

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 d'Ingénieur

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique

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

Thème

**Conception et réalisation d'un robot à
structure parallèle**

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

M MERAD Loffi	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 GENERALE

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1	Introduction.....	3
I.1.1	Historique	3
I.1.2	Définition	5
I.2	Les architectures de robot parallèle	6
I.2.1	Les robots plans.....	7
I.2.2	Les robots spatiaux	8
I.3	Comparaison entre le robot parallèle et le robot série	8
I.4	Manipulateur de Stewart	10
I.4.1	Introduction	10
I.4.2	Les avantages et les limitations	11
I.5	Conclusion	12

CHAPITRE II : MODEL CAO

I.1	Introduction.....	13
II.2	Modélisation générique	13
II.2.1	Manipulateur Stewart 6-RUS	13
II.2.1.1	La description géométrique	13
II.2.1.2	Vérification du nombre de degrés de liberté.....	15
II.2.1.3	Le modèle géométrique inverse.....	16
II.2.1.4	Le modèle géométrique direct.....	18
II.2.1.5	Le modèle cinématique	19
II.2.2	Manipulateur Stewart 6-UPS	20
II.2.2.1	La description géométrique	20
II.2.2.2	Vérification du nombre de degrés de liberté.....	21
II.2.2.3	Le modèle géométrique inverse.....	21
II.2.2.4	Le modèle géométrique direct.....	22
II.2.2.5	Le modèle cinématique	23
II.3	La Structure optimal	25
II.3.1	Cas du manipulateur Stewart 6-RUS.....	27
II.3.1.1	Sélection de la structure.....	27
II.3.1.2	Obtention des dimensions optimales de Robot	28
II.3.2	Cas du manipulateur Stewart 6-UPS	30

II.3.2.1	Sélection de la structure.....	30
II.3.2.2	Obtention des dimensions optimales de Robot	31
II.4	Modèle CAO.....	32
II.4.1	Modèle CAO pour le manipulateur 6-UPS	33
II.4.2	Modèle CAO pour le manipulateur 6-RUS	35
II.5	Conclusion	36
CHAPITRE III : COMPARAISON ENTRE LES ACTIONNEURS		
III.1	Les actionneurs du robot.....	37
III.2	Généralités sur les technologies de l'actionneurs	38
III.2.1	Généralité sur le moteur courant continu	38
III.2.2	Les réducteurs.....	40
III.2.3	System vis et écrou	42
III.4	Le servomoteur	42
III.5	Actionneur électromécanique linéaire	45
III.6	Comparaison entre l'actionneur linaire et le servomoteur	46
III.7	Conclusion	48
CHAPITRE IV : COMMANDE DU MANIPULATEUR		
IV.1	Introduction.....	49
IV.2	L'asservissement des actionneurs	49
IV.2.1	Régulation de vitesse.....	50
IV.2.2	Régulation de position.....	51
IV.3	Le contrôle articulaire indépendant	53
IV.3.1	À base de modèle géométrie	53
IV.3.2	À base de modèle cinématique	55
IV.3.3	La commande cinématique adapté à la transpose du jacobien inverse.....	58
IV.3.4	Comparaison entres les commandes.....	61
IV.4	Conclusion	61
CONCLUSION GENERALE		62
BIBLIOGRAPHIE		64

Table des figures

FIGURE I.1 : PREMIER ROBOT PARALLELE SPHERIQUE, BREVETE EN 1931 (MERLET, 2006).....	3
FIGURE I.2 : (A) PREMIER ROBOT PARALLELES SPATIAL INDUSTRIEL (POLLARD , 1942), (B) LA PLATEFORME DE GOUGH-STEWART (GOUGH, ET AL., 1962).....	4
FIGURE I.3 : SCHEMA DE L'ARCHITECTURE DELTA PROPOSEE DANS LE BREVET (CLAVEL, 1990).....	5
FIGURE I.4 : LES ARCHITECTURE DES ROBOTS PLANS A DEUX DDL (MERLET, 2006).....	7
FIGURE I.5 : EXEMPLE UN MANIPULATEUR A ARCHITECTURE PLANE DE TYPE 3- RRR ET 3- R PR (MERLET , 1997). .	7
FIGURE I.6 : ROBOT PARALLELE DE TYPE SSM, TSSM ET MSSM (MERLET , 1997).	8
FIGURE I.7 : MANIPULATEUR STEWART AVEC DEUX MODELES D'ACTIONNEUR.	10
FIGURE I.8 : EXEMPLE DES APPLICATIONS DE MANIPULATEUR DE STEWART.	11
FIGURE II.1 : LA GEOMETRIE DU MANIPULATEUR DE STEWART TYPE 6-RUS.	14
FIGURE II.2 : GEOMETRIE DE LA PLATEFORME DU STEWART TYPE 6-UPS.....	21
FIGURE II.3 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME DE NEWTON RAPHSON.	23
FIGURE II.4 : SCHEMA DE LA PROCEDURE D'ACQUISITION DU VOLUME DE TRAVAIL PAR LA METHODE NUMERIQUE.	27
FIGURE II.5 : LES MANIPULATEURS 6-RUS : (A) HUNT, (B) HEXA, (C) ZAMANOV.....	28
FIGURE II.6 : ESPACE DE TRAVAIL THEORIQUE DU MANIPULATEUR 6-RUS POUR L'ORIENTATION (0,0,0).....	29
FIGURE II.8 : LES VARIANTES DU MANIPULATEURS 6-UPS.	30
FIGURE II.9 : LA STRUCTURE OPTIMISEE DU MANIPULATEUR 6-UPS.....	32
FIGURE II.10 : ESPACE DE TRAVAIL THEORIQUE DU MANIPULATEUR 6-UPS POUR L'ORIENTATION (0,0,0).....	32
FIGURE II.11 : (A) BASE FIXE, (B) PLATEFORME MOBILE.....	33
FIGURE II.12 : PARTIE FIXE ET MOBILE DE L'ACTIONNEUR LINEAIRE.....	33
FIGURE II.13 : ARTICULATION SPHERIQUE.	34
FIGURE II.14 : L'ASSEMBLAGE FINALE DU MANIPULATEUR 6-UPS.....	34
FIGURE II.15 : LES PLATEFORMES DE MANIPULATEUR STEWART 6-RUS.	35
FIGURE II.16 : (A) LE SERVOMOTEUR, (B) CACHE DE MOTEUR.	35
FIGURE II.17 : (A) LE BRAS DU SERVO MOTEUR, (B) LA TIGE.....	36
FIGURE II.18 : L'ASSEMBLAGE FINALE DU MANIPULATEUR 6-RUS.....	36
FIGURE III.1 : (A) DRONE PARROT AVEC MOTEUR BRUSHLESS, (B) ROBOT RAVIOT AVEC MCC, (C) SCARA ROBOT AVEC MOTEUR PAS A PAS.	38
FIGURE III.2 : LE SCHEMA ET LE CIRCUIT DE MOTEUR A COURANT CONTINUE (THEODORE , ET AL., 2015).	39
FIGURE III.3 : SCHEMA BLOC DE FONCTION TRANSFER DE MOTEUR CC.....	40
FIGURE III.4 : LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU REDUCTEUR DE VITESSE.....	40
FIGURE III.5 : (A) REDUCTEUR A DENTURE DROIT, (B) SYSTEME POULIES ET COURROIES CRANTEES.	41
FIGURE III.6 : SYSTEME VIS ET ECROU.	42
FIGURE III.7 : LES COMPOSANTS DU SERVOMOTEUR (ROMAIN , 2015).....	44
FIGURE III.8 : POSITION EN FONCTION DE LA PULSATION (PIERRE, 2016) (ROMAIN , 2015).	44
FIGURE III.9 : LES COMPOSANTS D'ACTIONNEUR LINEAIRE ELECTRIQUES (ZURIEL, 2018).....	45
FIGURE III.10 : LE SCHEMA BLOC DE L'ACTIONNEUR LINEAIRE ELECTROMECHANIQUE.....	46
FIGURE III.11 : (A) ACTUATEUR LINEAIRE ELECTROMECHANIQUE, (B) SERVOMOTEUR FUTUBA S3003.....	47
FIGURE IV.1 : SCHEMA BLOC DE CONTROLE ARTICULAIRE INDEPENDANT DE ROBOT 6-UPS A BASE DE MODELE GEOMETRIE.	53

FIGURE IV.2 : LA REPONSE OPERATIONNELLE DE LA COMMANDE A BASE DU MODELE GEOMETRIQUE POUR LE MANIPULATEUR DE 6-PUS.	54
FIGURE IV.3 : LA REPONSE OPERATIONNELLE DE LA COMMANDE A BASE DU MODELE GEOMETRIQUE POUR LE MANIPULATEUR DE 6-RUS.	54
FIGURE IV.5 : LA REPONSE DE SORTIE DE VARIABLE q A BASE LE MODELE CINEMATIQUE DE 6-UPS.	57
FIGURE IV.6 : LA REPONSE DE SORTIE DE VARIABLE q A BASE LE MODELE CINEMATIQUE DE 6-RUS.	57

Liste des Tableaux

TABLEAU I.1 : DES AUTRES COMPARAISONS ENTRE LE ROBOT PARALLELE ET SERIE.....	9
TABLEAU II.1 : DEGRES DE LIBERTE DES LIAISONS LES PLUS UTILISEES.	16
TABLEAU II.2 : RESULTAT D'OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUE.....	29
TABLEAU II.1 : RESULTAT D'OPTIMISATION DES PARAMETRES GEOMETRIQUE.....	31
TABLEAU III.1 : COMPARAISONS ENTRE DEUX TYPES D'ACTIONNEUR COMMERCIAUX.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLEAU IV.1 : LES PARAMETRES DE L'ACTIONNEUR LINEAIRE, DU SERVOMOTEUR ET LEURS CORRECTEUR PD.	52
TABLEAU IV.2 : LES PERFORMANCES DE LA REPONSE OPERATIONNELLE BASEE SUR LE MODELE GEOMETRIQUE POUR LES DEUX MANIPULATEURS.	55
FIGURE IV.4 : SCHEMA BLOC DE CONTROLE ARTICULAIRE INDEPENDANT DE ROBOT 6-UPS A BASE DU MODELE CINEMATIQUE.	56
TABLEAU IV.3 : LES PERFORMANCES DE LA REPONSE OPERATIONNELLE BASEE SUR LE MODELE CINEMATIQUE POUR LES DEUX MANIPULATEURS.	58
IV. 7 : SCHEMA BLOC REPRESENTA LA COMMANDE CINEMATIQUE ADAPTE A LA TRANSPOSE DU JACOBIEN INVERSE.	59
IV. 8 : LA REPONSE OPERATIONNELLE DE LA COMMANDE CINEMATIQUE MODIFIER POUR LE ROBOT 6-UPS.	59
IV. 9 : LA REPONSE OPERATIONNELLE DE LA COMMANDE CINEMATIQUE MODIFIER POUR LE ROBOT 6-RUS.	60
IV. 4 : LES PERFORMANCES DE LA REPONSE OPERATIONNELLE BASE SUR LE MODELE CINEMATIQUE MODIFIE POUR LES DEUX MANIPULATEURS.	61

Liste des Abréviations

Ddl : degré de liberté.

R : rotatif.

P : prismatique.

U : universel.

S : sphérique.

SSM : Simplified Symmetric Manipulator.

TSSM : Triangular Simplified Symmetric Manipulator.

MSSM : Minimal Simplified Symmetric Manipulator.

CAO : La conception assistée par ordinateur.

MGI : Le modèle géométrique inverse.

MGD : Le modèle géométrique direct.

GCI : l'indice de conditionnement global.

GSI : l'indice de rigidité global.

LCI : L'indice de conditionnement locale.

Vt : Volume de travail.

MCC : Le moteur à courant continue.

PWM : Pulse with modulation.

SISO : Single input single output.

PD : proportionnel-dérivé.

Introduction générale

La motivation à imiter les capacités des humains a d'abord favorisé le développement du domaine de la robotique, un robot par définition est un manipulateur multifonctionnel reprogrammable conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés par des mouvements programmés pour l'exécution d'une variété de tâches (Gu, 2013). Les robots manipulateurs actuels ont le plus souvent une architecture sérielle qui impose un empilage des axes les uns sur les autres, cette architecture limite les performances dynamiques du fait que les masses élevées sont difficiles à déplacer. Une des idées innovantes introduite la première fois en 1956 par Gough (Gough, 1956) consiste à l'utilisation des architectures parallèles ce qui allège les masses mobiles et améliore les performances cinématiques. En conséquence, les robots parallèles sont devenus l'architecture préférée pour les tâches de ramassage (ex : robot delta et hexa) car ils ont un temps de cycle plus court et une capacité à manipuler des charges plus grande que les robots séries.

L'objectif de ce travail est la conception et la simulation des deux structures parallèles à six degrés de liberté de type Stewart, La première structure est 6-RUS actionné par un servo moteur et la seconde est 6-UPS conduite par un actionneur linéaire. Le robot Stewart est utilisé dans plusieurs applications comme la simulation de vol, le positionnement des télescopes et dans la chirurgie. Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art des robots parallèles. Du fait, il présente une introduction sur la robotique parallèle, les architectures qu'ils existent et une comparaison entre les robots parallèles et séries. On discute finalement le manipulateur Stewart.

Le deuxième chapitre définit le modèle géométrique et cinématique des structures 6-RUS et 6-UPS, le choix d'architecture et l'obtention des dimensions optimales sont discutés aussi, une modélisation des pièces sera effectuée dans l'environnement SolidWorks pour les deux robots.

Le troisième chapitre traite les technologies d'actionnement qui sont utilisées dans les robots, plus particulièrement dans le manipulateur Stewart, ses composants et ses modes d'asservissements, et

fournit une comparaison fonctionnelle entre l'actionneur linéaire et le servomoteur afin de sélectionner le mode d'actionnement le plus approprié.

Le quatrième chapitre introduit la commande articulaire indépendante, où deux approches ont été utilisées pour commander la position. La première approche est basée sur les modèles géométriques et l'autre sur les modèles cinématiques, ces approches sont appliquées aux manipulateurs 6-RUS et 6-UPS.

Le mémoire se termine par une conclusion sur ce travail, qui donne une vision sur la difficulté rencontrée et les objectifs réalisés tout en indiquant les possibilités de perspectives de développement de travaux futurs.

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction

I.1.1 Historique

Les mécanismes à structure parallèle (Merlet, 2006) sont connus depuis très longtemps tel que dans les années 1800, Augustin Louis Cauchy pionnier dans l'analyse mathématique a étudié la raideur d'un « octaèdre articulé » qui est l'ancêtre de l'hexapode. Après quelques années plus tard, en 1928, Bonev rappelle que le premier brevet déposé pour un mécanisme parallèle porte sur un mécanisme sphérique destiné à être utilisé comme plateforme mobile destinée à l'industrie du divertissement (Bonev, 2003), qui est le premier robot parallèle sphérique comme la figure I.1.

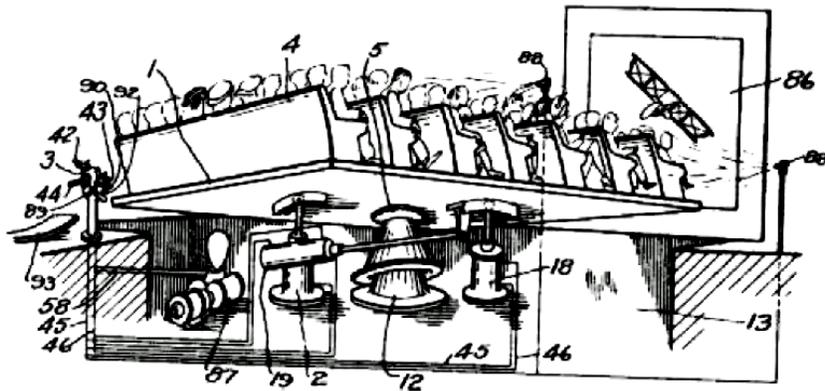


Figure I.1 : Premier robot parallèle sphérique, breveté en 1931 (Merlet, 2006).

Dix ans plus tard, Williard L.V. Pollard a conçu ce qui est considéré comme le premier robot parallèle industriel. Son fils a breveté cette invention qui n'a jamais été fabriquée. La structure mécanique de ce robot représentée en (Figure I.2-a), consiste en trois bras, très similaires au robot Delta.

Plus tard, la plateforme de robot parallèle de Gough se développe dans le domaine industriel. Il s'agit du premier robot parallèle industriel pour une plateforme hexapode en forme d'octaèdre et la fabrication de cet hexapode est de tester les pneus sous les efforts combinés de plusieurs charges

pour la société Dunlop. Le premier exemple a été produit en 1954 (figure I.2-b), qui est maintenant devenu l'un des robots parallèles les plus étendus au niveau industriel.

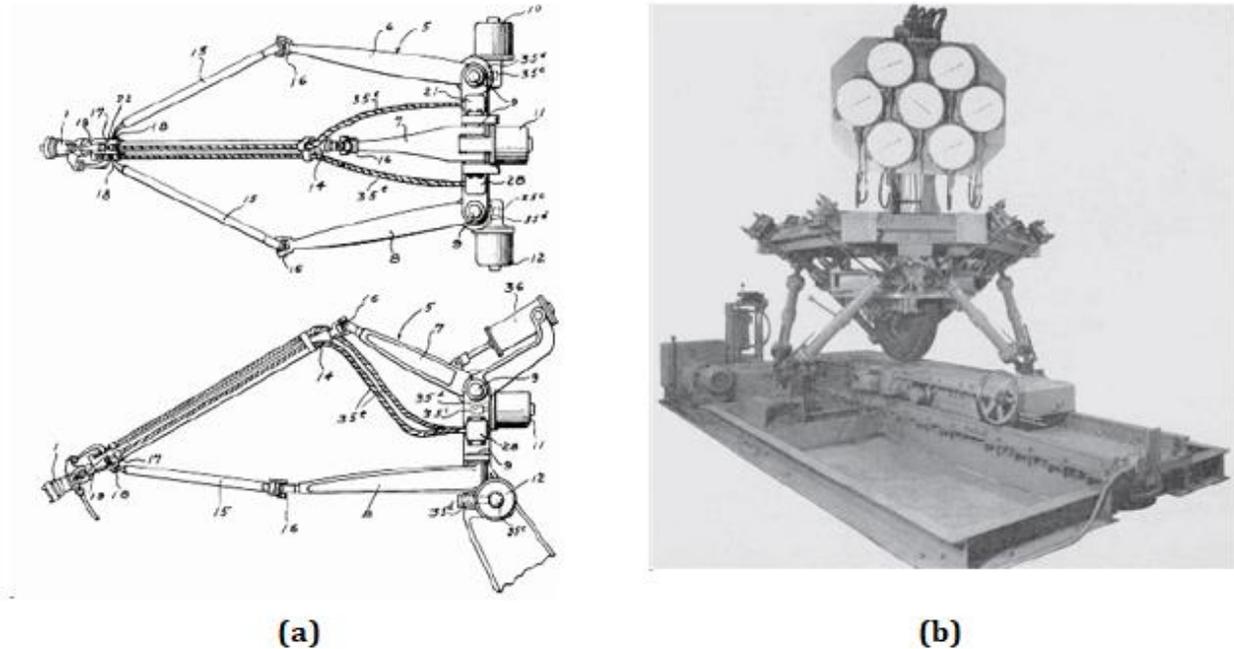


Figure I.2 : (a) Premier robot parallèles spatial industriel (Pollard, 1942), (b) La plateforme de Gough-Stewart (Gough, et al., 1962).

Après les années soixante, le Dr Stewart a proposé un manipulateur avec six degrés de liberté pour effectuer la simulation de vol qu'il a construite, Il serait renommé « plateforme de Stewart » (Stewart, 1965). Le développement des plateformes Gough-Stewart crée un grand nombre de cinématiques différentes de robots parallèles dans divers domaines: électronique, alimentaire et pharmaceutique.

Puis dans les années 80, le professeur Clavel a inventé un premier robot parallèle léger et ne se déplace qu'en trois translations (figure I.3), est appelé le robot Delta (Clavel, 1990), qui à ce jour est le robot le plus parallèle vendu dans le monde. Il a été conçu pour des applications à très grande vitesse de déplacement de faibles masses et le meilleur exemple de robot parallèle ayant une architecture proche du robot delta et commercialisable est le robot Par4.

Aujourd'hui, nous trouvons de nombreuses utilisations du parallélisme dans l'industrie, et la plupart des applications commerciales sont basées sur deux architectures bien connues: la plateforme Gough-Stewart et le robot Delta.

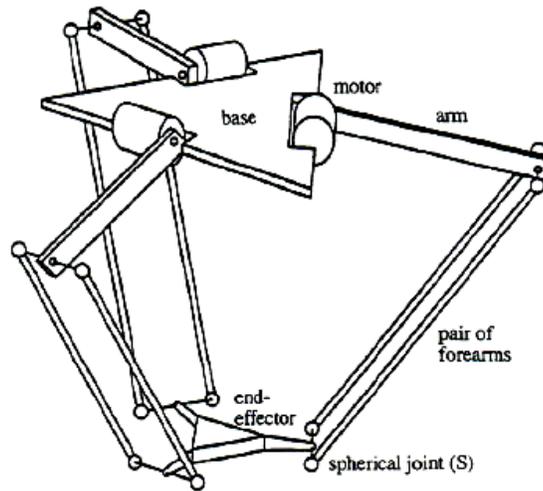


Figure I.3 : Schéma de l'architecture Delta proposée dans le brevet (Clavel, 1990).

