

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département de génie mécanique

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : CONSTRUCTION MECANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: CHIKH Aissa

Intitulé

Etalonnage Géométrique d'un Robot

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Moussai. T	Université de M'sila	Président
Dr. Slamani. M	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. Makri. H	Université de M'sila	Examineur
Dr. Arslane. M	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le Docteur SLAMANI Mohamed, Directeur du mémoire pour son suivi, ses conseils judicieux et ses discussions qui m'ont beaucoup aidé au cours de mes recherches.

Je remercie, mes plus sincères remerciements vont à mes parents qui m'ont toujours encouragé dans la poursuite de mes études, ainsi que pour leur aide, leur compréhension et leur soutien, de plus je remercie mes frères et mes sœurs, mes copains, pour les généraux conseils.

Je tiens aussi à remercier Dr. MOUSSAI. T pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire. Que Dr. MAKRI. H Trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail. Que Dr. ARSLANE. M Trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur OUAKAL Hamza et OGBA. K pour avoir bien voulu accepter de guider dans l'entreprise de MEI

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 01 : GENERALITES ET REVUE LITIRATURE	
1.1 Introduction :.....	4
1.2 Historique :.....	4
1.3 L'évolution des robots dans l'industrie :	5
1.4 LES ROBOTS INDUSTRIELS :.....	7
1.4.1 Robotique de service :.....	8
1.4.2 Classification des robots :.....	9
1.4.3 Robots sériels :.....	9
1.4.3.1 Espace de travail :.....	11
1.4.3.2 Les avantages et les inconvénients :.....	11
1.4.4 Les robots parallèles :	12
1.4.4.1 Les avantage :.....	12
1.4.4.2 Les inconvénients :	13
1.5 Précision absolue, répétabilité et résolution :	14
1.6 Sources d'erreurs :	16
1.6.1 Niveaux d'étalonnage :.....	17
1.6.1.1 Niveau 1 :.....	17
1.6.1.2 Niveau 2 :.....	17
1.6.1.3 Niveau 3 :.....	17
1.7 Processus d'étalonnage :.....	18
1.7.1 Modélisation :	18
1.7.2 Prise de mesures:.....	18
1.7.2.1 Laser de pour suite:	18
1.7.2.2 Machine à mesurer tridimensionnelle à portique :.....	20
1.7.2.3 Barre à billes :	21
1.7.3 Identification des paramètres :	22
1.7.4 Compensation :	22
1.8 Conclusion :	23

CHAPITRE 02 : OBJECTIVES ET METHODOLOGIES

2.1 Objective :.....	25
2.2 Méthodologie :.....	25
2.2.1 Programmation par MATLAB :.....	25

CHAPITRE 03 : CINEMATIQUE DIRECTE ET INVERSE

3.1 Introduction.....	28
3.2 Modélisation cinématique :.....	28
3.2.1 Définition de la Modélisation Cinématique :.....	28
3.2.2 Modélisation cinématique directe (MCD) :.....	28
3.2.2.1 Paramètres Denavit-Hartenberg :.....	29
3.2.2.2 Modélisation cinématique Inverse :.....	31
3.2.2.3 Approche algébrique :.....	32
3.3 Étude cinématique direct d'un robot ABB IRB 120 :.....	33
3.3.1 Présentation du robot expérimental :.....	33
3.4 Conclusion :.....	37

CHAPITRE 04 : ETALONNAGE GEOMETRIQUE D'UN ROBOT ABB IRB 120

4.1 Etalonnage Géométrique Du Robot ABB IRB 120:	39
--	----

CONCLUSION GENERALE.....	49
---------------------------------	-----------

BIBLIOGRAPHIE.....	50
---------------------------	-----------

Liste des figures

Figure 1.1 : Robot Unimate	5
Figure 1.2 : Ce graphique montre l'évolution du nombre de robots de quatre pays dans le temps	5
Figure 1.3 : Structure générale d'un robot industriel.....	8
Figure 1.4 : classification des robots selon leur structure cinématique.	9
Figure 1.5 : robot sériel ABB IRB 1600	10
Figure 1.6 : Structure des robots sériels.....	10
Figure 1.7 : espace de travail les Robots ABB IRB 140 et 2400.....	11
Figure 1.8 : robot parallèle adept	12
Figure 1.9 : Précision absolue, résolution et répétabilité	14
Figure 1.10 : Sources de manque de précision des robots et approches d'étalonnage correspondantes.....	16
Figure 1.11 : représenter le Laser de poursuite portable FARO Ion Tracker	20
Figure 1.12 : Machine à mesurer tridimensionnelle à portique	21
Figure 1.13 : barre à bille QC20-W	22
Figure 2.1 : Organigramme explique la méthodologie d'étalonnage par la méthode des moindres carrées	26
Figure 3.1 : figure représente les paramètres D-H.....	30
Figure 3.2 : Robot manipulateur ABB IRB 120	33
Figure 3.3 : Référentiels du robot IRB 120 selon la méthode D-H.....	34
Figure 3.4 : figure représente la cinématique directe de robot ABB IRB 120 pour $\theta = [0, -\pi/2, 0, 0, 0, \pi]$ par MATLAB.	36
Figure 3.5 : figure représente la cinématique directe de robot ABB IRB 120 pour $\theta = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ par MATLAB.	36
Figure.4.1 : Identification des paramètres par linéarisation (résolution d'un système linéaire).....	45
Figure 4.2 : Convergence du système linéaire vers une solution.....	46
Figure 4.3 : Résidus entre poses vraies et poses simulées	47
Figure 4.4 : Résidus entre poses vraies et poses nominales.....	48
Figure 4.5 : Résidus entre poses vraies et poses simulées	48

Introduction générale :

L'utilisation croissante de la robotique dans les domaines de l'industrie, de la médecine et militaire doit satisfaire une exigence de précision de plus en plus forte. Pour répondre à cette demande, il est nécessaire de connaître avec exactitude le modèle géométrique des structures mécaniques sérielles ou parallèles employées. Quels que soient les modèles employés pour représenter la géométrie des robots, leur précision dépend de l'exactitude des paramètres implantés dans les calculateurs.

Les erreurs géométriques de pose de l'effecteur de l'outil sont principalement dues aux erreurs de transformation cinématique résultant des incohérences entre le comportement du modèle géométrique implémenté dans la commande du robot et le comportement géométrique réel de la structure du robot. En effet, la structure du robot est fabriquée et usinée, le comportement géométrique du robot est donc influencé par les défauts d'usinage et d'assemblage des éléments. Ces défauts bornés par le tolérancement mis en place génèrent un écart entre les dimensions nominales du robot et les dimensions réelles de la structure assemblée. Il est alors nécessaire d'identifier les dimensions influentes sur la pose de l'effecteur final et de les maîtriser soit par un tolérancement adapté, soit par le développement d'un modèle géométrique adapté associé à une méthode d'identification de ces paramètres géométriques.

Les modèles géométriques des robots reposent généralement sur un ensemble d'équations mathématiques permettant de définir la pose de l'effecteur final en fonction des valeurs des variables articulaires et de paramètres géométriques. Les méthodes de modélisation les plus répandues reposent généralement sur le formalisme de Denavit-Hartenberg (D-H). Ce formalisme est enrichi par divers travaux scientifiques afin de s'adapter plus particulièrement à certains types de structures. Toutefois, la complexité des modèles développés ne garantit pas une meilleure précision géométrique. En effet, l'ajout de paramètres géométriques rend le modèle plus sensible aux erreurs d'identification. Il est nécessaire de limiter le nombre de paramètres géométriques aux paramètres influents et identifiables. De même, afin d'améliorer la précision de réalisation d'une tâche, il est nécessaire d'étudier l'influence de chaque paramètre géométrique sur la tâche et d'identifier ses paramètres dans les conditions de réalisation de la tâche. En effet, l'objectif n'est pas de garantir une précision de pose absolue du robot dans tout son espace de travail mais de se focaliser sur la précision de réalisation de la tâche.

Le but de la présente étude est de contribuer à l'amélioration de la précision absolue des robots manipulateurs sériels à six degrés de liberté. Ces méthodes consistent à identifier les valeurs des

paramètres du robot, en vue d'améliorer la correspondance entre le robot réel et le modèle mathématique utilisé par son contrôleur par programmation dans le logiciel Matlab.

Chpitre 01

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons définir dans un premier temps l'histoire de la robotique et les différents types de robots industriels, à savoir les robots sériels et les robots parallèles, les avantages et les inconvénients seront aussi exposés, puis on s'intéressera particulièrement aux sources d'erreurs et les niveaux d'étalonnage. On terminera par le processus d'étalonnage et quelques instruments de mesures.

1.2. Historique :

Les ancêtres des robots sont les automates, au XVII^e siècle. D'une certaine manière, dans la mesure où l'informatique les rend totalement interactifs avec les humains, les premiers robots sont les premiers ordinateurs, conçus pendant la Seconde Guerre mondiale et réalisés juste après. Mais leurs actions se limitant à des opérations intellectuelles, les premiers robots à proprement parler sont les appareils qui, synthèses des automates et des ordinateurs, peuvent effectuer de façon automatique des tâches physiques à la place des humains, ceci de façon plus efficace, en rapidité et en précision.

En 1954, l'Américain George Devol dépose le brevet de Unimate, premier robot industriel. Il s'agit d'un bras articulé capable de transférer un objet d'un endroit à un autre et inspiré des téléopérateurs utilisés dans l'industrie nucléaire dans les années 1950 pour la manipulation d'éléments radioactifs.

En 1956, la société Unimation Inc., est créée par Joseph Engelberger, associée de Devol.

En 1961, Unimate est installé aux lignes d'assemblage de l'usine Ewing Township (appartenant General Motors et située dans la banlieue de Trenton, New Jersey), Unimate. Il est chargé de saisir des pièces de métal à très haute température et de les déplacer jusqu'à des bains de refroidissement. À l'époque, la direction de General Motors ne diffuse pas l'information, estimant qu'il s'agissait d'un procédé expérimental risquant de ne pas fonctionner. Elle finit cependant par passer commande de 66 exemplaires. Un exemplaire du robot Unimate est présenté à la figure 1.1

- En 1968, Unimation est le leader du marché mondial de la robotique.
- En 1976, la première entreprise à adopter ses produits en France est Renault en 1976.

- En 1983, La société Westinghouse (à l'origine des premiers robots humanoïdes) rachète Unimation Inc. avant de la revendre à Stäubli trois ans plus tard [1].



Figure 1.1 : Robot Unimate [2].

1.3. L'évolution des robots dans l'industrie :

Depuis les années 60, de plus en plus de processus industriels sont automatisés afin de répondre à des problématiques de maîtrise de la qualité produite, de la productivité et des coûts. Une des méthodes d'automatisation repose sur la robotisation. La Figure 1.2 montre l'évolution de la demande mondiale de robots au cours des 10 dernières années.

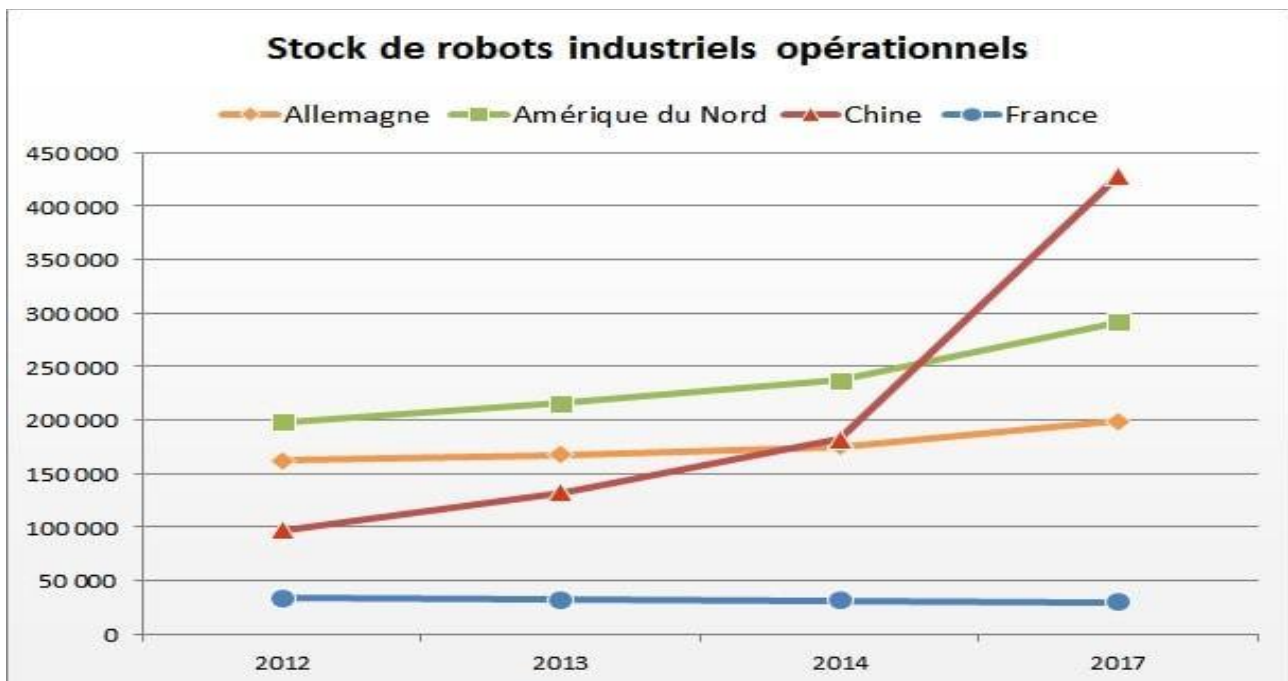


Figure 1.2 : Ce graphique montre l'évolution du nombre de robots de quatre pays dans le temps [3].

