

10/03

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieure et de la recherche scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de génie Mécanique



Mémoire du projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Mécanique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SUJET

**Modélisation, Etude
Et Simulation
D'un
Robot Manipulateur**

Proposé et encadré par :

Mr. M. MADANI

Etudié par :

Mr. MOUMENI Slimane

Membres du jury :

Mr. BELHADEF
Mr. RIACHE
Mr. GUERGUEB

PROMOTION 2003

DEDICACES

Je dédie mon travail

A mes parents

A mon frère et mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis

A tous ceux qui me sont chers

A mes collègues de la promotion 2003

REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur Mr. MADANI, et mes sincères remerciements pour avoir assumé la lourde responsabilité de m'encadrer, m'orienter, et de me conseiller tout au long de la réalisation de mon travail.

Mes remerciements vont également à messieurs les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'en être membres.

Il me tient également à cœur de dire que je ne pourrais jamais assez remercier mes parents qui m'ont aidé tout le long de mes études, tous particulièrement ma défunte mère à qui je doit ce que je suis devenu aujourd'hui.

Je tiens à remercier tous mes collègues de promotion et mes amis qui m'ont aidé durant ce travail, plus particulièrement Sofiane, Achour, Adlane, Nabile, Rabah. Ainsi que les enseignants de spécialité génie mécanique, plus particulièrement Mr. BENBERAÏKA, Mr. MADANI, Mr. BENNOUR, Mr. RIACHE, Mr. BELHADEF, sans oublier mon professeur de mathématique de deuxième année TCT de Béjaïa.

Je remercie aussi le personnel de la bibliothèque centrale de l'école nationale polytechnique, ainsi que les responsables des centres de documentation de l'INGM de Boumerdes, et de Babezzouar (USTHB).

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué par leur aide morale ou matérielle à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

في هذا المشروع قمنا بنمذجة، حساب و محاكاة ذراع آلية صناعية، النماذج الرياضية (الهندسية و الحركية) تساعدنا لاستخلاص طريقة التحكم الخطي للذراع الآلية. بوضع دفتر شروط محدد، اخترنا نوع المخفضات و المحركات لكل مفصل. و حسبنا عناصر الذراع، ثم قمنا بمحاكاته كخلاصة لإثبات عملنا.

كلمات مفتاحية: ذراع آلية، حيز العمل، نموذج هندسي، نموذج حركي و نموذج ديناميكي.

Résumé:

Dans ce projet, notre travail a été consacré à la modélisation, le dimensionnement et la simulation d'un robot manipulateur industriel. L'établissement des modèles mathématiques (géométrique et cinématique) vont servir comme support pour la mise au point de la commande en ligne du robot. En se donnant un cahier des charges bien défini, on a choisi le type de réducteur et actionneurs à utiliser, et proposer une méthode de calcul de la structure mécanique du robot, ainsi, une simulation de notre robot a pu être réalisé pour illustrer notre travail.

Mots clés: Robots manipulateur, Modèle géométrique, Modèle cinématique, Modèle dynamique, Espace de travail.

Abstract:

In this project, we focus our study on modeling, dimensioning and simulation of industrial serial robot. The description of the geometric and kinematics model, presented her can be used to establish the robot's command. We proposed one méthode for the dimensioning of the robot, according to a book charges. Finally we completed our study by a simulation of robot under Matlab software for illustrate our work.

Key words: Arms, work space, geometric model, kinematics model, dynamic model.

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : Généralité

I.1	Introduction (Historique).....	3
I.2	Définitions et vocabulaire des robots manipulateurs	5
I.3	Classification des robots.....	7
I.4	Morphologie et notion générale sur les robots manipulateurs.....	9
I.5	Nombre minimal de paramètre nécessaire à la définition de la situation d'un objet dans l'espace.....	11
I.6	Définition des liaisons (ou articulations).....	11
	I.6.1 Articulation rotoïdes	11
	I.6.2 Articulation prismatique	12
I.7	Les différentes architectures des robots manipulateurs	12
	I.7.1 Différente structure de base	13
I.8	Indice de mobilité, degré de liberté, redondance et singularité d'un robot manipulateur.....	14
I.9	Espace articulaire et espace de travail.....	16
	I.9.1 Espace articulaire.....	16
	I.9.2 Espace de travail.....	16
	I.9.3 Comparaison des volumes de travail des différentes structures de base	16
I.10	Les capteurs en robotique	18
I.11	Les Actionneurs	20
	I.11.1.1 L'énergie pneumatique	20
	I.11.1.2 L'énergie hydraulique.....	21
	I.11.1.3 L'énergie électrique.....	22
	I.11.1.4 Les actionneurs thermomécaniques	22

CHAPITRE II : Modélisation Géométrique

II.1	Introduction	24
II.2	Modèle géométrique direct : (MGD)	24
	II.2.1 Outils Mathématiques pour la Modélisation géométrique.....	25
	II.2.1.1 Transformations Homogènes.....	25
	II.2.1.2 Matrice de transformation de translation et de rotation pure	26
	II.2.1.2.1 Translation pure	26
	II.2.1.2.2 Rotation pure	27
	II.2.1.3 Matrice de transformation correspondant à une rotation autour d'un vecteur passant par l'origine	27
	II.2.2 Description de la géométrie des robots à structure ouverte simple	29
	II.2.3 Description de la géométrie choisie pour notre robot :.....	32
	II.2.4 Modèle géométrique direct du robot choisie.....	33

II.3	Espace de travail.....	35
II.3.1	Analyse de l'espace de travail du robot.....	36
II.3.2	Calcul de l'espace de travail du robot choisi.....	36
II.4	Modèle Géométrique Inverse : (MGI).....	42
II.4.1	La méthode de Paul pour le calcul du MGI.....	42
II.4.2	Calcul du modèle géométrique inverse pour le robot choisi.....	43
II.5	Conclusion	46

CHAPITRE III : Modélisation Cinématique

III.1	Introduction.....	47
III.2	Modèle cinématique directe :(MCD)	47
III.3	Calcul de la matrice jacobienne	48
III.3.1	Calcul de la matrice de base.....	48
III.3.2	Calcul de la matrice $J_{n,i}$	49
III.4	Calcul de la matrice jacobienne pour le robot choisi.....	50
III.5	Modèle cinématique inverse : (MCI)	53
III.6	Conclusion	53

CHAPITRE IV : Contribution à l'Etude du Robot

IV.1	Introduction.....	55
IV.2	Objectifs de l'étude.....	55
IV.3	Cahier des charges.....	55
IV.4	Travail demandé.....	56
IV.5	Actionneurs.....	56
IV.5.1	Choix de la source d'énergie.....	56
IV.5.2	Choix du type de moteur.....	58
IV.6	Problèmes de motricité.....	59
IV.6.1	Motricité centrale.....	59
IV.6.2	Motricité répartie	60
IV.6.3	Motricité mixte	60
IV.7	Type de réducteur choisi pour chaque articulation	60
IV.7.1	Articulations (1), (2) et (3).....	60
IV.7.2	Articulation (4) et (5).....	61
IV.8	Réducteurs harmonique drive	61
IV.8.1	Définition	61
IV.8.2	Principe de fonctionnement d'un réducteur HD.....	61
IV.8.3	Avantage d'un réducteur HD.....	63
IV.8.4	La lubrification	63
IV.9	Conception de la structure mécanique	64
IV.9.1	Choix du matériau des segments	64
IV.9.2	Choix de la section et de la forme des segments.....	65
IV.10	Architecture du Porteur.....	66
IV.11	Méthode d'approche simplifiée	66
	SIMULATION DU ROBOT	70
	CONCLUSION GENERALE	75

Liste des Figures

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
 المكتبة — BIBLIOTHEQUE
 Ecole Nationale Polytechnique

Figure 1.1	Cellule classique avec quatre robots	4
Figure 1.2	Structure générale d'un robot manipulateur	10
Figure 1.3	Symbole de l'articulation rotoïde	12
Figure 1.4	Symbole de la liaison prismatique	12
Figure 1.5.a	STRUCTURE PPP	13
Figure 1.5.b	STRUCTURE RPP ou PRP	13
Figure 1.5.c	STRUCTURE RRP	13
Figure 1.5.e	STRUCTURE RRR	14
Figure 2.1	Repère R_j exprimés dans le repère R_i	25
Figure 2.2.a	La translation pure du repère R_i vers le R_j	26
Figure 2.2.b	La rotation pure du repère R_i vers le R_j	27
Figure 2.3	Robot à structure ouverte simple	29
Figure 2.4	Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple	30
Figure 2.5	Description de la géométrie choisie pour notre robot	32
Figure 2.6	Schéma simplifié du programme qui calcul l'espace de travail du robot	37
Figure 3.1	Cas d'une articulation rotoïde	49
Figure 4.1	Schéma représentent le principe de fonctionnement les différentes parties du réducteur	63
Figure 4.2	Nature de quelques matériaux en fonction de E/ρ	65

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

GENERALE

ET

GENERALITES

SUR

LA ROBOTIQUE

INTRODUCTION GENERALE

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction Générale :

Pour commander un robot et simuler son comportement on doit disposer de modèles mathématiques. Plusieurs niveaux de modélisations sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques.

