

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique

Présenté par : **BENCHORA Abdelillah**
METCHAT Aissa Abdeldjalil

Thème

**Calibrage géométrique d'un robot
parallèle**

Soutenu publiquement, le 30 / 09 / 2020 , devant le jury composé de :

M MERAD Lotfi	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
M MALTI Abed	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M ABDI Sidi Mohammed	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Melle DIDI Ibtissem	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant de notre avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Nous remercions nos chers parents, qui ont toujours été là pour nous

Nous remercions sincèrement notre encadreur « Dr. Malti ». Il a déployé des efforts considérables pour nous aider et inspirer ses précieuses suggestions, ce qui nous a aidés à travailler avec sa gentillesse et sa patience.

Nous remercions les membres du jury d'avoir bien voulu analyser et porter un regard critique sur notre travail, nécessaire à l'aboutissement de tout projet scientifique.

Afin de n'oublier personne, nous tenons à remercier sincèrement tous ceux qui nous ont aidés à réaliser cet humble souvenir.

Table des matières

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE CALIBRAGE

I.1	Introduction.....	2
I.2	Les manipulateurs parallèles.....	3
I.2.2	Manipulateur Stewart.....	4
I.3	Le calibrage pour les robots parallèles.....	5
I.3.1	Modèle de calibrage basé sur le modèle géométrie inverse	6
I.3.2	Modèle de calibrage basé sur le modèle géométrie direct.....	6
I.4	Techniques de mesure pour le calibrage des robots.....	7
I.4.1	Systèmes à base de capteurs à fils	7
I.4.2	Théodolites.....	7
I.4.3	Système de suivi par laser.....	8
I.4.4	Systèmes à base de capteurs optiques.....	9

CHAPITRE II : LE MODELE GEOMETRIQUE DE MANIPULATEUR STEWART

II.1	Introduction.....	10
II.2	Le modèle géométrique de plateforme Stewart	10
II.2.1	Le modèle géométrique inverse.....	14
II.2.2	Le modèle géométrique direct.....	15
II.3	Conclusion.....	17

CHAPITRE III : LE CALIBRAGE GEOMETRIE

III.1	Introduction.....	18
III.2	Paramètres géométriques à calibrées :	18
III.3	Calibrage basé sur le modèle du géométrie inverse.....	19
III.3.1	Stratégie de la solution.....	19
III.3.2	Algorithme de solution.....	20
III.3.3	Simulation de calibrage :	21
III.4	Calibrage basé sur le modèle du géométrie Direct :	26
III.4.1	Algorithme de calibrage :	26
III.4.2	La formulation du jacobien :	28
III.4.3	Simulation de la méthode:	29
III.5	Comparaison entre les deux méthodes du calibrage :	33
III.6	Conclusion:	36
	CONCLUSION GENERALES.....	39

BIBLIOGRAPHIE.....40

ANNEXE A.....A

Table des figures

Figure I.1 : L'architecture du manipulateur Stewart.	4
Figure I.2 : Manipulateur Stewart avec deux modèles d'actionneur.	5
Figure I.3 : Exemple des applications de manipulateur de plateforme Stewart.	5
Figure I.4 : System à base de capteurs à fils.	7
Figure I.5 : Un théodolite.	8
Figure I.6 : Système de suivi par laser.	9
Figure II.1 : Modèle CAO représente le manipulateur Stewart 6-UPS.	11
Figure II.2 : Représente la structure de notre robot parallèle de type plateforme Stewart.	12
Figure II.3 : Schéma représente la géométrie de plateforme Stewart.	14
Figure III.1 : Convergence du calibrage basée sur MGI essai N°1.	23
Figure III. 2 : Résidu avant et après le calibrage essai N°1.	24
Figure III. 3 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°1.	24
Figure III. 4 : Convergence du calibrage basée sur MGI essai N°2.	25
Figure III.5 : Résidu avant et après le calibrage essai N°2.	25
Figure III. 6 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°2.	26
Figure III.7 : Organigramme de la procédure du calibrage basé sur MGD.	28
Figure III.8 : Résidu avant et après le Calibrage essai N°1.	30
Figure III.9 : Convergence du calibrage basée sur MGD Essai N°1.	31
Figure III.10 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°1.	31
Figure III.11 : Résidu avant et après le calibrage essai n°2.	32
Figure III.12 : Convergence du calibrage basée sur MGD ESSAI N°2.	33
Figure III. 13 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°2.	33
Figure III. 14 : Application pour calibrer le manipulateur Stewart.	34
Figure III. 15 : Comparaison entre déférentes résidus de calibrage essai N°1.	35
Figure III. 16 : Paramètres géométriques du calibrage pour les deux modèles essai N°1.	35
Figure III. 17 : Comparaison entre déférentes résidus de calibrage essai n°2.	36
Figure III.18 : Paramètres géométriques du calibrage pour les deux modèles essai n°2.	36

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des caractéristiques des systèmes de mesures.....	9
Tableau III.1 : Paramètre géométrique nominaux (cm).....	22
Tableau III.2 : Paramètres géométriques perturbés (cm).....	22
Tableau III.3 : Résultat du calibrage à l'aide de MGI de robot test n°1.	23
Tableau III.4 : Résultat du calibrage à l'aide de MGI de robot test n°2.	25
Tableau III.5 : Résultat du calibrage à l'aide de MGD de robot (Essai N°1).	30
Tableau III.6 : Résultat du calibrage à l'aide de MGD de robot (Essai N°2).	32

Liste des Abréviations

P : prismatique.

R : rotatif.

U : universel.

S : sphérique.

ddl : degré de liberté.

MGI : Le modèle géométrique inverse.

MGD : Le modèle géométrique direct.

CAO : La conception assistée par ordinateur.



Introduction général

les manipulateurs à structure parallèle sont reconnus pour leur potentielle offrir de très bonnes performances en matière de précision, de rigidité, de vitesse et d'accélération. L'utilisation croissante de ce type de robot dans tous les domaines allant du médical aux industrielles et spatiale, doivent répondre à des exigences de précision de plus en plus forte, la précision est influencée en premier lieu par les défauts géométriques comme les défauts d'usinages et les défauts d'assemblages, ces défauts génèrent un écart entre les dimensions nominales du robot et les dimensions réelles de la structure assemblée, les dimensions nominales du robot sont obtenues à travers les modèles géométriques qui 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.

Il est alors nécessaire d'identifier les erreurs influentes sur la pose de l'effecteur final et de les maîtriser par le développement d'un modèle géométrique adapté associé à une méthode d'identification de ces paramètres géométriques.

Dans ce travail nous nous intéressons au calibrage d'une structure parallèle de six degrés de liberté largement utilisée dans l'étude des robots parallèles, nommés plateformes de Gough-Stewart ou bien manipulateur Stewart. On utilise deux méthodes de calibrage la première basée sur le modèle géométrique inverse et la seconde basée sur le modèle géométrique direct. Le but est d'améliorer la précision statique et les performances dynamiques. Ce travail est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons définir le calibrage géométrique, on s'intéressera particulièrement au manipulateur parallèle Stewart. Par la suite, on présentera les outils qui seront nécessaires à la procédure d'étalonnage (les modèles de calibrage à base du MGD et MGI, l'influence des erreurs sur les paramètres géométriques, les techniques de mesure).

Le deuxième chapitre sera consacré à la description de la structure du manipulateur Stewart et au développement des modèles géométriques inverse et directe.

Le troisième chapitre aura pour objectif une présentation des deux méthodes d'étalonnage géométrique (méthode basée sur MGD et autre sur MGI) appliquer au robot Stewart.

Chapitre I : Généralité sur le calibrage

I.1 Introduction

D'une manière globale, le calibrage est utilisé pour améliorer la précision du positionnement du robot, grâce à un logiciel plutôt que de modifier la structure mécanique ou la conception du robot lui-même. Comme les robots analogues à d'autres dispositifs mécaniques peuvent être affectés par de légères modifications ou dérives causées par l'usure des pièces, les dérives dimensionnelles, les tolérances et le remplacement des composants, le calibrage peut minimiser le risque de devoir modifier les programmes d'application en raison de légères modifications ou dérives causées par les facteurs susmentionnés dans le système du robot (Elatta, et al., 2004). Ceci est utile dans les applications qui peuvent impliquer un nombre assez important de points des tâches. L'objectif de l'étalonnage géométrique est d'identifier les valeurs exactes des paramètres géométriques qui jouent un rôle dans le calcul des modèles géométriques du robot, afin d'améliorer sa précision statique. Les valeurs nominales de ces paramètres sont connues et généralement fournies par le fabricant. Il s'agit alors d'estimer les paramètres qui minimisent la différence entre une fonction des variables réelles du robot et son modèle mathématique. Les méthodes proposées dans la littérature diffèrent selon les variables utilisées pour définir cette fonction.

La précision est affectée par des facteurs géométriques, tels que les erreurs de paramètres géométriques, ainsi que par des facteurs non géométriques, tels que la flexibilité des liaisons et des trains d'engrenages, les jeux d'engrenages, les erreurs de résolution des encodeurs, l'usure et les effets thermiques (Elatta, et al., 2004). La précision de positionnement d'un robot industriel peut être améliorée pour approcher sa répétabilité par une procédure de calibrage qui détermine les valeurs actuelles des dimensions géométriques et des caractéristiques mécaniques de la structure.

Des techniques pratiques permettant de compenser tous les effets géométriques et non géométriques ne sont pas encore développées. Sur la base d'une enquête (Judd, et al., 1990) sur la contribution des erreurs provenant de diverses sources ont conclu que l'erreur due aux facteurs géométriques représentait 95% de l'erreur totale. Par conséquent, une approche

raisonnable serait de calibrer les paramètres géométriques actuels et de traiter les facteurs non géométriques comme une erreur distribuée de manière aléatoire.

Le problème de l'étalonnage géométrique peut être divisé en quatre étapes distinctes (Khalil, et al., 2004) :

1. Une formulation mathématique particulière qui aboutit à un modèle, lequel est fonction des paramètres géométriques, des variables articulaires et de certaines mesures opérationnelles.
2. La collecte de données expérimentales pour un nombre suffisant de configurations.
3. L'identification des paramètres géométriques et la validation des résultats obtenus.
4. La compensation des erreurs de paramètres géométriques dans les modèles à géométrie directe et inverse.

I.2 Les manipulateurs parallèles

Les robots manipulateurs sont des mécanismes de chaîne cinématique qui peut être fermée ou ouverte. Ils se composent généralement d'une ou plusieurs jambes reliées par des articulations pour assurer une rotation ou une translation relative entre elles. Sa structure est plus ou moins similaire à celle d'un bras humain. Son objectif est d'être appliqué périodiquement à une variété d'applications et de tâches, et peut être adapté à d'autres fonctions sans qu'il soit nécessaire de modifier en permanence le matériau, comme le prélèvement et le déplacement d'objets avec plusieurs degrés de liberté. Il peut être contrôlé par un opérateur, une unité de commande électronique utilise un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances ou un système logique (dispositif à cames, relais, câbles, etc.).

Les manipulateurs à structure parallèle des mécanismes en chaîne cinématique fermée, Ils contiennent en général deux plateformes parallèles : une base relie au repère fixe et un autre au repère mobile. La plateforme mobile est reliée à la base par plusieurs chaînes cinématiques en parallèle, ces chaînes sont des jambes mobiles d'architecture sérielle identique (Merlet, 2000) qui sont constituées des actionneurs linéaires ou rotatifs, des articulations prismatique (P), rotoïde (R), universel (U) ou sphérique (S). Pratiquement, on distingue deux catégories des robots parallèles, les robots planaires et les robots spatiaux. Chaque catégorie ayant leur nombre de degré de liberté (ddl) maximum qu'est support.

I.2.2 Manipulateur Stewart

Le manipulateur Stewart est un robot parallèle de type hexapode possède six degrés de liberté publiée la première fois en 1965 (Stewart, 1965). Il est composé d'une base fixe et une plateforme mobile qui sont reliées entre eux par six chaînes cinématiques identiques (jambe), telle que chaque chaîne contient une articulation active p et deux autre passifs (U) et (S) . La géométrie du manipulateur Stewart est présentée dans la figure (I.1). $R_B = (O, X, Y, Z)$ est un référentielle fixe liée à la base et $R_P = (O', X', Y', Z')$ est supposé mobile et il est reliée à la plateforme.

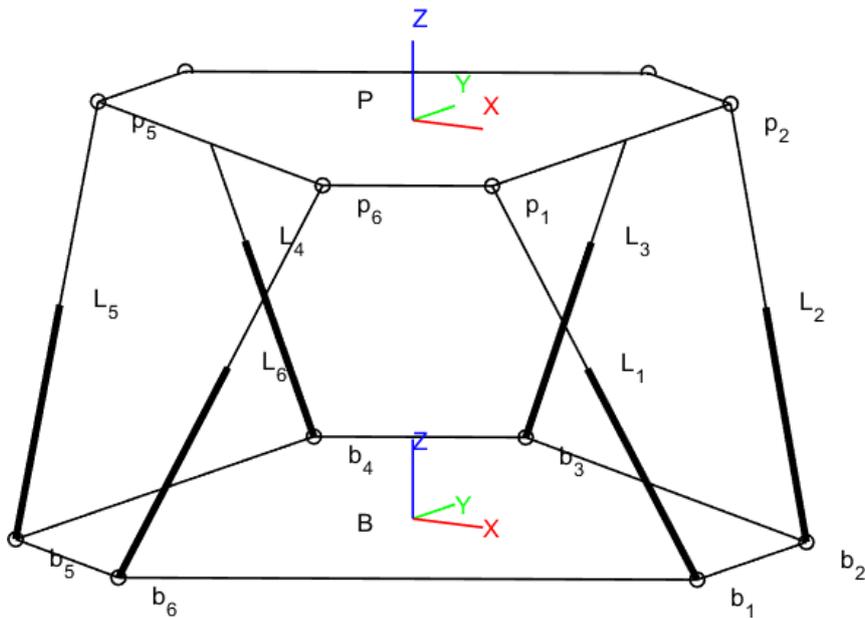


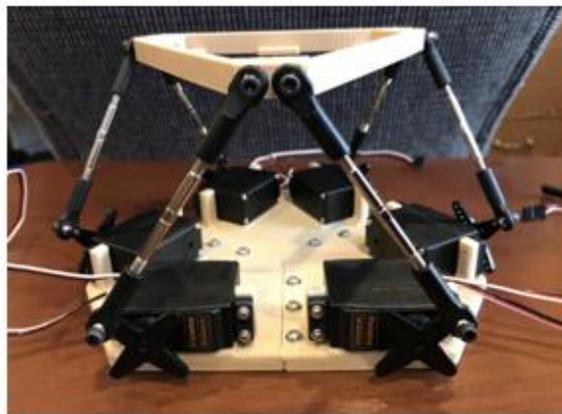
Figure I.1 : L'architecture du manipulateur Stewart.

Selon le type d'actionnement on trouve deux variétés du manipulateur Stewart (Figure I.2):

- Une variété à base d'actionneur linéaire (6-UPS), généralement des vérins hydrauliques ou électriques.
- Une autre variété à base d'actionneur rotatif (6-RUS), généralement un servomoteur.



plateforme de stewart avec actionneur lineaire



plateforme de stewart avec servo moteur

Figure I.2 : Manipulateur Stewart avec deux modèles d'actionneur.