- Pour la période 2015 – 2017, une croissance de la demande annuelle moyenne de 16% est attendue en Asie et Australie et de 6% en Amérique et Europe.

L'industrie automobile est la plus demandeuse en robots industriels. En effet, depuis son apparition, l'utilisation des robots industriels a principalement consisté à réaliser des opérations dangereuses pour l'être-humain.

En 1974, en France, la Direction des Techniques Avancées en Automatismes (DTAA) coopère avec la Société Française d'Étude et de Réalisation de Machines-Outils (SOFREMO) sur la conception de robots. Ces robots sont intégrés la première fois par l'entreprise Renault en 1976.

En 1970, la première conférence sur les robots industriels est organisée à Chicago aux Etats Unis, l'ISIR (International Symposium on Industrial Robots). Après cet évènement, le Robot Institute of America (RIA) a été créé (NOF99).

En 1987, la conférence change de nom et devient l'ISR (International Symposium of Robotics) jusqu'à nos jours.

Dans les années 70, KUKA développe le robot Famulus, le premier robot avec six axes électromécaniques. Dès lors, l'activité dans le domaine des robots industriels n'a cessé de croître de manière significative. Nous pouvons noter les faits marquants suivants : - Hitachi, en 1970, développe le premier robot avec l'intégration de capteurs de vision dynamique pour détecter les objets en mouvement. - L'entreprise Cincinnati Milacron Corporation crée en 1974 le robot T3, le premier robot commandé par un microprocesseur. - ASEA en 1974 développe le premier robot ARB 6, avec un microprocesseur Intel 8bit.

- En 1978, General Motors intègre, avec l'entreprise Unimation/Vicarm, un robot PUMA pour l'assemblage des pièces plus légères.

- Cette même année (1978), Hiroshi Makino de l'Université de Yamanashi développe le robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) [Bonet14].

- En 1981 à l'Université de Carnegie Mellon aux Etats Unis, Haruiko Asada et Takeo Kanade proposent une méthode de conception de mécanismes de transmission pour les bras robotiques, le Direct Drive Arm. Ce mécanisme permet aux robots de se déplacer avec précision à grande vitesse.

- En 2006, Comau en Italie introduit le WiTP (Wireless Tech Pendant), une unité de contrôle et programmation des robots sans fil. La même année, en Allemagne, KUKA développe un robot avec une structure extérieure en aluminium afin de réduire son poids et réaliser des économies d'énergie [4].

1.4. LES ROBOTS INDUSTRIELS :

Un robot manipulateur, quelle que soit la fonction qui lui est attribuée (transfert d'objet, soudage, assemblage), est un mécanisme capable de déplacer et de situer un objet appelé « organe terminal » ou « point outil » dans une partie de l'espace appelé « volume de travail ». Afin de différencier les robots que nous allons étudier des manipulateurs simples dont les mouvements sont déterminés par des butées rigides, nous parlerons de « robot industriel » dont la définition générale est donnée ci-dessous.

<< Un robot industriel est un manipulateur à plusieurs degrés de liberté contrôlé automatiquement, reprogrammable et multitâche qui peut être fixe ou mobile pour une application en automatisation industrielle >>.

Autre définition : (Robot industriel pour manipulation). Système de manipulation programmable de trois axes ou plus, à usage multiple, contrôle automatiquement, reprogrammable, qui peut être mobile ou fixe lors de son utilisation automatique (définition ISO 8373).

Le robot industriel se compose d'une structure mécanique animée par des actionneurs, à partir d'ordres élaborés par un calculateur (Figure 3). Ces ordres dépendent des informations délivrées par les capteurs. L'utilisation de capteurs externes, capteurs « extéroceptifs », pour évaluer et mesurer l'interaction du robot avec l'environnement directement depuis son organe terminal devient une pratique de plus en plus courante dans les applications robotiques de haute précision.

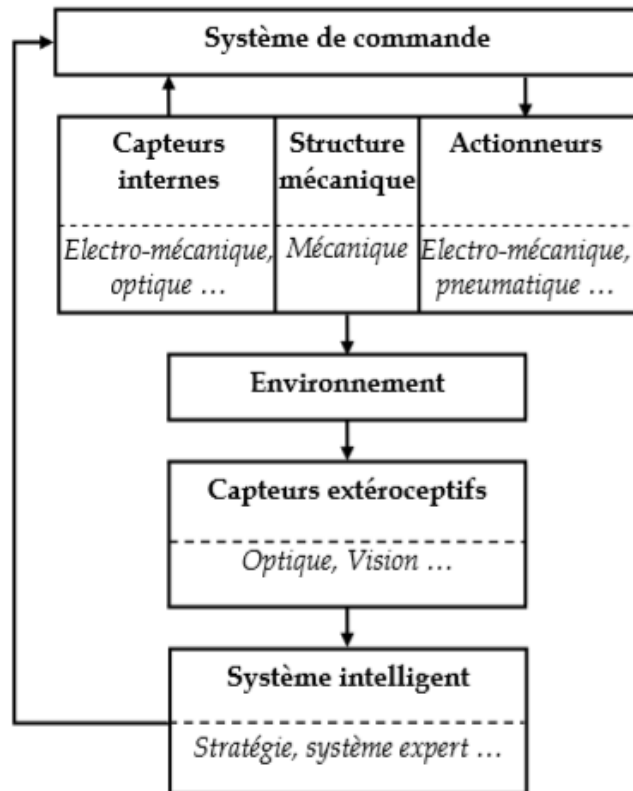


Figure 1.3 : Structure générale d'un robot industriel [5].

1.4.1. Robotique de service :

Si la robotique est restée pendant longtemps relativement confinée à des applications industrielles manufacturières, les avancées technologiques font que depuis quelques années de nombreux autres domaines sont explorés, en vue notamment de développer une robotique de service.

Un robot de service est un robot mi ou totalement autonome accomplissant un travail directement utile à un usager ou sur un équipement, à l'exception des tâches de production industrielle.

On peut citer ici quelques domaines d'utilisation des robots de service : robotique médicale (chirurgie télé opérée), robotique de manutention, robotique d'exploration et de surveillance (terrestre, sous-marine, aérienne, spatiale), robotique pour la sécurité civile, robotique agricole, robotique minière, robotique militaire (démontage, soldat robotisé, drone), robotique de chantier (ou du bâtiment), robotique de nettoyage et d'entretien, robotique de divertissements (jouets, robots de compagnie), robotique d'aide à la personne (aide aux handicapés, prothèses), etc.

1.4.2. Classification des robots :

Les robots peuvent être classifiés selon divers critères comme : le nombre de degrés de liberté, leur structure cinématique, la taille et la forme de leur espace de travail ou les caractéristiques de leur mouvement. Les robots peuvent alors être aussi définis comme des robots sériels (figure a), des robots parallèles (figure b) ou des robots hybrides. Un robot est dit sériel lorsqu'il a une structure basée sur une chaîne cinématique ouverte constituée par une succession de corps rigides ou bras chacun d'eux liés à son prédécesseur par une articulation à un degré de liberté [4].



a) Robot ABB IRB 2400 [6].



b) Robot ABB IRB 360 [7].

Figure 1.4 : classification des robots selon leur structure cinématique.

1.4.3. Robots sériels :

La plupart des robots industriels construits à ce jour est de type sériel, c'est-à-dire que leur structure mobile est une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté. Chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents.

La succession d'éléments assemblés composant un robot sériel débute par la base et se termine par l'organe final (Figure 1.5). La structure mécanique articulée a pour but de positionner l'organe final par rapport à une tâche dans une situation de l'espace donné (position et orientation) suivant une vitesse et accélération programmée. Cette structure est basée sur une chaîne cinématique composée de solides rigides articulés par des liaisons passives ou actives.

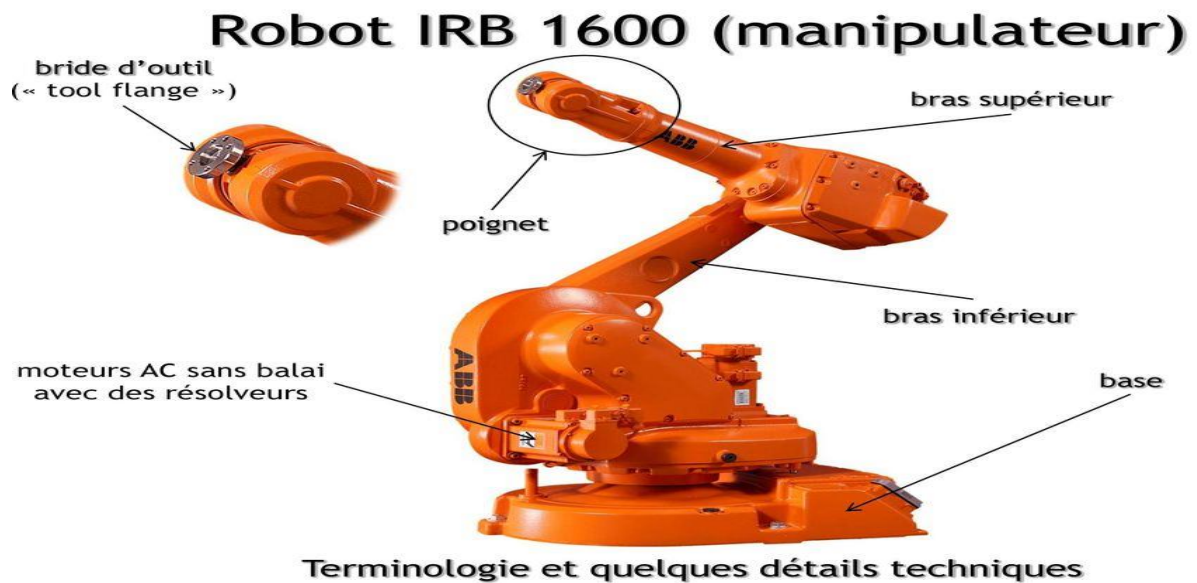


Figure 1.5 : robot sériel ABB IRB 1600 [8].

Suivant le type de connexion entre les éléments, les robots à structure sérielle peuvent être à chaîne ouverte, à chaîne fermée ou à chaîne complexe (Figure 1.6). Les robots sériels à chaîne ouverte sont des robots composés d'éléments ou corps reliés au reste du système avec 2 liaisons à 1 degré de liberté (ddl). L'effecteur final et la base sont, eux, reliés avec une liaison à 1 ddl. Les robots sériels à chaîne fermée, par contre, ont au moins un élément ou corps avec un degré de connexion supérieur à deux.

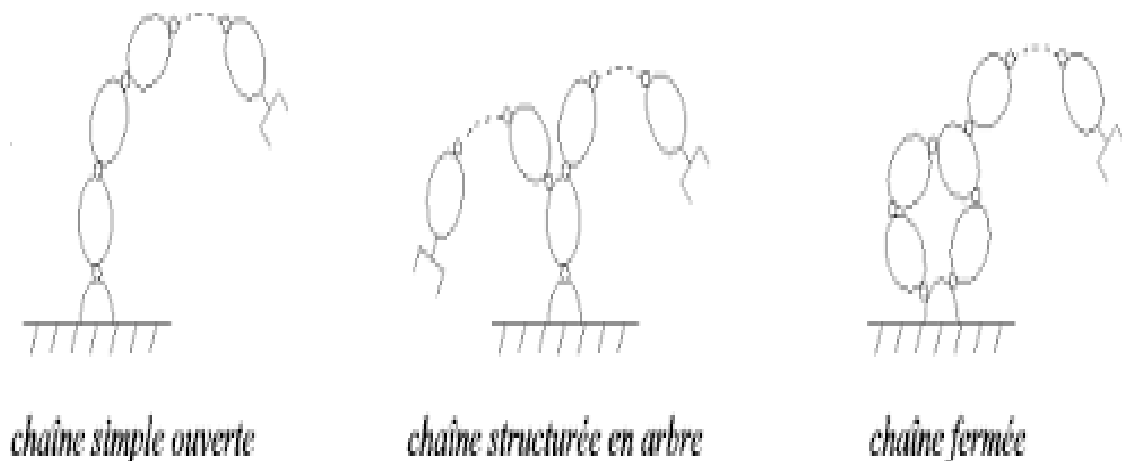


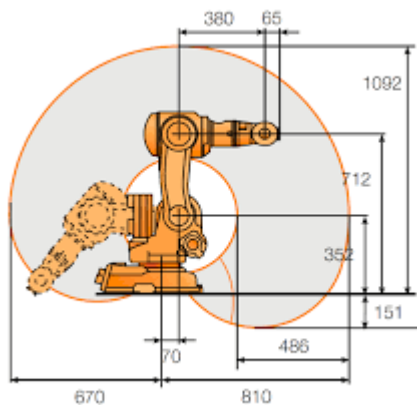
Figure 1.6 : Structure des robots sériels [9].