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée. En effet la difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. On prend en compte le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée.

Ces modèles, qu'ils soient utilisés en simulation ou en commande, doivent représenter le comportement géométrique, cinématique ou dynamique du robot de façon réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en oeuvre des procédures efficaces d'identification de leurs paramètres constitutifs.

Pour qu'une commande puisse effectivement être implantée sur un contrôleur de robot, les modèles doivent être calculés en ligne et donc, le nombre d'opérations à effectuer doit être minimum. Les techniques proposées ont été développées dans ce souci et conduisent aux modèles les plus performants.

Donc Avant toute conception de robot, la modélisation et la simulation de celui-ci est impérative pour le bon fonctionnement et la réussite du prototype à réaliser. C'est ce qui est traité dans notre travail qui est consacré à la « Modélisation et Etude d'un robot manipulateur à 5 degré de liberté », ce type de robot est une reproduction directe de la structure du bras humain.

Notre travail se présente en quatre chapitres :

La 1^{ère} partie : Généralité

- ✚ Le **premier chapitre**, est abordé par un historique de la robotique. On donne les différents types de robots et le vocabulaire utilisé dans la robotique, sans oublier une définition détaillée des robots manipulateurs.

La 2^{ème} partie : La Modélisation

- ✚ Le **deuxième chapitre**, décrit le calcul du Modèle géométrique direct à partir de la matrice de transformation homogène qui va être utilisée comme outil à la détermination du Modèle géométrique inverse.
- ✚ Le **troisième chapitre**, décrit le Modèle cinématique direct qui consiste à établir la matrice jacobienne associée au modèle géométrique. On a exposée deux méthodes, la méthode classique (méthode indirecte), de mise on œuvre fastidieuse, est abandonnée au profit d'une méthode de factorisation (méthode directe) de la matrice jacobienne. cette méthode va nous permettre par la suite de déterminer le modèle inverse.

La 3^{ème} partie : Dimensionnement et Simulation

- ✚ Le **quatrième chapitre**, après avoir déterminer le modèle géométrique et cinématique, ce chapitre est une contribution à l'étude de notre robot.

La simulation de notre robot sera élaboré avec le « Robotics toolbox 6 », réaliser par Peter corke, très utiliser dans les laboratoires de recherche en robotique.

Conclusion

On terminera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre
I

GENERALITES

I.1 Introduction (Historique)

Étymologiquement, le mot robot a connu plusieurs définitions selon différentes langues, le mot « robot » tire sa racine du bulgare robu qui signifie « serviteur », donnant naissance au mot russe rabota qui signifie « travail » et au mot tchèque robota qui se traduit par « travail forcé ».

Vers les années vingt (1921), l'écrivain tchèque Karel CAPEK a popularisé le terme « robot » au travers d'une pièce théâtrale intitulée « Rossum's Universal Robots », elle met en scène des petits êtres artificiels qui répondent aux ordres de leur maître comme des esclaves, de cela le mot « robot » a pris sa véritable signification.

Les robots industriels n'ont aucune apparence humaine mais font le travail des humains. Le concept de robot industriel fut breveté en 1954 par G.C. Devol (brevet US n° 2988237). Ce brevet décrit la réalisation d'un bras mécanique asservi capable d'effectuer des tâches de caractère industriel. Le premier modèle du genre fut mis en oeuvre par Unimation Inc. en 1961 et depuis, des dizaines de milliers de robots ont été mis au travail aux Etats-Unis, au Japon et en Europe.

Les robots industriels d'aujourd'hui sont en fait des appareils actionnés mécaniquement sous le contrôle d'un ordinateur. La figure 1 représente la structure typique d'un robot. Le mécanisme de préhension, appelé manipulateur, simule les gestes d'un bras humain; il possède donc des articulations que l'on appelle, par analogie fonctionnelle, épaule, coude ou poignet. Le poignet est doué de mouvements de rotation triaxiaux.

Les articulations sont actionnées par des dispositifs électriques, pneumatiques ou hydrauliques. Cela leur permet de surpasser l'homme quant aux puissances mises en oeuvre.

L'ordinateur, désormais intégré à toute machine qui se réclame de la robotique moderne, est muni de routines système, dévolues aux fonctions générales du robot et d'un programme relatif aux opérations spécifiques qu'il doit effectuer, ainsi qu'à leur enchaînement. Les routines sont fournies par le fabricant du robot, tandis que le programme est créé chez son utilisateur au moyen d'un apprentissage de la machine ou par écriture en langage spécialisé. Dans ce dernier cas, le système du robot contient un interpréteur qui convertit les instructions du programme en paramètres machine, utilisables par les routines système. En définitive; les routines «internes» du robot utilisent le programme dont il est chargé en tant qu'ensemble de données et il est bien évident que toute tâche nécessite la création d'un programme spécifique de la part de l'utilisateur. Les robots industriels se substituent aux êtres humains de façon plus efficace. Ils peuvent travailler en deux-huit (trois-huit au Japon). Ils ne font pas de pause et encore moins la grève. Ils ne connaissent ni la fatigue ni l'ennui.

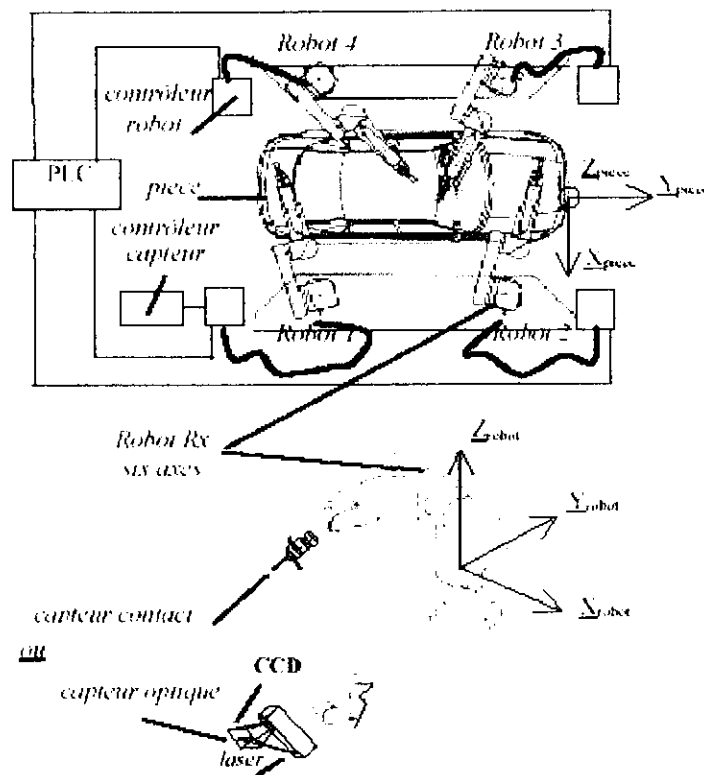


Figure 1.1 : Cellule classique avec quatre robots.

On distingue communément deux étapes dans cette courte histoire :

Les robots de la première génération ne sont pas munis de capteurs qui leur permettraient de percevoir l'environnement de travail, et sont par conséquent dans l'impossibilité de s'adapter automatiquement aux évolutions de celui-ci. Le pouvoir de décision reste aux mains de l'opérateur.