I.1.2 Définition

Le robot du type manipulateur est un mécanisme de chaîne cinématique peut être fermé ou ouvert. Il constitue normalement d'un, ou plusieurs, jambes qui sont reliées par une articulation assurant une rotation ou une translation relative entre lui. Il possède une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Le but est de l'introduire dans une variété d'applications et de tâches de manière cyclique, et de l'adapter à d'autres fonctions sans avoir besoin de modifier en permanence le matériel. Il peut être commandé 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.). Généralement ce type de robot est composé de quatre parties principales :

- Partie physique : qui sera le squelette du robot. En général elle constitue par ensemble des jambes et des articulations (articulation sphérique, prismatique...etc.).
- Partie puissance : est représenté par des moteurs, dont les plus utilisés sont les actionneurs linéaires, les servomoteurs et les moteurs pas à pas. Ils permettront au robot d'effectuer réellement ses actions qui seront émises par la partie commande en interaction avec les informations transmises par les capteurs.
- Partie mesure : correspond aux différents capteurs sensoriels équipant le robot pour une application particulière comme capteur de position, fin de parcours ...etc.

- Partie commande : C'est cette partie qui va permettre au robot d'analyser les données provenant des capteurs et d'envoyer les ordres relatifs aux moteurs via des microcontrôleurs comme Arduino, PIC, AVR ...etc.

Le choix d'un manipulateur robot est basé sur des paramètres et il est en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre :

- L'architecture et le choix de structure de robot.
- La charge transportable et la masse du robot.
- L'espace de travail qui correspond au volume total parcouru par l'effecteur et que le robot peut atteindre via au moins une orientation.
- La fiabilité, la répétabilité et la précision.
- La vitesse de déplacement qui dépend à vitesse maximum de moteur et accélération et erreur de vitesse.
- Le coût du robot qui dépend de la précision de robot et l'application que peut faire le robot.
- La maintenance de robot.

Le manipulateur de structure parallèle est un mécanisme à chaîne cinématique fermée. Il contient en général deux plateformes parallèles : l'une est la plateforme dont l'organe terminal est connecté, elle présente la partie mobile du robot et toutes les études dynamiques et cinématiques sont effectuées par rapport à cette dernière, l'autre est la base qui présente la partie fixe du robot. 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 d'actionneurs linéaires ou rotatifs, d'articulations prismatiques, rotoïdes ou sphériques. Il existe un grand nombre de cinématiques différentes de robots parallèles et leurs applications possibles sont nombreuses: simulateur de vol, machine-outil, robot de prise et dépose, positionneur de haute précision, robot médical, etc. Aujourd'hui encore, de nouveaux domaines s'ouvrent pour ces robots notamment grâce à la recherche sur les robots à câbles ou les robots ultra rapides.

I.2 Les architectures de robot parallèle

Un grand nombre de manipulateurs d'architecture parallèle peut être obtenu en faisant varier le nombre et la topologie des chaînes cinématiques du manipulateur (Merlet, 1997). Pratiquement,

on distingue deux catégories des robots parallèles, les robots planaires et les robots spatiaux. Chaque catégorie ayant leur nombre de degrés de liberté (ddl) maximum qu'est support.

I.2.1 Les robots plans

Un manipulateur plan est soit à deux ddl soit à trois ddl. Généralement, les architectures des robots plans à deux ddl les plus utilisés (Merlet, 2006) contient deux chaînes connectées les uns aux autres par une articulation du type rotoïde passive. Pour assurer deux mouvements de translation autour de la normale au plan. Chaque chaîne contient deux articulations du type rotoïde et prismatique active. Tel que les articulations prismatiques passives sont évitées car elles introduisent du jeu et des risques d'arc-boutement. Ces architectures sont représentées dans la figure I.4.

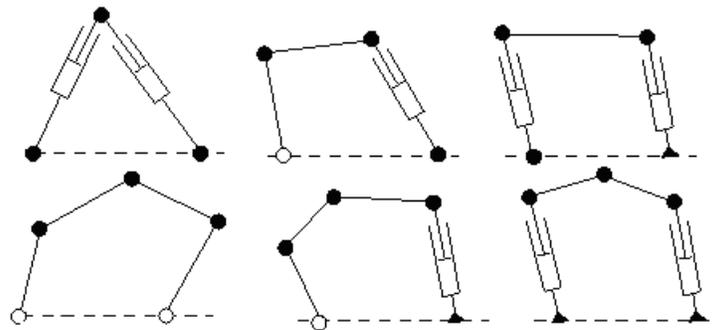


Figure I.4 : les architecture des robots plans à deux ddl (Merlet, 2006).

Pour le robot plan à trois ddl est constitué généralement d'une plateforme mobile reliée par trois chaînes cinématiques identiques. Dont cette plateforme constitue à deux mouvements de translation et une rotation autour de la normale au plan. Chaque chaîne contient trois articulations qui peuvent être, soit du type rotoïde, soit du type prismatique.

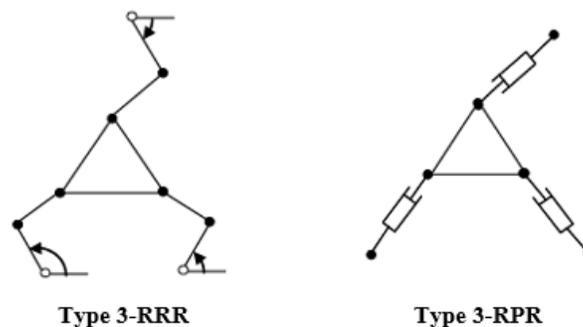


Figure I.5 : Exemple un manipulateur à architecture plane de type 3- RRR et 3- RPR (Merlet , 1997).

I.2.2 Les robots spatiaux

Les manipulateurs spatiaux sont constitués d'une plateforme et d'une base qui sont reliées entre elles par des chaînes cinématiques identiques transmettant de trois à six degrés de liberté à la plateforme. Le plus connu des robots à trois degrés de liberté en translation pure est le Delta et pour six degrés liberté est la plateforme de Gough- Stewart. Merlet décrit trois concepts de structures à six degrés de liberté avec base et une plateforme reliée entre elles par six actionneurs linéaires (Merlet , 1997) (Figure I.6) :

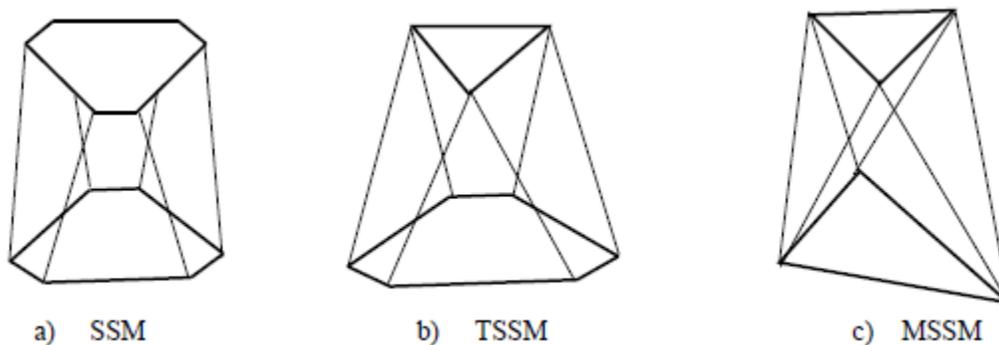


Figure I.6 : robot parallèle de type SSM, TSSM et MSSM (Merlet , 1997).

I.3 Comparaison entre le robot parallèle et le robot série

Les robots série, à l'inverse des structures parallèles, on parle de chaînes cinématiques ouvertes. C'est-à-dire que les éléments constitutifs du robot sont agencés les uns à la suite des autres un peu à l'image d'un bras humain. Les principaux critères de comparaison entre le robot parallèle et série sont le volume de travail, le rapport (*masse transportable / masse du robot*), la précision et le model géométrie :

- **Volume de travail** : le volume de travail pour l'architecture des robots parallèle est faible par rapport les robots série.
- **Rapport (*masse transportable / masse robot*)** : dans le robot sérié, l'effecteur et l'objet manipulé se situent à l'extrémité de la chaîne mécanique articulée. Chaque actionneur doit avoir la puissance nécessaire pour mettre en mouvement non seulement l'objet, mais aussi les corps et les actionneurs aval. Ce qui conduit à un faible rapport masse transportable / masse robot. Pour les robots parallèles la charge transportable est divisé sur

le nombre de leurs jambes, ce qui conduit un rapport (*masse transportable / masse robot*) plus élevé.

- **Précision et répétabilité** : L'architecture même des robots de type série pose le problème de l'accumulation des erreurs. Une erreur de positionnement sur chaque articulation ayant une répercussion sur la position de l'effecteur. La mise en série des articulations implique aussi la mise en série de leurs défauts (jeux, frottements, flexion des corps...). Les robots parallèles sont moins sensibles aux erreurs de position des actionneurs car les actionneurs dans chaque jambe sont indépendants aux autres.
- **Comportement dynamique** : le rapport (*masse transportable / masse robot*) est faible dans les robots de types série, donc ils ont des performances dynamiques limitées. Par contre le robot parallèle contient des performances dynamiques élevées.

Le tableau (I.1) montre une comparaison entre les robots parallèles et les robots séries sur la base d'autres critères:

Critères de comparaison	Robots parallèles	Robots série	
Rigidité	Grand	Faible	
Masse mobile (inertie)	Faible	Grand	
Volume de travail	Faible	Grand	
Singularité dans l'espace de travail	Présence de singularité	Rare	
Obtention du modèle géométrique direct	Difficile	Simple	
Obtention du modèle géométrique inverse	Simple	Difficile	
Réalisation	Simple	Difficile	

Tableau I.1 : Des autres comparaisons entre le robot parallèle et série.

I.4 Manipulateur de Stewart

I.4.1 Introduction

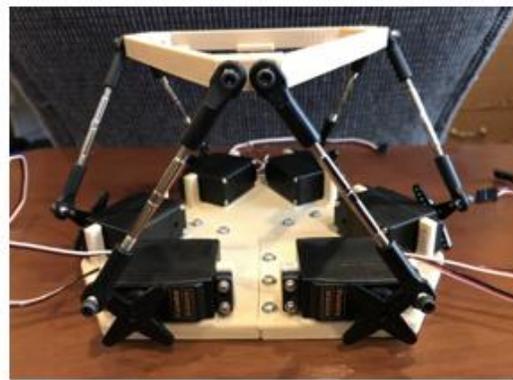
Comme nous l'avons noté précédemment, les hexapodes ont été les premiers robots parallèles industrialisés. Il existe plusieurs formes d'architectures parallèles du type hexapode et la plus répandue est la plateforme de Gough-Stewart. Elle est l'une des architectures parallèles la plus étudiée et la plus reproduite dans le monde universitaire ainsi que dans le monde industriel. Dans ce travail, on parle sur la plateforme de Stewart qui est la famille des manipulateurs parallèles à six ddl. Elle est composée par une base fixe et une plateforme mobile qui sont reliées par six jambes extensibles identiques. On trouve deux modèles de plateforme Stewart (Figure I.7), qui sont :

- Plateforme Stewart 6-UPS.
- Plateforme Stewart 6-RUS.

La plateforme Stewart à base des actionneurs linéaires (6-UPS) contient des jambes qui peuvent être des actionneurs linéaires électromécaniques, hydrauliques ou pneumatiques. Elles sont reliées à la base et à la plateforme par une articulation universelle et sphérique respectivement. Et pour le modèle à base des actionneurs rotatifs (6-RUS), les actionneurs sont généralement des servomoteurs qui sont fixé dans la base et le bras de servo est relié avec une tige par une articulation universelle. La tige est reliée avec la plateforme mobile par une articulation sphérique. En jouant avec la disposition des articulations, on peut obtenir d'autres architectures qui produisent le même mouvement.



Stewart plat-forme avec actuateur linéaire



Stewart plat-forme avec servo moteur

Figure I.7 : Manipulateur Stewart avec deux modèles d'actionneur.

La plateforme de Stewart est connue dans plusieurs applications. La figure I.8 permet d'avoir un aperçu des certaines applications. Il a été utilisée dans différents domaines (Génoüël, 2010), qui sont :

- En aéronautique, dans le positionnement de télescopes, dans les simulateurs de vol et de conduite d'engins spatiaux.
- Dans le domaine médical et la chirurgie orthopédique.
- En cinématographie, dans les sièges de cinéma dynamique.
- En productique, usinage et dans certaines machines-outils (l'hexapode de CMW).
- Dans la recherche, avec le système de positionnement de la chambre d'expérience du laser le plus puissant du monde : le laser Mégajoule.



Simulateur de vol



le positionnement de télescopes



La chirurgie orthopédique

Figure I.8 : Exemple des applications de manipulateur de Stewart.

I.4.2 Les avantages et les limitations

La plateforme de Stewart contient plusieurs avantages, qui sont :

- Architecture avec possibilité de mouvement dynamique élevé (accélérations élevées).
- Une bonne rigidité mécanique et précision élevée.
- La présence de plusieurs composants identiques sur le robot facilite la construction mécanique et l'intégration des capteurs.
- Maintenance simple et facile
- Capacité de charge élevée.

Par contre de leurs avantages, la plateforme Stewart contient aussi des limitations :

- Un volume de travail faible.
- Présence de nombreuses singularités dans leur espace de travail.
- Leur modèle géométrique directe est complexe.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'histoire du développement des robots parallèles. Ainsi que les architectures les plus utilisées. Puis les manipulateurs parallèles et série ont été comparés. Nous concluons ce chapitre par une présentation du manipulateur de Stewart et de ses différents domaines d'application, mettant en évidence ces avantages et limitations.

Chapitre II : Model CAO

I.1 Introduction

Ce chapitre traite du problème de la conception de robots parallèles. Nous devons d'abord choisir l'architecture mécanique. Ensuite, nous devons déterminer les dimensions du robot afin qu'il soit le plus conforme possible aux performances requises pour la tâche à accomplir. La réalisation du robot nécessite une étude statique et cinématique pour répondre aux besoins et aux objectifs du robot. Tout d'abord, on va faire une étude simplifier des performances cinématiques. C'est-à-dire tout ce qui concerne à la fois l'espace de travail et la dextérité, concernant la partie statique du robot en suppose que les actionneurs disponibles produiront une force et un couple suffisant pour répondre à la charge. Nous étudierons deux manipulateurs parallèles Stewart 6-UPS et 6-RUS. Afin de déterminer la structure de travail la plus appropriée, en va finaliser le chapitre par un modèle CAO de ces deux robots.

II.2 Modélisation générique

Dans cette partie en va développer les modèles cinématiques et géométriques pour les deux topologies commençant par la topologie 6-RUS (articulation rotative-sphérique-universelle). Puis la topologie 6-UPS (articulation universelle-prismatique-sphérique).

II.2.1 Manipulateur Stewart 6-RUS

II.2.1.1 La description géométrique

Le schéma d'un manipulateur Stewart de type 6-RUS est présenté à la figure II.1. O et O' sont les centres de coordonnées reliés à la plateforme fixe et mobile, respectivement. Les articulations révolues, universelles et sphériques de l' i -^{ème} branche sont représentées par B_i , A_i et P_i respectivement. La longueur du bras qui est liée entre l'articulation B_i et A_i , est notée a_i , la longueur de la tige qui est liée entre l'articulation A_i et P_i , est noté s_i . En outre, les rayons des plateformes fixes et mobiles sont respectivement r_b et r_p . σ_i est l'angle entre OB_i et l'image de la ligne A_iP_i sur la base. Les angles entre les articulations de la base fixe et entre les articulations de

la plateforme mobile sont θ_b et θ_p , respectivement. Comme on peut l'observer, le vecteur constructeur du manipulateur 6-RUS comprend 7 paramètres :

$\vartheta_{RUS} = [r_b \ r_p \ \theta_b \ \theta_p \ a_i \ s_i \ \sigma_i]$, on va noter les variables articulaires par φ_i .

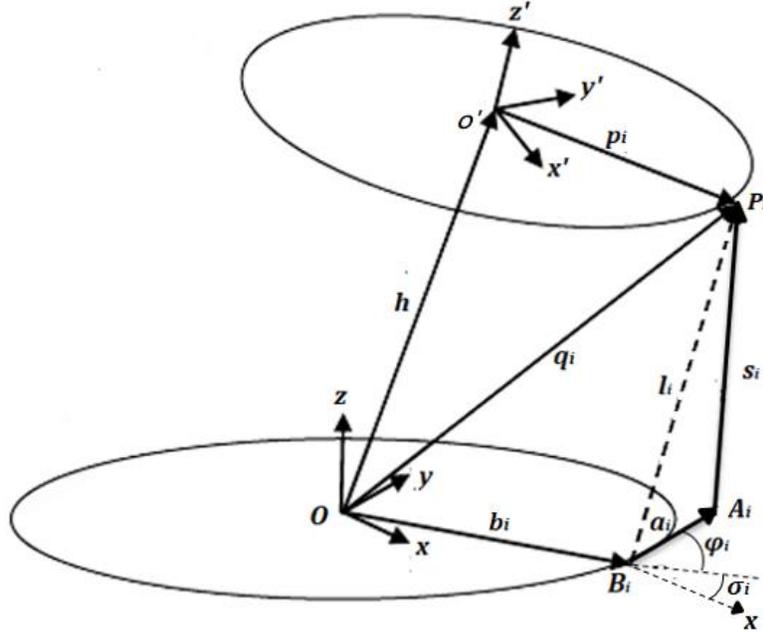


Figure II.1 : la géométrie du manipulateur de Stewart type 6-RUS.

Afin de simplifier le processus de modélisation, il est nécessaire de définir la position du point actif à partir du vecteur constructeur en reliant chaque position à un référentiel approprié. Ces points sont les suivants:

- Les coordonnées du point B_i qui sont écrites en fonction du θ_b dans le repère $R_b = (o, x, y, z)$, telle que :

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

$$\theta_b = \left[-\frac{\theta_b}{2} \quad \frac{\theta_b}{2} \quad 120 - \frac{\theta_b}{2} \quad 120 + \frac{\theta_b}{2} \quad -120 - \frac{\theta_b}{2} \quad -120 + \frac{\theta_b}{2} \right] \quad (\text{II.2})$$

- Les coordonnées du point P_i qui s'écrit en fonction du θ_p dans le repère $R_p = (o', x', y', z')$ telle que :

$${}^P P_i = \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p \cos \theta_{pi} \\ r_p \sin \theta_{pi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\theta_p = \left[-\frac{\theta_p}{2} \quad \frac{\theta_p}{2} \quad 120 - \frac{\theta_p}{2} \quad 120 + \frac{\theta_p}{2} \quad -120 - \frac{\theta_p}{2} \quad -120 + \frac{\theta_p}{2} \right] \quad (\text{II.4})$$

- Les coordonnées du point P_i dans le repère P_B telle que :

$${}^B P_i = h + R {}^P P_i \quad (\text{II.5})$$

Où $h = (x \ y \ z)^T$ est le vecteur de translation du R_P par rapport R_B , et R est la matrice de transformation homogène écrit comme suit :

$$\begin{aligned} R &= R(\gamma)_z \cdot R(\theta)_y \cdot R(\alpha)_x \quad (\text{II.6}) \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 0 \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\gamma)\cos(\theta) & -\sin(\gamma)\cos(\alpha) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\alpha) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\alpha) \\ \sin(\gamma)\cos(\theta) & \cos(\gamma)\cos(\alpha) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\sin(\alpha) & -\cos(\gamma)\sin(\alpha) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\alpha) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\alpha) & \cos(\theta)\cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (\text{II.7}) \end{aligned}$$

On peut exprimer les coordonnées du point A_i dans le repère R_B en fonction de B_i , φ_i et σ_i telle que :

$${}^B A_i = \begin{pmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \\ a_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i a \cos(\varphi_i) \cos(\sigma_i) + b_{ix} \\ a_i \cos(\varphi_i) \cos(\sigma_i) + b_{iy} \\ a_i \sin(\varphi_i) + b_{iz} \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Où

$$\begin{aligned} \sigma_i &= [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3 \ \sigma_4 \ \sigma_5 \ \sigma_6] \quad (\text{II.9}) \\ &= [-\sigma \ \sigma \ 120 - \sigma \ 120 + \sigma \ 240 - \sigma \ -240 + \sigma] \end{aligned}$$

et φ_i c'est la variable articulaire.

II.2.1.2 Vérification du nombre de degré de liberté

Afin de vérifier le degré de liberté (ddl) du robot, la formule de mobilité de Grübler (Kevin M. Lynch, et al., 2017) est utilisée :

$$dl = m(N - 1 - J) + \sum_{i=1}^J f_i \quad (\text{II.10})$$

Telle que m c'est le type du mécanisme de système, si le mécanisme est planaire, $m = 3$, si le mécanisme est spatial, $m = 6$. N c'est le nombre d'organes rigides dans le système. J et f sont respectivement le nombre d'articulations et leurs degrés de liberté.

Type de liaison	rotatif	universelle	prismatique	cylindrique	sphérique
Nb de degré de liberté	1	2	1	2	3

Tableau II.1 : degrés de liberté des liaisons les plus utilisées.