La plateforme de Stewart a des applications dans les domaines suivants : simulateurs de vol, technologie des machines-outils, animatronique, technologie des grues, recherche sous-marine, simulation de tremblements de terre, sauvetage air-mer, taureaux mécaniques, positionnement d'antennes paraboliques, télescope hexapode, robotique et chirurgie orthopédique.



Simulateur de vol



le positionnement de télescopes



La chirurgie orthopédique

Figure I.3 : Exemple des applications de manipulateur de plateforme Stewart.

I.3 Le calibrage pour les robots parallèles

L'une des caractéristiques attrayantes des robots parallèles est leur grande marge précision par rapport aux robots en série, principalement en raison de la plus grande rigidité de leur structure en boucle fermée. Toutefois, cette rigidité ne se traduit pas directement par une meilleure précision, mais plutôt par une plus grande répétabilité. Par conséquent, un bon calibrage des paramètres géométriques est également nécessaire pour qu'un robot parallèle puisse améliorer sa précision. Comme pour les robots en série, la procédure d'étalonnage comprend quatre

étapes : construction d'un modèle d'étalonnage, collecte d'un nombre suffisant de configurations, identification des paramètres géométriques à partir de l'équation d'étalonnage et mise en œuvre de la compensation des erreurs.

Il convient de noter que pour les robots parallèles, les paramètres estimés peuvent être introduits immédiatement dans le contrôleur (Masory, et al., 1993). Différents modèles de calibration sont proposés dans la littérature. Nous ne considérerons que les techniques conventionnelles où le modèle de calibrage est en fonction des coordonnées opérationnelles de l'effecteur finale relie à la plateforme mobile, qui doit être fournie par un capteur externe et les coordonnées articulaires des liaisons active qui doivent être fournies par des capteurs intrinsèques. Dans ce cas, le modèle de calibrage peut être dérivé du modèle géométrique inverse (MGI) (Zhuang, et al., 1995) ou du modèle géométrique direct (MGD) (Masory, et al., 1997). Rappelons que l'MGI est facile à calculer et qu'il donne une solution unique, alors que la MGD est calculée de manière itérative et il peut mener à des solutions multiples.

I.3.1 Modèle de calibrage basé sur le modèle géométrique inverse

Généralement, le problème de calibrage géométrique doit être exprimé comme un problème des moindres carrés non linéaires. Une fois terminé, un algorithme basé sur des gradients standard peut être utilisé pour trouver la meilleure solution. En fait, la fonction de coût de ce modèle est extraite de la norme d'erreur MGI, c'est-à-dire la différence entre la variable articulaire mesurée et la variable articulaire calculée. Il est représenté par l'équation suivante :

$$L - MGI(q, u) = 0 \quad (\text{I.1})$$

Où u désigne les paramètres géométriques actuels, q est la valeur mesurée l'emplacement et l'orientation d'effectuer final par rapport à le référentiel fixe, et L sont les variables articulaires.

I.3.2 Modèle de calibrage basé sur le modèle géométrique direct

Le second modèle de calibrage non linéaire, utilise le MGD itératif, et calculé d'après la norme d'erreur de position, est donné par :

$$\Delta q(L, q, u) = 0 \quad (\text{I.2})$$

Où Δq indique la différence entre la position mesurée et la position calculée de l'outil finale. L'équation d'identification peut être résolue en utilisant les méthodes basées sur le descend gradients. L'avantage de la méthode du calibrage basée sur MGD est qu'elle peut utiliser des éléments partiels de l'effecteur terminal. Par exemple, nous pouvons calibrer en tenant compte des trois premiers éléments de l'équation (I.2). À titre de comparaison, l'approche d'étalonnage

basée sur le MGI doit être complétée la mesure de l'emplacement finale. Le principal inconvénient de la méthode MGD est sa complexité de calcul. De plus, il ne peut pas y avoir de matrice jacobienne appropriée calculée analytiquement.

I.4 Techniques de mesure pour le calibrage des robots

Les méthodes d'étalonnage conventionnelles, ainsi que l'évaluation du positionnement, la précision et la répétabilité des robots, nécessitent de mesurer soit l'emplacement de l'effecteur final ou la position avec une grande précision. La plupart des systèmes des mesures actuels sont basés sur des systèmes de vision, des machines de mesure, des interféromètres laser, des et des théodolites (Khalil, et al., 2004) (Vischer, 1996). Idéalement, le système de mesure devrait être précis, peu coûteux et devrait être a fonctionné automatiquement. L'objectif est de minimiser le temps de calibrage et le robot.

I.4.1 Systèmes à base de capteurs à fils

Un tel système (figure I.1) est essentiellement composé de trois encodeurs optiques (ou plus) de haute résolution $P1, P2, P3$. Les câbles de faible masse sont fixés à l'une de leurs extrémités sur les arbres des codeurs, tandis que les autres extrémités sont fixés sur le point d'extrémité M du robot. Les lectures du codeur donnent les longueurs de câble, qui représentent les rayons ρ_1, ρ_2, ρ_3 de trois sphères dont les centres sont sur les arbres du codeur. L'intersection des sphères détermine les coordonnées de M .

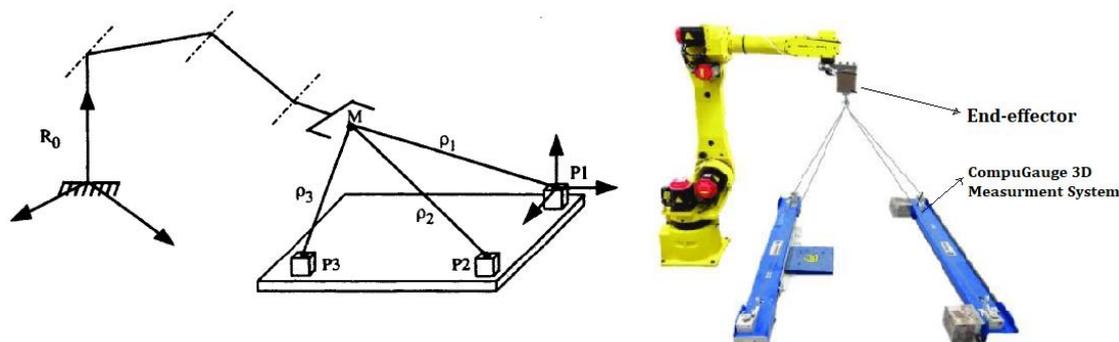


Figure I.4 : System à base de capteurs à fils.

Ce dispositif peu coûteux fournit automatiquement les coordonnées du point final M . Comme exemple commercial d'un tel système, on peut citer le CompuGauge 3D de Dynalog dont la précision est d'environ 0,1 mm pour un espace de mesure cubique de 1,5 m de côté.

I.4.2 Théodolites

Un théodolite (figure II.2) est un télescope dans lequel les deux angles donnant l'orientation de la ligne de visée peuvent être mesurés avec précision. Les coordonnées cartésiennes d'une boule

cible M sur l'effecteur final peuvent être obtenues à partir des lectures de deux théodolites $Th1$ et $Th2$ pointant cette boule et de la matrice de transformation T entre les deux théodolites.

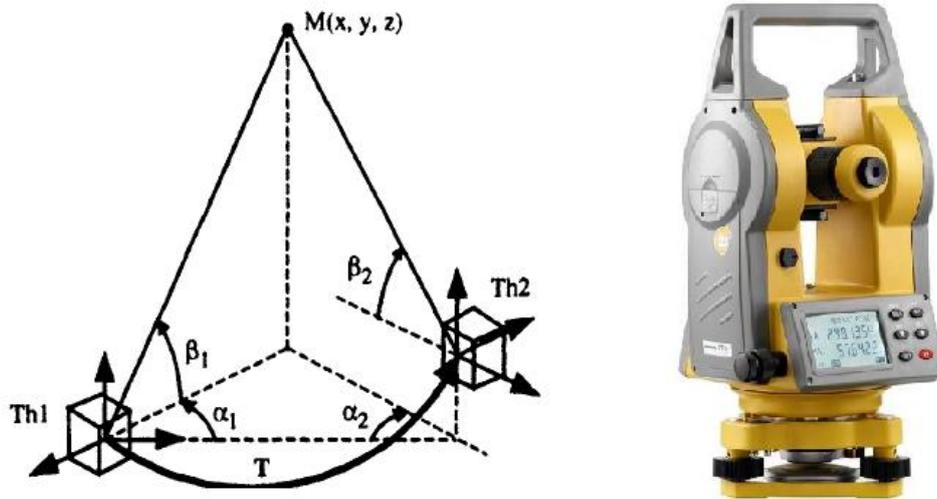


Figure I.5 : Un théodolite.

La précision de ce système est excellente (de l'ordre de 0,02 mm à environ 1 m distance). Le coût d'un théodolite est assez élevé. Les premiers systèmes devaient être manuellement, mais les données ont été lues et stockées par un ordinateur. Maintenant, nous pouvons trouver des théodolites motorisés qui peuvent tracker automatiquement une boule cible éclairée (TCA de Leica).

I.4.3 Système de suivi par laser

Cet appareil est composé de deux systèmes de scanner 2-D $T1$ et $T2$ externes au robot. Chacun des deux systèmes dévie un faisceau laser dans un plan vertical et un plan horizontal, grâce à deux miroirs motorisés. La direction du faisceau est commandée pour suivre un rétro réflecteur fixé sur la liaison terminale du robot (Figure I.3). La position du point cible est calculée automatiquement en utilisant les angles des faisceaux laser. La précision est de l'ordre de 0,1 mm pour une cible à 1 m de distance. À titre d'exemple de ce système, on peut citer le système LASERTRACES de ASL (UK) et OPTOTRAC l'Université du Surrey (UK). La limitation de cette est l'exigence d'un acteur final spécialisé.

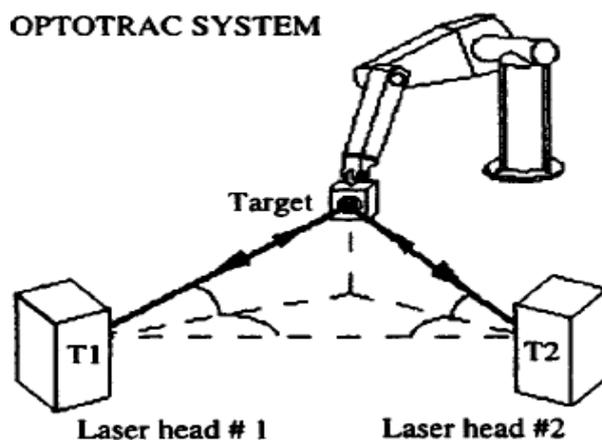


Figure I.6 : Système de suivi par laser.

I.4.4 Systèmes à base de capteurs optiques

Le principe est d'acquérir au moins simultanément deux images de la configuration du robot à l'aide de deux caméras. Les deux images sont traitées en temps réel pour estimer les coordonnées 3D des marqueurs de cible fixés sur les liaisons du robot. En pratique, les systèmes existants diffèrent par le nombre et le type de caméras utilisées. On peut citer comme exemple le R0DYM6D de Krypton, La précision est de l'ordre de 0,2 mm pour des points situés à 2,5 m de distance.

Le tableau suivant montre une comparaison entre les quatre techniques de mesure pour le calibrage des robots :

système	Volum e exploré	Précision mm	Durée d'acquisition des mesures	Coût	Mise en œuvre
Capteur à câble	élevé	1/10	faible	faible	simple
théodolites	élevé	5/100	faible	Très élevé	simple
Capteur optique	Très élevé	1/10	faible	élevé	simple
Balayage laser	élevé	1/10	Très faible	élevé	simple

Tableau I.1 : Comparaison des caractéristiques des systèmes de mesures.

I.5 Conclusion

Ce chapitre, nous avons présenté le principe d'étalonnage des robots parallèles, ainsi que les technologies de mesure les plus célèbres, on a introduit et discuté les manipulateurs parallèles et la célèbre structure de Stewart, qui deviendra l'objet de l'étalonnage dans le dernier chapitre.

Chapitre II : Le modèle géométrique de manipulateur Stewart

II.1 Introduction

Afin de développer une stratégie de contrôle efficace des robots manipulateurs ou de simuler son comportement, il est nécessaire de comprendre la cinématique et la dynamique du robot considéré. Les robots manipulateurs étant des systèmes non linéaires et multidimensionnels, il est nécessaire de disposer des modèles mathématiques. Ces modèles sont définis dans l'espace opératoire (où la position et l'orientation de l'organe terminal sont déterminées) ou dans l'espace articulaire. Ces modèles sont :

- Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.
- Les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.
- Les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercées par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Ces modèles permettent de construire une commande robuste pour un système réel, mais l'obtention de ces différents modèles n'est pas facile. La difficulté variant en fonction de la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Dans ce chapitre, nous avons extrait les modèles géométriques du manipulateur Stewart 6-UPS pour établir le calibrage à base de ces modèles.

II.2 Le modèle géométrique de plateforme Stewart

L'étude du modèle géométrique de robot parallèle permet d'établir le lien entre les coordonnées articulaires et les coordonnées cartésiennes et angulaires de la plateforme mobile (Craig , 1986), (Khalil , 1986). Nous distinguons deux problèmes apparaissent dans l'étude des modèles géométriques:

- Modèle géométrique direct : trouver les variables de la position et orientation de la plateforme mobile à partir des variables articulaires prismatiques.

- Modèle géométrique inverse : trouver les variables articulaires prismatiques à partir les variables de la position et orientation de la plateforme mobile.

La géométrie de notre robot Stewart est présentée à la figure II.1. Elle consiste en une structure comportant une plateforme fixe (base) et plateforme mobile, et les deux sont reliés avec l'autre par six jambes cinématiques indépendants identiques. Chaque jambe est un actionneur linéaire électromécanique, qui est relié à la base et à la plateforme mobile par des articulations universels et sphériques passifs respectivement. Le mécanisme de cette jambe est de type UPS (universel-prismatique-sphérique).