Les robots sériels à chaîne ouverte sont les plus communément utilisés dans l'industrie, cependant, les robots sériels à chaîne fermée ont l'avantage de proposer une structure

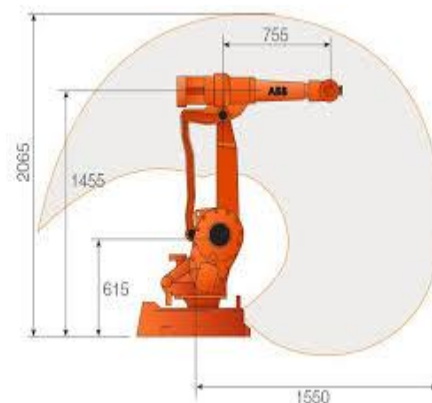
réputée plus rigide. Ainsi, certaines structures de robot dédié à l'usinage possèdent une structure fermée.

1.4.3.1. Espace de travail :

L'espace de travail d'un robot sériel est défini comme l'espace atteignable par l'effecteur final. La taille de l'espace de travail est fonction de plusieurs facteurs : le nombre de degrés de liberté, la longueur des éléments constituant le robot, la disposition des articulations, les limites des articulations et les interférences mécaniques entre ses éléments. La Figure 1.7 présente l'espace de travail ou zone atteignable par le centre du poignet du Robot ABB IRB 140 et 2400 [4].



a) ABB IRB 140 [10].



b) ABB IRB 2400 [6].

Figure 1.7 : espace de travail les Robots ABB IRB 140 et 2400.

1.4.3.2. Les avantages et les inconvénients :

Les robots séries possèdent l'avantage de disposer d'un grand volume de travail et d'être relativement simples sur le plan des calculs liés à leur commande. Leurs principaux inconvénients sont les suivants :

- ✓ Inertie élevée à cause de la répartition des masses sur toute la chaîne cinématique (actionneurs, organes de transmission).
- ✓ Manque de rigidité par la mise en série d'éléments élastiques, fatigue et usure des liaisons de puissance assurant l'alimentation des actionneurs (câbles, tuyaux flexibles).
- ✓ Fatigue et usure des liaisons assurant la circulation des informations entre les capteurs et la commande, ce point est très important lorsqu'il s'agit de sûreté.

- ✓ De fonctionnement, puisqu'une erreur de transmission peut avoir des conséquences néfastes sur les mouvements du robot.

1.4.4. Les robots parallèles :

Un robot parallèle contrôle le mouvement de son effecteur au moyen d'au moins deux Chaînes cinématiques allant de l'effecteur à la base (Figure 1.8). De plus, un manipulateur pleinement parallèle est un manipulateur parallèle dont le nombre de chaînes est strictement égal au nombre de degrés de liberté de l'organe terminal.



Figure 1.8 : robot parallèle adept [11].

1.4.4.1. Les avantages :

Possibilité de positionner les actionneurs directement sur la base fixe ou très proche de celle-ci ; cette particularité a les conséquences positives suivantes :

- ✓ Grand choix de moteurs et de réducteurs puisque leur masse n'a pas d'influence sur l'inertie du robot en mouvement.
- ✓ Simplification importante des problèmes de liaisons entre les moteurs, les capteurs et le contrôleur (câblage plus simple et plus fiable) ;

- ✓ Facilité de refroidissement des actionneurs, donc diminution des problèmes de précision dus aux dilatations, et puissance potentielle élevée ;
- ✓ Facilité d'isolation des moteurs de l'espace de travail pour des activités en atmosphère propre, avec risque de déflagration, ou encore pour des applications en milieux humides.
- ✓ Faible masse mobile.
- ✓ Possibilité de mouvements à haute dynamique (accélérations élevées).
- ✓ De manière intrinsèque, raideur mécanique élevée (puisque la charge est reprise par l'ensemble des jambes et plus d'éléments ne sont soumis qu'à des sollicitations de traction/compression).
- ✓ Capacité de charge élevée.
- ✓ Facilité d'intégration de capteurs.
- ✓ Construction mécanique modulaire, simplicité de fabrication et utilisation d'éléments standards par la présence de plusieurs composants identiques sur un robot.

Les robots parallèles offrent la possibilité d'atteindre de plus grandes vitesses et accélérations que les robots sériels. Une meilleure répétabilité statique et dynamique ainsi qu'une amélioration de la raideur intrinsèque seraient possibles par ce type d'architecture.

Cependant, ces dernières affirmations font encore l'objet de multiples discussions : les performances en termes de précision dépendent des mécanismes comparés, des performances recherchées, de la manière dont sont calculées les performances et des types d'applications envisagées.

1.4.4.2. Les inconvénients :

- ✓ Les modèles associés à leur commande sont complexes et fortement couplés à cause de la redondance des chaînes cinématiques.
- ✓ Ils possèdent un petit espace de travail par rapport à leur empreinte au sol.
- ✓ De nombreuses singularités peuvent être présentes dans leur espace de travail.
- ✓ L'utilisation d'un grand nombre de liaisons passives induit des jeux, rendant le comportement du robot difficilement modélisable. Il faut pourtant les maîtriser pour définir des zones dangereuses à proximité des singularités et pour améliorer la précision du robot [12].

1.5. Précision absolue, répétabilité et résolution :

La précision d'un robot est définie par la déviation entre une position commandée et la position atteinte de l'effecteur (position et orientation). Cette déviation est définie dans un repère de référence et est quantifiée par la précision absolue et la répétabilité.

La répétabilité nommée également précision relative, est la capacité d'un robot à retourner à une position précédente. Elle est définie par la dispersion sur la position de l'organe terminal visée « n » fois (Figure 1.9). Elle est influencée essentiellement par les jeux et le frottement entre les différents composants mécaniques du robot, le bruit électrique, la résolution des encodeurs, et d'autres erreurs de type stochastique.

La précision absolue correspond à la tolérance à l'intérieur de laquelle l'effecteur peut être placé par rapport à la position désirée. Elle est principalement limitée par des facteurs tels que les perturbations de l'environnement de travail, la différence entre la structure réelle et le modèle géométrique utilisé par le contrôleur, l'effet des forces de frottement, les jeux dans les articulations, les déflexions des articulations et des segments de la structure, la boucle de réglage et l'incertitude entre le repère de référence et celui de l'effecteur.

La résolution d'un robot représente le plus petit incrément de déplacement qui peut être exécuté (Figure 1.9). Elle est déterminée par le type d'actionneur et les capteurs de position. Cependant, la résolution effective par rapport à l'organe terminal peut être influencée par l'environnement de travail, le frottement, les jeux et l'élasticité dans la structure du robot.

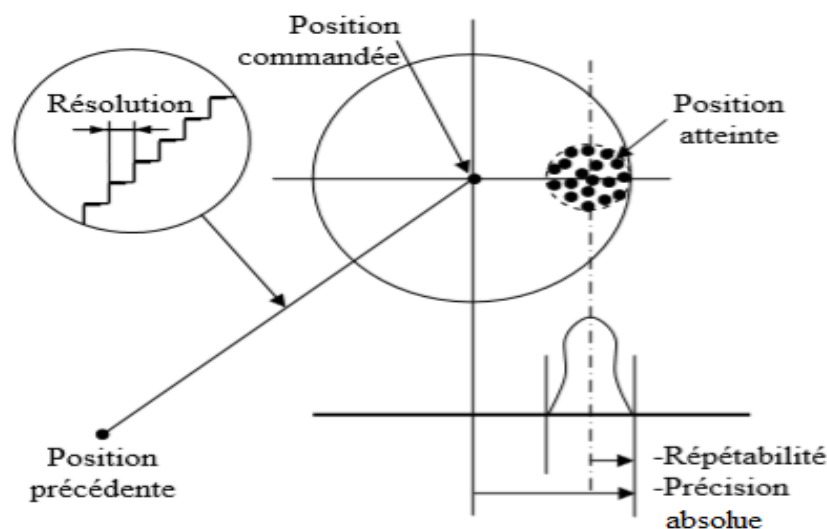


Figure 1.9 : Précision absolue, résolution et répétabilité [5].

La figure 1.9 montre la relation entre la position commandée, la position atteinte, la précision, la répétabilité et la résolution. Nous venons de voir que les sources d'imprécision relatives ou absolues d'un robot sont nombreuses, par soucis de clarté pour la suite, nous les répartissons ci-dessous en 4 types.

- Type 1 : erreurs de nature géométrique qui proviennent de la structure mécanique du robot, telles que les segments et les articulations : tolérances d'usinage, assemblage, référence,
- Type 2 : erreurs issues de non-linéarités, telles que les jeux, le frottement, l'hystérie et les erreurs dues aux déflexions élastiques dans la structure. Ces déflexions sont causées par l'élasticité des segments et la compliance des articulations sous l'effet du poids du robot, des efforts extérieurs ou des forces d'inertie,
- Type 3 : erreurs dans la commande du robot issues de la résolution limitée des encodeurs, de la capacité limitée des calculateurs, du calcul de la cinématique inverse et du suivi de trajectoire (erreurs dynamiques),
- Type 4 : erreurs générées par l'environnement telles que les variations de température, l'humidité, les vibrations, les bruits électriques et erreurs de type stochastique [5].

1.6. Sources d'erreurs :

Principalement l'origine d'erreurs qui affectent la précision d'un robot sériel peuvent être classées en deux catégories (Figure 1.10) : erreurs géométriques et erreurs non géométriques (Whitney et al. 1986) [13].

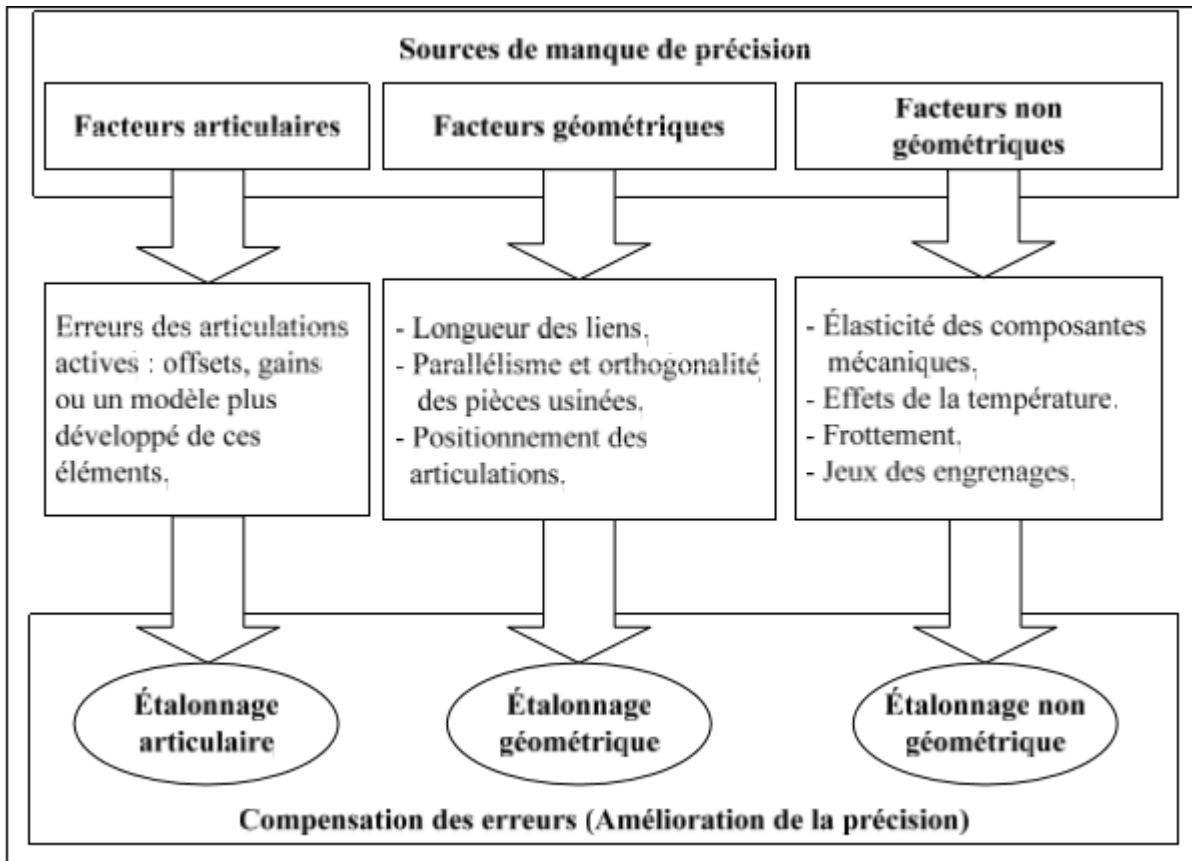


Figure 1.10 : Sources de manque de précision des robots et approches d'étalonnage correspondantes [14].