Dans chaque chaîne cinématique $B_i P_i$, il y a deux organes rigides et 3 articulations avec des degrés de mobilité égale à 6. La topologie 6-RUS contient en totale 14 organes rigides indépendants, 18 articulations et 36. Correspond aux degrés de liberté des toutes les liaisons. Selon la formule de mobilité, le nombre de degrés de liberté de cette topologie est de 6.

$$dl = 6(14 - 1 - 18) + 6 * 6 = 6 \quad (\text{II.11})$$

II.2.1.3 Le modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet d'écrire les coordonnées articulaires φ en fonction des coordonnées opérationnelles q , tel que :

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

D'après (figure II.1) on a :

$$a_i^2 = \|A_i B_i\|^2 \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{aligned} &= (a_{ix} - b_{ix})^2 + (a_{iy} - b_{iy})^2 + (a_{iz} - b_{iz})^2 \\ &= (a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2) + (b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) - 2(a_{ix}b_{ix} + a_{iy}b_{iy} + a_{iz}b_{iz}) \end{aligned}$$

$$l_i^2 = \|B_i^b P_i\|^2 \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{aligned} &= (p_{ix} - b_{ix})^2 + (p_{iy} - b_{iy})^2 + (p_{iz} - b_{iz})^2 \\ &= (p_{ix}^2 + p_{iy}^2 + p_{iz}^2) + (b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) - 2(p_{ix}b_{ix} + p_{iy}b_{iy} + p_{iz}b_{iz}) \end{aligned}$$

$$s_i^2 = \|A_i^b P_i\|^2 \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{aligned}
&= (p_{ix} - a_{ix})^2 + (p_{iy} - a_{iy})^2 + (p_{iz} - a_{iz})^2 \\
&= (p_{ix}^2 + p_{iy}^2 + p_{iz}^2) + (a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2) - 2(p_{ix}a_{ix} + p_{iy}a_{iy} + p_{iz}a_{iz})
\end{aligned}$$

Si on remplace l'équations (II.13) et (II.14) dans (II.15) on trouve :

$$\begin{aligned}
s_i^2 &= l_i^2 - (b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) + 2(p_{ix}b_{ix} + p_{iy}b_{iy} + p_{iz}b_{iz}) + a_i^2 \\
&\quad - (b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) + 2(a_{ix}b_{ix} + a_{iy}b_{iy} + a_{iz}b_{iz}) - 2(p_{ix}a_{ix} \\
&\quad + p_{iy}a_{iy} + p_{iz}a_{iz})
\end{aligned} \tag{II.16}$$

$$\begin{aligned}
l_i^2 - (s_i^2 - a_i^2) &= 2(b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) + 2a_{ix}(p_{ix} - b_{ix}) + 2a_{iy}(p_{iy} - b_{iy}) \\
&\quad + 2a_{iz}(p_{iz} - b_{iz}) - 2(p_{ix}b_{ix} + p_{iy}b_{iy} + p_{iz}b_{iz}) \\
&= 2(b_{ix}^2 + b_{iy}^2 + b_{iz}^2) + 2(a \cdot \cos(\varphi_i) \cos(\sigma_i) + b_{ix})(p_{ix} - b_{ix}) \\
&\quad + 2(a \cdot \cos(\varphi_i) \sin(\sigma_i) + b_{iy})(p_{iy} - b_{iy}) + 2(a \cdot \sin(\varphi_i))(p_{iz} - b_{iz}) \\
&\quad - 2(p_{ix}b_{ix} + p_{iy}b_{iy} + p_{iz}b_{iz}) \\
&= 2a \cdot \sin(\varphi_i) (p_{iz} - b_{iz}) + 2a \cdot \cos(\varphi_i) \cos(\sigma_i) (p_{ix} - b_{ix}) + \\
&\quad 2a \cdot \cos(\varphi_i) \sin(\sigma_i) (p_{iy} - b_{iy})
\end{aligned} \tag{II.17}$$

À partir l'équation (II.17) on trouve :

$$\begin{aligned}
l_i^2 - (s_i^2 - a_i^2) &= 2a \cdot \sin(\varphi_i)(p_{iz} - b_{iz}) \\
&\quad + 2a \cdot \cos(\varphi_i)[\cos(\sigma_i) (p_{ix} - b_{ix}) + \sin(\sigma_i) (p_{iy} - b_{iy})]
\end{aligned} \tag{II.18}$$

Nous avons écrit (II.18) comme suit :

$$D = M \cdot \sin(\varphi) + N \cdot \cos(\varphi) \tag{II.19}$$

Tel que :

$$D = l_i^2 - (s_i^2 - a_i^2) \tag{II.20}$$

$$M = 2a(p_{iz} - b_{iz}) \tag{II.21}$$

$$N = 2a[\cos(\sigma_i) \cdot (p_{ix} - b_{ix}) + \sin(\sigma_i) (p_{iy} - b_{iy})] \tag{II.22}$$

Mathématiquement l'équation (II.19) est équivalent à ceci :

$$M \cdot \sin(\varphi) + N \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{M^2 + N^2} \sin\left(\varphi + \tan^{-1}\left(\frac{N}{M}\right)\right) \tag{II.23}$$

Car si considère la relation suivante :

$$A^2 + B^2 = C^2 \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{A^2}{C^2} + \frac{B^2}{C^2} = 1 \quad (\text{II.25})$$

En peut trouver un angle β tel que $\cos(\beta) = \frac{A}{C}$ et $\sin(\beta) = \frac{B}{C}$.

Si on remplace l'équation (II.25) dans la relation trigonométrique (II.26) on obtient l'équation (II.27)

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \cos(\alpha) \sin(\beta) \quad (\text{II.26})$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \frac{A}{C} \sin(\alpha) + \frac{B}{C} \cos(\alpha) \quad (\text{II.27})$$

$$C \sin(\alpha + \beta) = A \sin(\alpha) + B \cos(\alpha) \quad (\text{II.28})$$

où $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$ et $C = \sqrt{A^2 + B^2}$.

Et en fin l'angle de servomoteur φ_i est calculé de manière suivant :

$$\varphi_i = \arcsin\left(\frac{D}{\sqrt{M^2 + N^2}}\right) - \arctan\left(\frac{N}{M}\right) \quad (\text{II.29})$$

Pour $i = 1, 2, \dots, 6$.

L'équation (II.29) représente la solution de modèle géométrique inverse dans le sens de trouve l'angle de servomoteur φ_i pour $i = 1, 2, \dots, 6$ en fonction des coordonnées opérationnelles $q = (x \ y \ z \ \alpha \ \theta \ \gamma)$.

II.2.1.4 Le modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) permet de trouver les coordonnées opérationnelles q en fonction des coordonnées articulaires φ :

$$q = f(\varphi) \quad (\text{II.30})$$

Afin d'extraire le MGD du manipulateur Stewart 6-RUS nous avons utilisé la méthode quasi-Gough (Rui, et al., 2015) basée sur l'algorithme de Newton-Raphson. La seule chose à changer est d'assigner le point d'articulation A_i attaché au servomoteur comme nouveau paramètre géométrique de la base B_i et de fixer les coordonnées de l'articulation prismatique à la longueur s_i . Le reste de l'algorithme est le même (Voir section II.2.4).

II.2.1.5 Le modèle cinématique

Le modèle cinématique inverse décrit les vitesses angulaires $\dot{\varphi}_i \in R^m$ en fonction de vitesse de la plateforme mobile $\dot{q} \in R^n$, veuillez noter :

$$\dot{\varphi}_i = J(q) \cdot \dot{q} \quad (\text{II.31})$$

Où $J(q)$ désigne la matrice Jacobienne.

Pour extraire la matrice Jacobienne (Erfan, et al.) il faut obtenir l'équation du carré de la longueur s_i :

Pour $i = 1, 2, \dots, 6$.

$$({}^B P_i - A_i) \cdot ({}^B P_i - A_i)^T = s_i^2 \quad (\text{II.32})$$

En remplaçant l'équation (II.5) dans l'équation (II.32), nous aurons:

$$(h + R \cdot {}^P P_i - A_i) \cdot (h + R \cdot {}^P P_i - A_i)^T = s_i^2 \quad (\text{II.33})$$

On dérive l'équation (II.33), l'équation suivante peut être obtenue:

$$\lambda_i^T \dot{h} + \lambda_i^T \dot{R} \cdot {}^P P_i - \lambda_i^T \dot{A}_i = 0 \quad (\text{II.34})$$

Quand λ_i et \dot{R} est défini comme suite :

$$\lambda_i = h + R \cdot {}^P P_i - A_i \quad \text{et} \quad \dot{R} = w \wedge R \quad (\text{II.35})$$

Où w est la vitesse angulaire (voir dans l'équation II.52). De plus, \dot{A}_i s'écrit:

$$\dot{A}_i = a_i \dot{\varphi} \begin{pmatrix} -\sin(\varphi_i) \cos(\sigma_i) \\ -\sin(\varphi_i) \sin(\sigma_i) \\ \cos(\varphi_i) \end{pmatrix} \quad (\text{II.36})$$

On remplace (II.35) et (II.36) dans (II.34), on trouve :

$$\lambda_i^T \dot{h} + (R \cdot {}^P P_i \wedge \lambda_i)^T w = \lambda_{qi} \dot{\varphi} \quad (\text{II.37})$$

Où λ_{qi} donne comme suite :

$$\lambda_{qi} = \lambda_i^T a_i \begin{pmatrix} -\sin(\varphi_i) \cos(\sigma_i) \\ -\sin(\varphi_i) \sin(\sigma_i) \\ \cos(\varphi_i) \end{pmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Enfin, la relation entre le vecteur vitesse de la plateforme mobile \dot{q} et le vecteur de vitesse angulaire de servomoteur $\dot{\varphi}$ est obtenues dans l'équation (II.39) :

$$\dot{\varphi} = J_q^{-1} \cdot J_x \cdot J_w \dot{q} \quad (\text{II.39})$$

Tel que

$$J_x = \begin{pmatrix} \lambda_1^T & (R.^P P_1 \wedge \lambda_1)^T \\ \lambda_2^T & (R.^P P_2 \wedge \lambda_2)^T \\ \vdots & \vdots \\ \lambda_6^T & (R.^P P_6 \wedge \lambda_6)^T \end{pmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$J_q = \text{diag}[\lambda_{q1} \ \lambda_{q2} \ \lambda_{q3} \ \lambda_{q4} \ \lambda_{q5} \ \lambda_{q6}] \quad (\text{II.41})$$

$$J_w = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0 & 0 \\ \cos(\theta) \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 & 0 \\ 0_{3 \times 3} & \cos(\theta) \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Tel que J_w est la matrice Jacobienne, qui permettaient d'utiliser l'angle d'Euler. Donc l'expression finale de la jacobienne de la cinématique inverse donnée comme suite :

$$J(q)^{-1} = J_q^{-1} \cdot J_x \cdot J_w \quad (\text{II.43})$$

Le modèle cinématique direct exprime la vitesse de la plate-forme \dot{q} en fonction les vitesses angulaire $\dot{\varphi}$ qui s'écrit :

$$\dot{q} = J(q) \cdot \dot{\varphi} \quad (\text{II.44})$$

Pour trouver la matrice Jacobienne du modèle cinématique direct $J(q)$, nous inversons la matrice Jacobienne du modèle cinématique inverse.

II.2.2 Manipulateur Stewart 6-UPS

II.2.2.1 La description géométrique

Le schéma d'un manipulateur Stewart de type 6-RUS est présenté à la figure (II.2), O et O' sont les centres de coordonnées reliés à la plateforme fixe et mobile, respectivement. Les articulations universelles et sphériques de la branche i sont représentées par B_i et P_i respectivement. La longueur du bras qui est liée entre ces deux articulations est notée l_i . En outre, les rayons des plateformes fixes et mobiles sont respectivement r_b et r_p . Les angles entre les articulations de la base fixe et entre les articulations de la plateforme mobile sont θ_b et θ_p , respectivement. Comme on peut l'observer, le vecteur constructeur du manipulateur 6-UPS comprend 5 paramètres : $\vartheta_{\text{UPS}} = [r_b \ r_p \ \theta_b \ \theta_p \ l]$. Les coordonnées des points ${}^B B_i$, ${}^P P_i$ et ${}^B P_i$ sont identiques à celles du manipulateur 6-RUS (II.1.1)

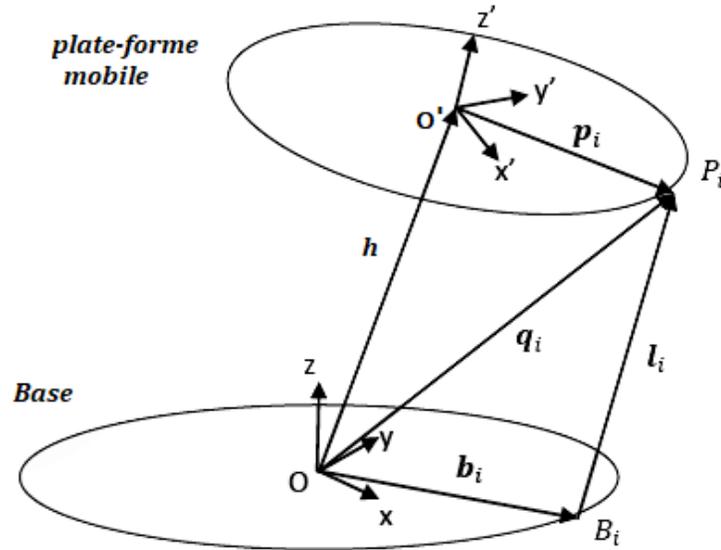


Figure II.2 : géométrie de la plateforme du Stewart type 6-UPS.

II.2.2.2 Vérification du nombre de degré de liberté

Comme le nombre total d'organes rigides est égal à 14, et que nous avons 18 articulations au total, leur mobilité est égale à 36. Selon l'équation (II.10), le nombre de degré de liberté du manipulateur 6-PUS est de 6.

$$dl = 6(14 - 1 - 18) + 36 = 6 \quad (\text{II.45})$$

II.2.2.3 Le modèle géométrique inverse

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

$$L_i = f(q) \quad (\text{II.46})$$

pour $i = 1, 2, \dots, 6$.

De telle façon :

$$\begin{aligned} l_i &= h + R \cdot p_i - b_i \\ &= \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + R(\alpha, \theta, \gamma) \cdot p_i - b_i \end{aligned} \quad (\text{II.47})$$

Où : h est le vecteur de translation du R_p par rapport R_B , R est la matrice de transformation homogène (l'équation II.6). p_i et b_i sont les vecteurs $O'P_i$ et OB_i respectivement.

II.2.2.4 Le modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) dans le manipulateur Stewart permet de trouver les coordonnées opérationnelles de la plateforme mobile en fonction d'une configuration articulaire donnée. L'obtention d'une solution du MGD correspond à la résolution d'un système d'équations non-linéaires multi variable (II.21), 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 thèse on utilise la méthode de Newton-Raphson (Nguyen, 1991), (Merlet, 1993) qu'est une méthode itérative qui devrait être employées pour résoudre l'ensemble d'équations non linéaires ci-dessous afin d'obtenir une solution proche de la solution effective. Pour appliquer la méthode de Newton-Raphson, nous définissons six fonctions scalaires :

$$f_i(q) = ({}^B P_{ix} - {}^B b_{ix})^2 + ({}^B P_{iy} - {}^B b_{iy})^2 + ({}^B P_{iz} - {}^B b_{iz})^2 - L_i^2 = 0 \quad (\text{II.48})$$

Ensuite, nous utilisons l'algorithme de Newton-Raphson suivant pour trouver q :

- Étape 1 : Sélectionner l'estimation initiale de $q = (x \ y \ z \ \alpha \ \theta \ \gamma)$.
- Étape 2 : Calculer les éléments de R en utilisant l'équation (II.6) pour $i, j = 1, 2, 3$.
- Étape 3 : Calculer $f_i(q)$ et $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$ en utilisant (II.48) pour $i, j = 1, 2, \dots, 6$.
- Étape 4 : Calculer $B_i = -f_i(q)$ pour $i = 1, 2, \dots, 6$. Si $\sum_{i=1}^6 |B_i| < \text{erreur}$, arrêter et sélectionner q comme solution.
- Étape 5 : Résoudre $\sum_{j=1}^6 A_{ij} \delta q_j = B_i$ pour $i = 1, 2, \dots, 6$ en utilisant la décomposition de LU. Si $\sum_{j=1}^6 \delta q_j < \text{erreur}$, arrêter et sélectionner q comme solution.
- Étape 6 : Sélectionner $q^{nv} = q + \delta q$ et répétez les étapes 2 à 6.

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 la plateforme du 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 et qu'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, 1991) dans l'espace du travail accessible du robot fera converger l'algorithme.

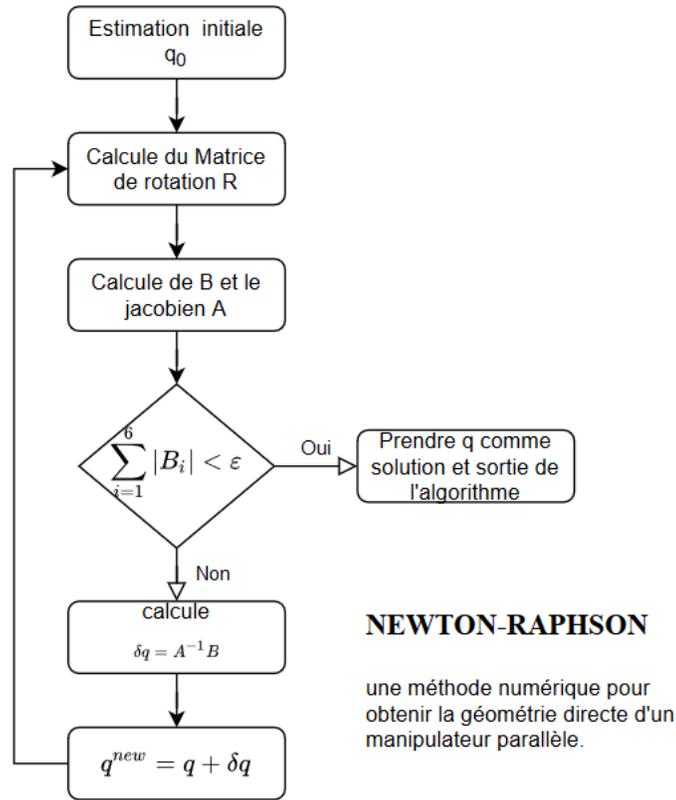


Figure II.3 : Organigramme de la méthode de Newton Raphson.

II.2.2.5 Le modèle cinématique

Le modèle cinématique inverse décrit les vitesses articulaires $\dot{l}_i \in R^m$ en fonction de vitesse de la plateforme mobile $\dot{q} \in R^n$, veuillez noter :

$$\dot{l}_i = J(q) \cdot \dot{q} \tag{II.49}$$

$J(q)$: désigne la matrice Jacobienne écrite en fonction des coordonnées opérationnelles q . Afin d'exprimer la vitesse de l'articulation prismatique en fonction de la vitesse de la plateforme (Ahmet, 2016), (Harib, et al., 2003), Nous avons dérivé la relation (II.13) par rapport au temps et nous avons constaté que:

$$\dot{l}_i = \dot{h} + \dot{R} \cdot p_i \tag{II.50}$$

Et on a :

$$\dot{R} = w \wedge R \tag{II.51}$$

Tel que w est une vitesse angulaire, écrite comme suite :

$$w = \begin{pmatrix} \cos(\theta)\cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \cos(\theta)\sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} \quad (\text{II.52})$$

Par conséquent, \dot{l}_i devient :

$$\dot{l}_i = \dot{h} + w \wedge (R.p_i) \quad (\text{II.53})$$

où n_i est un vecteur unitaire de l'articulation prismatique écrit comme :

$$n_i = \frac{l_i}{\|l_i\|} = \frac{l_i}{L_i} \quad (\text{II.54})$$

Tel que $L_i = \|l_i\|$ est une norme vectorielle de vecteurs articulaires, donc à partir (II.54), l'expression (II.53) devient :

$$\dot{L}_i.n_i + L_i.\dot{n}_i = \dot{h} + w \wedge R.p_i \quad (\text{II.55})$$

Et puisque on a $\dot{n}_i.n_i = 0$ et $n_i.n_i = 1$, donc la vitesse des articulations s'écrit:

$$\dot{L}_i = \dot{h}.n_i + w \wedge R.p_i.n_i \quad (\text{II.56})$$

Après avoir utilisé les attributs du produit mixte, la formule ci-dessus devient:

$$\dot{L}_i = \dot{h}.n_i + w.R.p_i \wedge n_i \quad (\text{II.57})$$

La relation final de \dot{L}_i est donnée de manière suite :

$$\dot{L}_i = J_1^{-1}(q). \begin{pmatrix} \dot{h} \\ w \end{pmatrix} \quad (\text{II.58})$$

Où:

$$J_1^{-1}(q) = \begin{pmatrix} n_1^T & (R.p_1 \wedge n_1)^T \\ \vdots & \vdots \\ n_6^T & (R.p_6 \wedge n_6)^T \end{pmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Nous notons que cette relation inclut la vitesse angulaire de la plateforme, et afin de se conformer à la convention basée sur l'angle d'Euler, une deuxième matrice jacobienne est introduite pour permettre l'utilisation des angles d'Euler, qui s'écrit comme suit:

$$J_2^{-1}(q) = \begin{pmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \cos(\theta) * \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ 0_{3 \times 3} & \cos(\theta) * \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ & \sin(\theta) & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.60})$$

Enfin, nous avons constaté que la relation complète entre les vitesses des articulations prismatiques \dot{L} et une vitesse donnée de la plateforme \dot{q} est donnée par :

$$\dot{L} = J_1^{-1}(q).J_2^{-1}(q).\dot{q} = J^{-1}(q).\dot{q} \quad (\text{II.61})$$

Où $J^{-1}(q)$ est la matrice Jacobienne du model cinématique inverse.

Pour obtenir le modèle cinématique direct qui est exprimé comme suite :

$$\dot{q} = J(q).\dot{L} \quad (\text{II.62})$$

Il suffit l'inverser la matrice Jacobienne du modèle cinématique inverse pour obtenir l'équation (II.62), d'où $J(q)$ est la matrice Jacobienne du modèle cinématique direct.