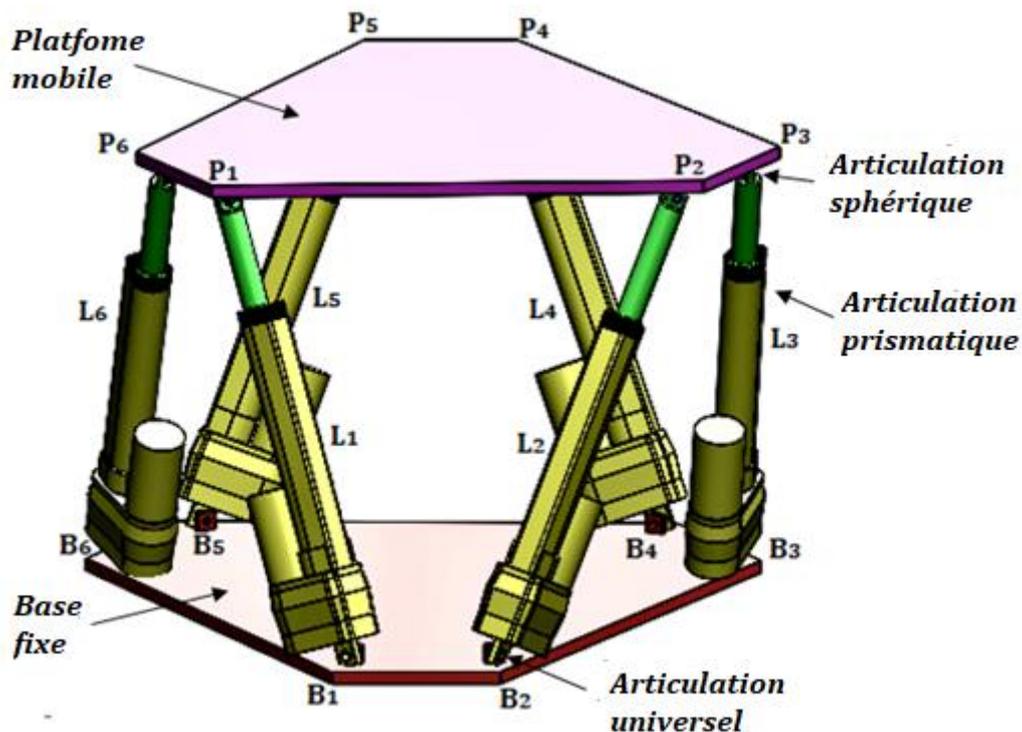


Figure II.1 : Modèle CAO représente le manipulateur Stewart 6-UPS.

Lors de la définition des dimensions de la plateforme Stewart, les exigences suivantes doivent être prises en compte :

- Le manipulateur doit pouvoir fonctionner dans l'espace de travail prescrit par la demande.
- Les propriétés de longueur des actionneurs prismatiques doivent être réalisables physiquement.
- Éviter les collisions des actionneurs prismatiques, mais ce n'est qu'une préoccupation pour les conceptions où les articulations sont placées arbitrairement.

La variation de conception des différents types de Stewart dépend uniquement des emplacements de l'articulation sur la base et la plateforme. La configuration utilisée est illustrée à la figure II.2. Le choix de la configuration repose principalement sur la capacité de manutention de la charge, la résistance globale et le volume de travail de la plateforme.

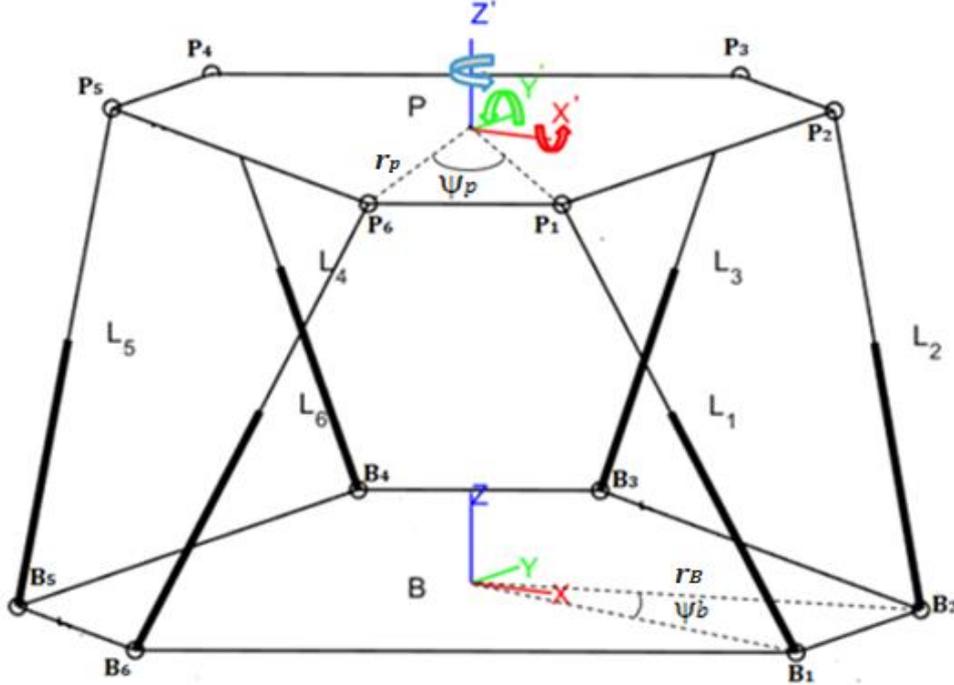


Figure II.2 : Représente la structure de notre robot parallèle de type plateforme Stewart.

Tel que B_i et P_i sont les coordonnées des articulations sphériques dans la base et la plateforme respectivement. L_i est la longueur d'articulation prismatique pour $i = 1, 2, \dots, 6$. r_b et r_p sont les rayons de la base et la plateforme mobile respectivement. Les coordonnées B_i et P_i , s'écrivent comme suivant :

$$B_i = \begin{pmatrix} b_{ix} \\ b_{iy} \\ b_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_b \cos(\beta_{bi}) \\ r_b \sin(\beta_{bi}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.1})$$

$$P_i = \begin{pmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_p \cos(\beta_{pi}) \\ r_p \sin(\beta_{pi}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Où

$$\beta_b = \left(0 \quad \psi_b \quad \frac{2\pi}{3} \quad \frac{2\pi}{3} + \psi_b \quad \frac{4\pi}{3} \quad \frac{4\pi}{3} + \psi_b \right) \quad (\text{II.3})$$

$$\beta_p = \left(0 \quad \psi_p \quad \frac{2\pi}{3} \quad \frac{2\pi}{3} + \psi_p \quad \frac{4\pi}{3} \quad \frac{4\pi}{3} + \psi_p \right) \quad (\text{II.4})$$

La base est considérée comme un référentiel fixe, avec des axes orthogonaux (X, Y, Z) . La plateforme mobile a ses propres coordonnées orthogonales (X', Y', Z') . La plateforme mobile dispose six degrés de liberté. Il y a trois translations représentées par le vecteur $h = (x \ y \ z)^T$ (vecteur de translation) et l'ensemble d'angles d'Euler sont utilisés dans la séquence suivante :

- Rotation d'un angle γ autour de l'axe Z (lacet).
- Rotation d'un angle θ autour de l'axe Y (Tangage).
- Rotation d'un angle α autour de l'axe X (roulis).

Tel que ces angles d'Euler sont utilisés dans la détermination de la matrice de transformation homogène R . Elle est une matrice de passage du repère $R_p = (O', X', Y', Z')$ de la plateforme mobile vers le repère $R_B = (O, X, Y, Z)$ de la base (origine). Elle est donnée par le produit successive des trois matrices suivantes :

$$R = R(\gamma)_z \cdot R(\theta)_y \cdot R(\alpha)_x \quad (\text{II.5})$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$

On suppose : $\cos(.) = c$. et $\sin(.) = s$.

$$R = \begin{pmatrix} c\gamma c\theta & -s\gamma c\alpha + c\gamma s\theta s\alpha & s\gamma s\alpha + c\gamma s\theta c\alpha \\ s\gamma c\theta & c\gamma c\alpha + s\gamma s\theta s\alpha & -c\gamma s\alpha + s\gamma s\theta c\alpha \\ -s\theta & c\theta s\alpha & c\theta c\alpha \end{pmatrix} \quad (\text{II.6})$$

On peut écrire R comme suite :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Les propriétés de cette (Nguyen, et al., 1991) sont :

$$\bullet \quad R \cdot R^T = I \quad (\text{II.8})$$

$$\bullet \quad R^T = R^{-1} = R(\gamma)_z^{-1} \cdot R(\theta)_y^{-1} \cdot R(\alpha)_x^{-1} \quad (\text{II.9})$$

$$\bullet \quad r_{11} + r_{21} + r_{31} = r_{12} + r_{22} + r_{32} = r_{13} + r_{23} + r_{33} = 1 \quad (\text{II.10})$$

$$\bullet \quad \begin{cases} r_{11} \cdot r_{12} + r_{21} \cdot r_{22} + r_{31} \cdot r_{32} = 0 \\ r_{11} \cdot r_{13} + r_{21} \cdot r_{23} + r_{31} \cdot r_{33} = 0 \\ r_{12} \cdot r_{13} + r_{22} \cdot r_{23} + r_{32} \cdot r_{33} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.2.1 Le modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) de manipulateur Stewart permet d'écrire les coordonnées articulaires prismatiques l_i en fonction des coordonnées opérationnelles de la plateforme mobile q (Nguyen, et al., 1991), il s'écrit :

$$L_i = f(q) \quad (\text{II.12})$$

Généralement, la résolution du MGI ne pose pas de problème dans les robots parallèles car il contient une solution unique. Le figure II.3 représente un schéma de la géométrie de plateforme Stewart.

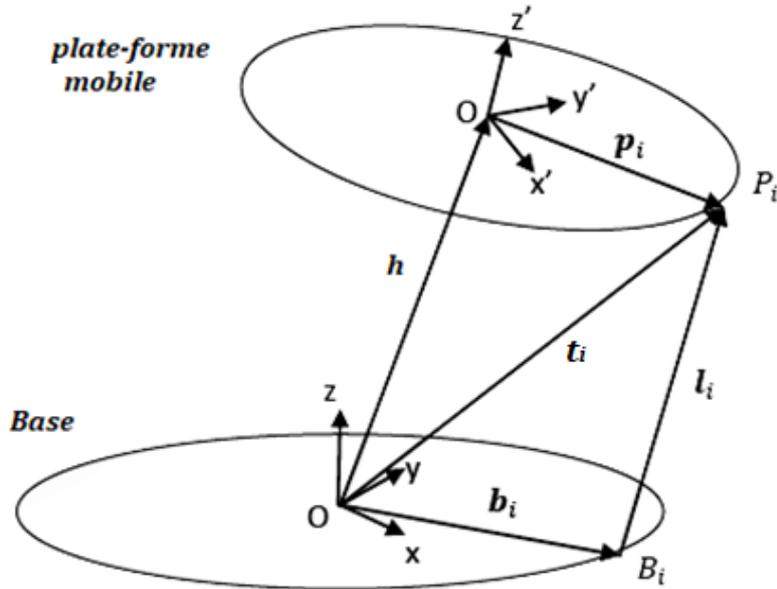


Figure II.3 : Schéma représente la géométrie de plateforme Stewart.

Donc nous pouvons déterminer la longueur d'articulation prismatique l_i sous forme vectorielle dans R_B , tel que :

$$t_i = h + R \cdot p_i \quad (\text{II.13})$$

$$l_i = t_i - b_i \quad (\text{II.14})$$

Où $p_i = (r_p \cos(\beta_{pi}) \quad r_p \sin(\beta_{pi}) \quad 0)^T$ est le vecteur définissant les coordonnées du point P_i par rapport R_P et $b_i = (r_b \cos(\beta_{bi}) \quad r_b \sin(\beta_{bi}) \quad 0)^T$ est le vecteur définissant les coordonnées du point B_i par rapport R_B . Donc à partir (II.13) et (II.14) l'expression final de vecteur l_i donne comme suite :

$$l_i = h + R \cdot p_i - b_i \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{II.15})$$

Et on a :

$$R \cdot p_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{ipx} \\ p_{ipy} \\ p_{ipz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} \cdot p_{ix} + r_{12} \cdot p_{iy} \\ r_{21} \cdot p_{ix} + r_{22} \cdot p_{iy} \\ r_{31} \cdot p_{ix} + r_{32} \cdot p_{iy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Et à partir (II.1) et (II.2), on trouve :

$$p_{ix}^2 + p_{iy}^2 + p_{iz}^2 = r_p^2 \quad (\text{II.17})$$

$$b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2 = r_b^2 \quad (\text{II.18})$$

Le longueur L_i de vecteur $l_i = (l_{ix} \quad l_{iy} \quad l_{iz})^T$, écrire comme suite :

$$L_i^2 = l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2 \quad (\text{II.19})$$

Où

$$L_i^2 = (x - b_{ix} + u_i)^2 + (y - b_{iy} + v_i)^2 + (z - b_{iz} + w_i)^2 \quad (\text{II.20})$$

A partir les expressions (II.10–II.11) et (II.17–II.18), (II.12) devient comme suite :

$$L_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(r_{11} \cdot p_{ix} + r_{12} \cdot p_{iy})(x - b_{ix}) \quad (\text{II.21})$$

$$+ 2(r_{21} \cdot p_{ix} + r_{22} \cdot p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(r_{31} \cdot p_{ix} + r_{32} \cdot p_{iy})(z - b_{iz})$$

L'expression finale de L_i^2 en fonction des coordonnées opérationnelles est donnée dans l'équation II.22 comme suite :

$$L_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(c_{\gamma c \theta} \cdot p_{ix} + (-s_{\gamma c \alpha} + c_{\gamma s \theta s \alpha}) p_{iy}) \quad (\text{II.22})$$

$$+ 2(s_{\gamma c \theta} \cdot p_{ix} + (c_{\gamma c \alpha} + s_{\gamma s \theta s \alpha}) p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(-s_{\theta} \cdot p_{ix}$$

$$+ c_{\theta s \alpha} \cdot p_{iy})(z - b_{iz})$$

L'équation (II.22) représente la solution de modèle géométrique inverse dans le sens de trouver la longueur d'articulation prismatique L_i en fonction des coordonnées opérationnelles q , tel que le vecteur q écrire comme suite :

$$q = (x \quad y \quad z \quad \alpha \quad \theta \quad \gamma)^T \quad (\text{II.23})$$

II.2.2 Le modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) dans le robot Stewart permet de trouver les coordonnées opérationnelles de la plateforme mobile en fonction d'une configuration articulaire. L'obtention d'une solution du MGD correspond à la résolution d'un système d'équations non-linéaires multi variable (II.22), ce qui est un problème complexe.

Il existe quatre méthodes pour déterminer le MGD : les méthodes analytiques, les méthodes itératives, les méthodes reposant sur l'ajout de capteurs additionnels et les méthodes utilisant

les réseaux de neurones. Dans notre travail on utilise la méthode de Newton-Raphson (Nguyen, et al., 1991), (Merlet , 1993), qui est une méthode itérative qui devrait être employées pour résoudre l'ensemble d'équations non linéaires ci-dessous afin d'obtenir une solution proche que la solution effective. Pour appliquer la méthode de Newton-Raphson, nous définissons six fonctions scalaires à partir l'équation (II.22) :

$$f_i(q) = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_b^2 + 2(cyc\theta.p_{ix} + (-syc\alpha + cys\theta s\alpha)p_{iy}) + 2(syc\theta.p_{ix} + (cyc\alpha + syc\theta s\alpha)p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(-s\theta.p_{ix} + c\theta s\alpha.p_{iy})(z - b_{iz}) - L_i^2 = 0 \quad (II.24)$$

Pour $i = 1, 2, \dots, 6$, le vecteur q_i définie comme suite :

$$q_i = (q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6)^T = (x \ y \ z \ \alpha \ \theta \ \gamma)^T \quad (II.25)$$

Puis nous avons utilisé l'algorithme de Newton-Raphson suivante pour résoudre q_i :

- Étape 1 : Sélectionner l'estimation initial de q_i .
- Étape 2 : Calculer les éléments de R en utilisant l'équation (II.6).
- Étape 3 : Calculer $f_i(q)$ et $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$ (l'équation (II.26)) en utilisant (II.24) pour $i, j = 1, 2, \dots, 6$.
- Étape 4 : Calculer $B_i = -f_i(q)$ pour $i = 1, 2, \dots, 6$. Si $\sum_{i=1}^6 |B_i| < erreur$, arrêter et sélectionner q_i comme solution.
- Étape 5 : Résoudre $\sum_{j=1}^6 A_{ij} \delta q_j = B_i$ pour $i = 1, 2, \dots, 6$. Si $\sum_{j=1}^6 |\delta q_j| < erreur$, arrêter et sélectionner q_i comme solution.
- Étape 6 : Sélectionner $q_i^{nv} = q_i + \delta q_i$ et répétez les étapes 2 à 6.

