the end-effector, a linear artifact.
- Everett, Louis J. 1993. « Models for diagnosing robot error sources ». In *Robotics and Automation, 1993. Proceedings., 1993 IEEE International Conference on*. p. 155-159. IEEE.
- Everett, Louis J et Tsing-Wong Hsu. 1988. « The theory of kinematic parameter identification for industrial robots ». *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 110, n° 1, p. 96-100.
- Feng, Ya Lei, Dao Kui Qu, Fang Xu, et Hong Guang Wang. 2013. « Joint Stiffness Identification and Flexibility Compensation of Articulated Industrial Robot ». *Applied Mechanics and Materials*, vol. 336-338, p. 1047-1052.
- Foulloy, L et Robert B Kelley. 1984. « Improving the precision of a robot ». In *Robotics and Automation. Proceedings. 1984 IEEE International Conference on*. p. 62-67. IEEE.
- Gatla, C. S., R. Lumia, J. Wood, et G. Starr. 2007. « An Automated Method to Calibrate Industrial Robots Using a Virtual Closed Kinematic Chain ». *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 23, n° 6, p. 1105-1116.
- Gong, Chunhe, Jingxia Yuan, et Jun Ni. 2000. « Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, n° 14, p. 2119-2137.

- Gonzalez-Hernandez, Abraham et Eduardo Castillo-Castaneda. 2013. « Stiffness estimation of a parallel manipulator using image analysis and camera calibration techniques ». *Robotica*, vol. 31, n° 4, p. 657-667.
- Goswami, A., A. Quaid, et M. Peshkin. 1993. « Identifying robot parameters using partial pose information ». *Control Systems, IEEE*, vol. 13, n° 5, p. 6-14.
- Ha, In-Chul. 2008. « Kinematic parameter calibration method for industrial robot manipulator using the relative position ». *Journal of mechanical science and technology*, vol. 22, n° 6, p. 1084-1090.
- Hanqi, Zhuang, Wang Kuanchih, et Zvi S. Roth. 1994. « Optimal selection of measurement configurations for robot calibration using simulated annealing ». In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*. p. 393-398 vol.1.
- Hanqi, Zhuang, Wang Kuanchih, et Zvi S. Roth. 1995. « Simultaneous calibration of a robot and a hand-mounted camera ». *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 11, n° 5, p. 649-660.
- Hayati, Samad A. 1983. « Robot arm geometric link parameter estimation ». In *Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on*. p. 1477-1483. IEEE.
- Heping, Chen, T. Fuhlbrigge, Choi Sang, Wang Jianjun, et Li Xiongzi. 2008. « Practical industrial robot zero offset calibration ». In *Automation Science and Engineering, 2008. CASE 2008. IEEE International Conference on*. p. 516-521.
- Houde, Genevieve. 2006. « A closed-loop method for the geometric calibration of serial robots ». Thesis, McGill University (Canada). <<http://search.proquest.com/docview/304938318?accountid=27231>>. Copyright - Copyright UMI - Dissertations Publishing 2006 Last updated - 2013-04-10 DOI - 1306834111 ; 36222981 ; 66569 ; 9780494249659 ; MR24965 First page - n/a.
- In-Won, Park et Kim Jong-Hwan. 2011. « Estimating entire geometric parameter errors of manipulator arm using laser module and stationary camera ». In *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. p. 129-134.
- Jarvis, John F. 1987. « Microsurveying : towards robot accuracy ». In *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on*. p. 1660-1665. IEEE.
- Joubair, Ahmed. 2012. « Contribution a l'amélioration de la précision absolue des robots parallèles ». Thesis, Ecole de Technologie Supérieure (Canada). <[http://search.proquest.com/docview/1238228432?accountid=27231http://openurl.uquebec.ca:9003/ets?url\\_ver=Z39.88-2004&rft\\_val\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+%26+theses&sid=ProQ:ProQuest+Dissertations+%26+Theses+Full+Text&atitle=&title=Contribution+a+l%27amelioration+de+la+precision+absolue+des+robots+paralleles&issn=&date=2012-01-01&volume=&issue=&spage=&au=Joubair%2C+Ahmed&isbn=9780494788752&jtitle=&bttitle=&rft\\_id=info:eric/](http://search.proquest.com/docview/1238228432?accountid=27231http://openurl.uquebec.ca:9003/ets?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+%26+theses&sid=ProQ:ProQuest+Dissertations+%26+Theses+Full+Text&atitle=&title=Contribution+a+l%27amelioration+de+la+precision+absolue+des+robots+paralleles&issn=&date=2012-01-01&volume=&issue=&spage=&au=Joubair%2C+Ahmed&isbn=9780494788752&jtitle=&bttitle=&rft_id=info:eric/)>. Copyright -