II.3 La Structure optimale

Le problème de conception optimale des manipulateurs parallèles consiste à déterminer un ensemble de paramètres de conception pour garantir un critère optimal. Généralement, certains critères de performance, tels que la précision de contrôle (isotropie ou dextérité), la vitesse, la capacité de charge utile et la rigidité peuvent être impliquées dans ce processus. En fait, la première étape de la conception optimale des plateformes parallèles consiste à déterminer la structure de la plateforme, c'est-à-dire son architecture géométrique.

Après le choix de la structure il faut trouver les meilleures dimensions de conception qui garantissent que l'ensemble des critères de performance est respecté dans le cadre de l'ensemble des contraintes géométriques imposées. En général, les indices de performance cinématique et statique qui sont l'indice de conditionnement global (GCI) et l'indice de rigidité global (GSI). Ainsi que le volume d'espace de travail est considéré comme les critères les plus importants lors du processus de conception optimale des plateformes robotiques, et en particulier, pour les plateformes parallèles.

- **La dextérité cinématique**

La dextérité cinématique est définie comme la capacité du corps terminal de la plateforme à se déplacer avec précision et avec une grande répétition dans l'espace de travail (Joumah, et al., 2018). Elle est évaluée d'après l'indice de conditionnement global (GCI), et obtenue à l'aide du nombre de conditionnement du jacobien telle que :

$$\text{cond}(J) = \|J\|.\|J^{-1}\| = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (\text{II.63})$$

Avec : $\| \cdot \|$ c'est la norme 2 de la matrice ; σ_{max} et σ_{min} est la valeur singulière maximales et minimales du matrice jacobien J . L'indice de conditionnement locale égale à l'inverse du nombre de conditionnement de telle façon $LCI \in [0,1]$. Plus que LCI est proche de l'unité le plus que le manipulateur est mieux conditionné.

$$LCI = cond(J)^{-1} \quad (II.64)$$

La dextérité cinématique est déterminer par le coefficient GCI qui est obtenué par la relation suivante :

$$GCI = \frac{\int_W cond(J)^{-1} dw}{\int_W dw} \quad (II.65)$$

Avec W est l'espace de travail.

(II.66) définie l'équation pour obtenir le coefficient GCI de manière numérique, durant le procédés de la conception optimal de la plateforme. Nous voulons atteindre des valeurs proches de l'unité qui présent la situation optimale.

$$GCI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n cond(J_i)^{-1} \quad (II.66)$$

Où n présente le nombre du point active, qui constitue l'espace de travail.

- **L'espace de travail**

L'espace de travail d'un manipulateur parallèle est l'un des critères les plus importants, qui reflète sa capacité. Il est donc nécessaire d'analyser la forme et la taille de l'espace de travail pour améliorer les applications des manipulateurs parallèles. Fondamentalement, les trois méthodes utilisées pour calculer l'espace de travail sont des méthodes analytiques, géométriques et numériques (MERLET, 2006). Pour calculer l'espace de travail, il est nécessaire de considérer les contraintes géométriques sur la limitation des angles d'articulation et l'interférence entre les liaisons.

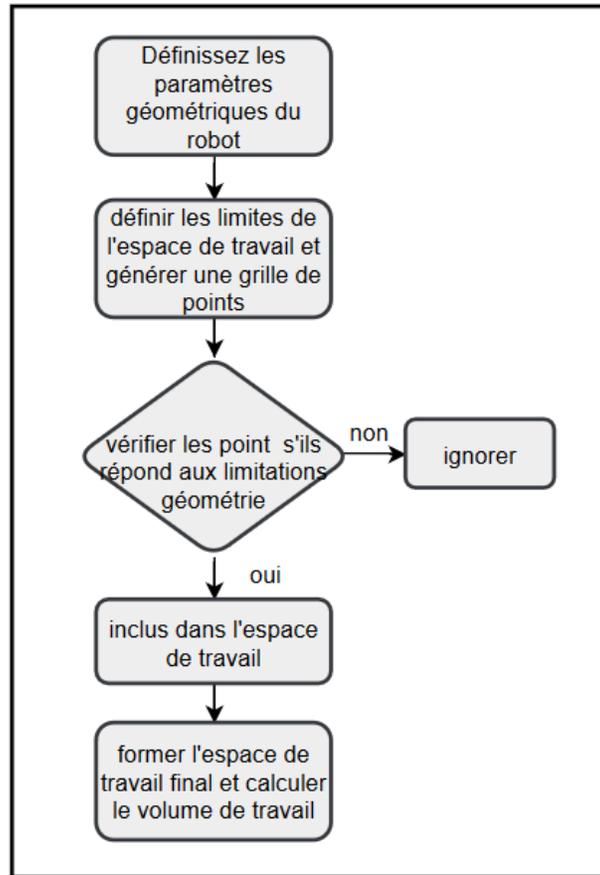


Figure II.4 : schéma de la procédure d'acquisition du volume de travail par la méthode numérique.

II.3.1 Cas du manipulateur Stewart 6-RUS

II.3.1.1 Sélection de la structure

Trois échantillons des manipulateurs 6-RUS sont les plus connus dans la littérature, le manipulateur de type Hunt, Hexa et Zamanov (MERLET, 2006). Tous les types mentionnés ont la même topologie, mais ils sont différents selon l'angle de l'axe de l'articulation rotative et le point de connexion à la plateforme mobile.

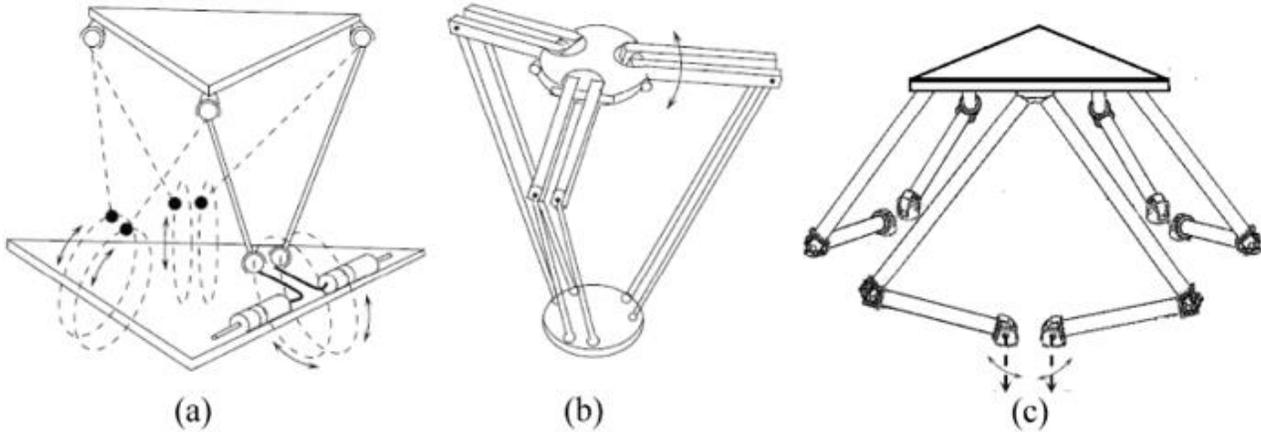


Figure II.5 : Les manipulateurs 6-RUS : (a) Hunt, (b) Hexa, (c) Zamanov.

En comparant les trois manipulateurs 6-RUS (Erfan, et al., 2016), les performances du type Zamanov se situent au milieu de deux autres manipulateurs, en termes d'espace de travail ainsi que la dextérité cinématique et dynamique. Par conséquent, dans la suite du travail, nous choisirons cette structure.

II.3.1.2 Obtention des dimensions optimales de Robot

Afin de déterminer la meilleure configuration, il est nécessaire de formuler un problème d'optimisation multicritères. Après avoir déterminé les paramètres de conception et défini un ensemble de fonctions de coût liées à la taille de la zone de travail (V_t) et à l'indice de performance cinématique, qui est l'indice de conditionnement global (GCI). Il a noté que la longueur de la branche a_i est directement liée au type d'actionneur rotatif (servo moteur), pour plusieurs modèles commerciaux $a_i = 2.8$. Nous avons pris cette valeur comme référence et alors le vecteur des variables de conception est le suivant : $\vartheta_{rus_opt} = [r_b \ r_p \ \theta_b \ \theta_p \ s_i \ \sigma]$. Par conséquent le problème peut être formulé comme suit :

« Trouver un vecteur ϑ_{rus_opt} tel que : $\max(\text{GCI}), \max(V_t)$ »

Sous les contraintes ci-dessous :

- Limite de l'espace de travail x (cm), y (cm) et z (cm) :

$$-40 < x \text{ (cm)} < 40$$

$$-40 < y \text{ (cm)} < 40$$

$$0 < z \text{ (cm)} < 40$$

- Limites des variables de conception :

$$5 < r_b(cm) < 15$$

$$5 < r_p(cm) < 15$$

$$0 < \theta_b^\circ < 120$$

$$0 < \theta_p^\circ < 120$$

$$0 < \sigma^\circ < 360$$

$$7 < s_i(cm) < 30$$

$$a_i = 2.8 (cm)$$

Ce processus se déroule en utilisant la fonction d'optimisation génétique multifonctionnelle "gamultiobj" de Matlab. Le volume de travail est obtenu approximativement en préservant les points de l'espace de travail, puis en calculant le volume résultant (figure II.6), les résultats d'optimisation sont présentés dans le tableau II.2.

$r_p(cm)$	$r_b(cm)$	θ_b°	θ_p°	σ°	$s_i(cm)$	GCI	$V_{travail}(cm^3)$
6.06	5.82	18	13	300	22.08	0.05	8493.3

Tableau II.2 : résultat d'optimisation des paramètres géométrique.

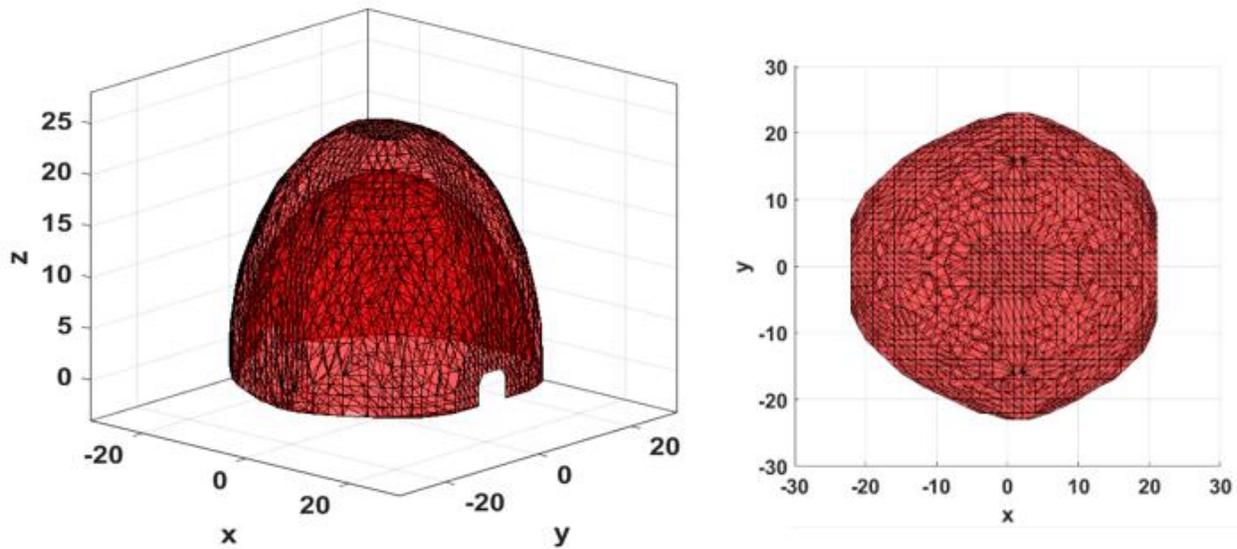


Figure II.6 : Espace de travail théorique du manipulateur 6-RUS pour l'orientation (0,0,0).

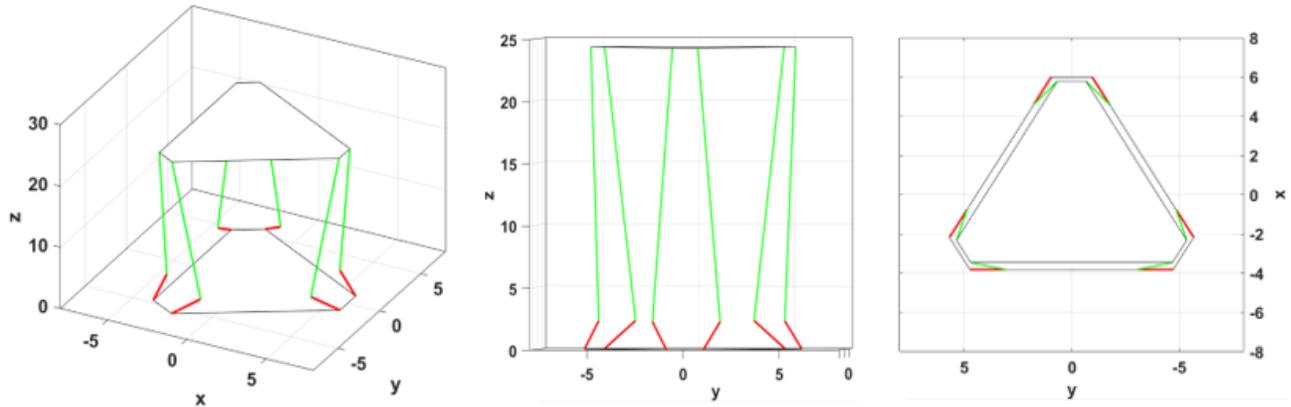


Figure II.7 : La structure optimisée du manipulateur 6-RUS.

II.3.2 Cas du manipulateur Stewart 6-UPS

II.3.2.1 Sélection de la structure

Les manipulateur 6-UPS possède essentiellement 3 variantes (W.Khalil, et al., 2004) (MERLET, 2006) présentés dans la figure (II.8). Elles possèdent toutes une base planaire et une plateforme mobile, mais diffèrent par la distribution de leur centre articulé. Le premier robot, appelé MSSM (*Minimal Simplified Symmetric Manipulator*) a une base et une plateforme triangulaire. Le deuxième robot, appelé TSSM (*Triangular Simplified Symmetric Manipulator*).

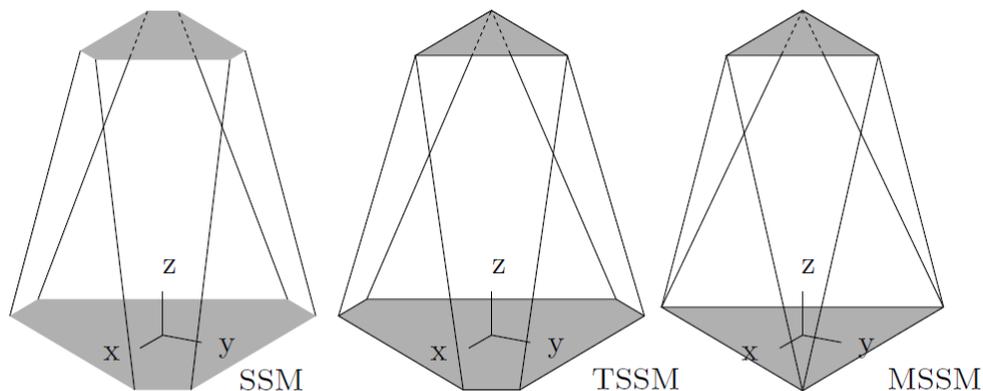


Figure II.8 : Les variantes du manipulateurs 6-UPS.

Une plateforme triangulaire et une base hexagonale. Le troisième est le SSM (*Simplified Symmetric Manipulator*) qui possède deux plateformes hexagonales.

Une comparaison a été faite (MERLET, 2006) entre le volume d'espace de travail à orientation constante pour les trois structures. Il convient de noter que le volume de l'espace de travail du SSM est toujours environ 30 % plus important que celle du TSSM. De même, le volume du SSM est

supérieur de 70 % à celui du MSSM. Le volume du TSSM est donc supérieur d'environ 25 % à celui de celle du MSSM. Pour cela, dans la suite du travail, nous choisirons la structure SSM.

II.3.2.2 Obtention des dimensions optimales de Robot

Pour obtenir la configuration optimale du manipulateur 6-UPS, nous opérons de la même manière que le manipulateur 6-RUS, l'actionneur linéaire sélectionné pour la simulation possède les dimensions suivantes : $l_1=20.5$ (cm) et $l_2=10$ (cm), de telle façon les variables l_1 et l_2 sont les longueurs de la partie fixe et la partie mobile de l'actionneur respectivement . Le vecteur des variables de conception devient : $\vartheta_{ups_opt} = [r_b \ r_p \ \theta_b \ \theta_p]$. Le problème d'optimisation est formulé de la manière suivante :

« *Trouver un vecteur ϑ_{ups_opt} * tel que : $\max(\text{GCI}), \max(Vt)$ »*

Sous les contraintes ci-dessous :

- Limites de l'espace de travail x et y et z(cm) :

$$-40 < x \text{ (cm)} < 40$$

$$-40 < y \text{ (cm)} < 40$$

$$0 < z \text{ (cm)} < 40$$

- Limites des variables de conception :

$$10 < r_b \text{ (cm)} < 30$$

$$10 < r_p \text{ (cm)} < 20$$

$$0 < \theta_b^\circ < 120$$

$$0 < \theta_p^\circ < 120$$

$$l_1 \text{ (cm)} = 20.5$$

$$l_2 \text{ (cm)} = 10$$

Les résultats d'optimisation de la structure obtenue via la fonction "gamultiobj" du Matlab est données dans (tab II.3) et (figure II.9).

r_b (cm)	r_p (cm)	θ_b°	θ_p°	GCI	$V_{travail}$ (cm ³)
10.40	10.37	49.62	39.69	0.00168	32759.33

Tableau II.1 : résultat d'optimisation des paramètres géométrique.

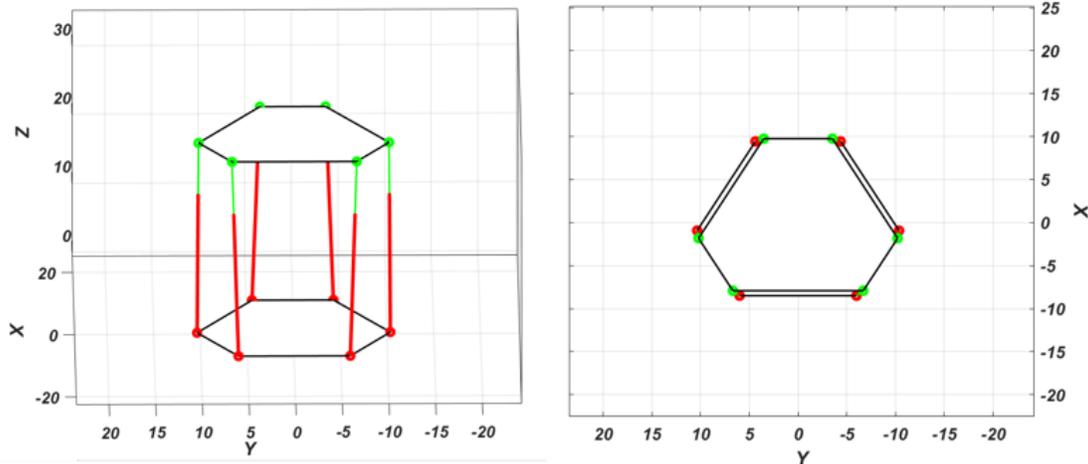
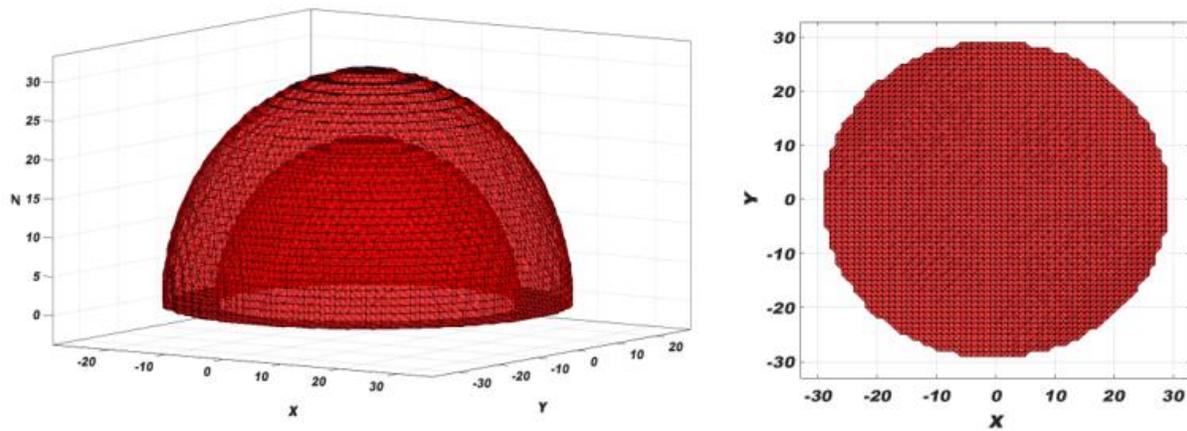


Figure II.9 : La structure optimisée du manipulateur 6-UPS.

Figure II.10 : Espace de travail théorique du manipulateur 6-UPS pour l'orientation $(0,0,0)$.

II.4 Modèle CAO

Le Modèle CAO des deux structures est présenté sous SolidWorks, le dimensionnement des pièces est basé sur les valeurs obtenues via l'optimisation de la structure, les pièces sont modélisées au but de simulation et tester des commandes. Les articulations universelles sont remplacées par des articulations sphériques pour faciliter la mise en œuvre, cela n'affecte pas la mobilité du système car la mobilité des articulations sphériques est supérieure à celle de l'articulation universel.