Tel que

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_6} \end{pmatrix} \quad (II.26)$$

La solution analytique de ce problème n'est pas unique, en général il existe plus de 40 solutions réelles (Raghavan, 1991), (Husty, 1994) à ce problème dans le cas de plateforme Stewart. L'inconvénient principal de la méthode itérative de Newton-Raphson est de trouver une solution sans aucune garantie que ce soit la plus proche de la solution effective. Elle nécessite une estimation initiale qui assure la convergence de l'algorithme. Cependant, selon les

expériences acquises de la simulation informatique présentées plus loin, toute supposition initiale non nulle (Nguyen, et al., 1991) dans l'espace de travail accessible du robot fera converger l'algorithme.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles génériques du plateforme Stewart (6-UPS) afin de décrire la relation de mouvement entre les coordonnées opérationnelles et articulaires pour fournir les équations mathématiques nécessaires pour le calibrage géométrique (Chapitre III).

Chapitre III : Le calibrage géométrie

III.1 Introduction

Les robots parallèles représentent une catégorie de robots relativement nouvelle, celles-ci sont devenues le centre d'intérêt des chercheurs et les pratiquants. Bien qu'ils présentent de nombreux avantages (flexibilité, Vitesse et précision, charges lourdes, etc.), la modélisation cinématique, dynamique et la précision pose néanmoins des défis.

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer la précision absolue du manipulateur Stewart grâce à l'étalonnage, deux approches ont été adoptées afin d'estimer les paramètres géométriques réels, la première est basée sur le modèle géométrique inverse (MGI) et la seconde est basée sur le modèle géométrique direct (MGD), l'implémentation et la simulation du calibrage a été réalisés dans Matlab.

III.2 Paramètres géométriques à calibrées

les paramètres géométriques sont les paramètres nécessaires pour calculer le modèle géométrique direct et inverse (Khalil, et al., 2004), diverses approches de modélisation paramétrique ont été utilisées, comme le modèle du Denavit-Hartenberg ou du Khalil and Kleinfinger, le nombre des paramètres est directement lié à l'approche de modélisation et au niveau du calibrage adopté. Puisque notre but est d'éliminer que les erreurs de deuxième niveau, c'est-à-dire les erreurs géométriques du positionnement des articulations. Les erreurs de fabrication des articulations et les erreurs non géométriques comme l'usure mécanique sont négligés, pour sur passé ce problème il est conseillé de faire un nouvel étalonnage après un certain temps d'utilisation, on a choisi de travail avec le modèle cartésien classique, dont chaque articulation est modélisé par 3 variables d'espace, puisque le manipulateur contient 6 articulations universels B et 6 sphériques P , plus 6 longueurs ΔL de la partie fixe de l'actionneur, cela donne 42 paramètres ($6 \times 3 + 6 \times 3 + 6 = 42$), pour résumer le vecteur constructeur des paramètres géométriques est le suivant :

$$u = [u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6] \quad (\text{III.1})$$

où pour $i = 1, 2, \dots, 6$, $u_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz} \ p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz} \ \Delta l_i]$

III.3 Calibrage basé sur le modèle du géométrie inverse

L'étalonnage géométrique est un processus par lequel la précision de la plateforme peut être améliorée en modifiant son modèle géométrique. Le problème du calibrage est formulé en termes de résidu de mesure, c'est-à-dire l'écart entre la longueur de jambe mesurée et la longueur de jambe calculée. Les paramètres d'erreur sont essentiellement les erreurs d'installation des articulations sphériques et universelles, ainsi que les décalages de longueur des jambes. Pour $i = 1, 2, \dots, 6$, on a :

$$(l_i + \Delta l_i)^2 = (b_i - R p_i - h)^T (b_i - R p_i - h) \quad (\text{III.2})$$

Où la longueur réelle de la jambe est la somme de la commande articulaire nominale l_i et d'un décalage fixe Δl_i .

III.3.1 Stratégie de la solution

Puisque le problème d'identification géométrique est formulé comme un problème de moindres carrés non linéaires, on peut formuler la fonction de coût en se basant uniquement sur la solution géométrique inverse comme suite : soit $\widehat{l}_{i,j}$ et $l_{i,j}$ les déplacements articulaires calculés et mesurés de la jambe i à la pose j de la plateforme respectivement.

Ici, les déplacements articulaires calculés sont obtenus en appliquant la solution géométrique inverse, en utilisant les valeurs nominales des paramètres géométriques et les poses mesurées de la plateforme.

$$(l_{i,j} + \Delta l_i)^2 = (b_i - R_j p_i - h_j)^T (b_i - R_j p_i - h_j) \quad (\text{III.3})$$

On définit :

$$f_{i,j} = f(b_i, p_i, l_i, \Delta l_i, R_j, h_j) \quad (\text{III.4})$$

Tel que :

$$f_{i,j} = (l_{i,j} + \Delta l_i)^2 - (b_i - R_j p_i - h_j)^T (b_i - R_j p_i - h_j) \quad (\text{III.5})$$

$f_{i,j}$ est donc le résidu de mesure, qui est la différence entre les longueurs de jambe i mesurées et calculées à la pose j . En conséquence, la fonction de coût suivante est définie en termes de résidus de mesure de toutes les jambes à toutes les poses mesurées :

$$C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 f_{ij}^2 = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^6 f^2(b_i, p_i, \Delta l_i, l_{i,j}, R_j, h_j) \quad (\text{III.6})$$

Ainsi, le problème de calibration de manipulateur Stewart est alors réduit à la minimisation de C , en sélectionnant les paramètres géométriques de la plateforme.

III.3.2 Algorithme de solution

Les problèmes d'optimisation non linéaire décrits par (III.3), peuvent être résolus par des algorithmes standard de moindres carrés non linéaires basés sur des gradients, tels que l'algorithme du Levenberg-Marquardt qui est utilisé dans ce travail. Dans cette section, un modèle d'erreur qui facilite la solution non linéaire des moindres carrés (Hanqi Zhuang, et al., 1998). Par souci de simplicité, nous utiliserons l'équation (III.2) au lieu de l'équation (III.3). En différenciant les deux côtés de (III.2), on obtient :

$$2(l_i + \Delta l_i)(dl_i + d\Delta l_i) = 2(b_i - Rp_i - h)^2(db_i - Rdp_i) \quad (III.7)$$

Cependant, dl_i peut être obtenu à partir de la longueur de la jambe mesuré l_i et la longueur de la jambe \hat{l}_i calculé via MGI,

$$dl_i = l_i - \sqrt{(Rp_i + t - b_i)^T (Rp_i + h - b_i)} \quad (III.8)$$

Sur la base de la dérivation ci-dessus, le modèle d'erreur de plateforme est obtenu:

$$\begin{aligned} & l_{i,j} - \sqrt{(R_j p_i + h_j - b_i)^T (R_j p_i + R_j - b_i)} \\ & = \left[\frac{1}{l_{i,j} + \Delta l_i} (R_j p_i + t_j - b_i)^T R \quad \frac{-1}{l_{i,j} + \Delta l_i} (R_j p_i + h_j - b_i)^T \quad -1 \right] \begin{bmatrix} dp_i \\ db_i \\ d\Delta l_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (III.9)$$

Pour $i = 1, 2, \dots, 6$ et $j = 1, 2, \dots, m$.

La matrice des coefficients à (III.9) s'appelle l'identification jacobienne. Nous pouvons maintenant résoudre 42 paramètres d'erreur dp_i , db_i et $d\Delta l_i$ du système d'équations linéaires ci-dessus. Les paramètres p_i , b_i et Δl_i peuvent alors être mis à jour en utilisant les paramètres de l'erreur résolus. Le processus est répété jusqu'à ce que certaines conditions finales soient remplies. Notez que l'identification jacobienne est une matrice de blocs diagonaux, par conséquent les paramètres d'erreur de chaque jambe peuvent être résolus indépendamment. De cette façon, un peut améliorer l'efficacité numérique de l'algorithme d'identification géométrique. Par conséquent l'équation (III.10) est formulée pour $i = 1, 2, \dots, 6$ jambe par:

$$\delta l_i = J_i(l, q, u_i) \delta u_i \quad (III.10)$$

Avec : $u_i = [p_i, b_i, \Delta l_i]$ et $\delta u_i = [dp_i, db_i, d\Delta l_i]$

Encore l'équation (III.9) montre que les paramètres de chaque jambe peuvent être identifiés séparément. Ainsi, nous pouvons diviser le problème de l'identification en six des systèmes d'équations où chaque système est fonction des sept paramètres d'une jambe. En appliquant l'équation (III.10) pour un nombre suffisant de configurations j et en concaténant toutes les équations ensemble, on obtient l'équation suivante :

$$\delta u^k = [\delta u_1^k, \dots, \delta u_i^k] \quad (\text{III.11})$$

Avec

$$(J_i^t J_i + \lambda I) \delta u_i^k = -j_i^t r \quad (\text{III.12})$$

La mise en œuvre de l'algorithme du Levenberg-Marquardt (Duc-Hung, et al., 2012) procède comme suit :

- 1- Commencer à estimation initiale du paramètre géométriques u_0 ainsi l'erreur ε et le constant d'amortissement λ_0 .
- 2- A la $K^{ième}$ itération résoudre l'équation $(J^t J + \lambda I) \delta u^K = -j^t r$.
- 3- Si $\frac{\delta u^K}{u^k} \leq \varepsilon$ renvoie le paramètre u^K comme estimation de la solution et arrêté l'algorithme sinon passer à l'étape (4).
- 4- calculé $u^{k+1} = u^k + \delta u^k$ et évaluer $f(u^k)$ et $f(u^{k+1})$.
- 5- Si $f(u^{k+1}) \geq f(u^k)$, augmenter λ d'un facteur 10 ($\lambda = 10\lambda$) et passer à l'étape (2).
- 6- Si $f(u^{k+1}) < f(u^k)$, diminuer λ d'un facteur 10 ($\lambda = 0.1 \lambda$) et passer à l'étape (2).

Les itérations sont poursuivies jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait, c'est-à-dire jusqu'à ce que soit une petite modification relative de la somme des erreurs quadratiques (f), soit une petite modification de la valeur de chaque paramètre par rapport aux valeurs des itérations précédentes ou bien le nombre maximal d'itération est dépassé.

III.3.3 Simulation de calibrage

Le but de cette section est en fait de vérifier la fiabilité du modèle développé théoriquement vu à la simulation, un modèle du manipulateur Stewart a été construit sur la base des paramètres réels (tableau III.1), un ensemble de données concernant les coordonnées articulaires et opérationnelles a été généré en respecte l'espace de travail théorique, en effet, nous utilisons le double du nombre minimum de pose pour estimer les paramètres de la plateforme ($2 \times 7 = 14$), des perturbations réalistes sont ajoutées aux paramètres nominaux pour simuler les erreurs de construction, et enfin les paramètres géométriques sont calibrés en utilisant la méthode des moindres carrés selon l'algorithme du Levenberg-Marquardt, qui est prédéfini dans Matlab

"Optimization Toolbox ", les paramètres nominaux u_n du modèle sont indiqués dans le tableau (III.1).

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.07	-4.19	0	9.75	-3.52	0	20.5
2	9.07	4.19	0	9.75	3.52	0	20.5
3	-0.90	9.95	0	-1.82	10.20	0	20.5
4	-8.17	5.76	0	-7.92	6.68	0	20.5
5	-8.17	-5.76	0	-7.92	-6.68	0	20.5
6	-0.90	-9.95	0	-1.82	-10.20	0	20.5

Tableau III.1 : Paramètre géométrique nominaux (cm).

Deux essais ont été mis en place, de tell sorti dans la première, nous avons introduit des perturbation réalistes P_r avec distribution normale aux paramètres nominaux (tab III.2) où $\max |P_r| = 0.57$ cm, et les valeurs mesurées sont considérées comme idéales, par contre nous avons introduit un bruit réaliste b_r dans la mesure du deuxième essai tell que $\max|b_r| = 0.25$ cm, une série de 14 configurations impliquant les coordonnées articulaires et aussi bien les coordonnées opérationnelles pour deux essais ont été générées .

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.39	-3.99	0.75	9.77	-3.12	0.06	20.04
2	9.39	4.54	0.01	9.71	3.16	-0.41	20.17
3	-1.29	9.84	-0.22	-1.73	10.13	0.15	20.07
4	-8.34	5.92	-0.16	-8.19	7.25	0.03	20.51
5	-8.44	-5.88	-0.04	-7.61	-6.75	-0.04	20.37
6	-0.78	-10.24	0.09	-1.62	-10.04	-0.33	20.38

Tableau III.2 : Paramètres géométriques perturbés (cm).

Le calibrage des paramètres géométriques u est basé sur la fonction lsqnonlin, qui nécessite une estimation initiale de u_0 ($u_0 = u_n$ est un bon choix), et une fonction de coût contenant le résidu minimum, une boucle for pour calculer le résiduel entre l'allongement L de toutes les jambes i et les configurations j et l'allongement calculé à l'aide de MGI et des paramètres actuels u^k , le processus est répétitif, le nombre maximum d'itérations ainsi que l'algorithme de résolution et la tolérance peuvent être spécifiés pour accepter la solution.

- **Essai n°1 :**

Nous considérons les paramètres perturbés (tableau III.2) pour générer les coordonnées opérationnelle et articulaire mesuré, nous avons sélectionné les paramètres nominaux (tableau III.1) comme les paramètres initiaux pour les calculs des variables articulaires. Le résultat du calibrage est donné dans le tableau III.3.

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.39	-3.99	0.75	9.77	-3.12	-0.06	20.04
2	9.39	4.54	0.01	9.71	3.16	-0.41	20.17
3	-1.29	9.84	-0.22	-1.73	10.13	0.15	20.07
4	-8.34	5.92	-0.16	-8.19	7.25	0.03	20.51
5	-8.44	-5.88	-0.04	-7.61	-6.75	-0.04	20.37
6	-0.78	-10.24	0.09	-1.62	-10.04	-0.33	20.38

Tableau III.3 : Résultat du calibrage à l'aide de MGI de robot test n°1.

L'algorithme a convergé en quelques itérations (3 itérations) pour atteindre une norme du résidu inférieure à 10^{-6} .