L'étalonnage de robots consiste en identifier les paramètres réels de la cinématique d'un bras robot. L'étalonnage de robots permet d'améliorer la précision des applications programmés hors-line (programmation hors-line) par l'identification des paramètres réels. Un grand nombre d'études et de travaux ont été réalisés dans le domaine de l'étalonnage des robots manipulateurs.

1.6.1. Niveaux d'étalonnage :

1.6.1.1. Niveau 1 :

Un étalonnage de niveau 1 est également appelé étalonnage de «niveau articulation». Le but est de définir correctement la relation entre la position souhaitée de l'articulation (θ_s) et la position réelle de l'articulation (θ_r). Dans l'étalonnage de niveau 1, les facteurs qui causent le manque de précision compatible avec ces erreurs sont les capteurs des articulations actives du robot. Elles représentent les différences entre les valeurs fournies par les encodeurs des actionneurs et les mouvements articulaires réellement effectués.

1.6.1.2. Niveau 2 :

L'étalonnage de niveau 2 est souvent appelé étalonnage géométrique. Un étalonnage de niveau 2 correspond à l'étalonnage complet de la cinématique du robot. Pour augmenter la précision on doit identifier les paramètres géométriques du robot.

Les principales causes d'erreurs géométriques sont :

- les longueurs nominales des liens différentes des longueurs réelles. Ceci est causé principalement par les tolérances de fabrication et d'assemblage.
- Les caractéristiques géométriques des pièces usinées (parallélisme, orthogonalité, planéité, etc.).
- Le positionnement des articulations liées à la base et à l'élément terminal du robot.
- Les erreurs de localisation du référentiel de la base du robot par rapport à celui de la cellule.
- Les erreurs de localisation du référentiel de l'outil sur l'organe terminal.

1.6.1.3. Niveau 3 :

L'étalonnage de niveau 3 prend en compte les sources d'erreur non géométriques. Les sources d'erreurs non géométriques peuvent être la rigidité, le frottement, le jeu, les paramètres dynamiques, etc. L'étalonnage de niveau 3 est généralement associé à un étalonnage de niveau 2 et 1. Les étalonnages de robot les plus courants incluent un étalonnage cinématique complet (niveau 2) et parfois quelques paramètres décrivant la rigidité du bras du robot (niveau 3) [13].

1.7. Processus d'étalonnage :

La procédure d'étalonnage se passe sur quatre étapes principales, la modélisation, la prise de mesures, l'identification des paramètres et la compensation.

1.7.1. Modélisation :

C'est la première étape d'étalonnage, la méthode consiste à créer un modèle mathématique, ce modèle doit être plus proche possible du modèle réel. Il y a plusieurs méthodes pour faire la modélisation mais les modèles les plus abordés dans la littérature sont ceux des robots sériels utilisant la méthode Denavit-Hartenberg (DH).

L'autre méthode c'est la convention Denavit-Hartenberg modifiées pour étalonnage, cette méthode consiste à corriger les problèmes associés aux différents modèles Denavit-Hartenberg, il y a certains chercheurs ont proposé leurs modifications, ont proposé d'ajouter un paramètre, dénoté β , pour mieux caractériser la relation entre les référentiels de deux articulations rotoïdes parallèles consécutives. Cette modification rend le modèle proportionnel et permet ainsi de corriger le problème associé aux axes quasi parallèles.

1.7.2. Prise de mesures:

La deuxième étape du processus est la prise de mesures pour permettre l'identification subséquente des paramètres. Les chercheurs ont créé et utilisé plusieurs types de systèmes de mesure et différentes méthodes pour faire l'étalonnage de robots industriels à travers les années. Par souci de clarté, les principaux travaux de la littérature ont été groupés par type d'instrument ou par méthodologie de mesure.

1.7.2.1. Laser de poursuite:

Les systèmes de laser de poursuite (LTS) sont utilisés par plusieurs fabricants on cite ABB et FANUC et par certains chercheurs pour faire l'étalonnage des robots sériels. Ces systèmes utilisent deux technologies nécessaires de mesure. La première technologie est l'interféromètre (IFM) laser. L'IFM laser est un appareil de mesure incrémentale de distance sans contact. Il utilise un laser hélium néon asservi en fréquence qui se divise en deux faisceaux. Le premier faisceau est projeté directement dans l'interféromètre. L'autre faisceau est projeté vers l'extérieur sur un rétro réflecteur sphérique (SMR) pour être retourné dans l'interféromètre sur un photo-détecteur. L'interférence de ces deux faisceaux combinés permettra de récolter la mesure de distance.

La première étude qui a analysé la faisabilité d'utiliser un IFM laser avec un LTS pour étalonner la précision d'un robot a été réalisée par Lau et al.(1986), malgré que les IFM laser étaient déjà utilisés dans les années 1970. Depuis ce temps, plusieurs autres travaux importants d'étalonnage de robots sériels ont utilisé les IFM laser avec les LTS.

Les IFM laser sont très précis (p. ex. l'IFM laser du FARO Ion Tracker a une précision de $4 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m/m}$). Par contre, ils ont un désavantage important. Lors de la prise de mesures, le faisceau ne doit jamais être coupé, sinon le SMR doit être retourné à sa position de référence pour ré-étalonnage. Cela est problématique pour l'étalonnage d'un robot sériel puisque plusieurs mesures dans des configurations variées doivent être récoltées. Inévitablement, le faisceau sera coupé. Ainsi, il est difficile d'automatiser une prise de mesures dans l'espace de travail complet du robot avec cet instrument.

La deuxième technologie principale utilisée dans les LTS est le distance mètre absolu (ADM). Cette technologie utilise la lumière infrarouge d'un laser d'un semi conducteur. Celle-ci est projetée sur un SMR et retournée dans le LTS pour être convertie en signal électrique. Le principal avantage de cette technologie par rapport au IFM laser est que le faisceau peut être coupé lors de la prise de mesure. Ainsi, il est possible d'automatiser en totalité la prise de mesures nécessaires à l'étalonnage du robot. Par contre, la technologie ADM est moins précise que la technologie IFM (p. ex. l'ADM du FARO Ion Tracker a une précision de $16 \mu\text{m} + 0.8 \mu\text{m/m}$). Un travail récent a démontré qu'il est possible d'étalonner un robot sériel de manière automatisée en utilisant un LTS avec la technologie ADM (Nubiola et Bonev, 2013).

En définitive, le LTS est un excellent appareil de mesure pour l'étalonnage de robots sériels. Cependant, il est très dispendieux (p.ex. le LTS FAROI on Tracker coûte plus de 100000\$CA) et il est très sensible aux vibrations ainsi qu'aux variations de conditions atmosphériques. Le LTS FARO Ion Tracker est illustré à la figure 1.11.



Figure 1.11 : représenter le Laser de poursuite portable FARO Ion Tracker [13].

1.7.2.2. Machine à mesurer tridimensionnelle à portique :

La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) à portique (Figure1.12) permet de récolter des mesures de grande précision (c.-à-d. de quelques micromètres) dans une grande partie de l'enveloppe de travail du robot. Les mesures sont récoltées en positionnant un palpeur sphérique de position et de dimensions connues sur l'outil du robot. Plusieurs travaux importants ont utilisé une MMT pour acquérir de l'information sur la pose de l'outil. D'un point de vue industriel, cette méthode est très peu attrayante puisqu'elle nécessite le déplacement du robot à l'extérieur de son environnement de travail, et que la prise de mesure prend un temps considérable.



Figure 1.12 : Machine à mesurer tridimensionnelle à portique [13].

1.7.2.3. Barre à billes :

La barre à billes (Figure.1.13) est un outil de mesure utilisé depuis longtemps pour l'inspection des machines-outils. Celle-ci utilise un capteur télescopique linéaire pour mesurer le déplacement des positions des billes avec grande précision. Plusieurs chercheurs ont utilisé la barre à billes pour étalonner des robots sériels. Elle a été utilisée la première fois par Driels (1993), qui propose une nouvelle méthode en boucle fermée en reliant l'effecteur du robot à un point fixe par une barre à billes télescopique. Cette méthode est très précise avec un bruit de mesure estimé à $50 \mu\text{m}$ et permet d'obtenir une précision étonnante après étalonnage en mesurant aussi peu que 30 configurations. Par contre, cette méthode est entièrement manuelle, nécessite deux opérateurs et requiert que les servomoteurs puissent être mis hors tension pendant la prise de mesure. Cette méthode reste intéressante pour faire l'étalonnage de robots collaboratifs.



Figure 1.13 : barre à bille QC20-W [13].

1.7.3. Identification des paramètres :

L'identification des paramètres est au cœur du processus d'étalonnage. Cette phase consiste à déterminer quels sont les paramètres optimaux qui permettent de réduire les erreurs de position et, dans certains cas, d'orientation du robot en fonction du modèle posé et des mesures collectées. Il existe trois niveaux d'étalonnage et plusieurs méthodes d'optimisation pour identifier les paramètres du robot [13].

1.7.4. Compensation :

Cette dernière étape consiste à instaurer le modèle corrigé du robot dans son contrôleur, en utilisant les paramètres évalués par le processus d'identification. Ce modèle est considéré comme étant le plus représentatif et le plus près du modèle réel du robot à étalonner. Son utilisation permettra de compenser les erreurs et améliorer, par conséquent, la précision du robot. Savoure et al. (2006) proposent une méthode de compensation qui utilise les poses commandées et les valeurs estimées des paramètres pour faire une approximation linéaire des erreurs articulaires. Ces erreurs sont, par la suite, introduites aux valeurs articulaires calculées par le modèle nominal du robot, pour compenser les erreurs de pose [14].

1.8. Conclusion :

Ce chapitre on a défini les différents types des robotiques, leur utilisations et on a expliqué sur les causes des erreurs qui sont affectées sur la précision du robot, et on a terminé par le processus d'étalonnage.

Dans le chapitre suivant on va expliquer sur la méthodologie et l'objectif d'étalonnage.

Chpitre 02

2.1. Objective :

Le but de la présente étude est de contribuer à l'amélioration de la précision absolue des robots manipulateurs sériels à six degrés de liberté par une approche de simulation. Cette méthode consiste à identifier les valeurs des paramètres du robot, en vue d'améliorer la correspondance entre le robot réel et le modèle mathématique utilisé par son contrôleur. Aucun étalonnage dynamique ne sera pris en compte dans ce travail.

La méthode d'optimisation linéaire par les moindres carrés bien connus est utilisée dans ce mémoire pour identifier les paramètres d'erreur du modèle [15].

2.2. Méthodologie :

2.2.1. Programmation par MATLAB :

L'approche d'étalonnage par simulation commence par imposer les paramètres réels du robot, qui simulent la réalité, c.à.d. le vrai robot. Ensuite, générer toutes les matrices permettant de faire la transformation directe et inverse du modèle avec les paramètres imposés. Enfin, des programmes Matlab sont développés et exécutés.

Les points trouvés avec le logiciel MATLAB, qui prennent la forme de valeurs articulaires correspondants au modèle nominal du robot, sont introduits dans un programme qui, à partir des matrices de transformation trouvées, va nous donner les valeurs articulaires mais correspondantes au modèle réel imposé du robot. Pour atteindre ce but le programme applique la matrice de transformation directe puis la matrice de transformation inverse [16].

La méthode de linéarisation locale du modèle non linéaire du robot est aussi adoptée dans ce travail, puis une solution itérative du problème des moindres carrés est utilisée. Pour cela, une simulation informatique d'un robot ABB IRB 120 a été réalisée à l'aide des techniques d'élimination des paramètres non utiles en se basant sur la technique de décomposition en valeurs singulières (SVD) et l'analyse de conditionnement de la matrice d'observation. Cette approche va permettre d'obtenir une meilleure solution numérique dans le processus d'identification des paramètres.

Le programme commence par les paramètres D-H nominaux avec des erreurs nulles et dans chaque itération il estime les paramètres d'erreur et fait la sommation de nouvelles valeurs avec les valeurs de l'itération précédente. Pratiquement, la matrice jacobienne dépend des paramètres d'erreur trouvés à chaque itération et doit être absolument mise à jour après à

chaque itération. De plus, si les colonnes de la matrice jacobienne sont linéairement dépendantes, la matrice devienne mal conditionnée et les paramètres d'erreur inutiles doivent être éliminés.