Copyright ProQuest, UMI Dissertations Publishing 2012 Last updated - 2013-05-09  
DOI - 2841460341 ; 73718212 ; 66569 ; 9780494788752 ; NR78875 First page - n/a.

- Joubair, Ahmed et Ilian A Bonev. 2014. « Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints ». *Precision Engineering*.
- Joubair, Ahmed, Mohamed Slamani, et Ilian A Bonev. 2012. « Kinematic calibration of a 3-DOF planar parallel robot ».
- Joubair, Ahmed, Albert Nubiola, et Ilian Bonev. 2013. « Calibration Efficiency Analysis Based on Five Observability Indices and Two Calibration Models for a Six-Axis Industrial Robot ». *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 6, n° 1, p. 161-168.
- Jwu-Sheng, Hu, Wang Jyun-Ji, et Chang Yung-Jung. 2012. « Kinematic calibration of manipulator using single laser pointer ». In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*. p. 426-430.
- Karan, Branko et Miomir Vukobratović. 1994. « Calibration and accuracy of manipulation robot models—An overview ». *Mechanism and Machine Theory*, vol. 29, n° 3, p. 479-500.
- Karlsson, Björn et Torgny Brogårdh. 2001. « A new calibration method for industrial robots ». *Robotica*, vol. 19, p. 691-693.
- Khosla, Pradeep. 1987. « Estimation of robot dynamics parameters : Theory and application ».
- Khosla, Pradeep K et Takeo Kanade. 1985. « Parameter identification of robot dynamics ». In *Decision and Control, 1985 24th IEEE Conference on*. p. 1754-1760. IEEE.
- Lau, K, R Hocken, et L Haynes. 1985. « Robot Performance Measurements Using Automatic Laser Techniques ». In *NBS-Navy NAV/CIM Workshop on Robot Standards, Detroit MI, June*.
- Li, Tian, Kui Sun, Yue Jin, et Hong Liu. 2011. « A novel optimal calibration algorithm on a dexterous 6 DOF serial robot-with the optimization of measurement poses number ». *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 975-981.
- Lightcap, C, S Hamner, T Schmitz, et S Banks. 2008. « Improved positioning accuracy of the PA10-6CE robot with geometric and flexibility calibration ». *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 24, p. 452-456.
- Lubrano, E., M. Bouri, et R. Clavel. 2011. « Ultra-high-precision industrial robots calibration ». In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. p. 228-233.
- Meng, Y. 2001. « Self-Calibration of Camera-Equipped Robot Manipulators ». *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, p. 909-921.