L'existence de la fonction perception de l'environnement, déjà présente dans quelques machines, est un des aspects dominants de la deuxième génération de robots. Un robot de ce type, seul autorisé à porter ce nom, constitue un système automatique hautement adaptatif qui se caractérise par la réalisation de tâches dont l'exécution est guidée par une interaction constante avec son environnement. Ceci induit, en particulier, qu'il soit doté de facultés de décision ainsi que des capacités d'apprentissage.

I.2 Définitions et vocabulaire des robots manipulateurs

D'après l'Association Française de Normalisation (AFNOR), un robot est un *"manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel"*.

Dans cette définition, on retrouve les différentes composantes d'une cellule robotisée :

- le *mécanisme* : ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il permet de remplacer ou de prolonger son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles). Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés ;

- la *perception*, qui permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des capteurs dits *proprioceptifs* lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations) et *extéroceptifs* lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, mesure de distance, vision artificielle)
- la *commande*, qui synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs. A partir de la l'onction de perception et des ordres de l'utilisateur, elle permet d'engendrer les fonctions du robot ;
- l'*interface homme machine* à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter ;
- le *poste de travail* et les *dispositifs péri robotiques* qui constituent l'environnement dans lequel évolue le robot.

La robotique est donc une science pluridisciplinaire qui requiert des connaissances en mécanique, automatique, électrotechnique, traitement du signal, communication, informatique...etc.

Constituants mécaniques des robots :

Un robot manipulateur est constitué par deux sous-ensembles distincts, un (ou plusieurs) *organe terminal* et une *structure mécanique* articulée ;

- Sous le terme *organe terminal*, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression...) ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture...). Il s'agit donc d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, c'est-à-dire qu'il est équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel mais interchangeable. Enfin, un robot peut être *multi bras*, chacun des bras portant un organe terminal différent. Par la suite, nous utilisons indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, *outil ou effecteur* pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

- le rôle de la *structure mécanique articulée* est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps généralement rigides, ou supposés comme tels, assemblés par des liaisons appelées articulations.

I.3 Classification des robots

En effet, une classification, c'est-à-dire un groupement en sous-ensembles homogènes, s'effectue à partir de conditions satisfaites pour certains sous-ensembles et non par d'autres. Ces conditions peuvent impliquer des propriétés, des critères, des paramètres, des grandeurs quantitatives ou qualitatives. La question de base concerne l'origine des éléments permettant d'établir les conditions d'affectation de tel robot dans telle classe. On peut aussi formuler cela avec la question suivante : « A quelle(s) chose(s) attachons-nous le plus d'importance dans l'utilisation d'un robot ? » Compte tenu de la complexité de cette machine et de la variété de ses applications, de nombreux choix peuvent s'offrir (en particulier, ceux concernant l'efficacité, vitesse, précision ou l'habileté ou le dimensionnement, etc.). Les spécialistes des associations de robotique industrielle de divers pays semblent s'être tous retrouvés, dans un premier temps, sur le thème du niveau d'automatisation de la commande. Ce choix n'est pas à récuser mais on peut penser qu'il a été fait en pleine période (1975-1985) où le thème de l'automatisation de la production battait son plein, ce qui mettait en exergue cette capacité à améliorer la productivité... On peut constater aujourd'hui que ces classifications sont dépassées, On peut, bien entendu, aborder des sous classifications qui ne

S'attachent qu'à un aspect particulier du robot. C'est le cas du classement morphologique ou cinématique reconnu par la norme ISO 8373 qui ne porte attention, là encore, qu'aux robots manipulateurs industriels à poste fixe. Cette norme propose le découpage suivant :

○ *Robot cartésien ou robot rectangulaire*

Robot dont le bras est constitué de trois articulations prismatiques dont les axes sont disposés selon un système de coordonnées cartésiennes.

Exemple : robot portique.

○ *Robot cylindrique*

Robot dont le bras est constitué d'au moins une articulation cylindrique et d'une articulation prismatique dont les axes sont disposés selon un système de coordonnées cylindriques.

○ *Robot polaire*

Robot dont le bras est constitué de deux articulations cylindriques et d'une articulation prismatique dont les axes sont disposés selon un système de coordonnées polaires.

○ *Robot pendulaire*

Robot polaire dont la structure mécanique comprend un sous-ensemble pivotant de type transmission par cardan.

○ *Robot anthropomorphe ou robot articulé*

Robot dont le bras comprend trois articulations cylindriques.

○ *Robot SCARA*

Robot ayant deux articulations cylindriques à axes parallèles, avec complaisance dans un plan donné.

○ *Robot vertébral*

Robot dont le bras est constitué de deux ou plusieurs articulations rotoïdes.

○ *Robot parallèle*

Robot dont les bras (axes principaux) sont constitués de trois articulations prismatiques concourantes.

Les scientifiques, de leur côté, plutôt qu'à une description morphologique, s'attachent à des représentations mathématiques des cinématiques, ce qui leur permet d'effectuer des calculs de mouvements.

Ainsi, les robots séries sont constitués par une succession d'articulations prismatiques (P) et cylindriques (R) qui permet de situer un robot rectangulaire à trois axes par le sigle PPP ou un robot anthropomorphe par RRR. La description complète prend en compte les longueurs des segments et les axes successifs autour ou le long desquels se font les rotations et les translations.

De la même manière, les morphologies de robots parallèles, tous héritiers de la plateforme de Steward, peuvent se répartir en trois catégories qui sont :

- le type SSM (Simplified Symetric Manipulator) dont les pieds des chaînes cinématiques forment un hexagone tant sur la base fixe que sur la partie mobile ;
- le type TSSM (Triangular SM) avec un hexagone sur la base fixe et un triangle sur la base mobile ;
- le type MSSM (Minimal SSM) dont les pieds des chaînes cinématiques forment un triangle sur la partie fixe aussi bien que sur la partie mobile.

1.4 Morphologie et notion générale sur les robots manipulateurs

Un robot manipulateur, quelle que soit la fonction qui lui est attribuée (manipulation, assemblage, soudage...), doit manipuler dans l'espace un, objet appelé organe terminal. Il peut s'agir d'une pince maintenant une pièce, d'un pistolet de peinture ou d'un autre type d'outil. La situation de l'organe terminal, en général quelconque et évolutive, est définie par la position de l'un de ses points et par son orientation autour de ce point.

Un robot manipulateur est l'ensemble formé par

- une structure mécanique qui supporte l'organe terminal à situer,
- des actionneurs qui servent à agir sur la structure précédente pour en modifier la configuration et donc la situation de l'organe terminal,
- des capteurs divers nécessaires à la commande, parmi lesquels on distingue les capteurs proprioceptifs qui permettent la saisie de l'état mécanique du robot manipulateur et les capteurs extéroceptifs qui indiquent l'état de l'environnement du robot manipulateur,
- un système de commande qui pilote les actionneurs du robot manipulateur à partir de la définition du mouvement à exécuter transmise par le système décisionnel et des informations délivrées par les capteurs proprioceptifs,

- un système décisionnel qui assure la fonction de raisonnement et élabore le mouvement du robot manipulateur à partir de la définition de la tâche à exécuter transmise par l'opérateur à l'aide du système de communication (les fonctions de base du système décisionnel sont l'interprétation et la compréhension des messages émis par l'opérateur, la résolution des problèmes posés, la génération de plans et la génération de messages à destination de l'opérateur ainsi que la gestion de la base de données nécessaire à ce système),
- un système de communication qui gère les messages transmis entre le système décisionnel et l'opérateur via une console de visualisation alphanumérique ou graphique, un système d'analyse et de synthèse vocale, un syntaxeur, etc. ...