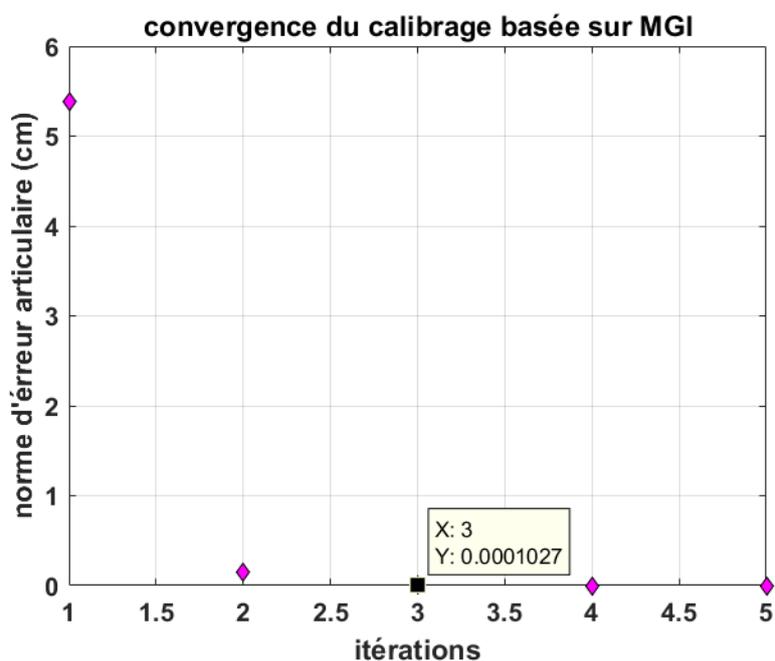


Figure III.1 : Convergence du calibrage basée sur MGI essai N°1.

À des fins de vérification, les résidus avant et après l'étalonnage ont été comparés. Le résultat de cette comparaison est présenté à la figure III.3. Les résultats donnés indiquent que l'erreur du manipulateur Stewart a été réduite à un niveau proche de zéro (la norme des résidus finaux

égale à 1.1853×10^{-5}), cela montre que la méthode d'étalonnage est très efficace dans l'absence des bruits.

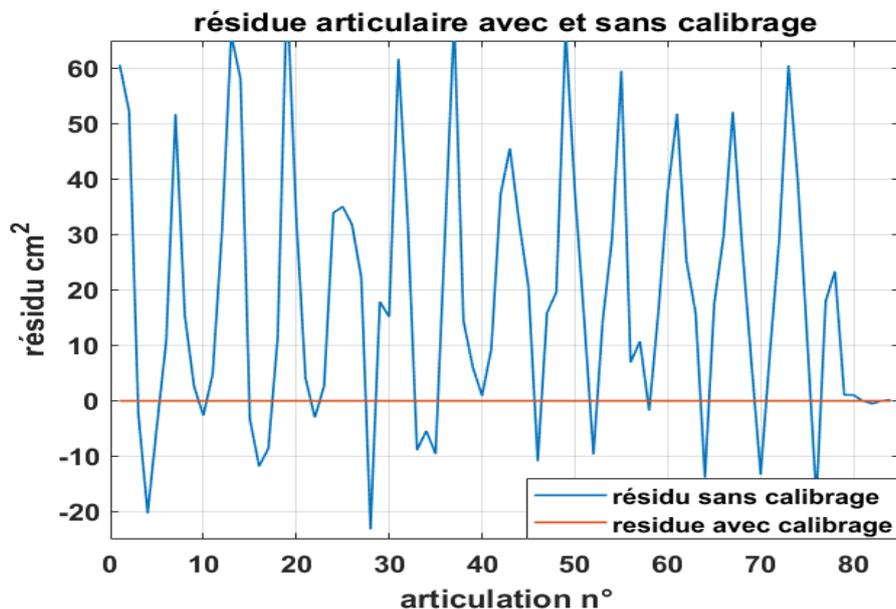


Figure III. 2 : Résidu avant et après le calibrage essai N°1.

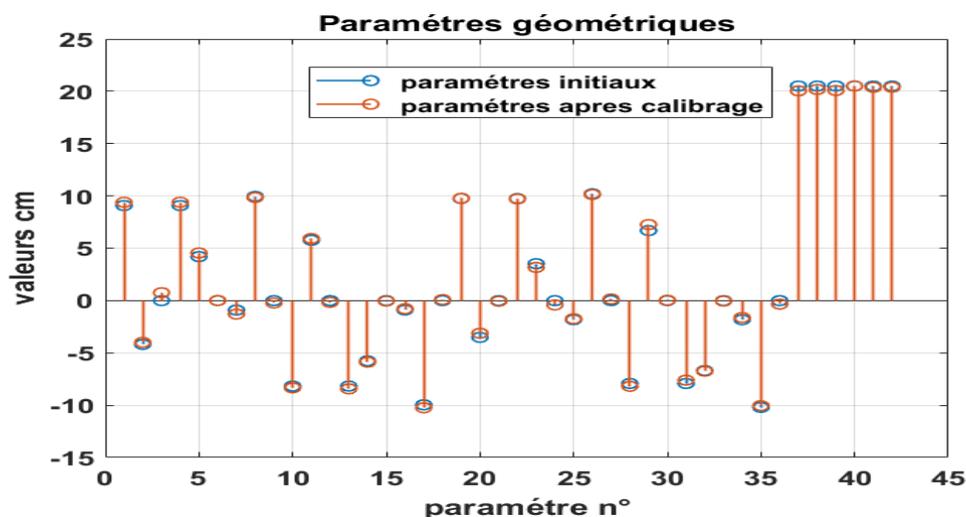


Figure III. 3 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°1.

• **Essai n°2 :**

Dans cet essai on a introduit un bruit b_r pour les mesures de la position finale, les conditions d'expérience sont similaires à celles du première essai. Les résultats du calibrage sont donnés dans le tableau (III.4) et les figures (III.4-III.6):

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.47	-3.82	0.71	9.94	-2.98	0.45	19.53
2	9.30	4.65	-0.12	9.68	3.21	0.04	19.63
3	-1.33	10.04	-0.54	-1.66	10.29	0.84	19.18

4	-8.23	6.18	-0.62	-7.88	7.57	1.05	19.21
5	-8.21	-5.60	-0.42	-7.20	-6.50	0.76	19.31
6	-0.54	-9.96	0.01	-1.28	-9.81	0.25	19.78

Tableau III.4 : Résultat du calibrage à l'aide de MGI de robot test n°2.

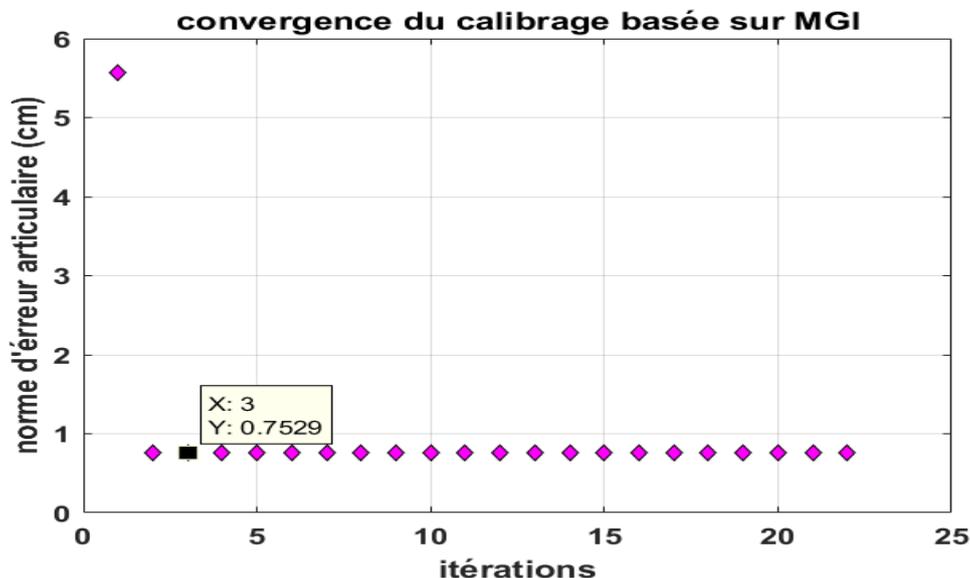


Figure III. 4 : Convergence du calibrage basée sur MGI essai N°2.

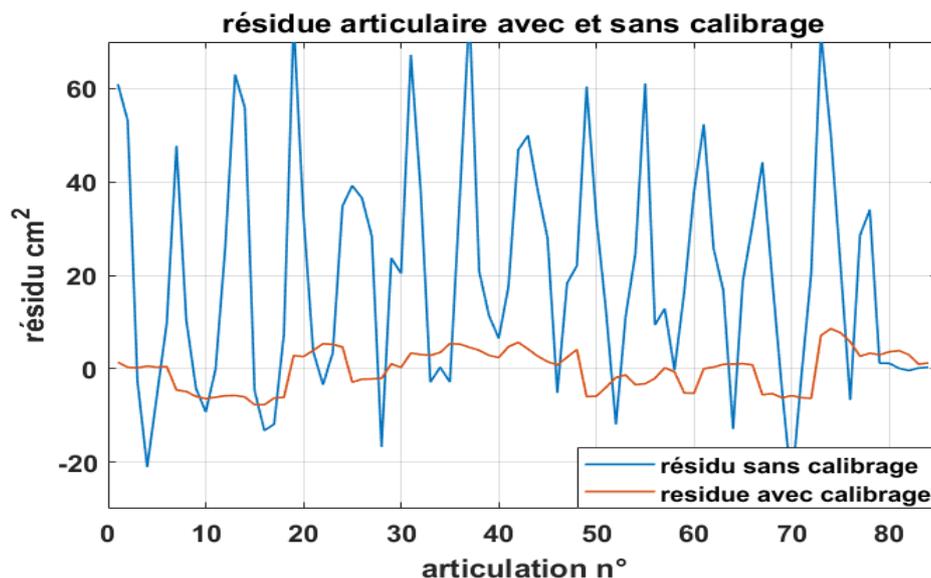


Figure III.5 : Résidu avant et après le calibrage essai N°2.

Comme le montre la figure II.4 , la convergence est réalisée qu'en 3 itérations, pour une valeur de la norme d'erreur égale à 0.752 cm, ce qui montre que le modèle d'erreur est bien structuré et que l'identification jacobienne est bien conditionnée, pour la figure II.5 notez que l'erreur est réduite d'une manière significative, mais la convergence de l'algorithme n'est pas absolue,

la norme finale des résidus est égale à 38.32 ce qui est une valeur acceptable, en peut valider cet algorithme en tenant compte leur rapidité et efficacité en présence des erreurs de mesure.

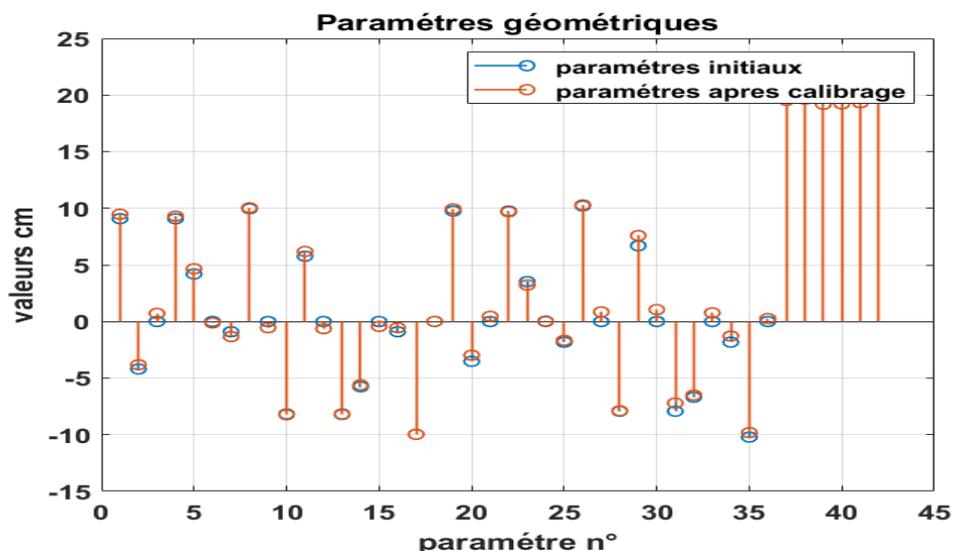


Figure III. 6 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°2.

III.4 Calibrage basé sur le modèle du géométrie Direct

Dans cette section, nous avons essayé une autre méthode d'étalonnage, basée sur la minimisation du résidu des coordonnées opérationnelles, c'est-à-dire l'erreur entre les valeurs mesurées et les calculs de l'orientation et de l'emplacement de l'effecteur final, cette approche est souvent utilisée dans l'étalonnage des robots en série, car elle est basée sur les calculs de géométrie direct ainsi que sur l'identification jacobienne, ces deux ne sont pas facilement atteignables dans le cas parallèle, ou ils sont calculés d'une manière numérique, en effet ils sont très arithmétiquement exhaustifs en raison de la complexité et le nombre d'itérations des calculs. Nous essayons maintenant d'implémenter un algorithme de calcul et de passer à une simulation réaliste pour valider les résultats, nous avons mené deux expériences puis comparer les résultats avec la méthode précédente.

III.4.1 Algorithme de calibrage :

Le problème de l'identification des paramètres géométriques par approche du MGD peut être énoncé comme suit : compte tenu des longueurs de liaison mesurées et des poses de manipulateur mesurées (pour j poses différentes), estimer les paramètres géométriques qui définissent la transformation du système de coordonnées de base au système de coordonnées de plateforme. Comme il existe un bruit de mesure, les paramètres sont identifiés à l'aide des techniques des moindres carrés.

$$\Delta q = J \Delta u \quad (\text{III.13})$$

La procédure d'étalonnage présentée ci-dessous (Masory, et al., 1993) est basée sur la méthode du gradient, elle utilise un modèle linéarisé d'erreur (équation III.13) Où Δq c'est le vecteur d'erreur opérationnel, Δu c'est le vecteur d'erreur des paramètres géométriques et J est une matrice appelée l'identification jacobienne qui est calculé dans ce cas d'une manière numérique, l'algorithme du calibrage est la suivante :

- 1) Calculer le vecteur de pose q_s^k de la plateforme en utilisant L et u^k en résolvant le problème nominal de géométrie directe de la plateforme, où u est le vecteur de paramètre géométrique inconnu, s l'indice pour les poses mesurées et k l'indice pour les itérations. Là encore, le vecteur nominal de u_n peut être utilisé comme une condition initiale.
- 2) Calculer le vecteur d'erreur de pose Δq_s^k en utilisant $\Delta q_s^k = q_s^m - q_s^k$, où q_s^m est le s -ème pose mesurée.
- 3) Si $|\Delta q_s^k| < \varepsilon$ pour tous les s , le vecteur de paramètre identifié $u = u^k$ et arrêter le programme. Sinon, passez à l'étape (4).
- 4) Calculer l'identification Jacobien J^k . La formulation de ce jacobien est donnée dans la section III.3.2.
- 5) Mettre à jour u^k par $u^{k+1} = u^k + \Delta u^k$, où $\Delta u^k = J^+ \Delta q^k$. Ici, l'exposant $+$ dénote une opération pseudo inverse de Moore–Penrose. Dans ce cas, $J^+ = (J^t J)^{-1} J^t$.
- 6) Retournez à l'étape (1).