II.4.1 Modèle CAO pour le manipulateur 6-UPS

Le manipulateur 6-UPS est composé de 5 pièces :

- 1) Une base stationnaire et une plateforme mobile.



Figure II.11 : (a) Base fixe, (b) Plateforme mobile.

- 2) Un moteur linéaire qui se compose essentiellement de deux pièces mécaniques : le premier fixe elle est attachée à la base via une articulation sphérique, la deuxième c'est la partie active, qui est reliée à la plateforme via une articulation sphérique.

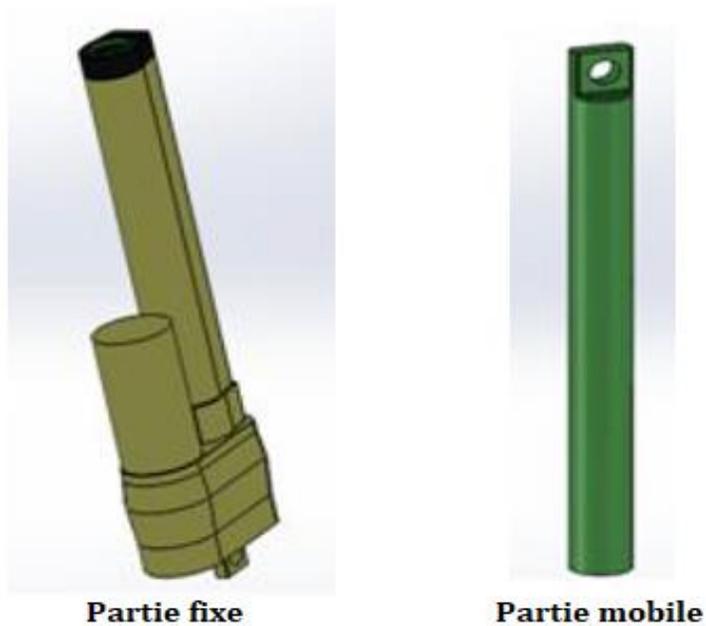


Figure II.12 : Partie fixe et mobile de l'actionneur linéaire.

3) Une articulation sphérique :



Figure II.13 : Articulation sphérique.

L'assemblage finale de ces pièces est présent dans la figure (II.14)

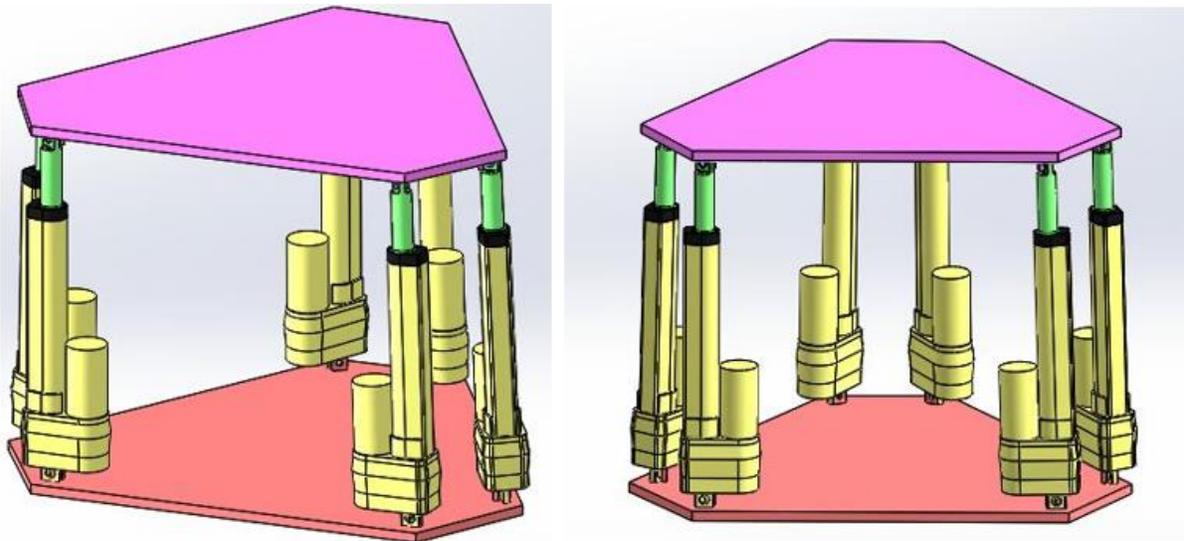
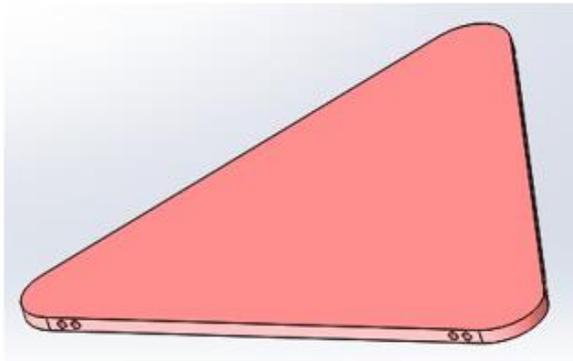


Figure II.14 : L'assemblage finale du manipulateur 6-UPS.

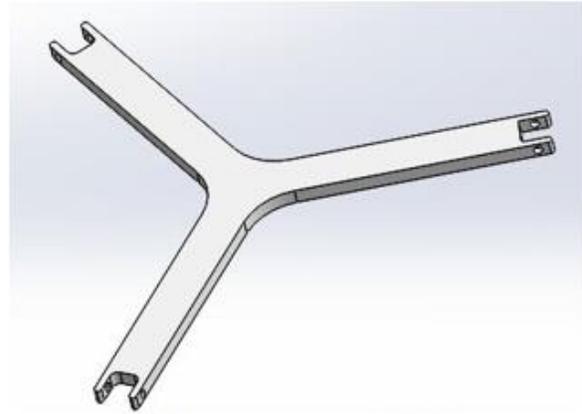
II.4.2 Modèle CAO pour le manipulateur 6-RUS

Le manipulateur 6-RUS se compose des pièces suivantes :

- 1) Une base fixe et une plateforme mobile :



La base



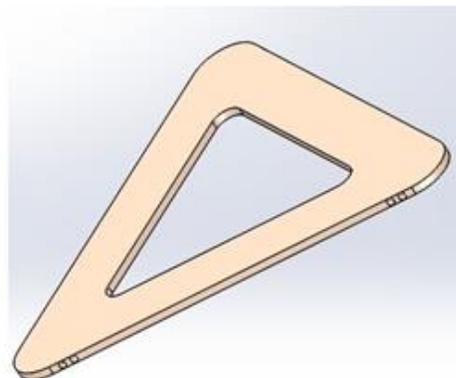
La plateforme mobile

Figure II.15 : Les plateformes de manipulateur Stewart 6-RUS.

- 2) Un actionneur rotatif (servo moteur) et un cache pour les actionneurs :



(a)



(b)

Figure II.16 : (a) Le servomoteur, (b) Cache de moteur.

- 3) Une arme relié au servo moteur et une tige attaché entre deux articulation sphérique



Figure II.17 : (a) Le bras du servo moteur, (b) La tige.

L'articulation sphérique est la même au figure (II.13), l'assemblage finale est présenté dans la figure ci-dessous :

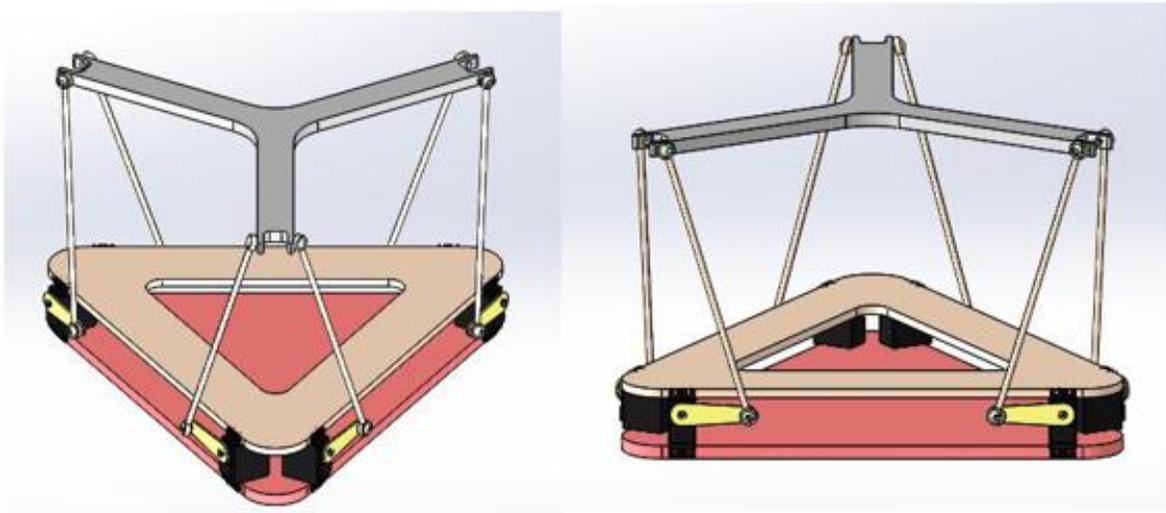


Figure II.18 : l'assemblage finale du manipulateur 6-RUS.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une modélisation générique pour deux topologies du manipulateur Stewart 6-RUS et 6-UPS, nous avons également fait une étude pour obtenir la structure optimale des manipulateurs par rapport à la dextérité et au volume de travail, ce chapitre se termine par un modèle CAO des deux robots.

Chapitre III : Comparaison entre les actionneurs

III.1 Les actionneurs du robot

Le robot remplit des fonctions mécaniques telles que le déplacement ou le positionnement. Pour cela, il a besoin d'un actionneur, qui effectuera la transmission d'informations et la conversion d'énergie. Il existe plusieurs technologies: rencontrer les actionneurs électriques, pneumatiques et hydrauliques et elles sont choisies en fonction des critères suivants :

- Cout.
- La puissance consommée.
- Le couple délivré et la vitesse.
- La précision de positionnement et la vitesse.

Les performances d'un actionneur électrique sont étroitement liées à son environnement : convertisseur d'énergie et sa commande électronique, asservissement éventuel et ses capteurs, et les dispositifs mécaniques. Il est important de considérer la grande comparaison des coûts entre plusieurs solutions. Par rapport aux concurrents hydrauliques et pneumatiques, les actionneurs électriques présentent de nombreux avantages (Pierre, 2016), notamment:

- Facile à obtenir de l'énergie, que ce soit du secteur ou de la batterie.
- Réglage facile de l'actionneur et sa commande grâce à un grand nombre de caractéristiques électriques.
- Depuis l'avancement des composants (circuits intégrés, transistors de puissance, etc.), les équipements électroniques associés ont été simplifiés.

Fondamentalement, des machines trouvées en robotique trois types:

- 1- Le moteur à courant continue (MCC) représente une solution traditionnelle lorsque vous devez contrôler la vitesse ou la position, mais nécessite un servo.
- 2- Le moteur à courant continu sans balais (moteur brushless) est en fait une machine alternative associée à un interrupteur électronique qui peut remplacer MCC traditionnel aux propriétés similaires.

- 3- Le moteur pas à pas est essentiellement un vérin de positionnement qui ne nécessite pas de servocommande, mais peut également être utilisé pour commander le mouvement.



Figure III.1 : (a) Drone Parrot avec moteur brushless, (b) Robot Raviot avec MCC, (c) SCARA Robot avec moteur pas à pas.

Dans ce chapitre, Nous voulons explorer deux types d'actionneur électrique pour les introduire dans notre robot parallèle, ces deux actionneurs sont : le servomoteur et l'actionneur linéaire électromécanique.

III.2 Généralités sur les technologies de l'actionneurs

III.2.1 Généralité sur le moteur à courant continu

Comme toute machine tournant (Théodore , et al., 2015), le moteur à courant continu MCC comporte une partie fixe, le stator et une partie mobile, le rotor, séparées par un entrefer (figure III.2). L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe B , qui peut être à « aimants permanents » ou constitué d'électroaimants. L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces (forces dites « de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m. qui est « redressée » par l'ensemble {collecteur + balais}.

Suivant le mode d'excitation de l'inducteur, on trouve plusieurs types du MCC. L' excitation la plus célèbre est l'excitation séparée (ou indépendant), qui est représenté par une schéma du circuit électrique équivalent (figure III.2). Pour chaque mode d'excitation, le MCC acquiert des caractéristiques électromécaniques et mécanique différentes. Les variateurs de vitesse à base MCC utilisent souvent des machines à inducteurs indépendant.

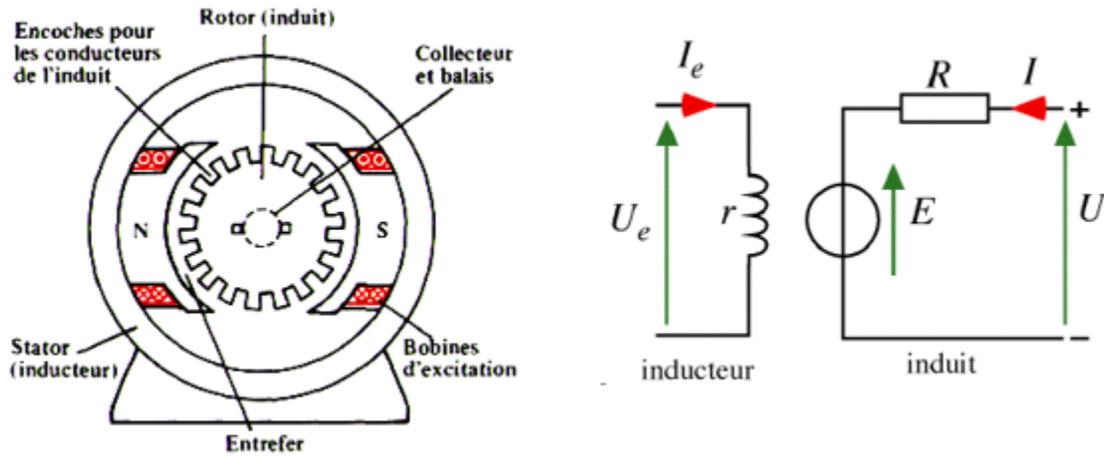


Figure III.2 : Le schéma et le circuit de moteur à courant continu (Théodore , et al., 2015).

Pour établir une relation simple entre les tensions $U(t)$ et les courants $i(t)$ (équation III.1), on néglige la saturation du circuit magnétique, ainsi que les pertes par hystérésis, les courants de Foucault, la commutation et la réaction de l'induit. Les équations générales régissant le moteur à excitation indépendante en régime transitoire sont (Pierre, 2016):

a. L'équation électrique :

$$U(t) = e(t) + R \times i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{III.1})$$

b. Proportionnalité entre le courant d'induit $i(t)$ et le couple électromagnétique du moteur $Te(t)$:

$$Te(t) = k \times i(t) \quad (\text{III.2})$$

c. Proportionnalité entre la f.é.m. " $e(t)$ " et la vitesse de rotation du moteur $\Omega(t)$:

$$e(t) = k \times \Omega(t) \quad (\text{III.36})$$

d. L'équation mécanique :

$$Te(t) - Tr(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f\Omega(t) \quad (\text{III.4})$$

Avec $Tr(t)$ couple résistant, J est le moment d'inertie total ramené sur l'arbre du moteur et f est le coefficient des frottements visqueux. Nous avons utilisée la transformation de LAPLACE pour ces équations, donc le modèle dynamique du moteur en boucle ouverte, ce qui donne :

$$I(s) = \frac{1}{R + Ls} (U(s) - E(s)) \quad (\text{III.37})$$

$$\Omega(s) = \frac{Te(s) - Tr(s)}{f + Js} \quad (\text{III.6})$$

Ces équations nous amènent au schéma bloc de la MCC dans le figure III.3 ci-dessous (Théodore , et al., 2015) :

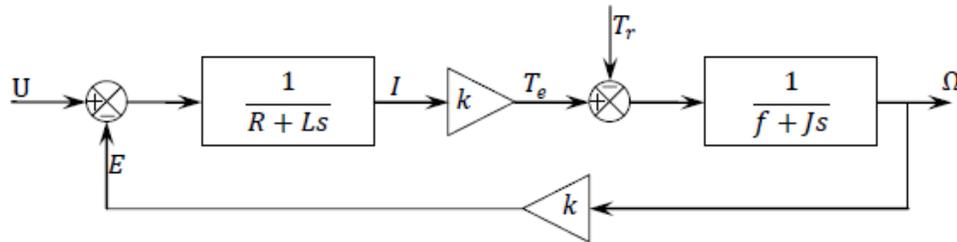


Figure III.3 : Schéma bloc de fonction Transfer de moteur CC.

La fonction de transfert d'un moteur à courant continu (sans couple résistant) est:

$$H(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k}{(f + Js) \cdot (R + Ls) + k^2} \quad (\text{III.7})$$

III.2.2 Les réducteurs

La liaison mécanique entre le moteur et sa charge est rarement directe, la plupart du temps exige la présence d'un mécanisme, qui est le réducteur. Le réducteur sert à réduire la vitesse avec transmission de la puissance motrice vers une machine réceptrice en absorbant le moins d'énergie (Pierre, 2016). Il permet d'augmenter le couple moteur afin d'entraîner en rotation un organe récepteur sous l'effet d'un nouveau couple (figure III.4).

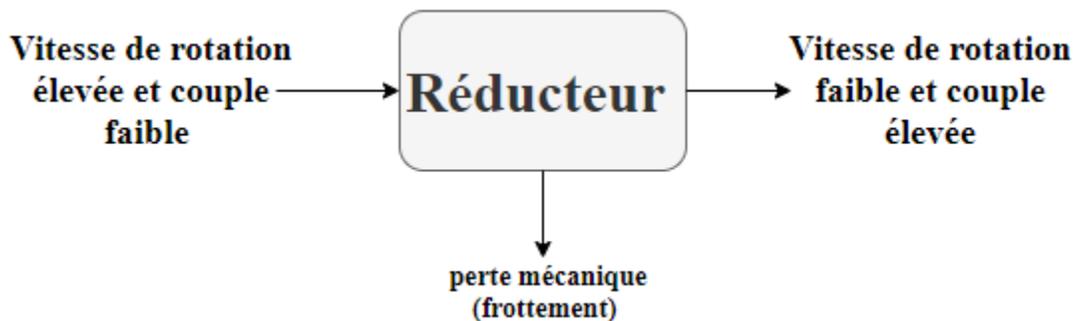


Figure III.4 : Le principe de fonctionnement du réducteur de vitesse.

Un réducteur élémentaire est formé en deux roues dents de diamètre différent (figure III.5-a), on définit le rapport de réduction par :

$$r = \frac{w_m}{w_c} \quad (\text{III.8})$$

Tel que w_m la vitesse de rotation de l'arbre de moteur et w_c la vitesse de rotation de la charge. Ce rapport s'exprime aussi en fonction les nombres des dents :

$$r = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (\text{III.9})$$

Telle que Z_1 et Z_2 sont les nombres des dents de roue de charge et roue de moteur respectivement.

Les réducteurs à denture droite sont les dispositifs les plus simples et ont un bon rendement (60 à 90 %), les réducteurs planétaires peuvent fournir des couples élevés et atteindre un rapport de réduction important et leur prix est plus élevé . Il y a aussi d'autres systèmes qui assurent la transmission entre deux mouvements comme le système poulies et courroies crantées (figure III.5-b), le rapport de réduction est égal au rapport des rayons des deux poulies :

$$r = \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{III.10})$$

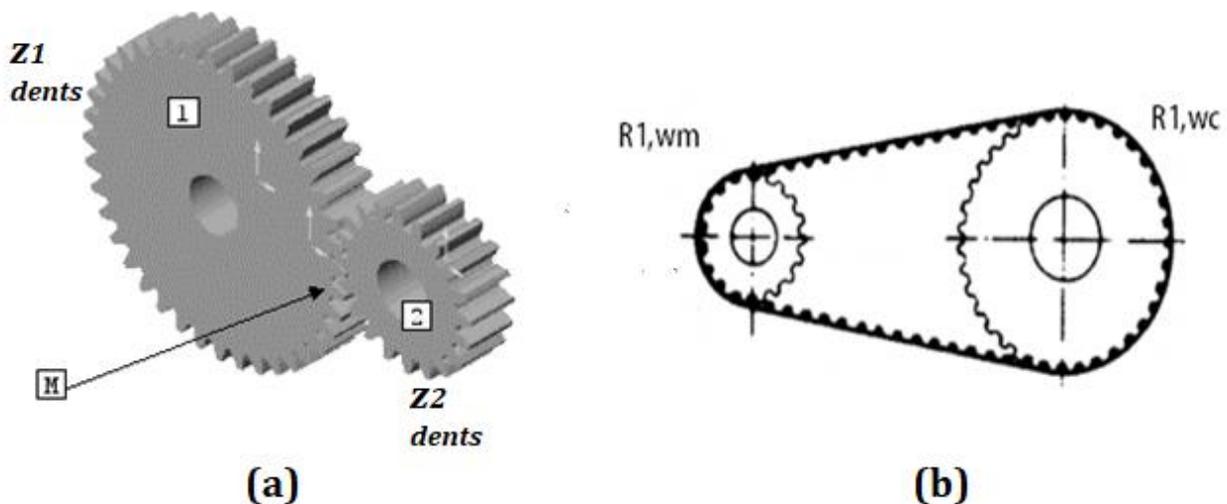


Figure III.5 : (a) Réducteur à denture droit, (b) Système poulies et courroies crantées.