Cette structure générale d'un robot manipulateur est définie sur la *Figure 1.2* :

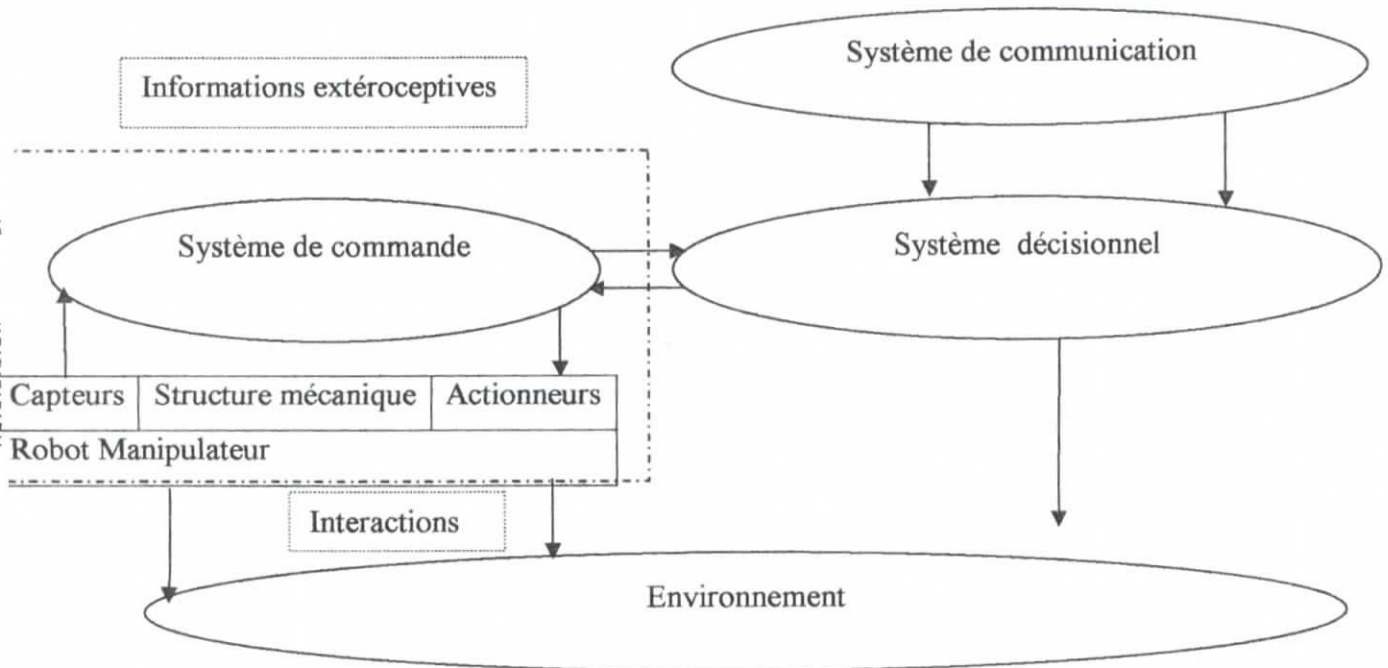


Figure 1.2 Structure générale d'un robot manipulateur.

I.5 Nombre minimal de paramètre nécessaire à la définition de la situation d'un objet dans l'espace

Pour définir la situation d'un objet libre dans l'espace, il est possible de fixer la position de trois points non alignés de cet objet soit neuf paramètres non indépendants puisque les coordonnées de ces points sont liées par trois relations qui expriment l'invariabilité de la distance entre ces points.

Définir la situation d'un objet libre nécessite donc, dans le cas général, la connaissance de six (neuf moins trois) paramètres indépendants

- trois paramètres indépendants définissent la position d'un point de l'objet (coordonnées cartésiennes, cylindriques, sphériques, etc. ...),
- trois paramètres indépendants déterminent l'orientation de l'objet autour du point précédent (angles d'Euler, paramètres d'Euler, etc...).

Par définition, cet objet possède six degrés de liberté.

I.6 Définition des liaisons (ou articulations)

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degrés de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité est telle que $0 \leq m \leq 6$.

Lorsque $m = 1$, ce qui est le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est soit rotoïdes, soit prismatique.

I.6.1 Articulation rotoïdes

Il s'agit d'une articulation de type pivot réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe. L'articulation rotoïdes est représentée par le symbole de la figure 1.3 et est notée R.

1.6.2 Articulation prismatique

Il s'agit d'une articulation de type glissière réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe. La figure 1.4 donne sa représentation symbolique. On la note P.

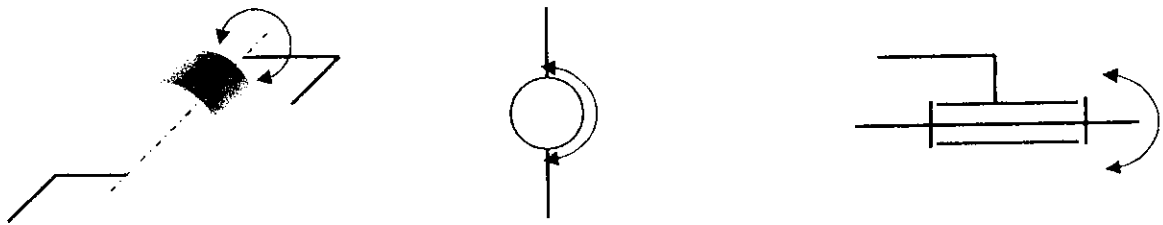


Figure 1.3. Symbole de l'articulation rotoïde

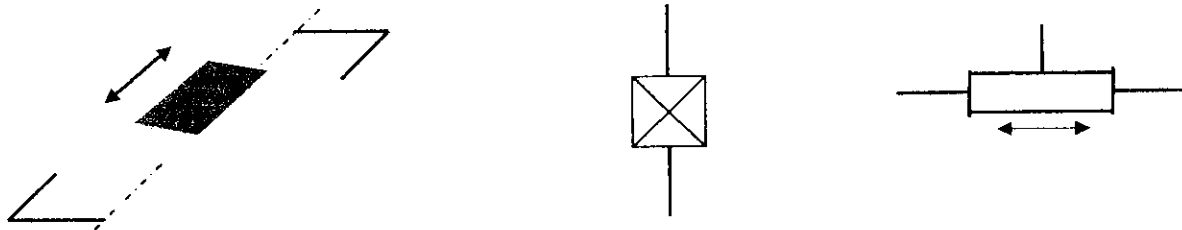
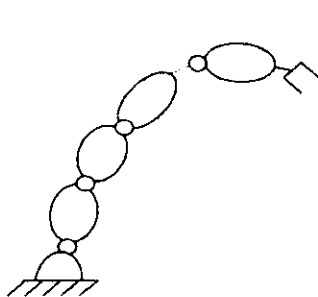


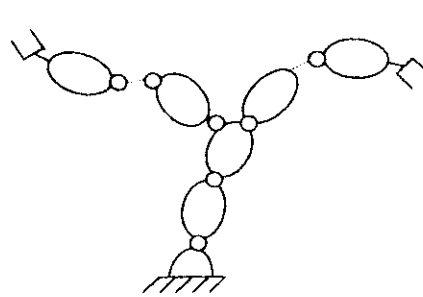
Figure 1.4. Symbole de la liaison prismatique

1.7 Les différentes architectures des robots manipulateurs

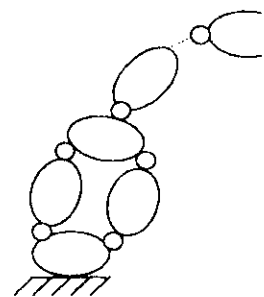
On distingue trois types de structures ; *chaîne simple*, *arborescente*, *complexe* (figures suivantes):



Robot manipulateur à structure de chaîne simple



Robot manipulateur à structure de chaîne arborescente



Robot manipulateur à structure de chaîne complexe

1.7.1 Différente structure de base

Elles sont dérivées des différents systèmes de repérage d'un point dans l'espace.

STRUCTURE PPP : (figure 1.5.a)

Ce type de structure, concernant 14 % des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de 0 en coordonnées cartésiennes.

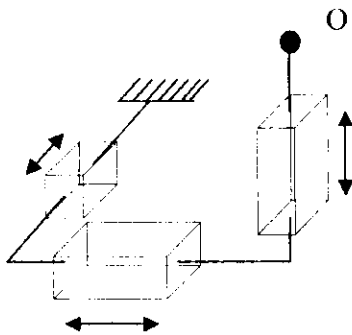


Figure 1.5.a

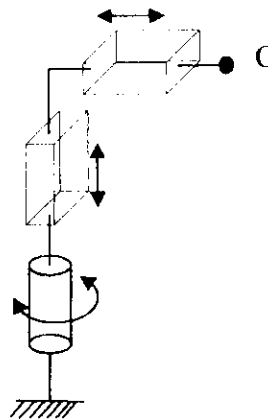


Figure 1.5.b

STRUCTURE RPP ou PRP : (figure 1.5.b)

Ce type de structure, concernant 47 % des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de 0 en coordonnées cylindriques.