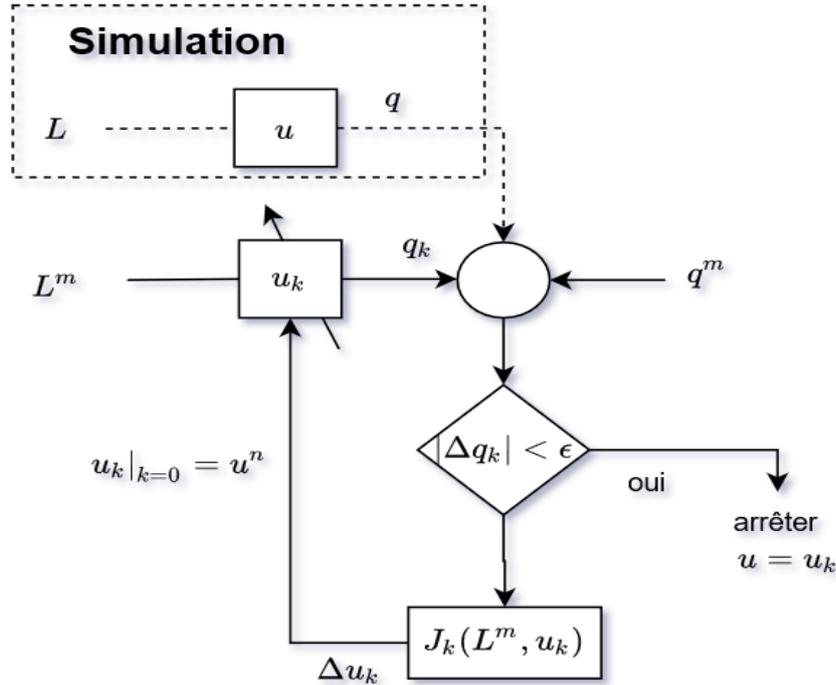


Figure III.7 : Organigramme de la procédure du calibrage basé sur MGD.

III.4.2 La formulation du jacobien

Un problème majeur dans l'estimation des paramètres géométriques par l'approche basée sur le modèle d'erreur opérationnelle est la formulation de l'identification jacobienne qui met en relation un vecteur de pose différentiel Δq à un changement différentiel des paramètres géométriques du vecteur Δu (équation III.13).

où Δu est un vecteur $(m \times 1)$, J une matrice $(6n \times m)$ et Δq est un vecteur $(6n \times 1)$ défini comme suit :

$$\Delta q = [(\Delta q_1)^T, (\Delta q_2)^T, \dots, (\Delta q_n)^T]^T \tag{III.14}$$

$$J = [J_1^T, J_2^T, \dots, J_n^T]^T \tag{III.15}$$

Rappelons que n est le nombre de mesures utilisées et m c'est le nombre des paramètres à identifier, dans l'équation (III.14), Δq_s , $s = 1, 2, \dots, n$, est un vecteur d'erreur 6×1 , pour l'équation (III.15) le jacobien J est décomposé de n matrices sous jacobiennes J_s , cependant pour chaque mesure s ,

$$\Delta q_s = J_s \Delta u \quad \text{pour } s = 1, 2, \dots, n \tag{III.16}$$

Où J_s est une matrice $6 \times m$. En outre,

$$J_s = [J_{s1}^T, J_{s2}^T, \dots, J_{sn}^T]^T \quad (\text{III.17})$$

Où J_{st} , $t = 1, 2, \dots, m$, est un vecteur 6×1 qui représente la dérivée partielle du vecteur de pose q_s par rapport au t – ème paramètre u_t . Il peut être obtenu numériquement en utilisant une méthode de perturbation (Masory, et al., 1997) (Kiusalaas, 2005) comme suit :

$$J_{st} = \frac{\delta q_s}{\delta u_t} \approx \frac{q_s(u_t + h) - q_s(u_t)}{h} \quad (\text{III.18})$$

où δu_t est une petite variation appropriée du paramètre u_t et h est une petite incrémentation (exemple 10^{-4}), Le vecteur d'erreur δq_s (6×1) est calculé en utilisant le modèle géométriques directe. En résumé, le Jacobien peut être exprimé sous la forme de la matrice ($6n \times m$) suivante :

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta q_1}{\delta u_1} & \frac{\delta q_1}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta q_1}{\delta u_m} \\ \frac{\delta q_2}{\delta u_1} & \frac{\delta q_2}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta q_2}{\delta u_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta q_n}{\delta u_1} & \frac{\delta q_n}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta q_n}{\delta u_m} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

III.4.3 Simulation de la méthode:

Dans cette partie, on va calibrer le manipulateur Stewart (tableau III.1) par approche basée sur MGD, on a adopté la même stratégie précédente (section III.2.3) concernant les valeurs des paramètres géométriques nominaux et perturbés, le nombre des essais, les mesures et l'introduction des erreurs. Le seul changement concerne la méthode de calcul, dans laquelle on va minimiser le résidu opérationnel au lieu du résidu articulaire.

- **Résultats d'essai N°1 : (calibrage en absence des bruits de mesure)**

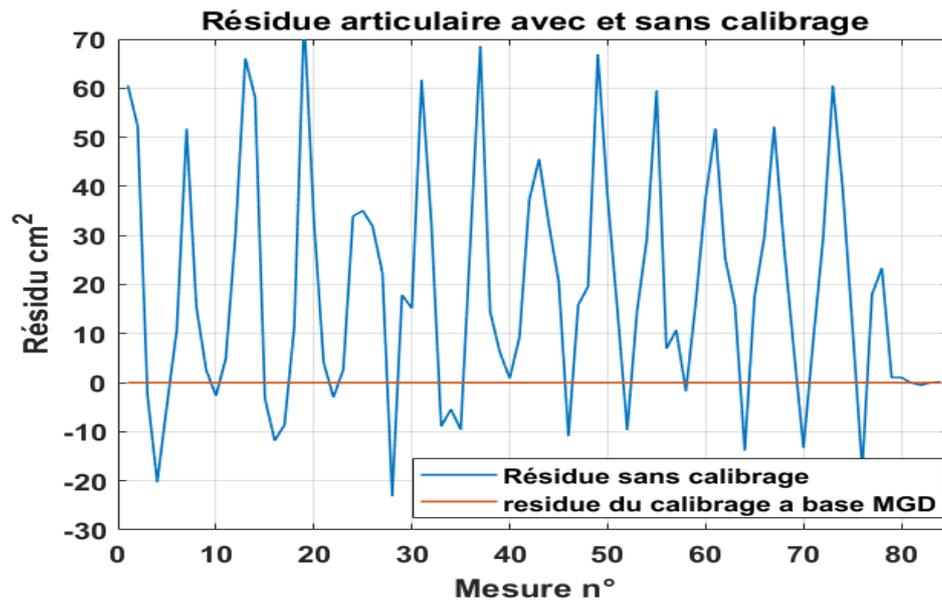


Figure III.8 : Résidu avant et après le Calibrage essai N°1.

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.39	-3.99	0.75	9.77	-3.12	-0.06	20.04
2	9.39	4.54	0.01	9.71	3.16	-0.41	20.17
3	-1.29	9.84	-0.22	-1.73	10.13	0.15	20.07
4	-8.34	5.92	-0.16	-8.19	7.25	0.03	20.51
5	-8.44	-5.88	-0.04	-7.61	-6.75	-0.04	20.37
6	-0.78	-10.24	0.09	-1.62	-10.04	-0.33	20.38

Tableau III.5 : Résultat du calibrage à l'aide de MGD de robot (Essai N°1).

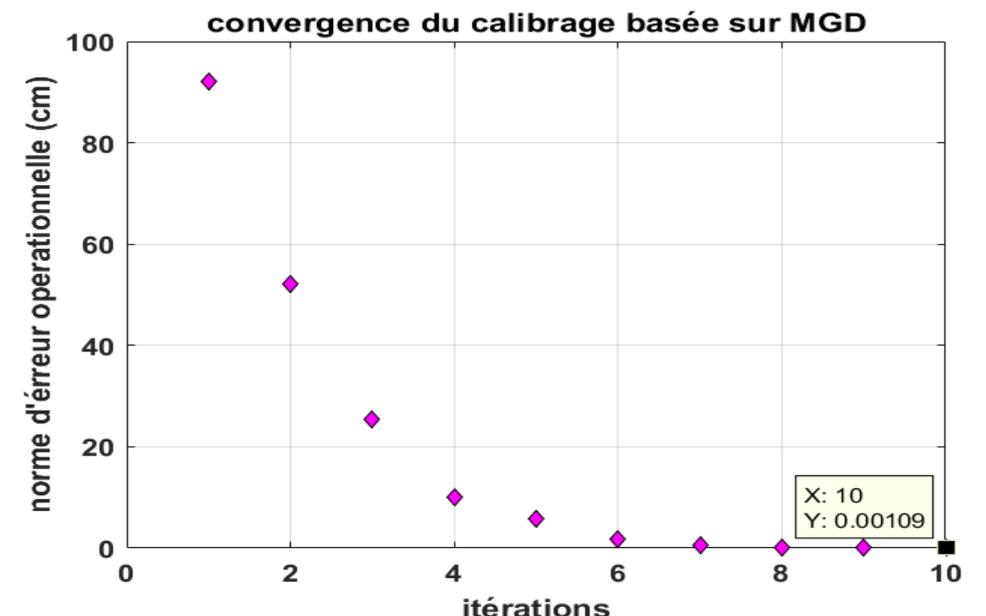


Figure III.9 : Convergence du calibrage basée sur MGD Essai N°1.

Nous pouvons voir que d’après 10 itérations, l’algorithme se converge à une erreur de l’ordre de 10^{-3} cm et étant donné des résidus articulaires avant et après le calibrage (figure III.7). On peut conclure que la procédure d’étalonnage à base MGD était successive en l’absence des bruits de mesure.

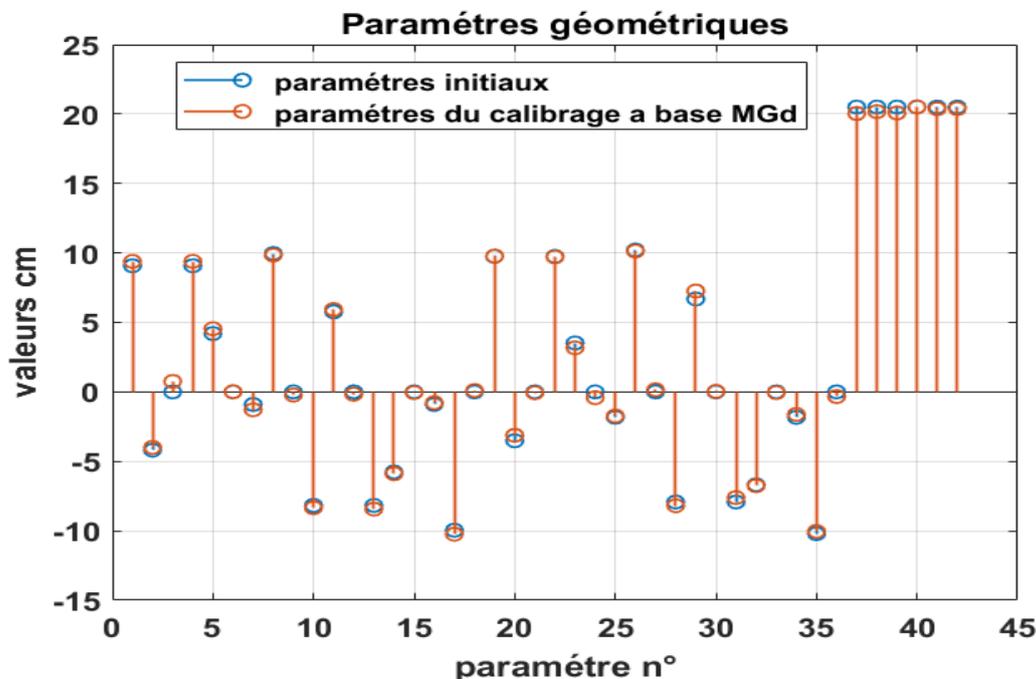


Figure III.10 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°1.

- **Résultats d’essai N°2 : (calibrage à la présence des bruits de mesure)**

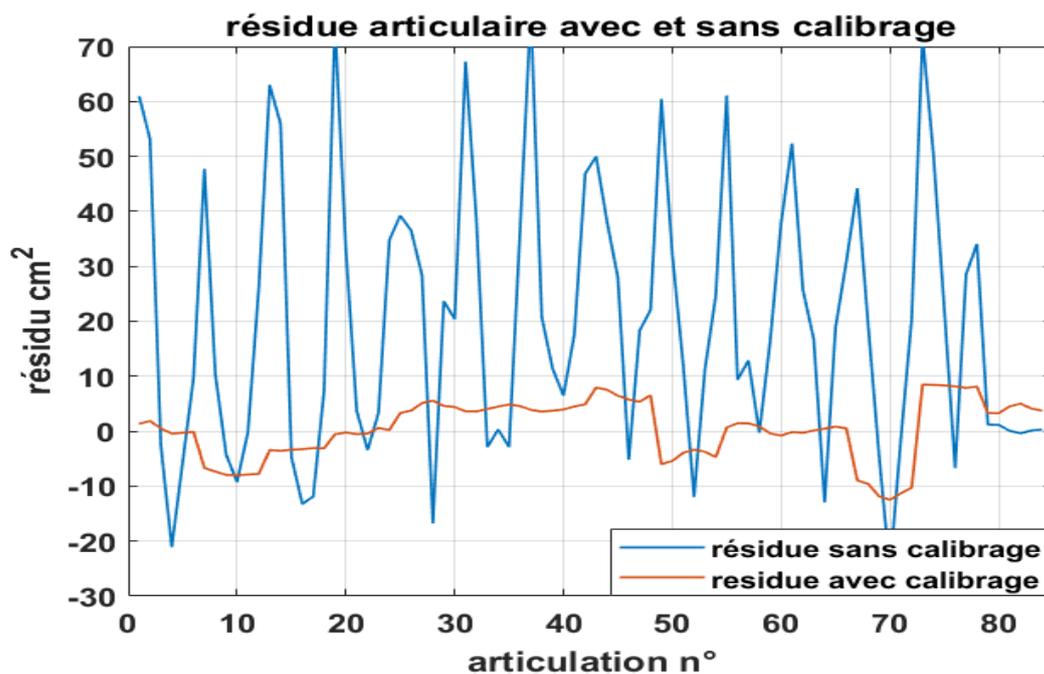


Figure III.11 : Résidu avant et après le calibrage essai n°2.

Articulation n°	b_{ix}	b_{iy}	b_{iz}	p_{ix}	p_{iy}	p_{iz}	Δl_i
1	9.64	-3.84	0.97	10.02	-2.97	0.14	20.02
2	9.59	4.65	0.08	9.89	3.27	-0.29	20.09
3	-1.20	9.94	-0.27	-1.63	10.21	0.18	19.98
4	-8.24	6.06	-0.16	-8.07	7.36	0.11	20.43
5	-8.15	-5.69	0.25	-7.31	-6.58	0.18	20.41
6	-0.49	-10.05	0.47	-1.32	-9.86	-0.09	20.49

Tableau III.6 : Résultat du calibrage à l'aide de MGD de robot (Essai N°2).