La représentation mathématique choisie pour modéliser la cinématique du robot est celle définie par Craig (Craig, 1986) et également connue sous le nom de notation DH (Denavit Hartenberg).

En utilisant les méthodes expliquées par Mooring et al (1991, p. 177) et en adaptant l'extraction des paramètres cinématiques à la notation DH, nous pouvons trouver le modèle cinématique d'un robot [15].

L'organigramme ci-dessous résume la méthodologie sur lequel nous allons travailler.

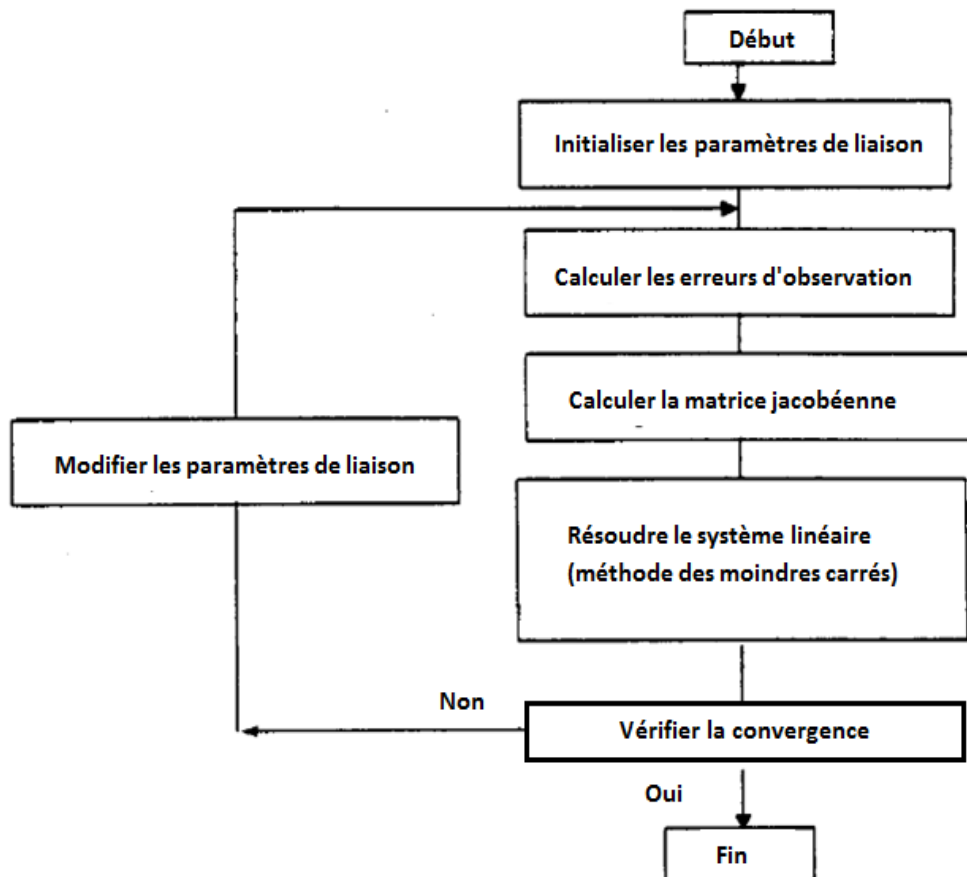


Figure 2.1 : Organigramme explique la méthodologie d'étalonnage par la méthode des moindres carrés [17].

Chpitre 03

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. Elle va permettre d'obtenir un modèle nominal dont les paramètres pourront ensuite être identifiés.

3.2. Modélisation cinématique :

3.2.1. Définition de la Modélisation Cinématique :

La modélisation cinématique d'un robot manipulateur détermine la relation entre la vitesse articulaire \dot{q}_i pour $i=1\dots n$ et la vitesse de la sonde sur le corps du patient : \dot{p} (vitesse linéaire) et \mathbf{W} (vitesse angulaire). Le modèle cinématique direct ou inverse est basé sur la matrice jacobéenne de base. Nous utiliserons également les deux modèles cinématiques directe et inverse et on prend en considération les mêmes paramètres géométriques.

3.2.2. Modélisation cinématique directe (MCD) :

Le modèle cinématique directe du robot décrit les variations élémentaires des coordonnées opérationnelles en fonction des variations élémentaires des coordonnées articulaire. Il est noté :

$$\begin{cases} dX = J(q) dq \\ \dot{X} = f(q, \dot{q}) \end{cases} \quad (3.1)$$

$J(q)$: désigne la matrice jacobéenne de dimensions $(m \times n)$ du mécanisme, et est égale $\frac{dx}{dq}$ en fonction de la configuration articulaire q .

Elle est à la base du modèle cinématique inverse, permettent de calculer de façon initiale les variables articulaires q connaissant les coordonnées opérationnelles P . Le modèle cinématique directe, déterminé par les dérivées par rapport au temps \dot{p} et \dot{q} des

coordonnées opérationnelles et des coordonnées articulaires, exprime les vitesses opérationnelles en fonction des vitesses articulaires [18].

3.2.2.1. Paramètres Denavit-Hartenberg :

La deuxième étape de la méthode est d'identifier les paramètres qui relient les référentiels attribués. Selon la méthode D-H, quatre paramètres sont nécessaires pour décrire la relation complète entre deux référentiels successifs. Ces paramètres ont la signification suivante :

- a_i est la distance entre Z_i et Z_{i+1} selon X_i .
- α_i est l'angle entre Z_i et Z_{i+1} autour de X_i .
- d_i est la distance entre X_{i-1} et X_i selon Z_i .
- θ_i est l'angle entre X_{i-1} et X_i autour de Z_i .

Ces paramètres permettent de définir les transformations nécessaires (c.-à-d. translations et rotations) pour relier les référentiels successifs entre eux afin de former la matrice homogène suivante :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \mathbf{R}_x(\alpha_{i-1}) \mathbf{Tr}_x(a_{i-1}) \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{Tr}_z(d_i) \quad (3.2)$$

Pour les axes parallèles consécutifs, le paramètre β_{i-1} est ajouté et forme ainsi la matrice homogène suivante :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \mathbf{R}_x(\alpha_{i-1}) \mathbf{Tr}_x(a_{i-1}) \mathbf{R}_y(\beta_{i-1}) \mathbf{R}_z(\theta_i) \mathbf{Tr}_z(d_i) \quad (3.3)$$

Dans la Figure 3.1, les paramètres \mathbf{a} et $\boldsymbol{\alpha}$ sont indexés sur une articulation en arrière (i.e. $i-1$) et \mathbf{d} et $\boldsymbol{\theta}$ sur la même articulation i . Cela va faciliter le remplissage de la table des paramètres, nécessaire pour l'obtention des matrices de transformation homogènes entre articulations. Après la multiplication de ces matrices, on obtient la matrice de transformation homogène reliant le poignet à la base du robot. Grâce à ces matrices on sera capable d'appliquer la cinématique directe et inverse.

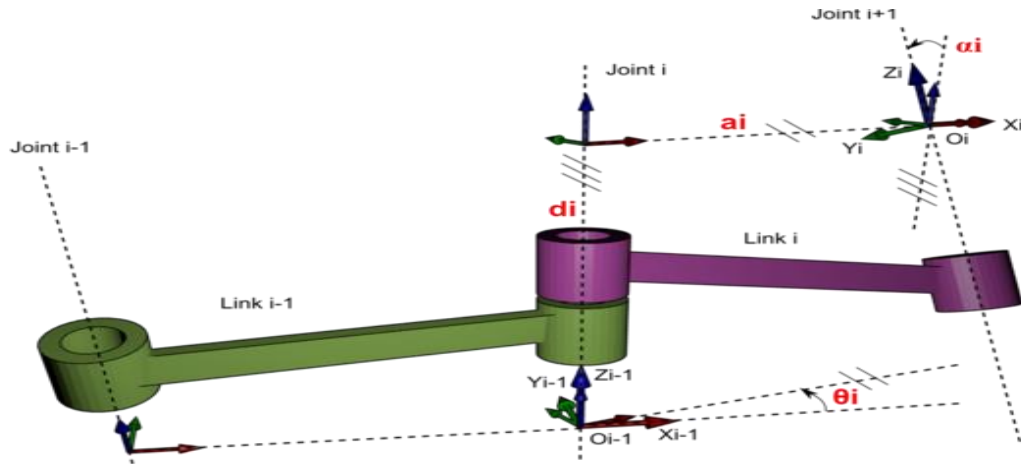


Figure 3.1: figure représente les paramètres D-H [19].

Où :

R_x est la matrice de rotation autour de l'axe x par rapport au système de coordonnées de l'articulation i-1, donc :

$$R_x(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

D_x est la matrice de translation au long de l'axe x par rapport au nouveau système de coordonnées obtenu lors de la rotation précédente,

$$D_x(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

R_z est la matrice de rotation autour de l'axe z par rapport au nouveau système de coordonnées obtenu lors des transformations précédentes, et :

$$R_z(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

D_z est la matrice de translation au long de l'axe z par rapport au nouveau système de coordonnées obtenu lors des transformations précédentes.

$$D_z(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

La valeur entre parenthèses est la valeur de rotation ou translation selon un axe à appliquer selon le cas [16].

En appliquant ces transformations on obtient donc la matrice résultante suivante:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & \alpha(i-1) \\ \sin\theta_i \cos\alpha(i-1) & \cos\theta_i \cos\alpha(i-1) & -\sin\alpha(i-1) & -\sin\alpha(i-1)di \\ \sin\theta_i \sin\alpha(i-1) & \cos\theta_i \sin\alpha(i-1) & \cos\alpha(i-1) & \cos\alpha(i-1)di \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

3.2.2.2. Modélisation cinématique Inverse :

La cinématique décrite jusqu'ici est dite directe, c'est-à-dire, qu'à partir d'une configuration donnée du robot (connaissance des différents angles des articulations), nous sommes passés d'un référentiel (celui de l'outil) à un autre (la base).

Une approche plus utile mais loin d'être aussi simple que la cinématique directe, est la cinématique inverse. C'est celle qui intéresse le plus les utilisateurs de robots, puisqu'à partir d'un point de l'espace à atteindre, la configuration géométrique (dépendant des angles articulaires) doit être déduite.

Le problème met en place n équations fortement non linéaires à n inconnues. Dans un cas linéaire, nous pouvons connaître le nombre de solutions à partir du déterminant du système. Ce n'est plus le cas ici. Avec n équations à n inconnues, nous pouvons très bien obtenir une infinité de solutions. Plusieurs techniques ont été utilisées dans le cadre du travail. Seules deux seront exposées : l'approche algébrique et l'approche optimisation.

3.2.2.3. Approche algébrique :

En plus d'être fortement non linéaire, le système d'équations est transcendant. En effet, les matrices homogènes impliquent une quantité énorme de sinus et cosinus rendant la résolution encore plus complexe.

$$\begin{pmatrix} X0 \\ Y0 \\ Z0 \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0T_1.{}^1T_2.{}^2T_3.{}^3T_4.{}^4T_5.{}^5T_6. \begin{pmatrix} X6 \\ Y6 \\ Z6 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$${}^0T_6 = [{}^0T_6]^{-1} \quad (3.10)$$

Par conséquence :

$$T = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & -((p_x.n_x) + (p_y.n_y) + (p_z.n_z)) \\ o_x & o_y & o_z & -((p_x.o_x) + (p_y.o_y) + (p_z.o_z)) \\ a_x & a_y & a_z & -((p_x.a_x) + (p_y.a_y) + (p_z.a_z)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

La technique de la substitution de variables peut être appliquée grâce aux relations suivantes :

$$\text{Cos}(\theta) = \frac{1-u^2}{1+u^2} \quad \text{et} \quad \text{Sin}(\theta) = \frac{2u}{1+u^2} \quad \text{avec} \quad u = \text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.13)$$

Dans le but de faciliter les calculs gigantesques avec 6 ddl (degrés de liberté), seulement 4 des 6 articulations sont étudiées. Les autres, moins significatives dans la morphologie du bras, sont supposées fixes. Par ailleurs la méthode algébrique convient bien aux mécanismes de 4 ddl maximum [20].

3.3. Étude cinématique direct d'un robot ABB IRB 120 :

3.3.1. Présentation du robot expérimental :

Le robot expérimental utilisé est le IRB 120 du fabricant ABB (Figure 3.2). Il s'agit d'un petit robot sériel composé de six axes rotatifs. Il est compact et possède une masse de 25 kg. Selon les spécifications du fabricant, le robot a une répétitivité de positionnement de 10 μm , une portée horizontale de 580 mm et supporte une charge maximale de 4 kg. Ce robot a été conçu pour réaliser des travaux de manutention et des applications d'assemblage, et il est utilisé dans différents types d'industries [21].



Figure 3.2 : Robot manipulateur ABB IRB 120 [22].