III.2.3 System vis et écrou

Système vis et écrou (figure III.6) est un mécanisme assurant la conversion d'un mouvement d'une rotation qui est caractérisée par une vitesse angulaire w et un couple C en mouvement linéaire, caractérisée par une vitesse linéaire V et une force F . L'écrou se déplace d'un pas p à chaque tour de la vis, si l'arbre du moteur tourne d'un angle θ (Pierre, 2016), la distance donne comme suite :

$$d = p \frac{\theta}{2\pi} \quad (\text{III.11})$$

En dérivant, on obtient une relation entre la vitesse linéaire v de la charge et la vitesse angulaire w du moteur :

$$v = p \frac{w}{2\pi} \quad (\text{III.12})$$

Et la relation entre le couple de rotation et la force de translation est :

$$C = \frac{F \cdot p}{2\pi \cdot n} \quad (\text{III.13})$$

Tel que n est le rondement. Il est faible pour une vis à billes, important pour une vis classique.

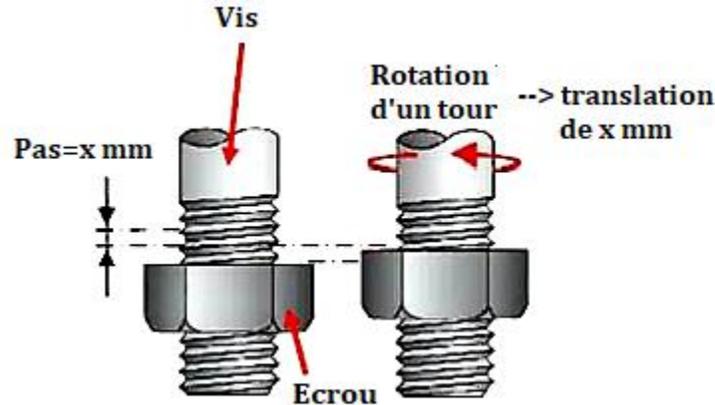


Figure III.6 : Système vis et écrou.

Ce mécanisme permet d'exercer des forces et des pressions importantes mais il génère beaucoup de frottement et sa fragilité peut entraîner des problèmes de guidage.

III.4 Le servomoteur

Dans la robotique, le servomoteur a en général une taille et une couple réduite, ce qui est très approprié pour occuper un petit espace et une énergie disponible limitée. Par conséquent, il existe

différents types de servomoteurs, qui diffèrent en taille, en poids et en couple (force). Ceci est un moteur spécial car il est formé d'une combinaison de technologie mécanique et électronique (figure III.7), mais son principe de fonctionnement est encore assez simple. Généralement en technologie robotique, les servomoteurs pouvant être utilisés comprennent (Pierre, 2016):

- Un moteur à courant continu, généralement assez petit.
- Un réducteur placé sur l'arbre de ce moteur diminuant la vitesse et augmentant le couple.
- Un capteur de position (en général un potentiomètre) qui délivre une tension proportionnelle à la position angulaire de l'arbre de sortie.
- Un dispositif électronique d'asservissement de position.
- Un axe dépassant hors du boîtier avec différents bras ou roues de fixation.

Les fonctions internes du servomoteur sont très basiques. Le circuit électronique plus petit permet de contrôler le moteur DC en fonction de la position du potentiomètre intégré au servomoteur. La sortie du moteur à courant continu est connectée mécaniquement à une série d'engrenages (ou réducteurs), qui augmentent le couple du servomoteur en réduisant la vitesse de rotation du servomoteur. Lorsque le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et porte le potentiomètre avec lui. Le circuit électronique ajuste constamment la vitesse du moteur afin que le potentiomètre (et donc le bras) reste toujours au même endroit. Entrer simplement le point de consigne de l'actionneur (par exemple, "rester à 90°") et l'actionneur fera tout son possible pour rester aussi près de ce point de consigne que possible.

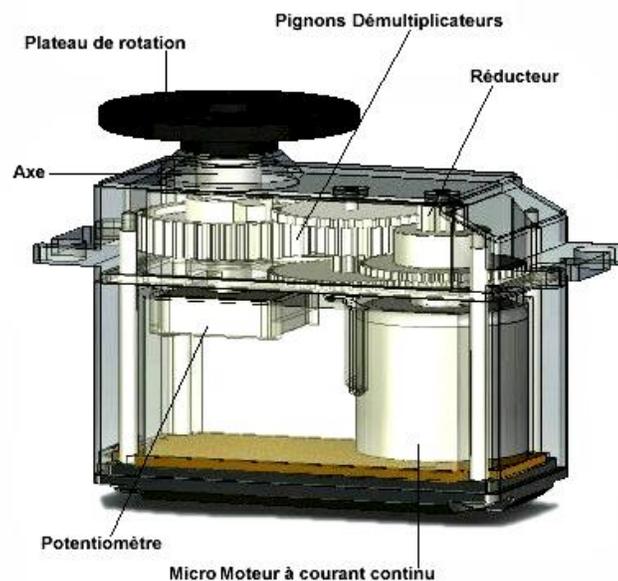


Figure III.7 : Les composants du servomoteur (Romain , 2015).

Le servomoteur a l'avantage d'être asservi en position angulaire (Pierre, 2016) (Romain , 2015), ce qui signifie que l'arbre de sortie du servomoteur sera conforme aux instructions que vous envoyez lorsque vous entrez, le moteur a au moins 3 fils, dont deux sont utilisés pour alimenter le moteur et le troisième est utilisé pour communiquer la consigne. Lorsque nous envoyons un signal de commande pour définir l'angle souhaité (point de consigne), le moteur est corrigé sans démarrer l'angle pour tendre vers le point de consigne de l'utilisateur, et il effectue cycliquement cette opération. Pour pouvoir réaliser la correction de l'angle du bras, le servo utilise une électronique d'asservissement tel que cette électronique est constituée d'un comparateur qui compare la position du bras du servo à la consigne. Grâce au potentiomètre connecté à l'arbre du moteur, la position du bras du robot peut être obtenue, et après une comparaison rapide de la valeur réglée et de la valeur réelle de la position du bras du robot, le servomoteur va appliquer une correction si le bras n'est pas orienté à l'angle imposé par la consigne.

La consigne envoyée au servomoteur analogique est un signal électronique de type PWM. Autrement dit, le temps séparant deux fronts montants est de 20 ms, qu'il faut transmettre tout ce dernière une impulsion d'une longueur comprise entre 1 et 2 ms.

- Une impulsion de 1 ms correspond à un angle de 0° .
- Une impulsion de 2 ms correspond à un angle de 180° .

En envoyant une impulsion d'une longueur intermédiaire, on obtient des angles différents, 90° avec une impulsion de 1.5 ms par exemple, comme le montre la figure au-dessous.

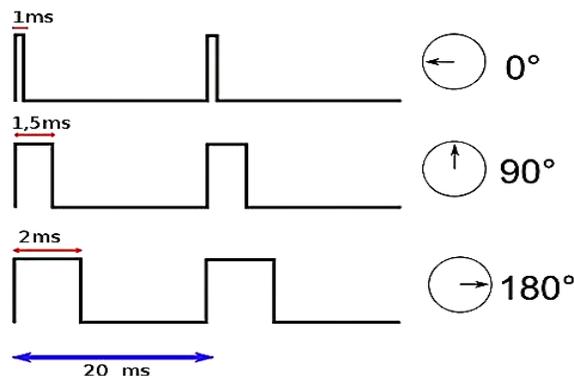


Figure III.8 : Position en fonction de la pulsation (Pierre, 2016) (Romain , 2015).

Au cours de la dernière décennie, les servomoteurs numériques sont devenus plus populaires que les servomoteurs analogiques. La différence entre eux est que le servomoteur analogique est

asservis avec un circuit analogique d'une fréquence faible, alors que le servo numérique est asservi par un microcontrôleur avec une fréquence élevée, de sorte que la position peut être déterminée plus rapidement et plus précisément avec une consommation électrique plus importante.

III.5 Actionneur électromécanique linéaire

Comme son nom l'indique, les actionneurs linéaires électriques utilisent l'énergie électrique pour permettre de convertir le mouvement rotatif en mouvement linéaire à travers l'ensemble des composants mécanique et électrique (Zuriel, 2018), qui sont généralement (la figure III.9) :

- a) Un moteur à courant continu.
- b) Les réducteurs pour changer la vitesse de sortie du moteur.
- c) Vis et écrou pour convertir le mouvement rotatif en linéaire.
- d) Arbre et deux capteurs de fin de course.

Les actionneurs linéaires électromécaniques utilisent généralement un moteur DC sous la forme d'un cylindre séparé fixé sur le côté de l'actionneur, soit parallèle à l'actionneur, soit perpendiculaire à l'actionneur. Il génère un mouvement de rotation à grande vitesse, tel que cette vitesse est réduite par la boîte de vitesse pour augmenter le couple qui sera ensuite utilisé pour tourner la vis-mère, la réduction de vitesse et la vis-mère déterminent la vitesse finale de l'actionneur linéaire, ce qui entraîne le mouvement linéaire d'un arbre ou d'un écrou d'entraînement. Un interrupteur situé à l'intérieur de l'arbre de l'actionneur principal, à l'extrémité supérieure et inférieure, arrête la vis lorsqu'elle atteint la fin de son mouvement ou de sa course. Lorsque l'arbre atteint son extrémité, l'interrupteur coupe l'alimentation du moteur.

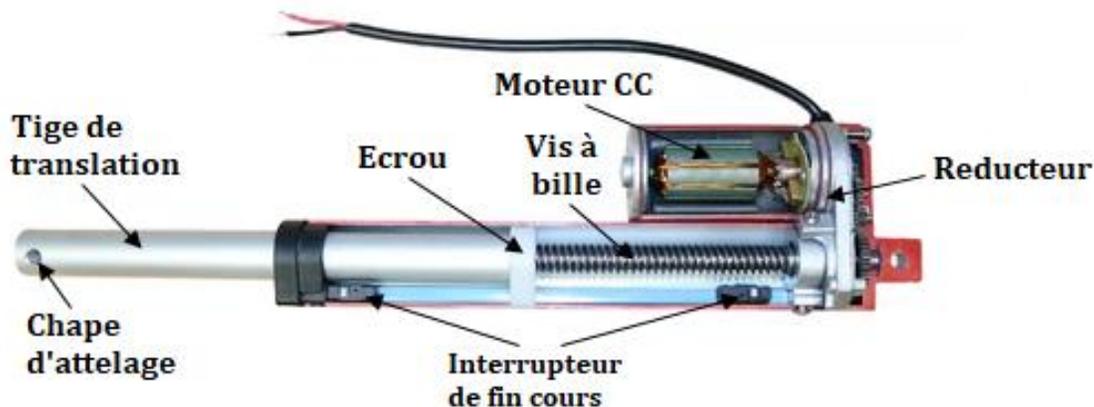


Figure III.9 : Les composants d'actionneur linéaire électriques (Zuriel, 2018).

La plupart des conceptions électromécaniques comprennent une vis-mère et un écrou, mais certains utilisent une vis à billes et un écrou à billes (la figure III.6). Dans certaines applications, les actionneurs linéaires ont différents modèles. Ces modèles ont généralement le même moteur, mais ils diffèrent par le type de réduction de vitesse, la vis mère et la longueur de l'arbre

Généralement l'actionneur linéaire ne vient pas asservi comme le servomoteur, il se dispose seulement de deux fils d'alimentation. La vitesse linéaire de cet actionneur est liée à l'alimentation variable de la MCC qui est assurée via un convertisseur électronique (Hacheur ou redresseur). Ces convertisseurs qui sont destinés pour variation de la vitesse des moteurs électriques sont dit les variateurs de vitesse. La figure ci-dessous montre le schéma bloc de cet actionneur linéaire.

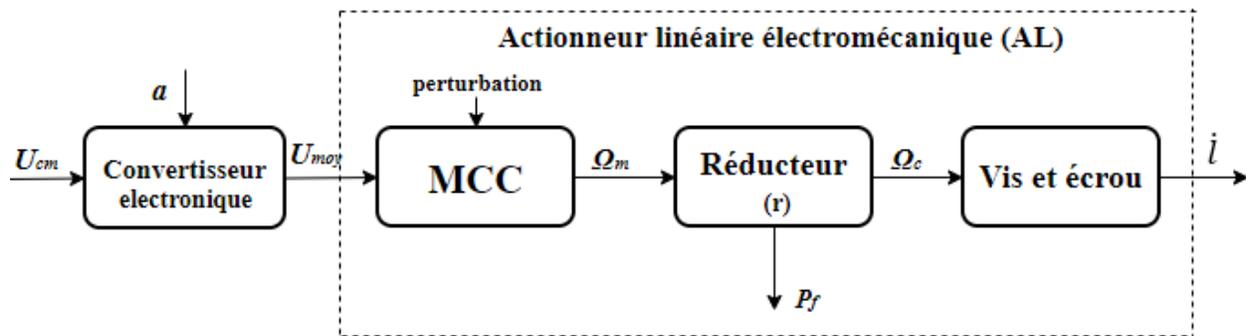


Figure III.10 : Le schéma bloc de l'actionneur linéaire électromécanique.

Les variateurs de vitesse de la MCC sont des hacheurs si la source amont est une source de courant continu, ou bien des redresseurs commandés si la source amont est une source de courant alternatif.

III.6 Comparaison entre l'actionneur linéaire et le servomoteur

La comparaison entre l'actionneur linéaire électromécanique (figure III.11-a) et le servomoteur (figure III.11-b) fera en tenant compte leurs intégrations à un robot parallèle de 6 ddl caractérisé par des petites dimensions (le diamètre de la base autour du 200 mm), pour cela il faut utiliser des actionneurs de taille réduite pour éviter les collisions entre eux.



Figure III.11 : (a) Actuateur linéaire électromécanique, (b) Servomoteur Futaba S3003.

Les critères les plus essentiels dont nous parlerons: la durabilité, couple ou force, la précision de la position et la vitesse et le cout.

- **La durabilité :** Le type d'actionneur et la conception du fabricant déterminent la durabilité d'un actionneur. Bien que ceux tels que les actionneurs linéaires électromécaniques sont considérés comme plus durables et robustes par rapport les servomoteurs, les spécifications détaillées sur la qualité du matériau utilisé seront à la discrétion du fabricant. La construction de cet actionneur linéaire est destinée à être utilisée dans des environnements plus difficiles, mais le servomoteur est fragile dans ces environnements.
- **Couple ou force :** Naturellement, le couple est l'un des aspects les plus importants à considérer dans la performance d'un actionneur. Il y a deux types de couple métrique à considérer, charge statique et dynamique. Le couple ou la force de charge statique fait référence à la capacité de l'actionneur au repos. La mesure dynamique fait référence à la capacité de couple de l'appareil lorsqu'il est en mouvement. la charge maximale de notre robot est estimée 1 kg, donc les deux actionneurs (actionneur linéaire ou servomoteur) peuvent supporte cette charge.
- **La précision de la position et la vitesse :** L'actionneur linéaire est plus précis que le servomoteur, car la qualité du matériau utiliser dans leurs constructions est déférents (la qualité du matériau d'actionneur linéaire est le meilleur). Et utilisation de servomoteur a

longtemps, il crée un jeu et vibration dans le plateau de rotation ce que diminue la précision de cet actionneur.

- **Le cout :** L'actionneur linéaire électromécanique est plus chère que le servomoteur (3 fois chère),

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différentes technologies utilisées dans le domaine de l'actionnement robotique, ainsi que les critères de sélection pour une application spécifique, nous avons conclu le chapitre en comparant deux modèles d'actionneurs commerciaux.

Chapitre IV : Commande du manipulateur

IV.1 Introduction

Les robots industriels d'aujourd'hui sont presque exclusivement équipés des contrôleurs des articulations indépendantes pour le contrôle de la position. Le problème de la commande du robot manipulateur est de déterminer l'historique des entrées articulées nécessaires pour que l'effecteur terminal exécute un mouvement commandé. Le mouvement commandé est généralement spécifié comme une séquence de positions et d'orientations de l'effecteur terminal.

De nombreuses techniques et méthodologies de contrôle peuvent être appliquées au contrôle des manipulateurs. La méthode de contrôle doit être choisie particulièrement, car la manière dont elle est mise en œuvre peut avoir un impact significatif sur les performances du manipulateur. Par exemple, suivre un chemin continu nécessite un contrôle architectural différent du contrôle point à point. De plus, la conception mécanique du manipulateur lui-même influencera le type de système de contrôle.

Dans ce chapitre, nous considérons la stratégie de contrôle la plus simple, à savoir, le contrôle articulaire indépendant. Dans ce type de commande, chaque jambe du manipulateur Stewart est commandée comme un système à entrer / sortie unique (SISO). L'objectif est de choisir un compensateur de telle sorte que la sortie suive le signal de référence.

Sur la base du contrôleur articulaire indépendant nous avons synthétisé deux approches pour contrôler la position point à point, la première approche utilise les modèles géométriques inverses et directs pour déterminer le signal de référence articulaire, et la seconde approche utilise les équations cinématiques pour tracker la position souhaitée, nous appliquons cette commande aux deux topologies Stewart, 6-UPS et 6-RUS.

IV.2 L'asservissement des actionneurs

L'asservissement des actionneurs linéaires et servo moteurs (sections III.3 et III.4) dépend de la régulation du moteur à courant continu (chapitre III.2.1). Un contrôleur proportionnel-dérivé (PD)

est utilisé, celui-ci est un mécanisme de boucle de rétroaction couramment utilisée dans les systèmes de contrôle, qui calcule en temps continu la valeur d'erreur $e(t)$ par la différence entre le point de consigne souhaité $r(t)$ et la variable de mesure $y(t)$ et applique une correction basée sur les termes proportionnels dérivés.

IV.2.1 Régulation de vitesse

On suppose que la fonction de transfert du correcteur PD est écrite sous la forme suivante :

$$C_v(s) = k_p + k_d s \quad (IV.1)$$

On a d'après la relation (III.7)

$$G_v(s) = \frac{K_m}{(f + Js). (R + Ls) + k^2} \quad (IV.2)$$

Tel que

$$\begin{cases} K_m = \frac{k.p.r}{2\pi} & \text{si } G_v(s) = \frac{\dot{l}(s)}{U(s)} \\ K_m = k.r & \text{si } G_v(s) = \frac{\dot{\varphi}(s)}{U(s)} \end{cases} \quad (IV.3)$$

La fonction de transfert de G_v en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} H_v(s) &= \frac{C_v(s).G_v(s)}{1 + C_v(s).G_v(s)} \quad (IV.4) \\ &= \frac{K_m(k_d s + K_p)}{((f + Js). (R + Ls) + k^2) + K_m(k_d s + k_p)} \\ &= \frac{K_m(k_d s + K_p)}{JLs^2 + (RJ + fL + K_m k_d)s + Rf + k_p K_m + k^2} \\ &= \frac{(K_m/(Rf + k_p K_m + k^2))(k_d s + K_p)}{\frac{LJ}{Rf + k_p K_m + k^2} s^2 + \frac{(fL + RJ + K_m k_d)}{Rf + k_p K_m + k^2} s + 1} \end{aligned}$$

Pour analyser un système linéaire du second ordre (équations IV.4), il est classique de comparer son équation caractéristique avec la forme standard suivante (Yves , 2010) :

$$\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \quad (IV.5)$$

Telle que :

$$\frac{LJ}{Rf + k_p K_m + k^2} s^2 + \frac{(fL + RJ + K_m k_d)}{Rf + k_p K_m + k^2} s + 1 = \frac{1}{w_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{w_n} s + 1 \quad (\text{IV.6})$$

Où ξ est le coefficient de amortissement et w_n est la pulsation propre du système. Donc k_p et k_d sont donnée comme suite :

$$k_p = \frac{LJw_n^2 - k^2 - Rf}{K_m} \quad (\text{IV.7})$$

$$k_d = \frac{2\xi LJw_n - (fL + RJ)}{K_m} \quad (\text{IV.8})$$

Tel que (Yves , 2010) :

$$T_p = \frac{2\pi}{w_n \sqrt{(1 - \xi^2)}} \quad (\text{IV.9})$$

$$D\% = \exp\left(\frac{-\pi}{\sqrt{(1 - \xi^2)}}\right) \quad (\text{IV.10})$$

Où T_p et $D\%$ sont la pseudo période et le dépassement respectivement.

IV.2.2 Régulation de position

La fonction de transfert de position est obtenue par l'introduction d'un intégrateur avec un gain proportionnel K_G à l'équation IV.4 :

$$G_p(s) = \frac{K_G}{s} H_v(s) \quad (\text{IV.11})$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} H_p(s) &= \frac{\frac{K_G}{s} H_v(s)}{1 + \frac{K_G}{s} H_v(s)} \quad (\text{IV.12}) \\ &= \frac{K_G K_m (k_d s + k_p)}{s((f + Js) \cdot (R + Ls) + k^2) + K_p K_m (k_d s + k_p)} \end{aligned}$$

Pour calculer le gain proportionnel K_G , on va utiliser le critère de Routh (Yves , 2010). On remplace les paramètres de l'actionneur linéaire (Tableau IV.1) dans l'équation (IV.11), et on trouve :

$$H_p(s) = \frac{3.327 \times 10^{-5}s + 0.4307}{4 \times 10^{-8}s^3 + 1.53 \times 10^{-4}s^2 + (K_G 3.327 \times 10^{-5} + 0.437)s + K_G 0.4307} \quad (\text{IV.383})$$

On va appliquer le critère de Routh sur la fonction Transfer $H_p(s)$ (IV.13) comme suit :

4.10^{-8}	$K_G 3.327.10^{-5} + 0.437$
$1.53.10^{-4}$	$K_G 0.4307$
$\frac{1.53.10^{-4}(K_G 3.327.10^{-5} + 0.437) - 4.10^{-8}K_G 0.4307}{1.53.10^{-4}} = c$	0
$K_G 0.4307$	0

Pour que le système soit stable, il faut qu'il n'y ait aucun changement de signe dans la première colonne, donc que $c > 0$ et $K_G 0.4307 > 0$, le système est donc stable si $K_G > 0$ et $K_G < 5443.0379$.