- Meng, Yan et Hanqi Zhuang. 2007. « Autonomous robot calibration using vision technology ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, n° 4, p. 436-446.
- Mooring, Benjamin W., Zvi S. Roth, et Morris R. Driels, 1991. *Fundamentals of Manipulator Calibration*. \* Only level 1 and level 2 robot calibration is considered \* Ahmed, on page 92, the authors state that "passive fixtures have also been used to locate the target point at predetermined locations in the workspace." \* Mohamed, the use of three ballbars in a tripod configuration is presented on page 97.
- Motta, José Mauricio S. T., Guilherme C. de Carvalho, et R. S. McMaster. 2001. « Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, n° 6, p. 487-497.
- Newman, W S, C E Birkhimer, R J Horning, et A T Wilkey. 2000. « Calibration of a Motoman P8 robot based on laser tracking ». Motoman P8 Laser tracker Circle-Point results interesting, (it is like geometric calibration by axes), Monte Carlo optimisation and GESA, all in table 7 Level-2 calibration (kinematic calibration).
- Nubiola, Albert et Ilian A. Bonev. 2013. « Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, n° 1, p. 236-245.
- Nubiola, Albert et Ilian A Bonev. 2014a. « GEOMETRIC APPROACH TO SOLVING THE INVERSE DISPLACEMENT PROBLEM OF CALIBRATED DECOUPLED 6R SERIAL ROBOTS ». *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 38, n° 1, p. 31-44.
- Nubiola, Albert et Ilian A Bonev. 2014b. « Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar ». *Precision Engineering*, vol. 38, n° 3, p. 472-480.
- Nubiola, Albert, Mohamed Slamani, Ahmed Joubair, et Ilian A. Bonev. 2013. « Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker ». *Robotica*, vol. FirstView, p. 1-20.
- Park, In-Won, Bum-Joo Lee, Se-Hyoung Cho, Young-Dae Hong, et Jong-Hwan Kim. 2012. « Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, n° 6, p. 1059-1067.
- Renaud, Pierre, N. Andreff, J. M. Lavest, et M. Dhome. 2006. « Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology ». *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, n° 1, p. 12-22.
- Roth, Zvi S., B. Mooring, et B. Ravani. 1987. « An overview of robot calibration ». *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, vol. 3, n° 5, p. 377-385.
- Ruibo, He, Zhao Yingjun, Yang Shunian, et Yang Shuzi. 2010. « Kinematic-Parameter Identification for Serial-Robot Calibration Based on POE Formula ». *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 26, n° 3, p. 411-423.

- Ruther, M., M. Lenz, et H. Bischof. 2010. « The narcissistic robot : Robot calibration using a mirror ». In *Control Automation Robotics and Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on.* p. 169-174.
- Schroer, Klaus, Stephen L Albright, et Michael Grethlein. 1997. « Complete, minimal and model-continuous kinematic models for robot calibration ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 13, n° 1, p. 73-85.
- Stone, Henry W et Arthur C Sanderson. 1987. « A prototype arm signature identification system ». In *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on.* p. 175-182. IEEE.
- Sun, Yu et John M. Hollerbach. 2008. « Observability index selection for robot calibration ». p. 831-836. IEEE.
- Traslosheros, A., J. M. Sebastian, J. Torrijos, R. Carelli, et E. Castillo. 2013. « An Inexpensive Method for Kinematic Calibration of a Parallel Robot by Using One Hand-Held Camera as Main Sensor ». *Sensors*, vol. 13, n° 8, p. 9941-65.
- Wang, Dali, Ying Bai, et Jiying Zhao. 2012a. « Robot manipulator calibration using neural network and a camera-based measurement system ». *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 34, n° 1, p. 105-121.
- Wang, Haixia, Shuhan Shen, et Xiao Lu. 2012b. « A screw axis identification method for serial robot calibration based on the POE model ». *Industrial Robot : An International Journal*, vol. 39, n° 2, p. 146-153.
- Watanabe, A., S. Sakakibara, K. Ban, M. Yamada, G. Shen, et T. Arai. 2006. « A Kinematic Calibration Method for Industrial Robots Using Autonomous Visual Measurement ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, n° 1, p. 1-6.
- Whitney, DE, CA Lozinski, et Johnathan M Rourke. 1986. « Industrial robot forward calibration method and results ». *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 108, n° 1, p. 1-8.
- Wu, Chi-Haur. 1983. « The kinematic error model for the design of robot manipulator ». In *American Control Conference, 1983.* p. 497-502. IEEE.
- Ye, S H, Y Wang, Y J Ren, et D K Li. 2006. « Robot calibration using iteration and differential kinematics ». Laser tracker calibration Calibration of an IRB 2400/L improves maximum errors from 1.7 to 0.6 mm measured in the center of the robot flange, in an unspecified number of configurations Level-2 calibration (kinematic calibration).
- Zhang, Dan et Zhen Gao. 2012. « Optimal kinematic calibration of parallel manipulators with pseudoerror theory and cooperative coevolutionary network ». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, n° 8, p. 3221-3231.

- Zhuang, Hanqi, Luke K. Wang, et Zvi S. Roth. 1993. « Error-model-based robot calibration using a modified CPC model ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 10, n° 4, p. 287-299.
- Zhuang, Hanqi, Wen-Chiang Wu, et Zvi S. Roth. 1995. « Camera-assisted calibration of SCARA arms ». In *Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Part 3 (of 3), August 5, 1995 - August 9, 1995*. p. 507-512. IEEE.