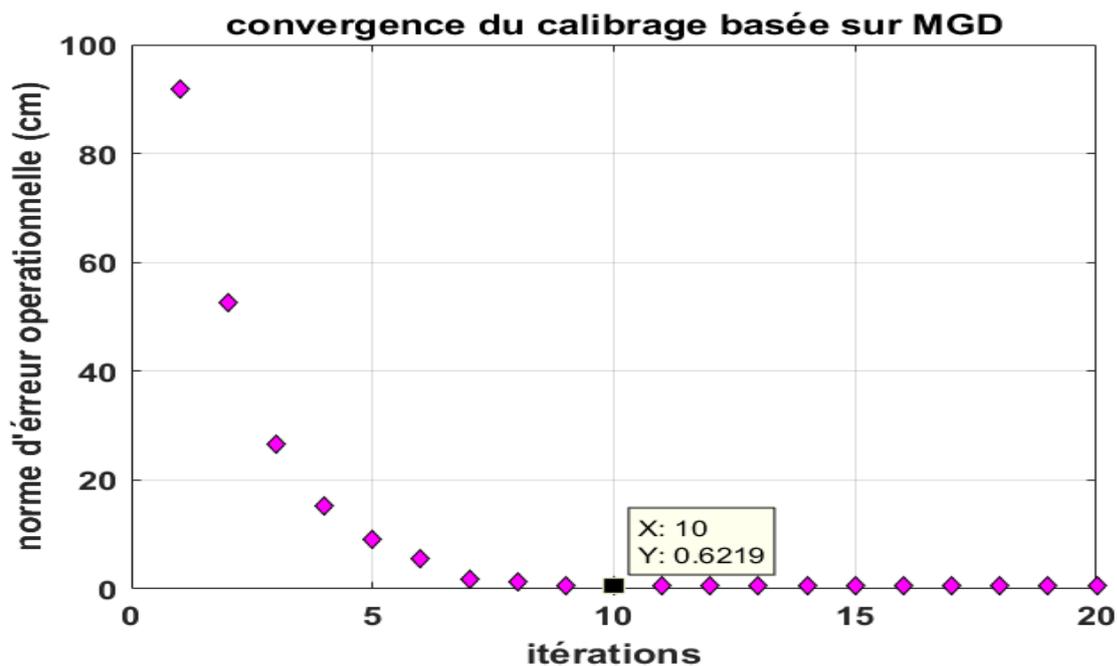


Figure III.12 : Convergence du calibrage basée sur MGD ESSAI N°2.

L'algorithme s'est stabilisé après 10 itérations et sa norme d'erreur opérationnelle était de 0.62cm, de toute évidence, le processus d'étalonnage a été très réussi en raison de la réduction de résidus articulaires de 287,51 à 48,51 cm². Par rapport au premier cas, la diminution de l'efficacité de la méthode est due au bruit de mesure.

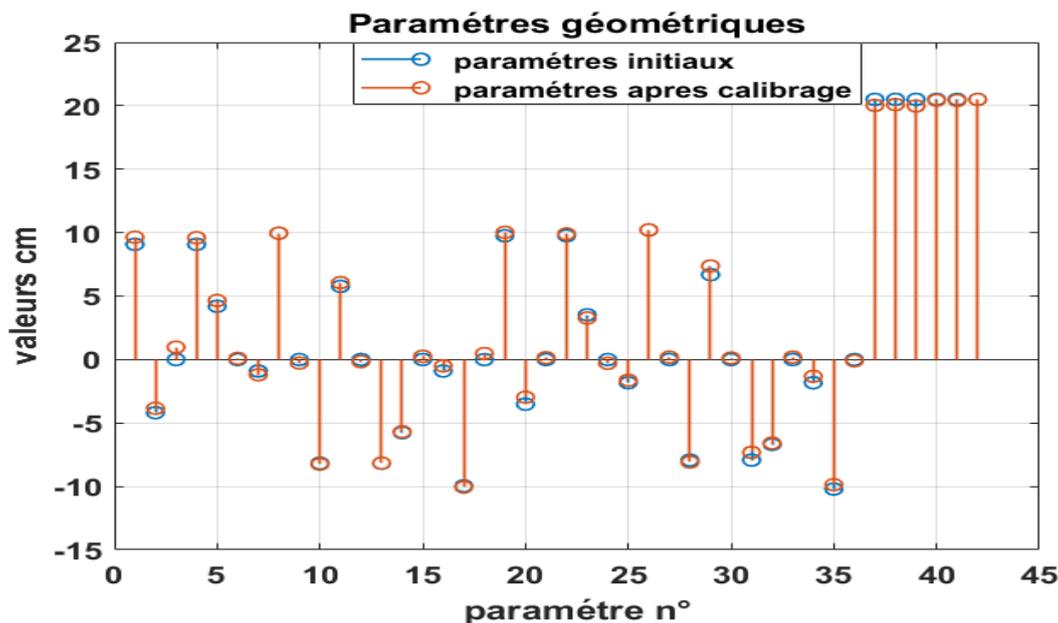


Figure III. 13 : Paramètres géométriques nominaux et calibrer essai n°2.

III.5 Comparaison entre les deux méthodes du calibrage

L'application Matlab ci-dessous (figure III.14) a été mise en œuvre pour étalonner le manipulateur de Stewart, dans lequel un étalonnage dans des conditions réelles peut être

effectué. La sélection de la méthode est possible ainsi qu'une évaluation finale du résultat en forme des graphes, les paramètres nominaux, les mesures articulaire et opérationnelle ainsi que le résultat du calibrage est saisi sous forme de fichier Excel. Nous avons exploité cette application pour comparer les deux méthodes en même temps pour les deux essais précédents.

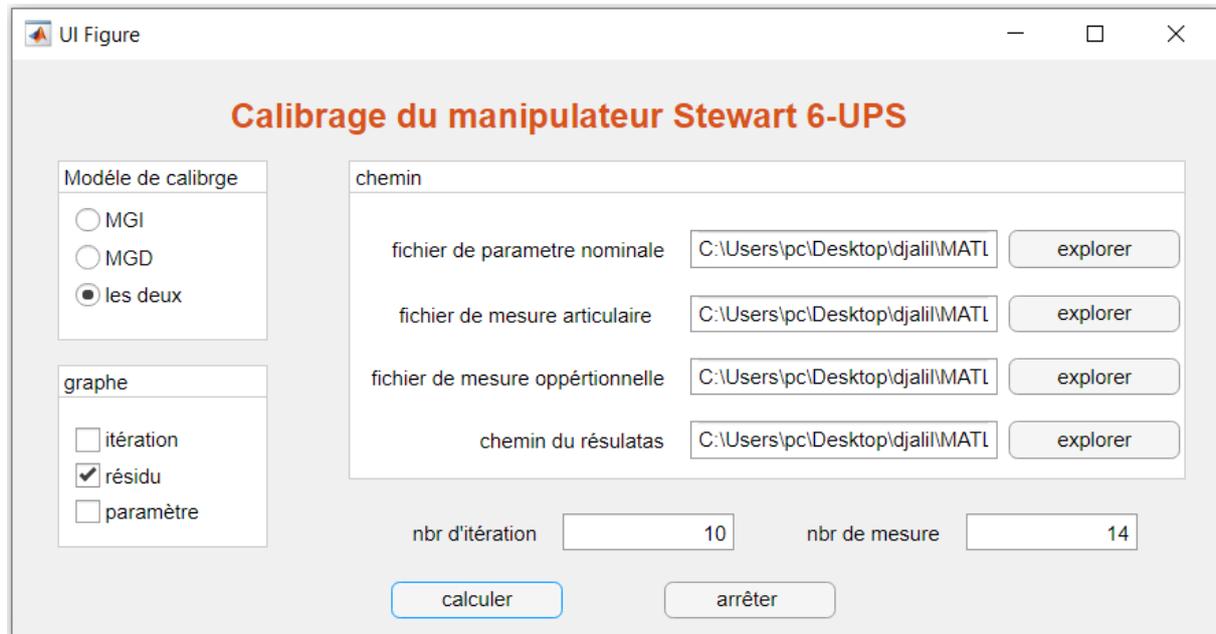


Figure III. 14 : Application pour calibrer le manipulateur Stewart.

Essai 1 :

Si en comparant les résidus de l'essai 1 en absence du bruit de mesure, on voit bien que les deux essais réduisent l'erreur résiduelle d'une façon énorme, en effet les deux résidus se superposent, mais il reste que les performances du calibrage à base du modèle MGI sont le plus efficace tenant en compte la norme des résidus articulaires (calibrage à base MGI= $1.1853 \cdot 10^{-5}$, calibrage à base MGD= $6.3628 \cdot 10^{-3}$), en remarque aussi dans la III.15 et III.16 qu'une légère modification dans les paramètres géométriques a provoqué une énorme déviation dans le modèle géométrique.

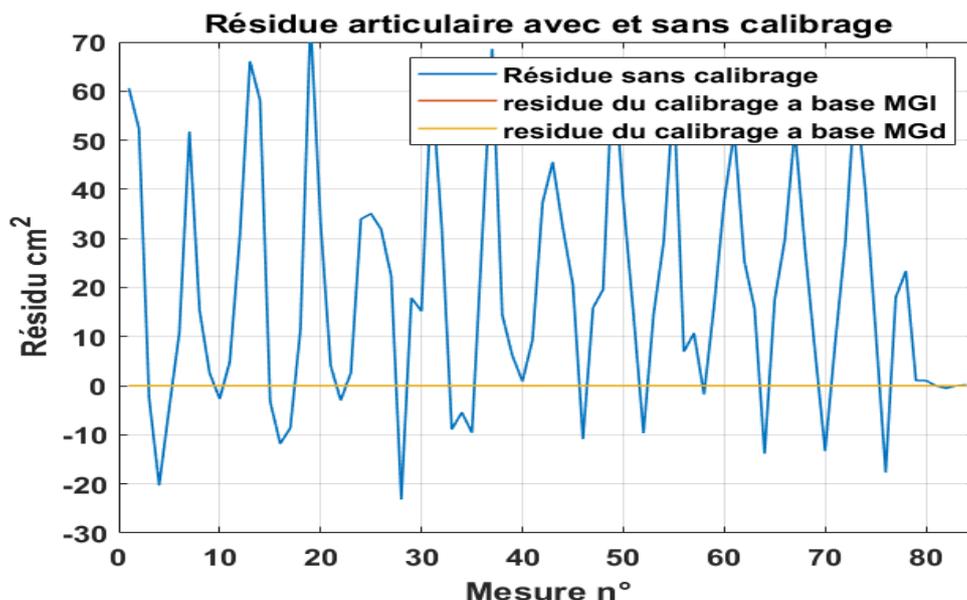


Figure III. 15 : Comparaison entre différents résidus de calibrage essai N°1.

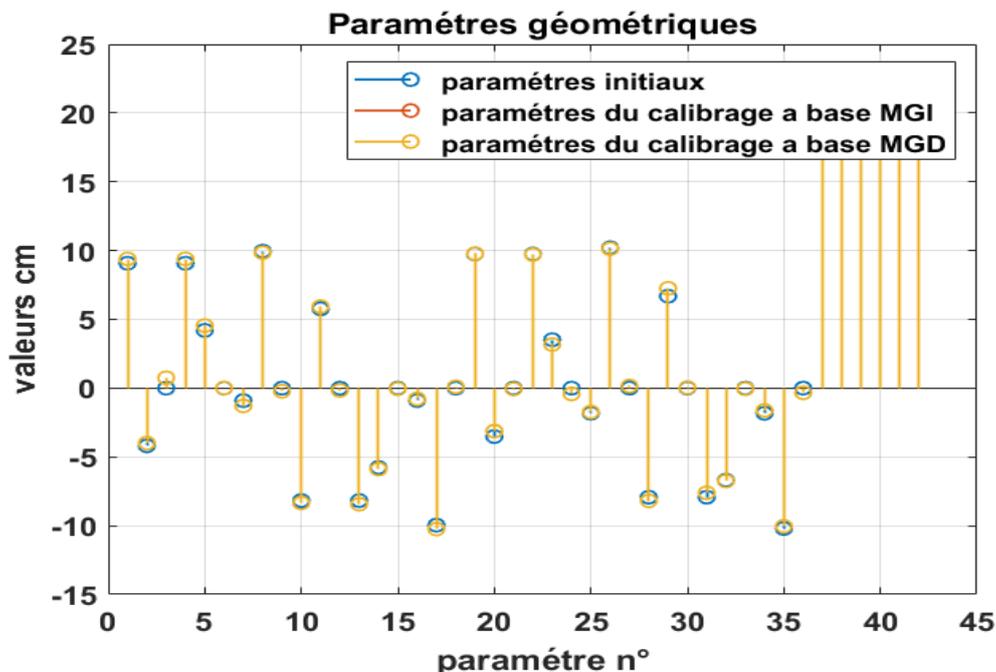


Figure III. 16 : Paramètres géométriques du calibrage pour les deux modèles essai N°1.

Essai 2 :

Dans cet essai les conditions de l'expérience ont changé du coté en a introduit un bruit aux mesures opérationnelles pour étudier leur impact sur la précision, les résultats se différencient selon le modèle de calibrage, les deux améliorent la précision du manipulateur, les valeurs de la norme de résidu sont minimums, mais il reste que les performances du calibrage basé

sur MGI sont légèrement mieux à celle de calibrage basée sur MGD (norme articulaire du calibrage à base MGI= 38.90 cm², norme articulaire du calibrage à base MGD= 48.59 cm²).

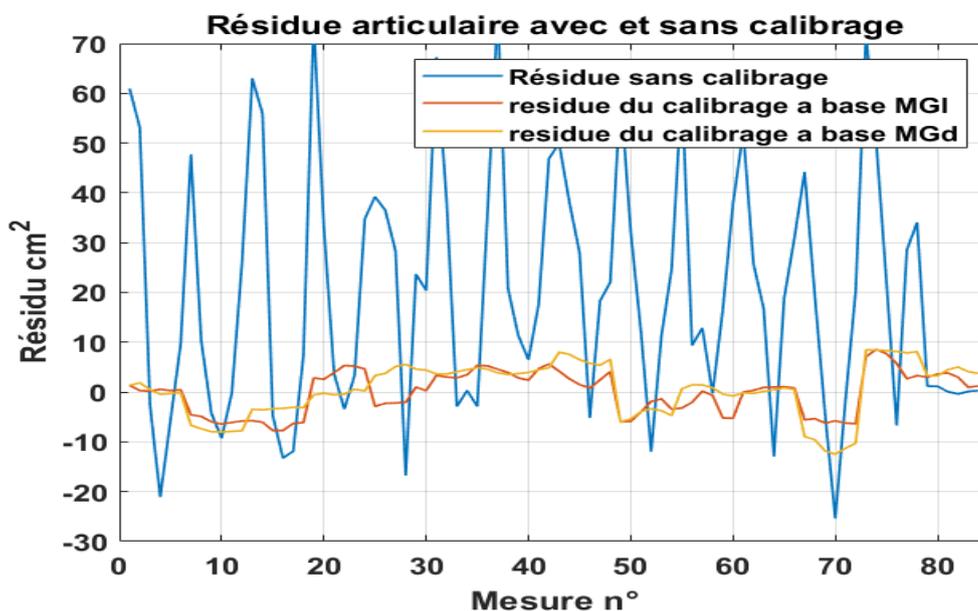


Figure III. 17 : Comparaison entre différents résidus de calibrage essai n°2.