Pour résoudre la cinématique directe d'un robot sériel, on commence premièrement par placer un référentiel sur chaque lien du robot (Figure 3.3). Puis, et pour décrire la pose d'un référentiel par rapport à un autre (deux référentiels consécutifs) on se réfère à la méthode Denavit-Hartenberg. Pour cela, nous avons besoin de seulement quatre paramètres géométriques, plutôt que six.

Le Tableau 3.1 présente les paramètres D-H nominaux pour le robot ABB IRB 120.

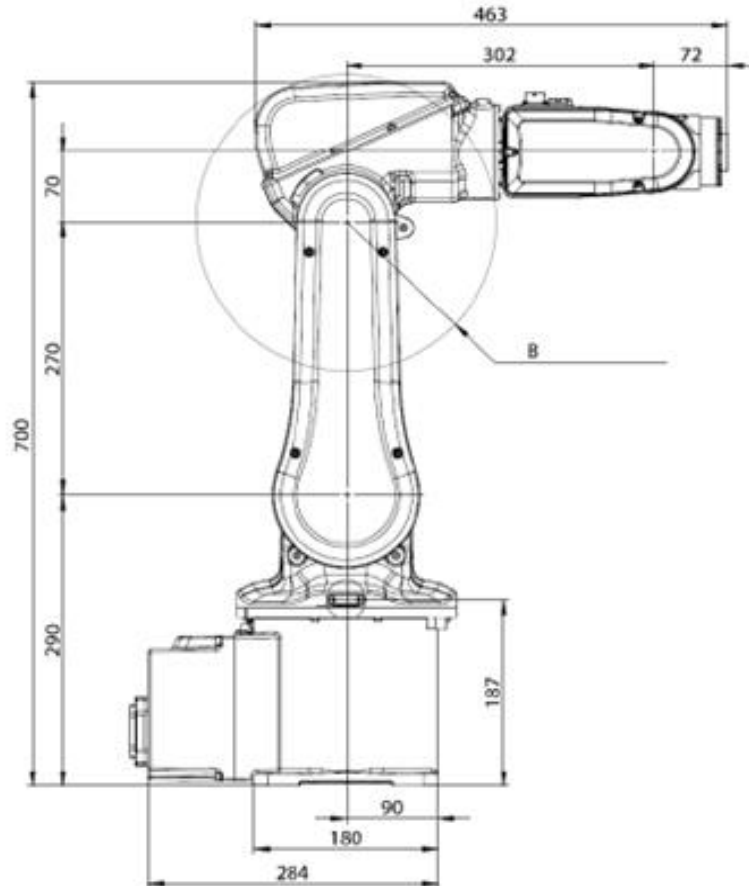


Figure 3.3 : Référentiels du robot IRB 120 selon la méthode D-H [23].

i	d_i	θ_i	a_i	α_i
1	290	θ_1	0	$-\pi/2$
2	0	$\theta_2 - \pi/2$	270	0
3	0	θ_3	70	$-\pi/2$
4	302	θ_4	0	$\pi/2$
5	0	θ_5	0	$-\pi/2$
6	72	$\theta_6 + \pi$	0	0

Tableau 3.1 : Paramètres nominaux du robot ABB IRB 120.

Ainsi, la matrice H_i^{i-1} qui représente la pose entre deux référentiels F_i et F_{i-1} peut être obtenue en fonction des quatre paramètres DH par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
 H_i^{i-1} &= H_{rot,z}(\theta_i)H_{trans}(0, 0, d_i)H_{trans}(a_i, 0, 0)H_{rot,x}(\alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$${}^0H_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.15}$$

$${}^1H_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 270 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 270 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.16}$$

$${}^2H_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 70 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 70 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.17}$$

$${}^3H_4 = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 302 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.18}$$

$${}^4H_5 = \begin{pmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.19}$$

$${}^5H_6 = \begin{pmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 72 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.20}$$

$${}^0H_6 = {}^0H_1 {}^1H_2 {}^2H_3 {}^3H_4 {}^4H_5 {}^5H_6 \quad (3.21)$$

Donc on peut calculer 0H_6 pour $\theta = [0, -\pi/2, 0, 0, 0, \pi]$:

$${}^0H_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 374 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 630 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

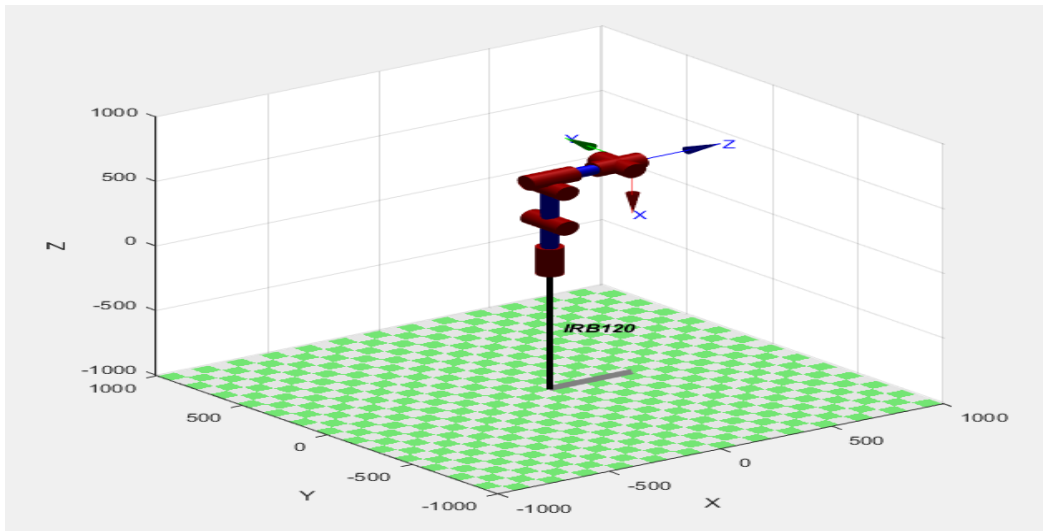


Figure 3.4: figure représente la cinématique directe de robot ABB IRB 120 pour $\theta = [0, -\pi/2, 0, 0, 0, \pi]$ par MATLAB.

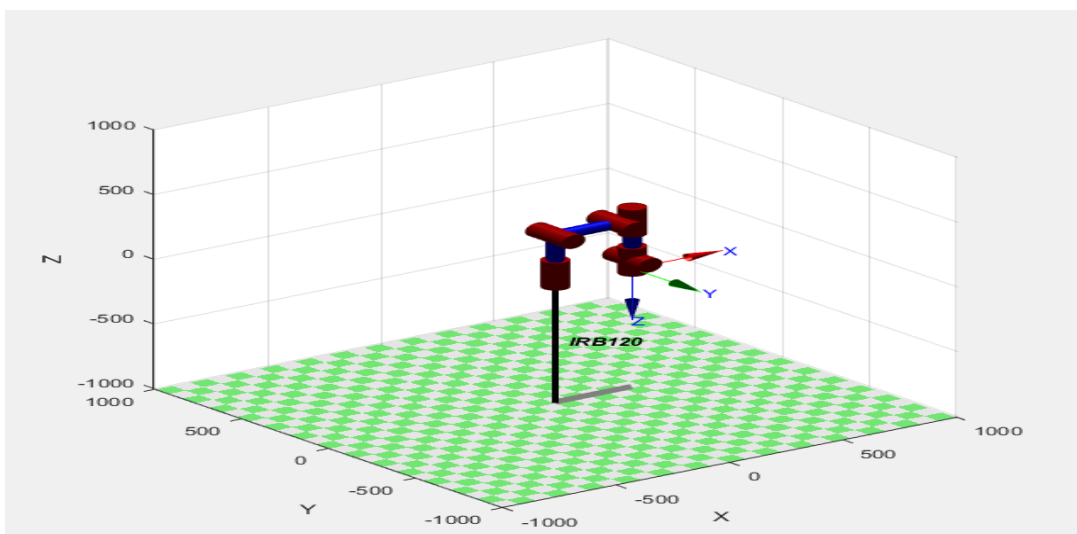


Figure 3.5 : figure représente la cinématique directe de robot ABB IRB 120 pour $\theta = [0, 0, 0, 0, 0, 0]$ par MATLAB.

3.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montré comment calculer le modèle cinématique directe et inverse par la méthode jacobienne et la méthode de Denavit-Hartenberg (D-H paramètre), Le modèle cinématique permet de trouver une solution au problème du changement des coordonnées quelle que soit la structure du robot, nous avons calculé la cinématique directe nominale du robot ABB IRB 120 par la méthode de D-H et on a obtenu les résultats de quelque exemple.

Chpitre 04

4.1. Étalonnage Géométrique Du Robot ABB IRB 120 :

La calibration d'un robot est un processus intégré, elle comporte la modélisation, la mesure, l'identification numérique des caractéristiques physiques réelles du robot et la mise en œuvre d'un nouveau modèle (modèle amélioré). La procédure d'étalonnage implique tout d'abord le développement d'un modèle cinématique dont les paramètres représentent avec précision le robot réel. Ensuite, les caractéristiques du robot spécifiquement sélectionnées sont mesurées à l'aide d'un instrument de mesure d'une précision connue. Puis, une procédure d'identification est utilisée pour estimer les paramètres réels du robot. Les paramètres estimés, et lorsqu'elles sont introduites dans le modèle nominal du robot, ils représentent avec précision le comportement du robot mesuré. Enfin, le modèle dans le logiciel de contrôle de position est corrigé (mise à jour du modèle qui se trouve dans le contrôleur).

La partie la plus importante des procédures d'identification des paramètres concerne les méthodes numériques. Dans ces procédures, les paramètres du modèle sont identifiés à partir de plusieurs poses mesurées de l'effecteur du robot utilisant des méthodes d'optimisation numérique.

Dans les problèmes matriciels, le conditionnement est un indicateur important de l'observabilité des paramètres à identifier. C'est également un facteur d'amplification dans l'analyse des erreurs et des perturbations.

D'autre part, l'outil le plus important d'analyse, d'évaluation et d'optimisation du modèle cinématique et du processus d'identification des paramètres est la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice d'observation (matrice jacobéenne) du système linéaire. La SVD est un ensemble puissant de techniques permettant de traiter des ensembles d'équations ou de matrices singulières ou numériquement très proches du singulier.

Compte tenu du manque d'instrument de mesure de précision, une approche d'étalonnage par simulation a été adoptée dans ce travail. Dans cette approche, nous avons suivi des étapes similaires à un étalonnage réel, c'est-à-dire une modélisation cinématique, une identification des paramètres à partir de poses sélectionnées représentant des mesures réelles et une évaluation de l'étalonnage.

Deux types de modèles cinématiques ont été utilisés. Le premier modèle était le modèle de génération de valeurs simulées des poses mesurées (ou poses d'erreurs) de l'effecteur (organe final), analogue aux poses mesurées expérimentalement, appelé modèle de pose simulée. Les erreurs de paramètres géométriques sont incluses dans ce modèle. Le second modèle est le modèle d'identification de paramètre appelé modèle linéaire. La précision de l'estimation de

l'erreur par ce modèle est liée à l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de sources d'erreurs géométriques incluses dans le premier modèle non inclus dans le second, sauf pour les paramètres géométriques éliminés pour une meilleure identifiabilité à atteindre par le modèle. La simulation du processus d'étalonnage a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

- Spécification des points de mesure

Chaque point de l'espace de travail a été spécifié par :

$$\delta T = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d \\ r \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$\delta T = [\delta T_1 \ \delta T_2 \ \dots \ \delta T_m]^t \quad (4.2)$$

où m est le nombre de points de mesure, cela signifie que chaque vecteur δT_i est un vecteur à 6 dimensions dont les trois premières composantes spécifient la position et les trois dernières orientations de l'effecteur final. L'équation (4.1) représente des points de mesure virtuels au lieu d'expérimentaux.

- Erreurs dues au système de mesure

Comme la plupart des systèmes de mesure ne fournissent que des données de position, la simulation présentée ici n'utilise que des composants de position.

$$\delta T = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

En d'autres termes, chaque point de mesure fournit trois équations de mesure. En règle générale, pour minimiser l'influence du bruit de mesure, le nombre d'équations de mesure devrait être environ deux ou trois fois plus grand que le nombre de paramètres à estimer. Considérant que le nombre maximal de paramètres géométriques dans un robot ABB IRB 120 est égal à 24 paramètres. Si on ajoute le décalage de la base et le décalage de l'effecteur, le nombre de paramètres devient 32. Dans ce travail, $m = 100$ était considéré comme le nombre maximum de postures pour la simulation.

Une erreur aléatoire ε de moyenne zéro et d'écart type $\sigma = 0.0058$ mm a été ajouté eu poses vraies.

Comme ce travail concerne l'identification plutôt que la modélisation, nous utilisons la notation D-H tout au long de ce mémoire. La notation D-H décrit la transformation à six degrés de liberté entre les référentiels consécutives (A_i^{i-1}) en fonction de quatre paramètres (p_i).