STRUCTURE RRP : (figure 1.5.c)

Ce type de structure, concernant 13 % des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de 0 en coordonnées sphériques.

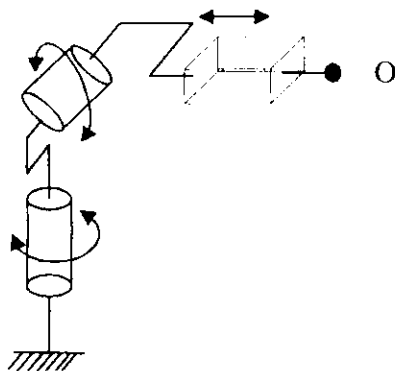


Figure 1.5.c

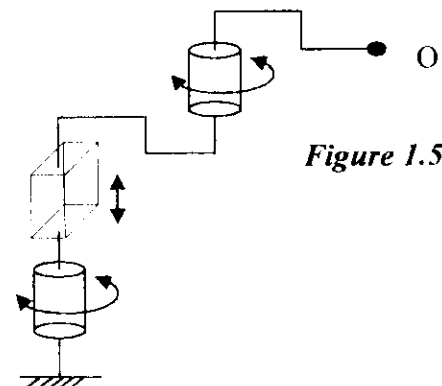


Figure 1.5.d

STRUCTURE RPP ou PRR ou RRP : (figure 1.5.d)

Ce type de structure, concernant 1 % des robots manipulateurs industriels est bien adapté à un repérage de 0 en coordonnées toriques.

STRUCTURE RRR : (Figure 1.5.e)

Ce type de structure, concernant 25 % des robots manipulateurs industriels, est bien adapté à un repérage de O dans un système de coordonnées qualifiées d'anthropomorphes par analogie avec le bras humain.

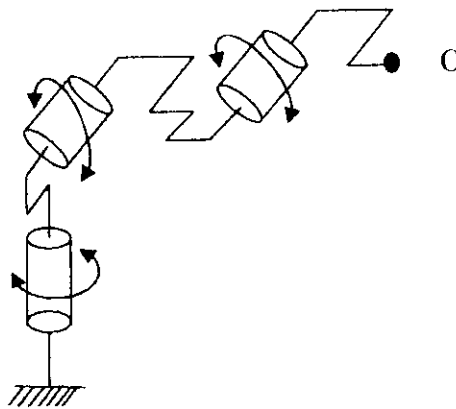


Figure 1.5.e

Notre travail consiste à modéliser un robot qui à la même structure donc une structure RRR, et qui comporte cinq degrés de liberté (5 ddl).

1.8 Indice de mobilité, degré de liberté, redondance et singularité d'un robot manipulateur

Indice de mobilité

Avant le montage du robot manipulateur, la position des n corps mobiles est définie à l'aide de $6n$ paramètres.

Une liaison de classe m entre 2 corps, fixe m de ces paramètres.

Il en résulte que si le robot manipulateur possède N_m liaisons de classe m :

$$M = 6n - \sum_{m=1}^5 m.N_m$$

Représente, après assemblage des corps constituant le robot manipulateur, le nombre de paramètres variables qui déterminent la configuration de celui-ci.

M est appelé indice de mobilité du robot manipulateur.

Bien que les robots manipulateurs à structure de chaîne complexe présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux robots manipulateurs à structure de chaîne simple ou arborescente, comme une plus grande rigidité, la presque totalité des robots manipulateurs industriels possède une structure de chaîne simple. Dans ces conditions, si toutes les liaisons utilisées sont rotoïdes et/ou prismatiques, la formule générale donnant l'indice de mobilité pour ces robots manipulateurs se réduit à :

$$M = N$$

Degré de liberté

Le degré de liberté DL_R d'un robot manipulateur est égal au nombre de paramètres indépendants qui fixent la situation de l'organe terminal.

Il peut être fonction de la configuration du robot mais l'inégalité suivante est toujours vérifiée.

$$DL_R \leq M$$

Redondance et singularité

Si quelle que soit la configuration du robot manipulateur, $DL_R = M$, il est dit non redondante.

Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $DL_R < M$, deux possibilités peuvent se présenter

- cette inégalité est satisfaite pour toutes les configurations que peut prendre le robot manipulateur qui sont dit alors redondant.
- cette inégalité est satisfaite pour certaines configurations du robot manipulateur qui est dit alors localement redondant.

Les configurations correspondantes sont dites singulières.

I.9 Espace articulaire et espace de travail

I.9.1 Espace articulaire

L'espace articulaire d'un robot est celui dans lequel est représentée la situation de tous ses corps. La solution la plus simple consiste à utiliser les variables ou coordonnées articulaires. L'espace de ces variables, est appelé aussi espace des configurations. Sa dimension N est égale au nombre de variables articulaires indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique. Dans une structure ouverte (simple ou arborescente), les variables articulaires sont généralement indépendantes, tandis qu'une structure fermée impose nécessairement des relations entre ces variables.

I.9.2 Espace de travail

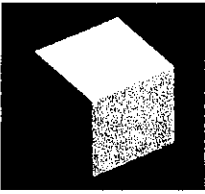


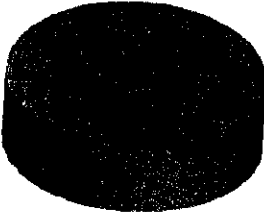
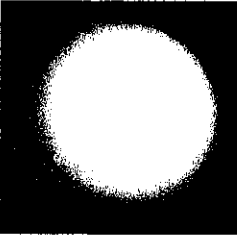
L'espace ou volume de travail d'un robot manipulateur est défini comme l'espace physique engendré par un point de l'organe terminal lorsque la configuration du robot évolue. Ce volume est habituellement représenté par deux sections perpendiculaires choisies en fonction, du type de robot manipulateur.

I.9.3 Comparaison des volumes de travail des différentes structures de base

A cette fin, nous ferons les hypothèses suivantes

- la rotation permise par chaque liaison rotoïde est de 360° , - la translation permise par chaque liaison prismatique est égale à L ,
- la dimension "principale" (la plus grande dimension) de chaque corps du robot manipulateur est égale à L .

Dans ces conditions, les volumes de travail en position, exceptionnellement représentés en perspective, pour chacune des structures de base sont indiqués dans le tableau ci-dessus. Ces volumes correspondent à ceux de robots manipulateurs dotés d'un poignet quelconque dont le centre O est le point de référence.