Le tableau ci-dessous donne les paramètres utiliser dans l'asservissement de l'actionneur linéaire et du servomoteur. Les gains k_p et k_d de ce correcteur sont calculées à travers les équations (IV.7) et (IV.8), pour l'actionneur linéaire on a : $K_m = \frac{k.p.r}{2\pi}$, $\xi = 0.96$ et $w_n = 1994$ (rd/s), et pour le servomoteur : $K_m = k.r$, $\xi = 0.38$ et $w_n = 5000$ (rd/s).

	$R(\Omega)$	$L(H)$	$J(\text{kg.m}^2)$	$f(\text{Nm.s/rd})$	$K(\text{Nm/A})$	p	r	k_p	k_d	K_G
Actuateur linéaire	4.8	1.6×10^{-3}	2.5×10^{-5}	10^{-8}	0.0637	3	1/10	141.6	0.01094	800
Servo moteur	4.8	1.6×10^{-3}	2.5×10^{-5}	10^{-8}	0.0637	-	1/20	270.4	0.021	800

Tableau IV.1 : Les paramètres de l'actionneur linéaire, du servomoteur et leurs correcteur PD.

IV.3 Le contrôle articulaire indépendant

IV.3.1 À base du modèle géométrique

La commande articulaire indépendante basée sur le modèle géométrique est la moyen la plus simple de commander les coordonnées opérationnelles q (position et orientation) du manipulateur 6-UPS. La figure ci-dessous montre un schéma qui présente le principe de cette commande.

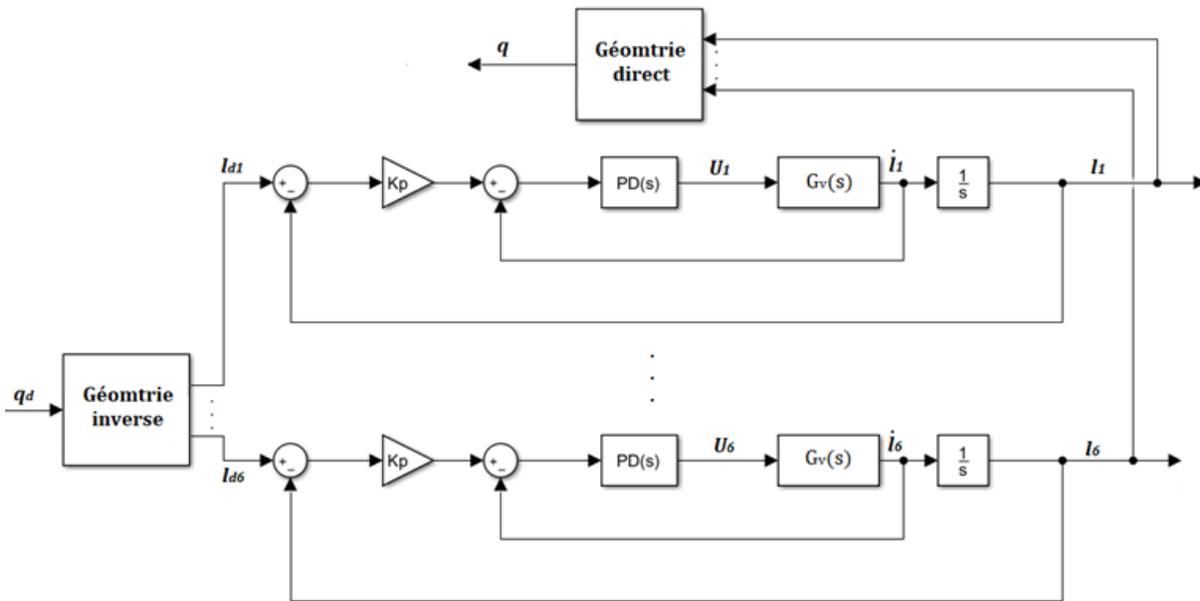


Figure IV.1 : Schéma bloc de contrôle articulaire indépendant de robot 6-UPS à base de modèle géométrie.

Le principe de fonctionnement de cette commande est de la manière suivante : les coordonnées opérationnelles q_d souhaitées sont introduite dans le modèle géométrique inverse (eq II.48) , pour trouver les coordonnées articulaires requises l_{di} . Pour $i = 1, 2, \dots, 6$, la différence entre les longueurs l_{di} et l_i (erreur d'élongation $e_i = l_{di} - l_i$) est multipliée par le gain K_{Gi} . Le résultat de la multiplication entre dans une autre boucle pour réguler la vitesse, cette boucle caractérisée par un correcteur PD et une fonction de transfert de l'actionneur en cascade (illustrée à la Figure IV.2). La vitesse de sortie est intégrée pour trouver l'élongation de sortie l_i . Cette longueur est insérée dans la géométrie directe (II.2) afin de trouver les coordonnées opérationnelles finales q . Nous allons tester cette commande dans MATLAB. Nous avons choisi la position désiré $q_d = [7 \ 8 \ 18 \ 1.5 \ 1 \ 0.5]$ et la position initiale $q_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]$, la réponse est donnée dans le graphe suivant :

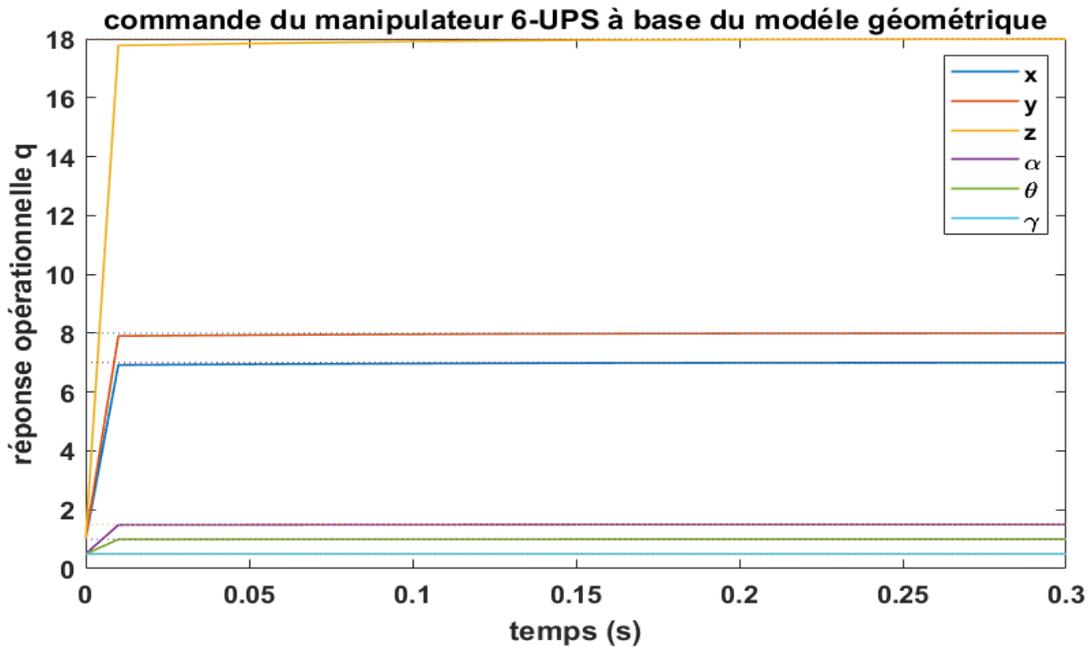


Figure IV.2 : La réponse opérationnelle de la commande à base du modèle géométrique pour le manipulateur de 6-PUS.

Il est noté que le schéma de commande du manipulateur 6-UPS est également valable pour le manipulateur 6-RUS, le modèle géométrique direct et inverse et la fonction de transfert de ce dernier devraient être utilisés. Nous allons tester cette commande pour le robot 6-RUS, pour les mêmes variables q_d et q_0 précédemment décrites, la réponse q est donnée dans la figure suivante :

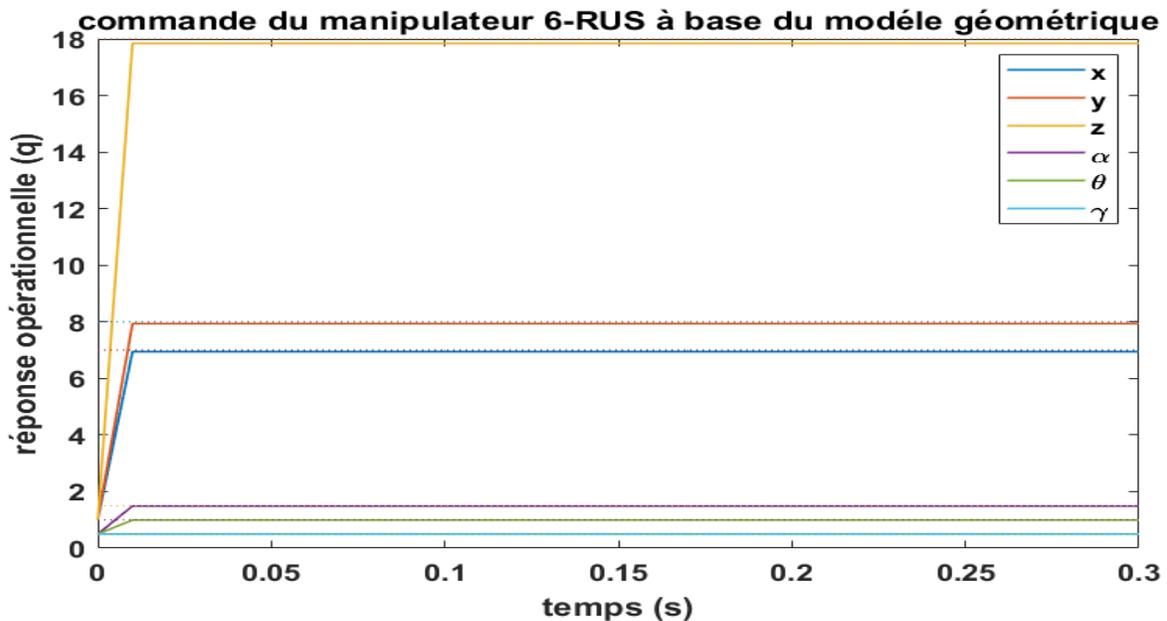


Figure IV.3 : La réponse opérationnelle de la commande à base du modèle géométrique pour le manipulateur de 6-RUS.

Le tableau IV.2 présente les performances des deux manipulateurs :

		x	y	z	α	θ	γ
6- UPS	q	7	8	18	1.5	1	0.5
	e=q _d -q	0	0	0	0	0	0
	T _r (s)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
6- RUS	q	7	8	18	1.5	1	0.5
	e=q _d -q	0	0	0	0	0	0
	T _r (s)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tableau IV.2 : Les performances de la réponse opérationnelle basée sur le modèle géométrique pour les deux manipulateurs.

IV.3.2 À base de modèle cinématique

Une autre méthode valable pour commander la position du robot est l'utilisation du modèle cinématique, cette méthode consiste à résoudre le problème du contrôle de mouvement en deux étapes, la trajectoire souhaitée de l'effecteur final est transformée par une cinématique inverse dans les trajectoires articulaires correspondantes, qui constituent alors les entrées articulées de référence pour un certain contrôle de l'espace. Où la cinématique du manipulateur est manipulée en dehors de la boucle de contrôle, ce qui permet de résoudre le problème des singularités et/ou les redondances à résoudre séparément. Le point clé du contrôle cinématique est la solution du problème de la cinématique inverse.

L'objectif est de concevoir des contrôleurs pour les problèmes de régulation (contrôle de position et vitesse). Maintenant, on va appliquer ces lois de commande aux manipulateurs Stewart 6-UPS et 6-RUS pour trouver la position $q(t)$ point à point. Selon la relation (III.2) le problème de cinématique inverse est donné :

$$\dot{L} = J_{inv} \dot{X} \quad (IV.14)$$

D'un point de vue algorithmique, il est conseillé d'introduire un terme de correction de rétroaction visant à éliminer toute dérivée numérique de la solution (B. Siciliano, et al., 2003).

$$\dot{L} = J_{inv} (\dot{x}_d + K e) \quad (IV.15)$$

où $e = x_d - x$ est l'erreur entre l'ensemble souhaité et l'ensemble réel des variables de position, et K est un gain matriciel défini positif approprié. Du coup l'erreur dynamique est gouverné par l'équation suivante :

$$\dot{e} + Ke = 0 \quad (\text{IV.16})$$

L'équation est globalement exponentielle stable pour chaque K positive, selon (Lafmejani, et al., 2020) le robot converge vers le point souhaité à partir de n'importe quelle position initiale . Le gain K du contrôleur régit le taux de convergence des trajectoires du système vers la position désirée. Le contrôleur proposé conduit l'effecteur finale du robot vers le point cible plus rapidement avec des valeurs de K plus importantes. Le schéma résultant de l'algorithme de cinématique inverse de robot 6-UPS est illustré dans la figure IV.4.

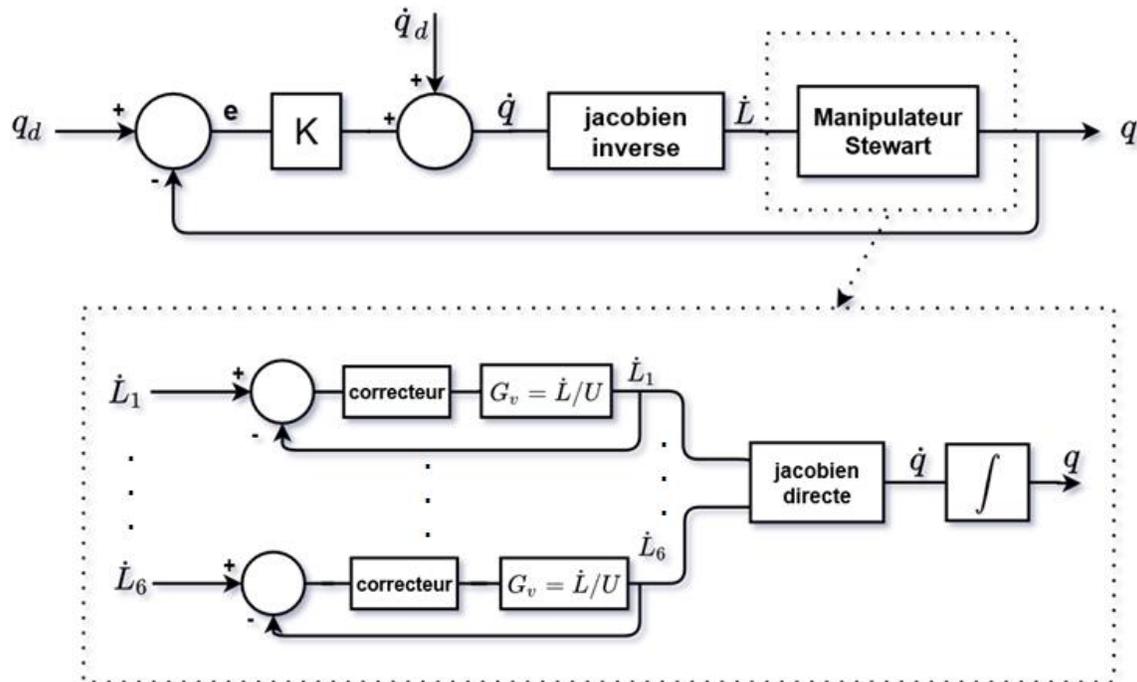


Figure IV.4 : Schéma bloc de contrôle articulaire indépendant de robot 6-UPS a base du modèle cinématique.

Ce schéma résout le problème dit le contrôle cinématique, c'est-à-dire de trouver les trajectoires opérationnelles $q(t)$ appropriées correspondantes à une trajectoire opérationnelle souhaitée $q_d(t)$. Le jacobien ainsi formulé peut être utilisé pour résoudre un certain nombre de problèmes de contrôle cinématique, à savoir, pour les manipulateurs en série, les manipulateurs redondants, les manipulateurs parallèles, les systèmes multi bras coopératifs et les manipulateurs flexibles.

Nous effectuerons un essai pour cette commande dans MATLAB. Les paramètres d'asservissement des deux actionneurs ainsi les variables initiaux et désirées sont identique à ceux du section précédente (IV.3.1), la réponse opérationnelle de la commande cinématique est donnée dans le graphe suivant :

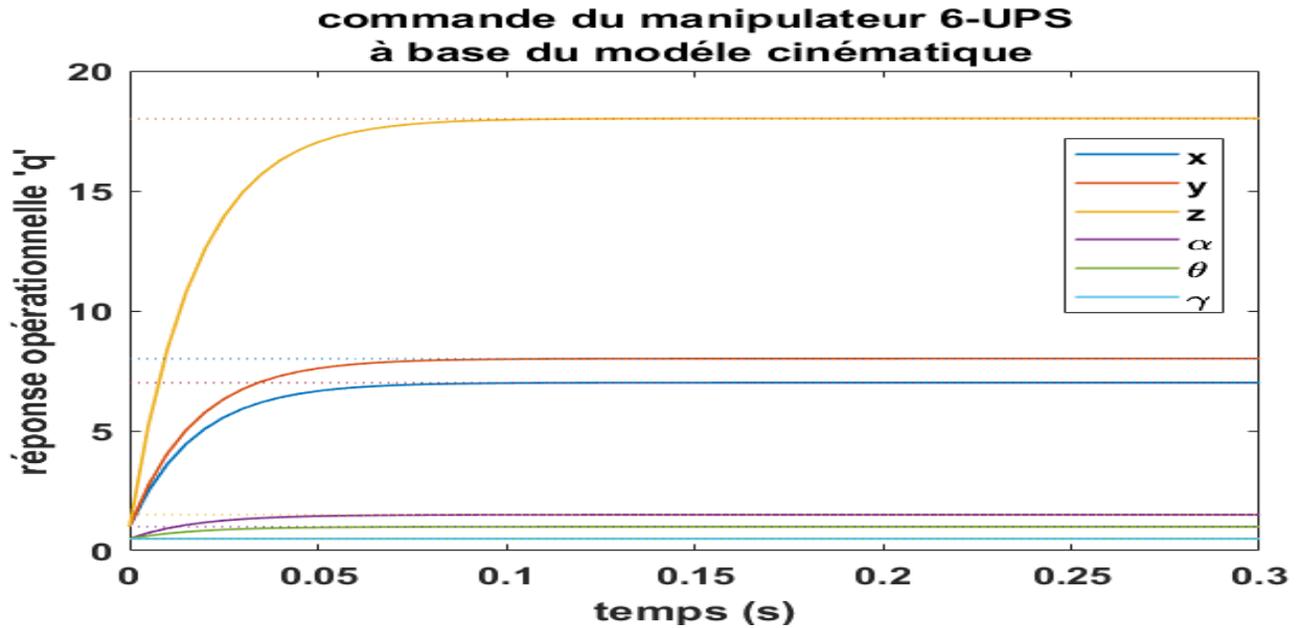


Figure IV.5 : La réponse de sortie de variable q à base le modèle cinématique de 6-UPS.