Selon [17][24]. La simulation des mesures et l'identification des paramètres par système linéaire sont formulés par les équations suivantes:

$$\mathbf{A}_i^{i-1} = \mathbf{A}_i^{i-1}(\mathbf{p}_i), \quad (4.4)$$

$$\mathbf{p}_i = [\theta_n, \alpha_n, r_n, l_n]^T \quad (4.5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & l_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & l_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & r_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

En commençant par l'équation 4.6 et en supposant que toutes les variations de la cinématique nominale peuvent être expliquées par des variations des paramètres $[\theta_n, \alpha_n, r_n, l_n]$.

$$d\mathbf{A}_n = \frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n + \frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial \alpha_n} \Delta \alpha_n + \frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial r_n} \Delta r_n + \frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial l_n} \Delta l_n \quad (4.7)$$

En différenciant l'équation 4.6 nous obtenons

$$\frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial \theta_n} = \begin{bmatrix} -s\theta_n & -c\theta_n c\alpha_n & c\theta_n s\alpha_n & -l_n s\theta_n \\ c\theta_n & -s\theta_n c\alpha_n & s\theta_n s\alpha_n & l_n c\theta_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}'_{\theta} \mathbf{A}_n \quad (4.8)$$

$$\mathbf{Q}'_{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial \theta_n} = \mathbf{A}_n \mathbf{Q}_\theta \quad (4.10)$$

Alors

$$\mathbf{Q}_\theta = \mathbf{A}_n^{-1} \mathbf{Q}'_\theta \mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & -c\alpha_n & s\alpha_n & 0 \\ c\alpha_n & 0 & 0 & l_n c\alpha_n \\ -s\alpha_n & 0 & 0 & -l_n s\alpha_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\dot{\mathbf{j}}_{\theta_i} = [\mathbf{U}_{i+1}]^{-1} \mathbf{Q}_{\theta_i} [\mathbf{U}_{i+1}] \quad (4.12)$$

$$\mathbf{U}_n = \prod_{i=n}^N \mathbf{A}_i \quad (4.13)$$

Similairement

$$\frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial r_n} = \mathbf{A}_n \mathbf{Q}_r \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial l_n} = \mathbf{A}_n \mathbf{Q}_l \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_n}{\partial \alpha_n} = \mathbf{A}_n \mathbf{Q}_\alpha \quad (4.16)$$

$$\mathbf{Q}_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s\alpha_n \\ 0 & 0 & 0 & c\alpha_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{Q}_l = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{Q}_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Similairement,

$$\dot{\mathbf{j}}_{r_i} = [\mathbf{U}_{i+1}]^{-1} \mathbf{Q}_{r_i} [\mathbf{U}_{i+1}] \quad (4.20)$$

$$\dot{\mathbf{j}}_{l_i} = [\mathbf{U}_{i+1}]^{-1} \mathbf{Q}_{l_i} [\mathbf{U}_{i+1}]$$

$$\dot{\mathbf{j}}_{\alpha_i} = [\mathbf{U}_{i+1}]^{-1} \mathbf{Q}_{\alpha_i} [\mathbf{U}_{i+1}] \quad (4.21)$$

La sous-matrice du lien i est donc

$$\mathbf{J}^i = [\dot{\mathbf{j}}_{\theta_i}, \dot{\mathbf{j}}_{\alpha_i}, \dot{\mathbf{j}}_{r_i}, \dot{\mathbf{j}}_{l_i}] \quad (4.22)$$

La matrice jacobienne pour une observation particulière \mathbf{J} est

$$\mathbf{J}_j = [\mathbf{J}^1, \mathbf{J}^2 \dots \mathbf{J}^n] \quad (4.23)$$

Nous avons la matrice

$$\mathbf{U}_{i+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\dot{\mathbf{j}}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{d}} \\ \bar{\mathbf{r}} \end{bmatrix} \equiv [\mathbf{U}_{i+1}]^{-1} \mathbf{Q} [\mathbf{U}_{i+1}] \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_x &= \mathbf{r} \cdot (\mathbf{p} \times \mathbf{n}) + \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}, & \bar{d}_y &= \mathbf{r} \cdot (\mathbf{p} \times \mathbf{o}) + \mathbf{d} \cdot \mathbf{o}, \\ \bar{d}_z &= \mathbf{r} \cdot (\mathbf{p} \times \mathbf{a}) + \mathbf{d} \cdot \mathbf{a} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\bar{r}_x = \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}, \bar{r}_y = \mathbf{r} \cdot \mathbf{o}, \bar{r}_z = \mathbf{r} \cdot \mathbf{a} \quad (4.27)$$

Puisque nous avons besoin dans notre simulation de la position de l'organe terminal, il suffit d'utiliser l'équation (4.27). La rotation est négligée dans cette étude.

La translation différentielle pour la $j^{\text{ème}}$ observation peut être calculée comme suit:

$$\delta \mathbf{T}_j \equiv \Delta \mathbf{T}_j, \quad \Delta \mathbf{T}_j = [\mathbf{T}_{m_j}]^{-1} d\mathbf{T}_j, \quad d\mathbf{T}_j = \mathbf{T}_{m_j} - \mathbf{T}_{p_j} \quad (4.28)$$

Où T_m est la pose de l'effecteur final mesurée (observée) (dans les coordonnées de base) et T_p est la pose prédite de l'effecteur final,

Le vecteur $\delta \mathbf{k}$ du manipulateur ABB IRB 120 a 24 éléments. La matrice jacobienne J pour chaque observation a trois lignes et 24 colonnes. Le vecteur δT à chaque observation comporte trois éléments. Plusieurs observations sont empilées les unes sur les autres, de sorte que la matrice J comporte au moins autant de lignes que de colonnes. Ainsi, il nous faut au moins huit observations pour le manipulateur ABB IRB 120. En pratique, un nombre beaucoup plus grand d'observations serait utilisé pour réduire les effets du bruit de mesure.

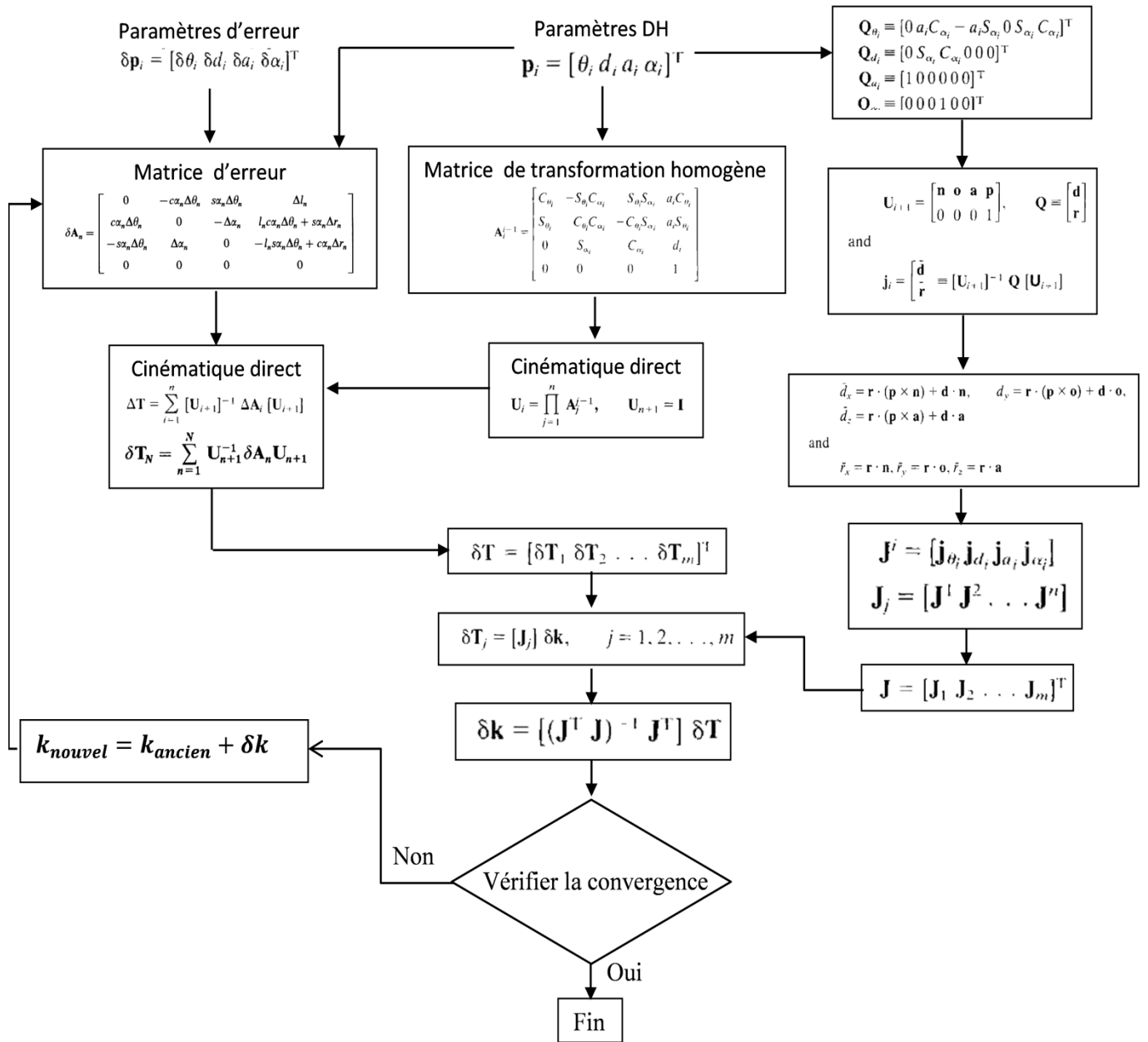


Figure 4.1 : Identification des paramètres par linéarisation (résolution d'un système linéaire).

$$\delta \mathbf{T}_j = [\mathbf{J}_j] \delta \mathbf{k}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.29)$$

Les paramètres $\delta \mathbf{k}$ peuvent être obtenus en résolvant le système linéaire.

$$\delta \mathbf{k} = [(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T] \delta \mathbf{T} \quad (4.30)$$

Puisque le calcul de la matrice jacobienne suppose des approximations linéaires, les erreurs de paramètre sont rajoutées au vecteur de paramètre de la manière suivante:

$$\mathbf{k}_{nouvel} = \mathbf{k}_{ancien} + \delta \mathbf{k} \quad (4.31)$$

Et la procédure d'identification des moindres carrés linéaires est répétée.

Le jacobien est légèrement différent à chaque itération car il dépend des paramètres d'erreur trouvés à chaque étape. Pour cela, nous devons assurer que toutes les colonnes de J sont linéairement indépendantes. Sinon, nous devons éliminer les paramètres d'erreur inutiles (paramètres redondants). L'analyse SVD montre que parmi les 24 paramètres, seulement 19 sont retenus, les 5 autres δr_2 , δr_5 , δl_5 , $\delta \theta_6$ et $\delta \alpha_6$ sont inutile (redondants) est alors éliminés du modèle (Tableau 4.1). Un résumé de notre approche est présenté à la Figure 4.1.

Comme critère de convergence (critère d'arrêt), nous calculons la somme des carrés des erreurs de paramètre identifiées à la fin de chaque itération. Si l'identification réussit, cette somme converge vers une petite valeur. Si l'identification échoue, la somme diverge en valeurs de plus en plus grandes. Figure 4.2 montre que notre méthode itérative converge après trois itérations. Le résultat d'estimation est présenté au Tableau 4.1. Les résultats sont obtenus avec des bruits de mesures simulés.

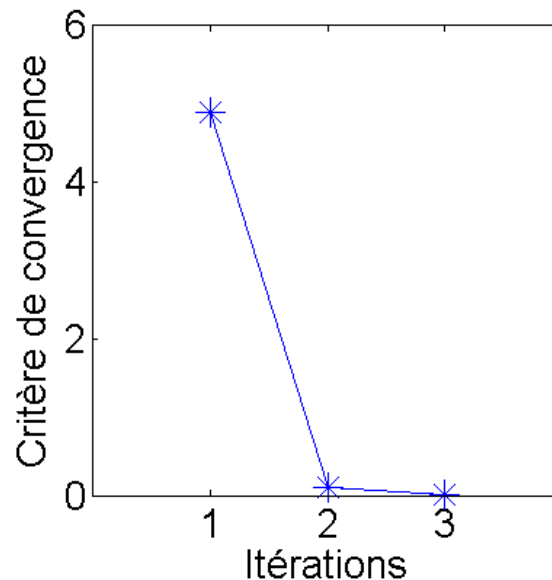


Figure 4.2 : Convergence du système linéaire vers une solution.

Tableau 4.1 montre une comparaison entre les paramètres initiaux et les paramètres estimés. Une grande similitude a été observée.