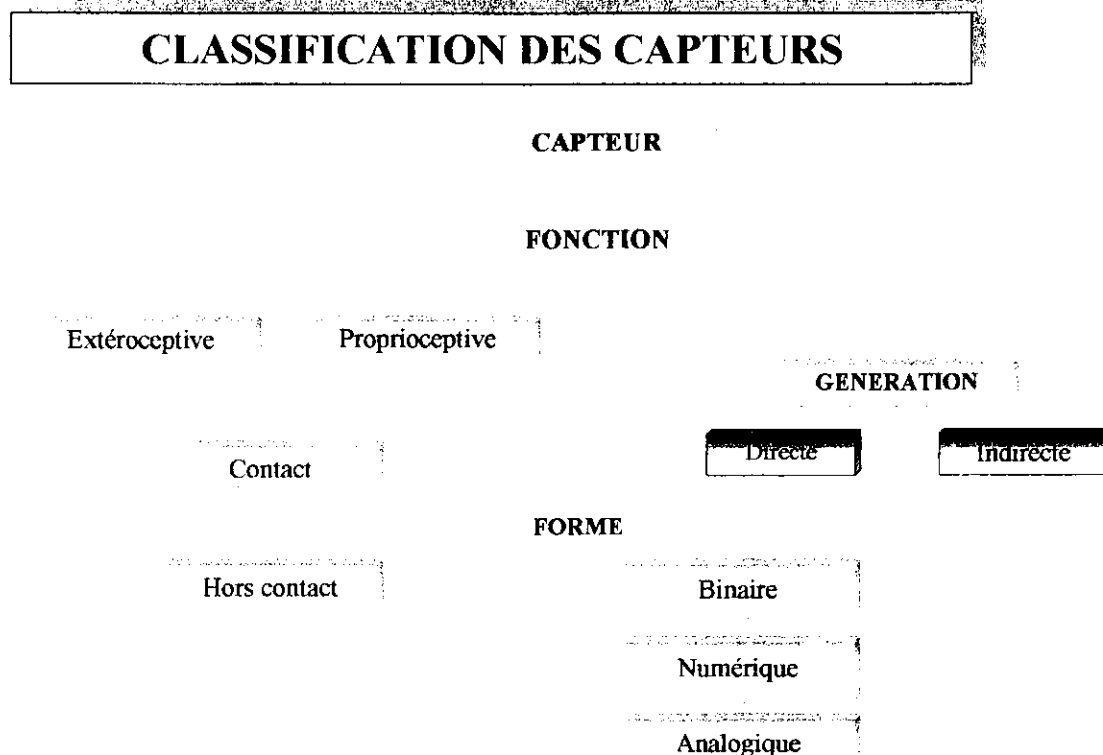
TYPE DE STRUCTURE	VOLUME DE TRAVAIL	V
PPP		$V = L^3$
RPP		$V = 3\pi(r_2 - r_1)^3 \approx 9(r_2 - r_1)^3$
RRP		$V = \frac{28}{3}\pi(r_2 - r_1)^3 \approx 29(r_2 - r_1)^3$
RPR		$V = 4\pi r^3 \approx 13r^3$
RRR		$V = \frac{32}{3}\pi r^3 \approx 9r^3$

Dans la réalité, en tenant compte des limitations sur les débattements par chaque liaison et des dimensions principales des corps constituant le robot manipulateur, les volumes de travail réels diffèrent légèrement de ceux donnés précédemment.

I.10 Les capteurs en robotique

La perception est un domaine central de la robotique. C'est autour de ce concept qu'est bâtie la structure d'un robot apte à exécuter des tâches complexes ou à évoluer dans un univers inconnu ou mal connu. L'élément de base du système de perception est le capteur qui a pour objet de traduire en une information exploitable des données représentant les caractéristiques de l'environnement. Ce dernier est défini au sens large par tous les constituants du système robotisé.

Une classification des capteurs est réalisée par décomposition des informations par rapport à trois caractéristiques.



La FONCTION définit le type d'information délivrée selon la provenance. Elle concerne deux entités :

- La structure mécanique articulée : capteur proprioceptif
- L'environnement dans lequel évolue le robot : capteur extéroceptif

La GENERATION concerne la manière avec laquelle est établie une information. Elle est produite selon deux méthodes :

- La génération directe :

Les dispositifs à génération directe ou capteurs actifs effectuent la traduction d'un phénomène physique directement en un signal électrique exploitable. Les effets physiques employés sont :

- L'effet piézoélectrique
- L'effet photoélectrique
- L'induction électromagnétique

- La génération indirecte

Les capteurs à génération indirecte ou capteurs passifs sont des dispositifs dont la conductance est affectée par un phénomène physique.

La FORME de l'information définit la méthode de représentation de la grandeur mesurée.

Trois formes sont dénombrées :

- L'information logique où seuls deux états sont possibles.
- L'information numérique qui est établie par un ensemble d'informations logiques ordonnées. Cet ensemble a une signification :
 - Soit symbolique : code ASCII, code EBCDIC.....etc.
 - Soit numérique : binaire naturel,etc.
- L'information analogique qui met en évidence toute variation de la grandeur mesurée. Les états mesurés ne sont plus discrets comme précédemment mais continus.

I.11 Les Actionneurs

Les actionneurs et effecteurs sont les organes du robot qui animent la structure mécanique. La maîtrise de leur commande permet de faire réaliser des tâches prédéfinies par l'opérateur.

Le mouvement est imposé au robot par un ou plusieurs actionneurs par transformation d'une énergie source en énergie mécanique, la technologie des actionneurs est liée à l'énergie de base utilisée. Nous allons faire un tour d'horizon des divers actionneurs employés en robotique en les classant selon l'énergie utilisée.

I.11.1.1 L'énergie pneumatique

L'énergie pneumatique est fréquemment employée sur les manipulateurs à cycles pré-réglés ou "tout ou rien" pour lesquels la précision n'est pas obtenue par une boucle d'asservissement mais par des butées mécaniques.

La compressibilité des gaz rend difficile la modulation fine de la pression.

Une précision de répétitivité peut néanmoins atteindre +/- 1 mm dans des cas particuliers d'asservissement électropneumatique. Une autre utilisation fréquente concerne les effecteurs (ex:pincés) et les outils (ex:visseuses).

La difficulté de contrôle des mouvements et le rendement peu important sont les inconvénients majeurs des systèmes pneumatiques. Cependant certains avantages, sont à considérer

- la simplicité de mise en oeuvre:
 - Génération par compresseur disponible habituellement sur site industriel
 - Transport par canalisations rigides ou souples
 - Stockage possible dans des réservoirs
- Economiques
 - Peu coûteux
 - Pas de consommation d'énergie lorsque l'actionneur n'est pas en fonctionnement
 - Robustesse

Les actionneurs

Les actionneurs constituent les systèmes de conversion d'énergie. Trois types d'actionneurs sont à considérer

- Les vérins linéaires
- Les vérins angulaires
- Les moteurs

Les organes de commande**Les distributeurs**

La distribution de l'énergie aux divers actionneurs est réalisée par des organes de commande binaire activés de manière

- électrique - pneumatique - manuelle- mécanique

Deux technologies sont employées : - la technologie à tiroir - la technologie à clapet.

Le distributeur à tiroir cylindrique ou plan déplace une tige par différence de pression, à la manière d'un vérin. Le déplacement de la tige a pour objectif de mettre en correspondance l'alimentation de la pression avec un orifice d'utilisation.

La technologie à clapet est constituée d'un ou plusieurs clapets mobiles qui selon un ordre de commande ouvre ou ferme le circuit de pression.

Les cellules logiques

Selon la position des orifices, le distributeur réalise une fonction logique: (oui, non, et, ou).

I.11.1.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'une des plus intéressantes dans le domaine de la robotique pour de multiples raisons

- puissance massique élevée
- temps de réponse court
- précision

Certains problèmes sont cependant à considérer

- l'étanchéité des conduites du fluide sous pression ainsi que les points de raccordement
- coût élevé de certains éléments.

L'énergie est générée par un groupe motopompe qui réalise la mise sous pression par la compression du fluide. Le stockage de l'énergie est possible par un accumulateur oléopneumatique.

Dans les actionneurs on trouve les (vérin linéaires, rotatifs, les moteurs).

I.11.1.3 L'énergie électrique

L'énergie électrique est certainement celle qui est la mieux maîtrisée à l'heure actuelle. Les commandes sont aisées, précises et fiables. Des développements importants ont été effectués et les applications à la robotique sont de plus en plus nombreuses. Cette énergie n'a pas que des avantages. Le principal inconvénient réside dans le rapport puissance sur masse qui est faible. L'introduction des matériaux à base de terres rares va donner une nouvelle impulsion au développement des moteurs électriques. Malheureusement, ces matériaux ont encore un coût élevé qui freine leurs applications.

On trouve les moteurs ; à courant continu et discontinue et les moteurs pas à pas, les moteurs à aimants permanents, les moteurs à reluctance variable, et les moteurs hybride.

I.11.1.4 Les actionneurs thermomécaniques

Le principe des actionneurs thermomécaniques repose sur la modification des formes géométriques de certains alliages (Ni-Ti, Cu-Zn-Al, Cu-Zn, Cu-Al...) portés à température.