La réponse articulaire pour le robot 6-RUS, est donnés dans le graphe ci-dessous :

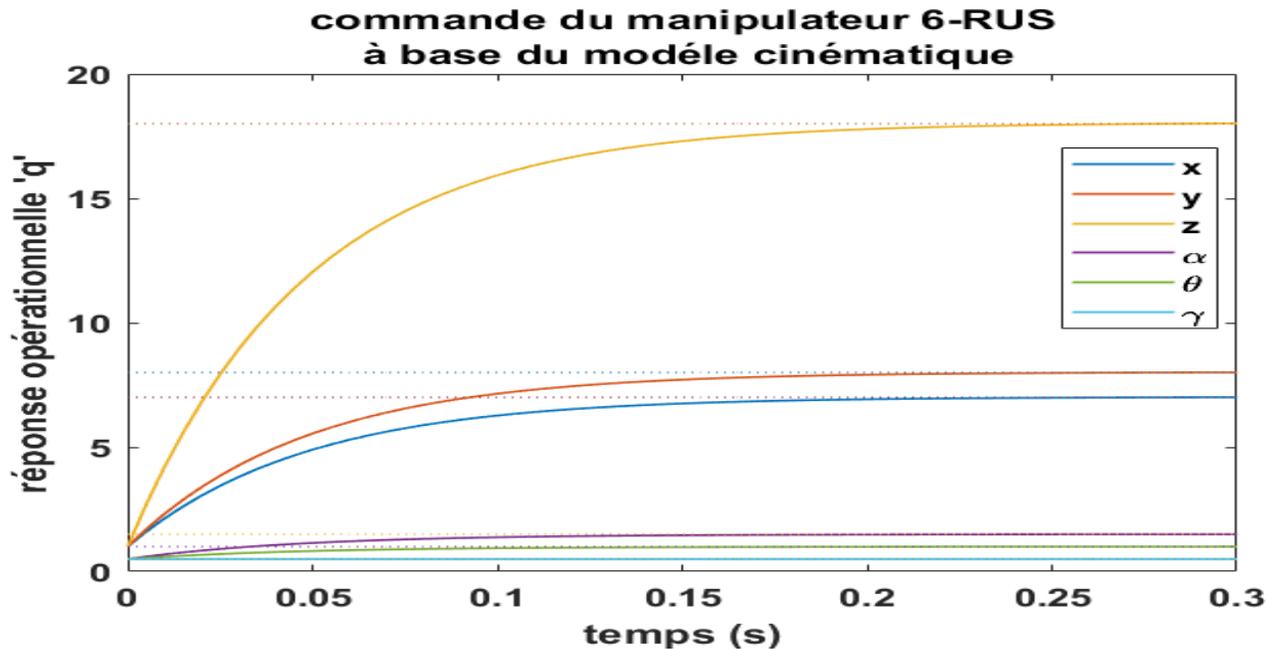


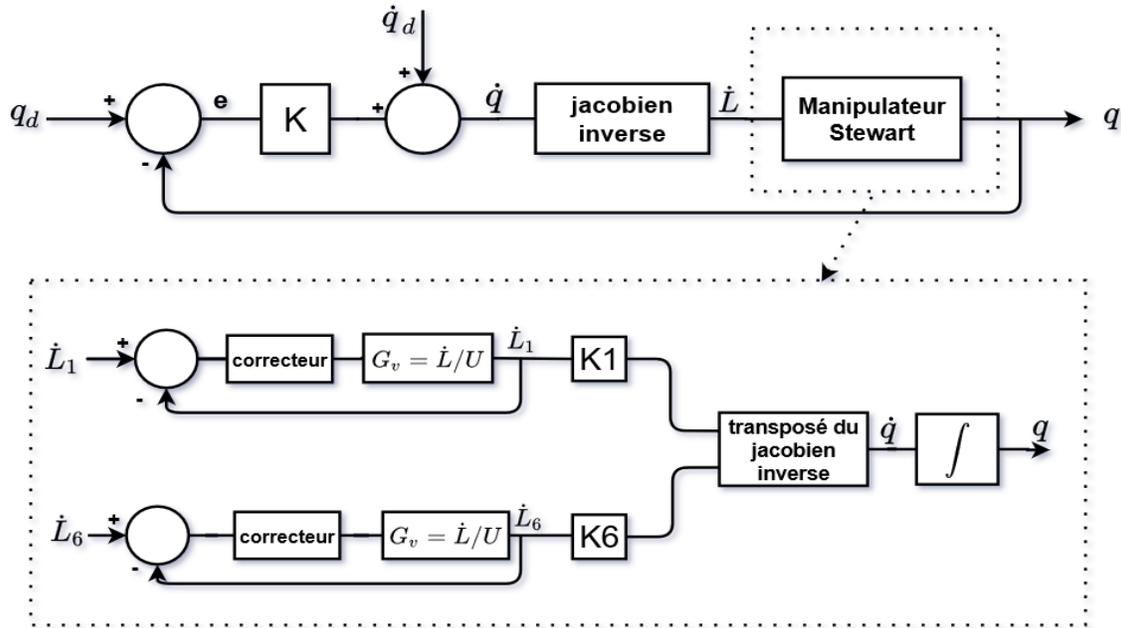
Figure IV.6 : La réponse de sortie de variable q à base le modèle cinématique de 6-RUS.

		x	y	z	α	θ	γ
6- UPS	q	7	8	18	1.5	1	0.5
	$e=q_d-q$	0	0	0	0	0	0
	$T_r(s)$	0.05	0.06	0.075	0.035	0.02	0.01
6- RUS	q	7	8	18	1.5	1	0.5
	$e=q_d-q$	0	0	0	0	0	0
	$T_r(s)$	0.135	0.15	0.185	0.08	0.05	0.01

Tableau IV.3 : Les performances de la réponse opérationnelle basée sur le modèle cinématique pour les deux manipulateurs.

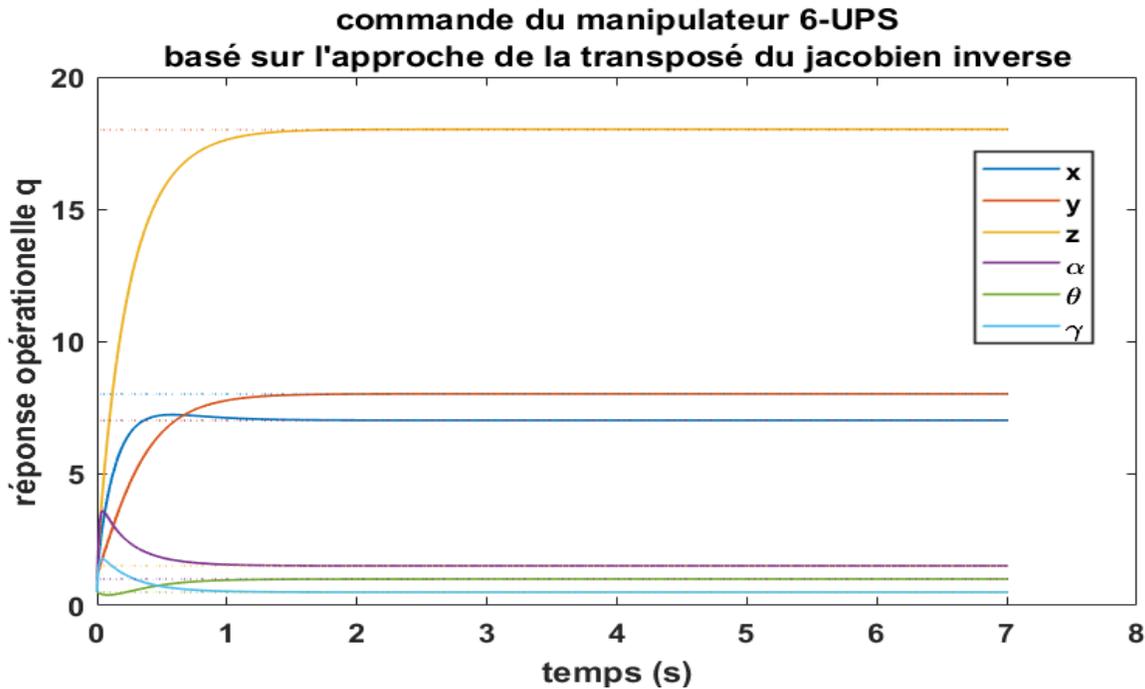
IV.3.3 La commande cinématique adapté à la transpose du jacobien inverse

L'élément-clé de la commande cinématique est le jacobien inverse et direct. Pour les robots parallèles il est facile d'obtenir le jacobien inverse analytiquement car il provient du MGI, par contre il est difficile d'obtenir le jacobien direct puisqu'il n'y a pas de formule analytique pour le MGD, pour cela il est souvent calculés par l'inversement du jacobien inverse, et cela n'est pas recommandable dans les applications en temps réelles, car il est difficile arithmétiquement d'inverser une matrice de taille importante, et cela prend du temps précieux, une autre approche pour l'obtenir est d'utiliser la transpose du jacobien inverse qui est facile et rapide à calculé, on ajoute un gain correctif K_s pour ajuster l'erreur, la figure (IV.7) illustre le schéma de la commande cinématique adapté à la transposer du jacobien inverse.



IV. 7 : Schéma bloc représente la commande cinématique adapté à la transposé du jacobien inverse.

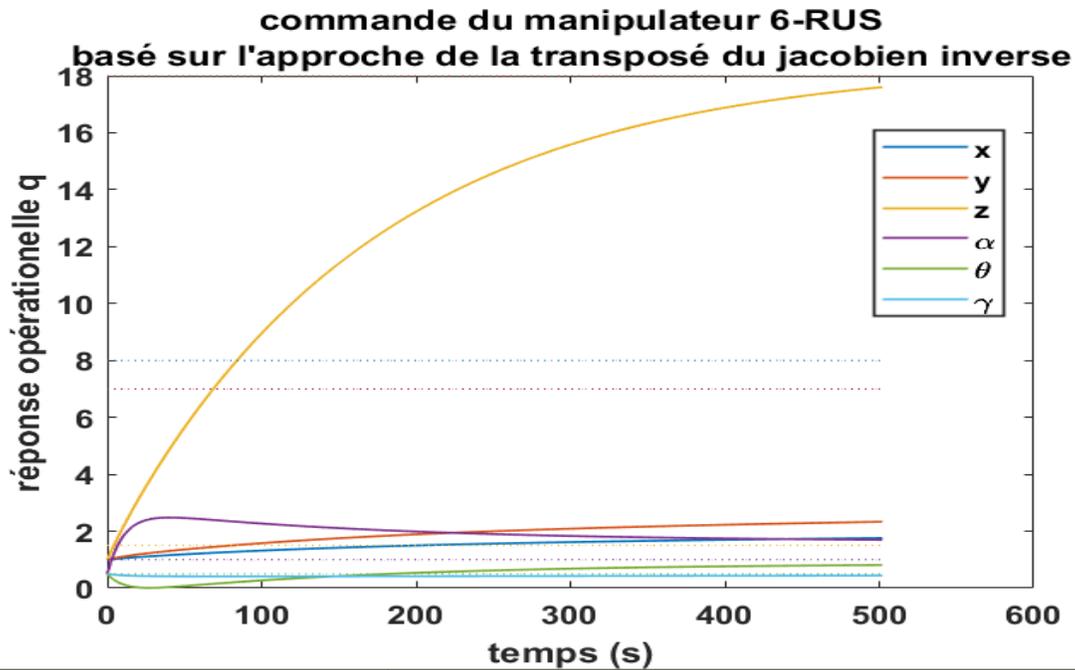
Nous allons implémenter cette commande dans MATLAB pour le cas du manipulateur 6-UPS . On a choisi la position initiale $q_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]$, la position désiré $q_d = [7 \ 8 \ 18 \ 1.5 \ 1 \ 0.5]$ et pour un choix empirique du $K_s=0.09$ où $s=1,\dots,6$, la réponse est donnée dans le graphe suivant :



IV. 8 : La réponse opérationnelle de la commande cinématique modifier pour le robot 6-UPS.

On remarque que le système est stable et la réponse suit la consigne proprement, bien que le temps de réponse est un peu long ($t_{r\ max} = 1.2$), il reste que ce système présente une solution alternative valable pour surpasser le problème de l'inversion de la jacobien inverse.

- Pour le manipulateur 6-RUS avec les positions opérationnelles initiale et désiré précédent, et pour un choix empirique du $K_s=0.007$ où $s=1,\dots,6$. On obtient la figure (IV.9).



IV. 9 : La réponse opérationnelle de la commande cinématique modifier pour le robot 6-RUS.

Le graphe montre que la réponse ne suit pas la consigne (système instable), ce qui est dû au mauvais choix de K_s qui n'est pas optimal. Comme une perspective cela peut être amélioré en sélectionnant K_s par une méthode d'optimisation ou en utilisant un algorithme méta heuristique.

Une comparaison entre les performances de deux manipulateurs, qui utilise l'approche de la commande cinématique par la transposition du jacobien inverse, est présentée dans le tableau (IV.7).

		x	y	z	α	θ	γ
6-UPS	q	7	8	18	1.5	1	0.5
	$e=q_d-q$	0	0	0	0	0	0
	$T_r(s)$	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

6- RUS	q	1.8042	2.4057	17.94	1.6752	0.8349	0.4465
	$e=q_d-q$	5.1958	5.5943	0.0588	-0.1752	0.1651	0.0535
	$T_r(s)$	-	-	-	-	-	-

IV. 4 : Les performances de la réponse opérationnelle basé sur le modèle cinématique modifié pour les deux manipulateurs.

IV.3.4 Comparaison entre les commandes

La réponse opérationnelle de la commande géométrique est très précise avec un temps de réponse de 0,001 et un dépassement nul pour les deux manipulateurs. En ce qui concerne le contrôle cinématique, la qualité de réponse est quasiment identique pour les deux robots, aussi bien en erreur statique qu'en dépassement qui sont nulles, la différence est dans le temps de réponse tel que le manipulateur 6-UPS est plus rapide que le manipulateur 6-RUS. Pour la commande cinématique adaptée à la transposition du jacobien inverse, concernant le manipulateur 6UPS, le temps de réponse est de 1,2 s, l'erreur statique est nulle, le dépassement de déplacement est aussi nul, mais pour l'orientation il varie de 0 à 42 %, pour le manipulateur 6-RUS, la réponse est instable.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux approches du contrôle de position basées sur une stratégie de commande indépendante des articulations, dont l'une utilisait les modèles géométriques et l'autre les modèles cinématiques, ces lois sont appliquées aux deux manipulateurs de Stewart, enfin une comparaison a été faite pour comparer les performances.

Conclusion générale

Dans ce travail, on s'est intéressé à la conception et la simulation des robots parallèles de 6 degrés de liberté (ddl) avec deux structures différentes, la différence entre ces structures est liée directement au mode d'actionnement, tel que ces manipulateurs sont définis par une plate-forme mobile liée à une base fixe par six chaînes cinématiques identiques, chaque chaîne cinématique est composée d'une articulation universelle et articulation sphérique considérées comme des actionneurs passifs et un actionneur motorisé, un vérin électromécanique dans le cas de la structure 6-UPS et un servomoteur dans le cas de la structure 6-RUS.

Nous avons présenté dans ce manuscrit pour chaque structure, la modélisation géométrique et cinématique, La sélection des dimensions optimales et obtenues via une formulation d'un problème d'optimisation, Nous avons un objectif à optimiser, concernent l'isotropie cinématique et le volume de travail, Nous avons utilisé une technique d'optimisation génétique implémentée sous Matlab (Optimisation Toolbox). À base de la dimension optimale trouver, une conception CAO a été réaliser,

Une étude des actionneurs a été faite, concernant les performances et les caractéristiques technologiques ainsi une comparaison fonctionnelle des deux structures, d'un point de vue financière le robot 6-RUS est un bon choix économique du fait que le cout de construction est bas, du point de vue performance, la structure 6-PUS est mieux adaptée en raison du son large espace du travail et leur capacité à manipulation des charges importantes.

La commande est établie en tenant compte la régulation de la position dans une première approche, pour cela on a utilisé les équations du modèle géométrique afin de déterminer les coordonnées opérationnelles nécessaires pour que l'effecteur final arrive à la destination désirée, cette approche donne un résultat satisfait en simulation, mais il reste le fait d'absence d'une boucle de rétroaction sur les coordonnées opérationnelles peut causer une désynchronisation dans l'actionnement des articulations.

On a essayé de surpasser ce défi par l'introduction de la commande cinématique où le jacobien inverse et le jacobien direct sont utilisés dans la boucle de la commande, les résultats aboutis sont bons pour les deux structures en termes du temps de la réponse et erreur statique, il faut noter que

le calcul du jacobien directe inclut une procédure d'inversion d'une matrice carrée de dimension (6) a chaque itération et cela peut ralentir l'unité de calculs, ce qui pose une perturbation de la commande, pour cela on a proposé d'utiliser la transpose du jacobien inverse au lieu du jacobien direct, on a pu obtenir une réponse stable pour la structure 6-UPS, et ce n'était pas le cas pour la structure 6-RUS.

Finalement, nous concluons par les perspectives suivantes :

- Une réalisation pratique pour vérifier l'efficacité du développement théorique.
- Développement d'un modèle dynamique affine d'étudié l'impact de la charge sur les commandes.
- Tester d'autres types de commandes.

Bibliographie

- Ahmet Sumnu** Simulation and PID control of a Stewart Platforme with lineair motor [Revue]. - Gaziantep, Turkey : Department of Aircraft and Aerospace Engineering, Gaziantep University, 15 August 2016. - pp. 2-5.
- B. Siciliano [et al.]** JACOBIAN-BASED ALGORITHMS : A BRIDGE BETWEEN KINEMATICS [Revue]. - Stanford University, CA : [s.n.], 2003.
- Boimond Jean-Louis** ROBOTIQUE [Rapport]. - [s.l.] : ISTIA, Université Angers.
- Bonev I** The true origins of parallel robots [En ligne]. - 2003. - <https://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>.
- Clavel R** US Patent : Device for the Movement and Positioning of an Element in Space [Revue] // No 4,976,582. - 1990.
- Erfan Mirshekari, Afshin Ghanbarzadeh et Kourosch Heidari Shirazi** Structure Comparison and Optimal Design of 6-RUS Parallel Manipulator Based on Kinematic and Dynamic Performances [Revue] // Latin American Journal of Solids and Structures. - 2016. - pp. 2414-2438.
- Firgelli Automations** Inner Workings of a Linear Actuator [En ligne] // Firgelli Automations. - 01 August 2018. - https://www.firgelliauto.com/blogs/news/inside-a-linear-actuator-how-a-linear-actuator-works?utm_source=Pinterest&utm_medium=Social.
- Génuouël S** Dossier technique Plate-forme 6 axes [Rapport]. - [s.l.] : Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, 2010.
- Gough V.E** Contribution of paper on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance [Revue] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Automobile Division. - 1956. - pp. 392-394.
- Gough V.E et Whitehall S.G** Universal type test machine [Revue] // Proceedings of the FISITA. - 1962.
- Gu Edward Y.L** A Journey from Robot to Digital Human [Livre]. - Heidelberg : Springer, 2013. - Vol. 1. - 978-3-642-39046-3.
- Harib Khalifa et Srinivasan Krishanswamy** Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool Structures [Revue] // Robotica. - september 2003.
- 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.

Joumah Alaa Aldeen et Chadi Albitar Design Optimization of 6-RUS Parallel Manipulator Using Hybrid Algorithm [Revue] // International Journal of Information Technology and Computer Science. - 2018. - pp. 83-95.

Kevin M. Lynch et Frank C. Park MODERN ROBOTICS MECHANICS, PLANNING, AND CONTROL [Livre]. - Cambridge : Cambridge University Press, 2017.

Lafmejani Amir Salimi [et al.] Kinematic Modeling and Trajectory Tracking Control of an Octopus-Inspired Hyper-Redundant Robot [Revue] // IEEE Robotics and Automation Letters. - 2020. - pp. 1-8.

Merlet Parallel robots [Rapport]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2006.

Merlet J Les robots parallèles [Rapport]. - Hermès, Paris, : [s.n.], 1997.

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.

MERLET J.-P. Parallel Robots [Livre]. - P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands. : Springer, 2006.

Nguyen Charles C Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist [Revue] // Computers & Electrical Engineering. - 1991. - pp. 191-203.

Pastre D Méthodes numériques [Rapport]. - [s.l.] : Université René Descartes UFR de mathématiques et informatique, 2004.

Pierre Mayé Moteurs électriques pour la robotique [Livre]. - Paris : DUNOD, 2016.

Pollard Willard LV Position-controlling apparatus [Revue] // US Patent 2,286,571. - 1942.

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.

Romain LEFEVRE Qu'est-ce qu'un servomoteur [En ligne] // supinfo. - 2015. - <https://www.supinfo.com/articles/single/296-qu-est-ce-qu-servomoteur>.

Rui zeng [et al.] DETERMINATION OF THE PROPER MOTION RANGE FOR THE ROTARY ACTUATORS OF 6-RSS PARALLEL ROBOT [Revue]. - [s.l.] : CCToMM Mechanisms, Machines, and Mechatronics (M3), 2015.

Stewart D A Platform with Six Degrees of Freedom [Revue]. - [s.l.] : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965. - Vol. 180. - pp. 371-386.

Stewart D A platform with six degrees of freedom. [Rapport]. - [s.l.] : In Proceedings of the Institution, 1965.

Théodore Wildi et Gilbert Sybille Electrotechnique (Physique) (French Edition) [Livre]. - [s.l.] : DE BOECK SUP, 2015.

W.Khalil et E.Dombre Modeling Identification and Control of Robots [Livre]. - [s.l.] : Butterworth-Heinemann, 2004.

Yves Granjon AUTOMATIQUE Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état [Livre]. - Paris : Dunod, 2010.

Zuriel Inside an Electric Linear Actuator [En ligne] // progressive automations. - 16 July 2018. - <https://www.progressiveautomations.com/blogs/products/inside-an-electric-linear-actuator>.

يتكون هذا العمل من دراسة و تصميم و محاكاة لروبوتين ذو هيكل متوازي مع ست درجات من الحرية، ويشمل العمل نمذجة هندسية و حركية، مما يسمح بالحصول على الابعاد المثلى للروبوت، و ذلك عن طريق خوارزمية جينية ، تم تجسيد هذه الابعاد عن طريق برنامج رسم مدعم بالحاسوب، أخيراً قمنا بإنشاء ثلاثة أنواع من التحكم بناءً على استراتيجية التحكم المستقلة للمفاصل.

الكلمات المفتاحية: روبوت بهيكل متوازي ، محرك سيرفو ، محرك خطي ، تعديل عرض النبضة ، نموذج حركي ، نموذج هندسي.

Résumé

Ce travail consiste en l'étude, la conception et la simulation de deux robots de structure parallèle, de type 6-UPS et 6-RUS à six degrés de liberté, le travail comprendra une modélisation géométrique et cinématique, qui permet d'obtenir les dimensions optimales des deux robots à l'aide d'un algorithme génétique, ces dimensions sont concrétisées par un logiciel de CAO, et enfin nous avons synthétisé trois type de commande basée sur la stratégie de commande indépendant des articulations.

Mots clés : robot à structure parallèle, servomoteur, moteur linéaire, pulse width modulation, modèle cinématique, modèle géométrique .

Abstract

this work consists in the study, design and simulation of two robots of parallel structure, type 6-UPS and 6-RUS with six degrees of freedom, the work includes a geometrical and kinematic modeling, which makes it possible to obtain the optimal dimensions of the two robots using a genetic algorithm, these dimensions are concretized by a CAD software, and finally we have synthesized three types of control based on the strategy of independent control of the joints.

Keywords: parallel structure robot, servomotor, linear motor, pulse width modulation, kinematic model, geometric model .