Classement des paramètres	Paramètres d'erreur	Paramètres estimés	Paramètres initiaux (vrais)
1.	$\delta \theta_1$	0.0009	0.0008
2.	δr_1	0.6667	0.6700
3.	δl_1	0.8214	0.8200
4.	$\delta \alpha_1$	0.0012	0.0012
5.	$\delta \theta_2$	0.001	0.001
6.	δr_2	paramètre redondant	0.4020
7.	δl_2	0.9583	0.9600

8.	$\delta \alpha_2$	0.0008	0.00090
9.	$\delta \theta_3$	0.0015	0.0015
10.	δr_3	0.5453	0.1400
11.	δl_3	0.1171	0.1100
12.	$\delta \alpha_3$	0.0003	0.00030
13.	$\delta \theta_4$	0.0112	0.0112
14.	δr_4	0.3571	0.3600
15.	δl_4	0.7674	0.7700
16.	$\delta \alpha_4$	0.0003	0.0003
17.	$\delta \theta_5$	-0.0019	0.0014
18.	δr_5	paramètre redondant	0.6200
19.	δl_5	paramètre redondant	0.24
20.	$\delta \alpha_5$	0.0091	0.0004
21.	$\delta \theta_6$	paramètre redondant	0
22.	δr_6	0.3801	0.3800
23.	δl_6	0.3290	0.3300
24.	$\delta \alpha_6$	paramètre redondant	0.0008

Table. 4.1 Paramètres initiales versus paramètres estimés

Les paramètres estimés sont par la suite utilisés pour simuler 100 nouvelles poses dans l'espace de travail du robot différentes à celles utilisées durant la procédure d'étalonnage. Les résultats obtenus sont comparé avec des poses réelles (obtenus avec paramètres réels) et des poses nominales (obtenus avec paramètres d'erreurs nuls). Une grande similitude a été observées (Figure 4.3). La différence entre les poses vraies et les poses nominales montre que la précision absolue du robot varie entre 3.25 mm et 2.66 mm (Figure 4.4). Des résultats similaires ont été obtenus en utilisant les poses simulées (Figure 4.5).

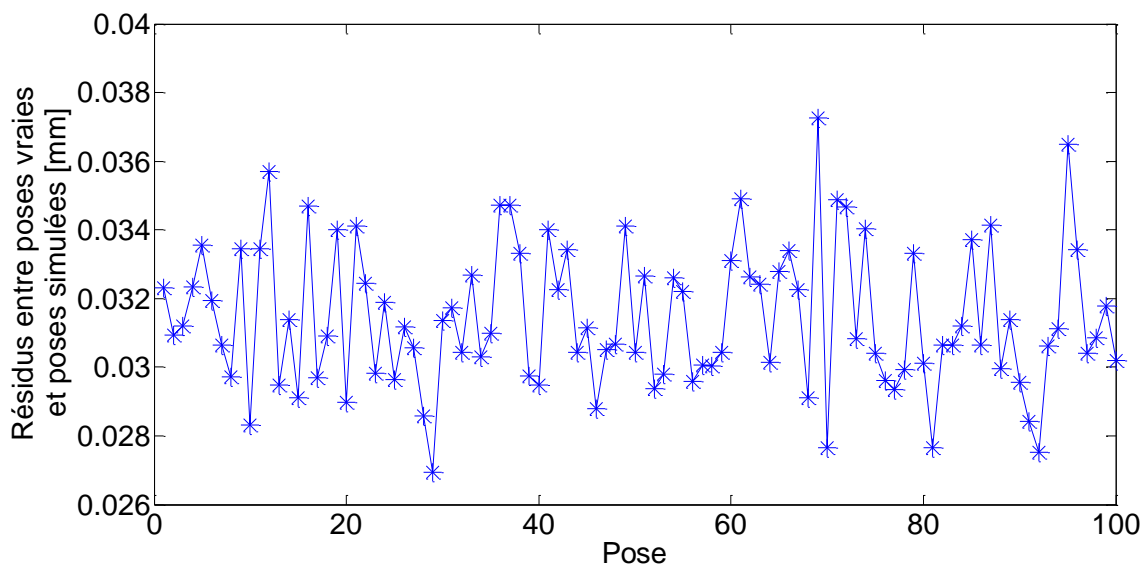


Figure 4.3 : Résidus entre poses vraies et poses simulées.

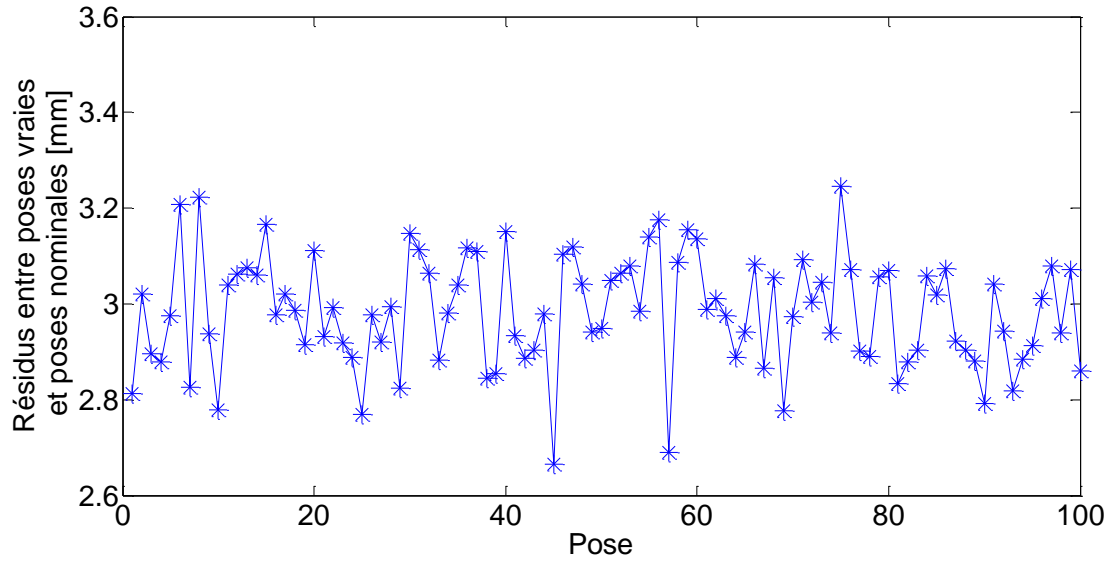


Figure 4.4 : Résidus entre poses vraies et poses nominales.

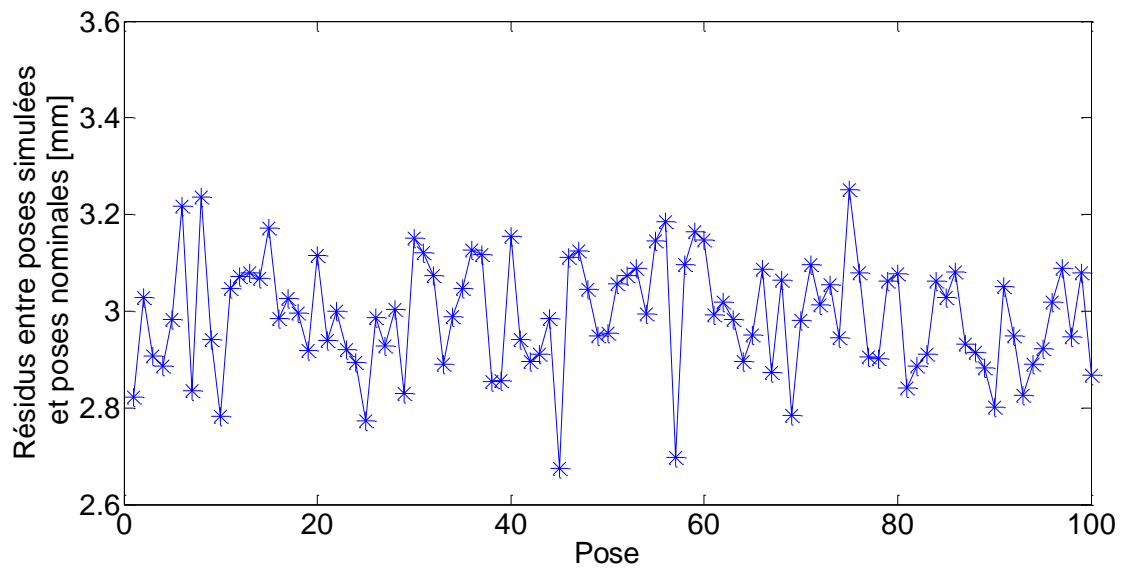


Figure 4.5 : Résidus entre poses vraies et poses simulées.

Conclusion générale :

La technique d'identification linéaire des paramètres de robot présentée dans cet article a été appliquée à des simulations d'étalonnage pour un manipulateur ABB IRB 120. Le principe de cette méthode, les considérations relatives à son utilisation et les techniques de simulation informatique des étapes de calibration ont été expliqués en détail dans ce mémoire. Les simulations ont été utilisées pour étudier l'effet de facteurs ayant une incidence sur l'identification des paramètres. La simulation réelle du robot a été réalisée en introduisant des erreurs aléatoires dans le modèle cinématique nominale pour représenter les erreurs de mesures. Le système de mesure a été simulé en utilisant des erreurs aléatoires similaires à celles obtenues lors des expérimentations spécifiques et proches à la répétabilité rapportée par le fabricant. Ces erreurs aléatoires suivent une distribution normale ayant une moyenne égale à zéro et un écart type σ . Les résultats de simulation montrent, que la méthodologie proposée permet d'établir une identification optimisée des paramètres du modèle en éliminant ainsi les défaillances numériques causées par les paramètres redondants. Les valeurs optimisées des paramètres du modèle se sont avérées utiles pour l'identification d'un meilleur modèle cinématique réel.

Références

- [1] www.wikipedia.org/wiki/Robotique_industrielle.
- [2] <https://robots.ieee.org/robots/unimate/> .
- [3] <https://cretinbot.wordpress.com/2016/05/11/robots-industriels-le-retard-francais/>
- [4] Gutierrez Tapia : Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage Jose, UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II, 2016
- [5] Toufik BENTALEB, Contribution à l'étalonnage géométrique des robots industriels, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, 2006
- [6] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-2400>
- [7] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-360-flexpicker>
- [8] <https://docplayer.fr/17862423-Mec741-robotique-ahmed-joubair-ing-ph-d-charge-de-cours-ets.html>
- [9] Jean-Louis Boimond, COURS ROBOTIQUE, ISTIA, Université Angers
- [10] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-140>
- [11] <http://www.directindustry.fr/prod/omron-electronics-gmbh/product-6076-1918474.html>
- [12] Julien Alexandre dit Sandretto, Étalonnage des robots à câbles identification et qualification, UNIVERSITÉ DE NICE - SOPHIA ANTIPOLIS, 2013
- [13] MARTIN GAUDREAU, ÉTALONNAGE AUTOMATISÉ D'UN ROBOT SÉRIEL AVEC UN NOUVEAU DISPOSITIF DE MESURE TRIDIMENSIONNELLE À FAIBLE COÛT, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE 2016
- [14] Ahmed JOUBAIR, CONTRIBUTION À L'AMÉLIORATION DE LA PRÉCISION ABSOLUE DES ROBOTS PARALLÈLES, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2012
- [15] Albert NUBIOLA, CALIBRATION OF A SERIAL ROBOT USING A LASER TRACKER, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2011
- [16] JOAN HERETER GREGORI, ÉTALONNAGE DE ROBOTS INDUSTRIELS, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2010

-
- [17] U.S. Pathre, M. R. Driels, SIMULATION EXPERIMENTS IN PARAMETER IDENTIFICATION FOR ROBOT CALIBRATION, Department of Mechanical Engineering, Naval Post Graduate School, Monterey, California, USA, 1990
- [18] HAMISSI Ayoub, Modélisation d'un Robot SCARA à structure complexe (Parallèle) destiné à manipuler une sonde échographique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF UFAS (ALGERIE),
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Denavit%E2%80%93Hartenberg_parameters
- [20] T. LATOUR, Modélisation cinématique et dynamique du robot industriel IRB2400 de ECAM – Bruxelles, 2006
- [21] www.abb.fr/robots
- [22] Robots industriels Ilian Bonev, Ph.D. Professeur, ÉTS
- [23] Caractéristiques du produit IRB120
- [24] BENJAMIN W. MOORING, FUNDAMENTALS OF MANIPULATOR CALIBRATION, the naval postgraduate school monterey, California, 1991

Résumé

Ce travail décrit les techniques de modélisation, d'optimisation et de simulation des processus d'étalonnage d'un robot ABB IRB 120 utilisant la programmation hors ligne. L'identification des paramètres géométriques du modèle cinématique nominal est optimisée à l'aide de techniques d'optimisation numérique du modèle mathématique. La simulation du robot réel et du système de mesure est réalisée en introduisant des erreurs aléatoires représentant leur comportement physique et la répétabilité statistique.

Une amélioration considérable de la précision est obtenue lorsque le modèle optimisé est comparé au modèle non optimisé.

Mots clés : Étalonnage; paramètres cinématiques; identification de paramètre, modèles cinématiques