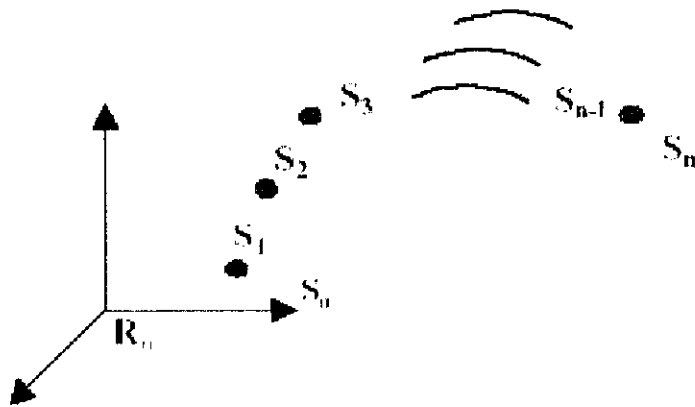
Le principe réside dans la transformation réversible martensite austénite.

Une transformation de phase est réalisée lorsque un matériau à structure austénitique (température élevée) est refroidi. Une réorganisation de la structure cristalline (martensite) est effectuée mais sans modification de l'aspect géométrique macroscopique.

A basse température, l'application d'une contrainte mécanique déforme un échantillon.

Une transformation de phase a lieu lorsque le matériau est porté à une température supérieure à une valeur critique A_s (Austénite Start) ce qui a pour conséquence de rendre à l'échelle macroscopique les caractéristiques géométriques antérieures à la déformation. De cette propriété est issue la dénomination de matériaux à mémoire de forme. La plage de température s'échelonne de 40 à 60°C environ pour le Cu-Zn-Al.

MODELISATION



Chapitre
II

MODELISATION GEOMETRIQUE

II.1 Introduction

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que :

- les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot).

On distingue :

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

II.2 Modèle géométrique direct : (MGD)

Le MGD est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple (ce qui est le cas de notre étude), il peut être représenté par la fonction f tel que :

$$X = f(q) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- q étant le vecteur des variables articulaires :

$$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$$

Les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$X=[X_1 \ X_2 \ \dots\dots\dots X_m]^T$$

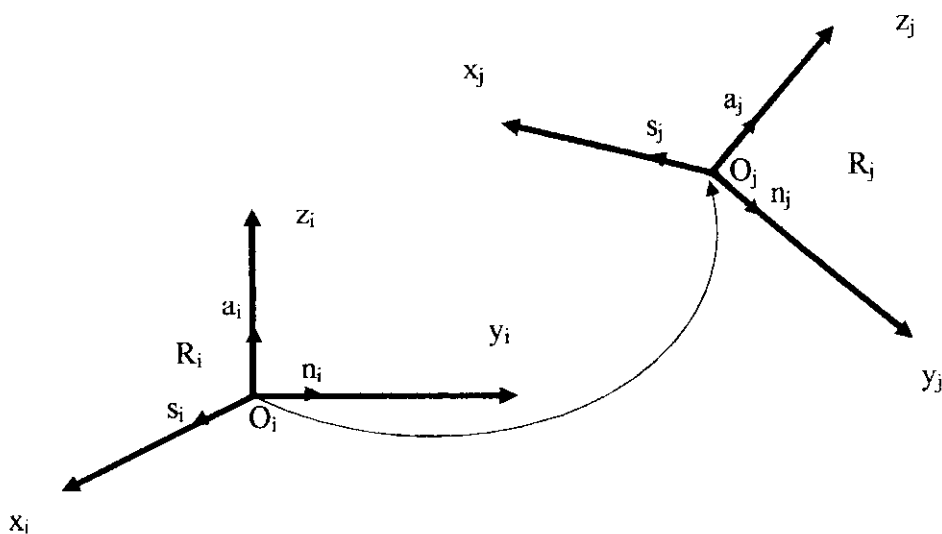
II.2.1 Outils Mathématiques pour la Modélisation géométrique

II.2.1.1 Transformations Homogènes

Soit deux repères R_i et R_j vectoriels orthonormés, nous appelons matrice de passage ou matrice de transformation homogène du repère R_i au repère R_j , la matrice carrée de dimension (4×4) telle que :

$$T_{i,j} = [s_{i,j} \ n_{i,j} \ a_{i,j} \ P_{i,j}] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

Où $s_{i,j}$ $n_{i,j}$ $a_{i,j}$ désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes X_j Y_j Z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i , et $P_{i,j}$ le vecteur de déplacement de R_i vers R_j exprimé par le vecteur O_iO_j . (**Figure 2.1**)



Pour mieux définir et manipuler la matrice de transformation homogène on la notera sous la forme d'une matrice partitionnée :

$$T_{i,j} = \begin{bmatrix} A_{i,j} & P_{i,j} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{i,j} & n_{i,j} & a_{i,j} & P_{i,j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

La matrice $A_{i,j}$ représente la matrice d'orientation du repère R_i dans R_j , et $P_{i,j}$ déjà définie comme vecteur de déplacement R_i dans R_j .

II.2.1.2 Matrice de transformation de translation et de rotation pure

II.2.1.2.1 Translation pure

La translation pure du repère R_i vers le R_j , (*Figure 2.2.a*) et définie par **Trans** (a, b, c) où a, b et c désigne les composante du vecteur O_iO_j :

$$T_{i,j} = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

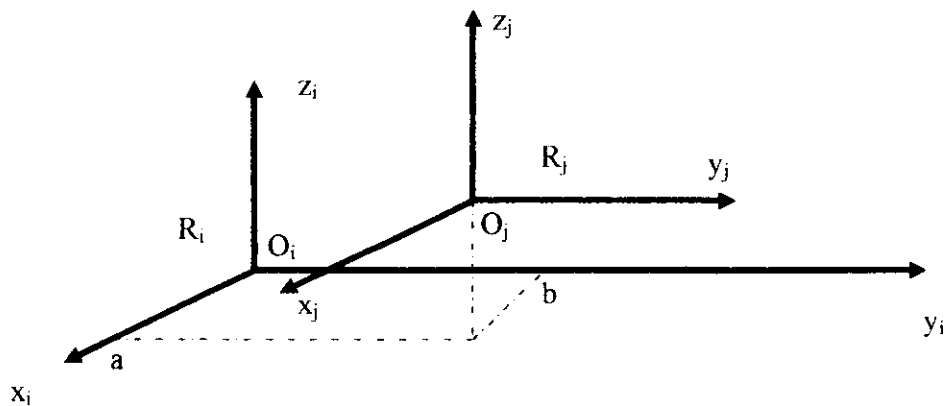


Figure 2.2.a

II.2.1.2.2 Rotation pure

La rotation pure du repère R_i vers le R_j , (Figure 2.2.b) est exprimée par les composantes des vecteurs unitaires $[s_{i,j} \ n_{i,j} \ a_{i,j}]$ du repère R_j exprimés dans R_i .

$$\begin{cases} s_{i,j} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ n_{i,j} = [0 \ c\theta \ s\theta \ 0]^T \\ a_{i,j} = [0 \ -s\theta \ c\theta \ 0]^T \end{cases} ; \text{L'exposant T désigne la transposition.}$$

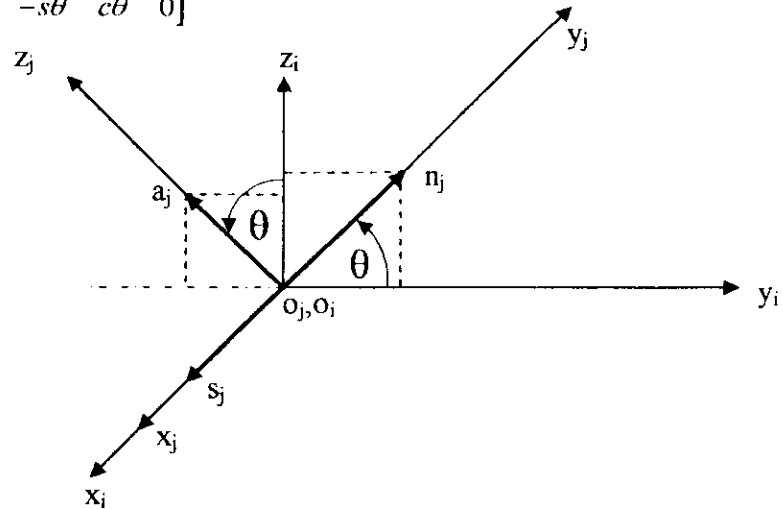


Figure 2.2.b. Transformation de rotation pure suivant θ

II.2.1.3 Matrice de transformation correspondant à une rotation autour d'un vecteur passant par l'origine

Considérons maintenant une rotation $\text{Rot}(u, \theta)$ autour d'un axe portant un vecteur $u = [u_x \ u_y \ u_z]^T$ passant par l'origine du repère R_i .