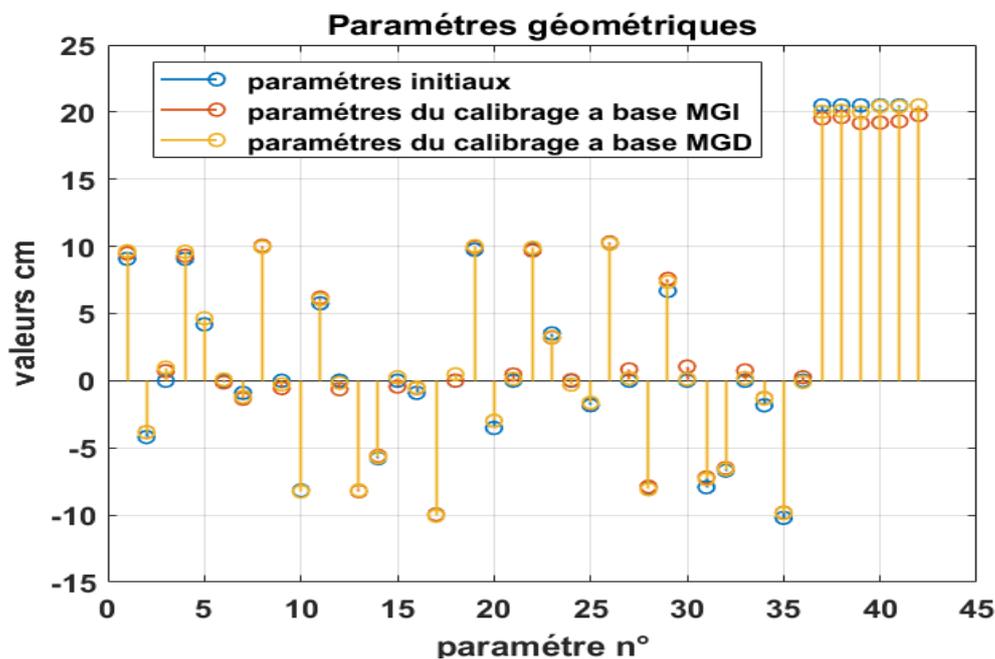


Figure III.18 : Paramètres géométriques du calibrage pour les deux modèles essai n°2.

III.6 Conclusion

Ce travail propose deux méthodes pour calibrer le manipulateur de Stewart. Ces méthodes sont basées sur la minimisation d'un résidu formulé d'après l'erreur des coordonnées opérationnelles ou bien d'après l'erreur des coordonnées articulaires, et par conséquent :

- L'étalonnage basé sur le MGI a donné des performances très satisfaites dans la simulation, dans la présence et l'absence des bruits de mesure.
- Il n'est pas nécessaire de résoudre le problème MGD de la plateforme Stewart, qui résulte dans un algorithme d'identification géométrique très efficace et robuste.
- Le modèle d'erreur qui en résulte est très **compact**.
- L'identification jacobienne est une matrice diagonale en bloc ; les paramètres d'erreur de chaque jambe peuvent donc être résolus indépendamment. De cette façon, l'efficacité numérique est assurée.
- Le calibrage à base du MGD donne des résultats acceptables, mais il est très exhaustif par rapport le temps et la complexité de calcul.
- Le calibrage à base du MGD utilise des approches itératives qu'on ne peut pas garantir toujours leur convergence.
- On peut conclure que le calibrage à base du modèle MGD est plus situé au manipulateur en série et par contre celui à base de MGI est mieux adapté au manipulateur en parallèle.



Conclusion générales

Dans ce travail, deux méthodes de calibrage géométriques adaptées aux robots parallèles et plus particulièrement aux manipulateurs Stewart sont décrites, afin de comparer leur capacité à réduire les erreurs géométriques du robot.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une introduction générale aux procédures du calibrage, aux robotiques parallèles et aux technologies de mesure, le développement des modèles géométriques directs et inverses est traité dans le deuxième chapitre.

La première méthode du calibrage est basée sur la minimisation des résidus à partir des coordonnées articulaires mesurées et des coordonnées articulaires calculées selon MGI, le problème d'identification est résolu par l'algorithme de Levenberg-Marquardt. La deuxième méthode basée sur une approche classique, utilisée dans le calibrage des robots de structure sérielle, cette approche consiste à minimiser les résidus des coordonnées opérationnelles mesurées et les coordonnées opérationnelles calculées d'après MGD, dans ce cas l'identification se fait par un algorithme de gradient. Dans le troisième chapitre nous avons procédé à leurs simulations par ordinateur.

Il faut noter que ces méthodes nécessitent des mesures de l'effecteur final qui sont effectuées à travers des capteurs externes et des mesures articulaires qui sont effectuées avec des capteurs internes.

Les deux approches montrent des performances presque similaires en l'absence et en présence du bruit de mesure, la seule différence étant le temps de calcul, qui est relativement longue pour l'étalonnage basé sur la MGD.

Ce travail a été complété par une conception d'une application Matlab utilisée pour calibrer et évaluer les manipulateurs Stewart.

Bibliographie

- Ahmet Sumnu** Simulation and PID control of a Stewart Platforme with lineair motor [Rapport]. - Gaziantep,Turkey : Department of Aircraft and Aerospace Engineering, Gaziantep University, 2016. - pp. 2-5.
- Craig J.J** Introduction to robotics : mechanics and control [Revue] // Addison Wesley, Reading, USA. - USA : [s.n.], juan 1986.
- Dombre Etienne et Khalil Wisama** Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators [Ouvrage]. - London W1T 5DX : ISTE Ltd, 2007. - 1e. - 978-1-905209-10-1.
- Duc-Hung Le [et al.]** Parameter extraction and optimization using Levenberg-Marquardt algorithm [Revue] // IEEE. - 2012. - pp. 434-437.
- Elatta A.Y [et al.]** An Overview of Robot Calibration [Revue] // Information Technology Journal 3. - 2004. - pp. 74-78.
- Hanqi Zhuang, Jiahua Yan et Oren Masory** Calibration of Stewart Platforms and Other Parallel Manipulators by Minimizing inverse Kinematics Residuals [Revue] // Journal of Robotic Systems. - 1998. - pp. 395-405.
- Harib Khalifa et Srinivasan Krishnaswamy** Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool Structures [Revue] // Robotica. - september 2003. - Vol. 21. - pp. 541-554.
- Husty M.L** An algorithm for solving the direct kinematics of Stewart-Gough type platforme [Rapport]. - Montréal, Canada : Rapport technique n TR-CIM94-7,McGill University, 1994.
- Judd Robert P et KNASINSKI B** A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification [Revue] // IEEE Transactions on Robotics and Automation. - 1990. - 1 : Vol. 6. - pp. 20-30.
- Khalil W** A new geometric notation for open and closed-loop robots [Revue] // Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation, San Francisco. - avril 1986. - pp. 1174-1180.
- Khalil Wisama et Dombre Etienne** Modeling Identification and Control of Robots [Ouvrage]. - [s.l.] : Butterworth-Heinemann, 2004. - 1e.
- Kiusalaas Jaan** Numerical Methods in Engineering with MATLAB [Ouvrage]. - cambridge : cambridge university press, 2005. - 1e : pp. 160-163. - 978-0-521-85288-3.
- Masory Oren, Wang Jian et Zhuang Hanqi** Kinematic modeling and calibration of a Stewart platform [Revue] // Advanced Robotics. - 1997. - 5 : Vol. 11. - pp. 519-539.
- Masory Oren, Wang Jian et Zhuang Hanqi** ON THE ACCURACY OF A STEWART PLATFORM - PART II - KINEMATIC CALIBRATION AND COMPENSATION [Revue] // IEEE. - 1993. - pp. 725-731.
- Merlet Jean Pierre** Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data [Rapport]. - Atlanta, USA : In: International Conference on Robotics and Automation, 1993. - pp. 200-204.
- Merlet J** Parallel robots [Rapport]. - [s.l.] : Kluwer Academic Publ. Dordrecht, The Netherland, 2000.
- Nguyen Charles C [et al.]** Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist [Revue] // Computers & Electrical Engineering. - 1991. - 17 : Vol. 3. - pp. 191-203.

Raghavan M The Stewart platform of general geometry has 40 configurations [Revue] // In : ASME Design and Automation Conference. - Chicago, USA : [s.n.], September 1991. - pp. 397-402.

Vischer peter improving the accuracy of parallel robots [Rapport] : thèse / école polytechnique fédérale de lausanne. - 1996.

Zhuang Hanqi, Masory Oren et Yan Jiahua Kinematic Calibration of a Stewart Platform Using Pose Measurements Obtained by a Single Theodolite [Revue] // IEEE. - 1995. - pp. 329-334.

Annexe A

Matrice de transformation homogène

En robotique, on associe à tout élément du poste de travail un ou plusieurs repères. Ces repères sont généralement définis de telle sorte que leurs axes et leurs origines correspondent respectivement à des directions. Le passage du repère d'origine R_i vers le repère R_k se fera par trois rotations en utilisant deux repères intermédiaires R_1 et R_2 . La figure A.1 montre le passage en trois rotations d'un repère à un autre. La chaîne de rotation élémentaire est décrite de la façon suivante :

- $R_i(O, x, y, z)$ est transformé en $R_1(O1, x1, y1, z1)$ par la rotation d'angle γ autour de Z .
- $R_1(O1, x1, y1, z1)$ est transformé en $R_2(O2, x2, y2, z2)$ par la rotation d'angle θ autour de Y .
- $R_2(O2, x2, y2, z2)$ est transformé en $R_j(O_j, x_j, y_j, z_j)$ par la rotation d'angle α autour de X .

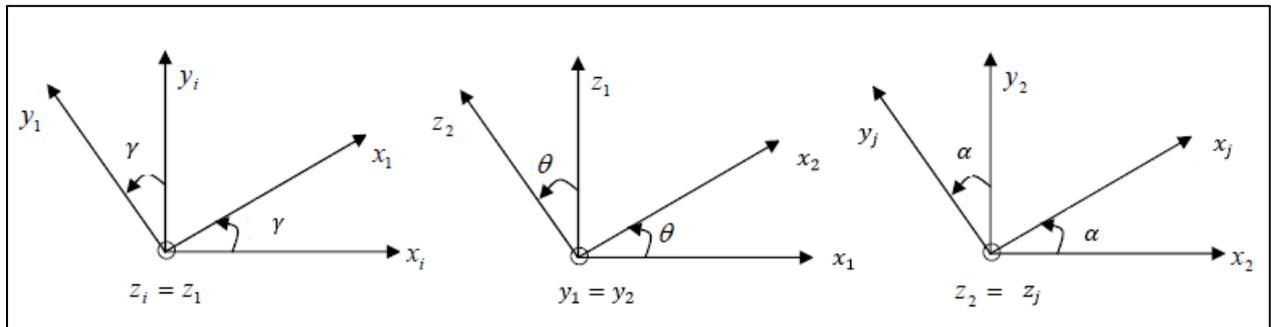


Figure A.1 : montre le passage en trois rotations d'un repère à un autre.

Nous avons dans la passage du repère $R_i(O, x, y, z)$ en repère $R_1(O1, x1, y1, z1)$ par la rotation d'angle autour de Z :

$$x1 = \cos(\gamma) x + \sin(\gamma) y + 0. z$$

$$y1 = -\sin(\gamma) x + \cos(\gamma) y + 0. z$$

$$z1 = 0. x + 0. y + z$$

Ces trois équations au-dessus peuvent être mise sous forme matricielle et nous obtenons:

$$\begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Telle que le matrice de l'équation (A.1) est la matrice de passage du repère R_1 vers le repère R_i et nous avons noté ce matrice par $R(\gamma)_z$. Le même chose pour le passage du repère $R_1(O1, x1, y1, z1)$ en repère $R_2(O2, x2, y2, z2)$ par la rotation d'angle θ autour de Y et le passage du repère $R_2(O2, x2, y2, z2)$ en repère $R_k(O_k, x_k, y_k, z_k)$ par la rotation d'angle α autour de X , on extrait dans chaque passage les trois les équation et écrire sous forme matriciel et on trouve respectivement :

$$\begin{pmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x1 \\ y1 \\ z1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{pmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Telle que ces matrices au-dessus est la matrice de passage du repère R_2 vers le repère R_1 , il est noté $R(\theta)_y$ et la matrice de passage du repère R_j vers le repère R_2 , il est noté $R(\alpha)_x$ respectivement. Le passage du repère R_i vers le repère R_j ou inversement se fait par trois rotations successives de telle sorte que tous les axes de R_j occupent des positions différentes de celle de. La matrice de passage de R_j vers R_i est donnée par le produit des trois matrices successives et noté par R , on obtient :

$$\begin{aligned} R &= R(\gamma)_z \cdot R(\theta)_y \cdot R(\alpha)_x & (\text{A.4}) \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

La multiplication matricielle $R(\gamma)_z R(\theta)_y R(\alpha)_x$ n'est pas commutative, donc différents ordres de multiplication matricielle conduiront à des résultats différents de la matrice de transformation homogène R , mais ils donnent le même résultat de passage de point dans repère R_i vers R_j . Il y a 6 combinaisons différentes possibles pour trouve la matrice homogène de transformation mais dans notre thèse on utilise la combinaison $R(\gamma)_z R(\theta)_y R(\alpha)_x$ pour trouve R .

يعالج هذا العمل مشكلة المعايرة الهندسية للروبوتات المتوازية وعلى وجه الخصوص ذات ست درجات من الحرية لنوع ستيوارت. يتم تحسين دقة الروبوتات المتوازية من خلال تحديد المعاملات الهندسية الحقيقية التي تصف سلوك الهيكل، وعدد المعاملات الهندسية للنموذج الذي تحققه هذه البنية هو 42، وتعتمد طرق المعايرة المقدمة على النموذج الهندسي المباشر والنموذج الهندسي المعكوس. تم إنشاء تطبيق ماتلاب لتنفيذ عملية المعايرة. الكلمات المفتاحية: روبوت ذو بنية متوازية ، نموذج هندسي ، معايرة هندسية مباشرة ، معايرة هندسية معكوسة.

Résumé

Ce travail traite du problème de l'étalonnage géométrique des robots parallèles et en particulier de six degrés de liberté de type Stewart. L'amélioration de la précision des robots parallèles est obtenue en déterminant les vrais paramètres géométriques décrivant le comportement de la structure, Le nombre de paramètres géométriques du modèle réalisé par cette structure est de 42, Les méthodes d'étalonnage présentées sont basées sur le modèle géométrique direct et modèle géométrique inverse. Une application MATLAB a été créée pour mettre en œuvre le processus de calibrage.

Mots clés : robot à structure parallèle, modèle géométrique, calibrage géométrique direct, calibrage géométrique inverse.

Abstract

This work deals with the problem of geometric calibration of parallel robots and in particular of six degrees of freedom of the Stewart type. The improvement of the accuracy of parallel robots is obtained by determining the true geometrical parameters describing the behavior of the structure, the number of geometrical parameters of the model realized by this structure is 42, and the calibration methods presented are based on the direct geometrical model and the inverse geometrical model. A MATLAB application has been created to implement the calibration process.

Keywords: parallel structure robot, geometric model, direct geometric calibration, inverse geometric calibration.