On définit le repère R_k de telle sorte que z_k soit porté par le vecteur u et que l'axe x_k soit selon la perpendiculaire commune à z_k et z_i . La matrice $T_{i,k}$ peut être obtenue par la composition des transformations suivantes :

$$T_{i,k} = \text{Rot}(z, \alpha)\text{Rot}(x, \beta)$$

Où α est l'angle entre l'axe x_i et l'axe x_k autour de z_i et où β est l'angle entre z_i et u autour de x_k .

En développant l'équation précédente on obtient :

$$u = a_{i,k} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\alpha & s\beta \\ -c\alpha & s\beta \\ c\beta \end{bmatrix}$$

La rotation autour de u est équivalente à tourner autour de l'axe z du repère R_k .

$$Rot(u, \theta) T_{i,k} = T_{i,k} Rot(z, \theta) ;$$

$$\begin{aligned} \text{D'où : } Rot(u, \theta) &= T_{i,k} Rot(z, \theta) T_{i,k}^{-1} \\ &= Rot(z, \alpha) Rot(x, \beta) Rot(z, \theta) Rot(x, -\beta) Rot(z, -\alpha) ; \end{aligned}$$

En développant cette formule; on obtient : [khalil 99]

$$Rot(u, \theta) = \begin{bmatrix} & & & \vdots & 0 \\ & Rot(u, \theta) & & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} u_x^2(1-c\theta) + c\theta & u_x u_y(1-c\theta) - u_z s\theta & u_x u_z(1-c\theta) + u_y s\theta & 0 \\ u_x u_y(1-c\theta) - u_z s\theta & u_y^2(1-c\theta) + c\theta & u_y u_z(1-c\theta) + u_x s\theta & 0 \\ u_x u_z(1-c\theta) + u_y s\theta & u_y u_z(1-c\theta) + u_x s\theta & u_z^2(1-c\theta) + c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ;$$

Pour simplifier la lecture de cette matrice, on peut l'écrire sous la forme suivante :

$rot(u, \theta) = uu^T (1 - \theta) + I_3 C\theta + \hat{u}S\theta$; Où \hat{u} désigne la matrice antisymétrique du pré produit vectoriel définie par :

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} 0 & -u_z & -u_x \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{bmatrix} ;$$

Le produit vectoriel $u \times V$ s'obtient par la multiplication $\hat{u} V$.

II.2.2 Description de la géométrie des robots à structure ouverte simple

Ce paragraphe présente la méthodologie à suivre pour décrire les robots à structure ouverte simple.

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps notés S_0, \dots, S_n et de n articulation. Le corps S_0 désigne la base du robot et le corps S_n le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation j connecte le S_j au corps S_{j-1} (figure 2.3). La méthode de description est fondée sur les règles et conventions suivantes :

- Les corps sont supposés parfaitement rigides. Ils sont connectés par des articulation considérés comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité), soit prismatiques ;
- Le repère R_j est lié au corps j ;
- La variable de l'articulation j est notée q_j .

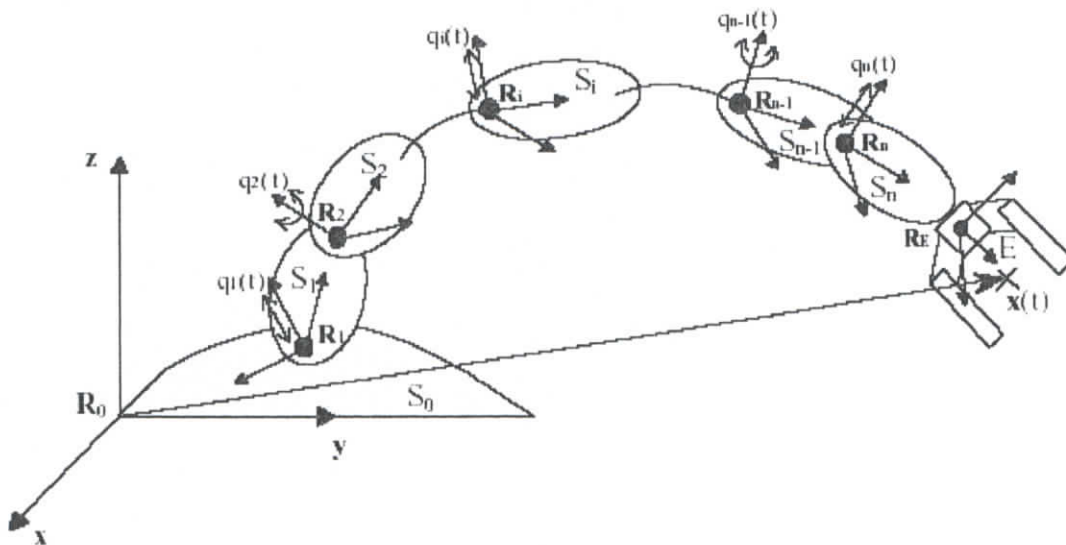


Figure 2.3. Robot à structure ouverte simple

le repère R_j , fixé au corps S_j , est défini de sorte que :

l'axe z_j est porté par l'axe de l'articulation j ;

l'axe x_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j+1} . Si les axes z_j et z_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, le choix de x_j n'est pas unique : des considérations de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants (*figure 2.4*) :

- α_j : angle entre les axes z_{j-1} et z_j correspondant à une rotation autour de x_{j-1} ;
- d_j : distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1} ;
- θ_j : angle entre les axes x_{j-1} et x_j correspondant à une rotation de z_j ;
- r_j : distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_j .

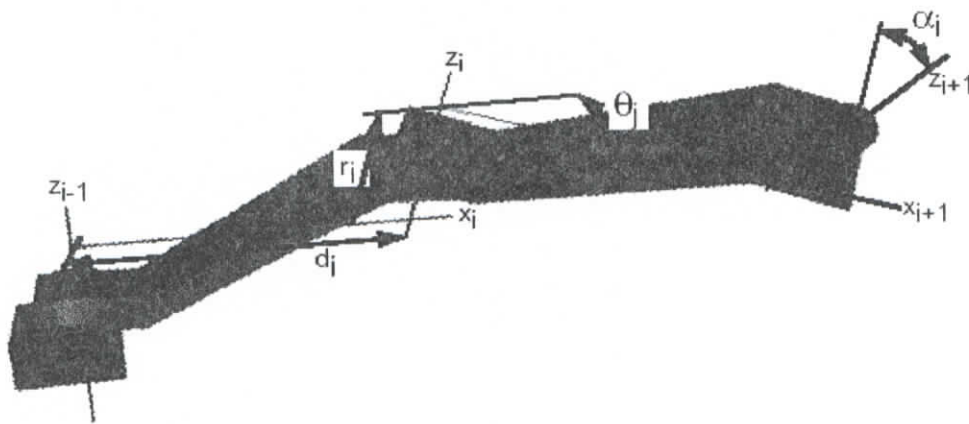


Figure 2.4. Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple

La variable articulaire q_j associée à la $j^{\text{ième}}$ articulation est soit θ_j , soit r_j , selon que cette articulation est de type rotoïde ou prismatique, ce qui se traduit par la relation:

$$q_j = \bar{\sigma}_j \theta_j + \sigma_j r_j$$

Avec :

- $\sigma_j = 0$ si l'articulation j est rotoïde ;
- $\sigma_j = 1$ si l'articulation est prismatique ;

Par analogie, on définit le paramètre

$$\bar{q}_j = \sigma_j \theta_j + \bar{\sigma}_j r_j$$

La matrice de transformation définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est donnée par (figure 2.3) :

$$T_{j-1,j} = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j)$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \dots\dots\dots(2.3)$$

Avec : $C\theta = \cos(\theta)$;
 $S\theta = \sin(\theta)$; de même pour $C\alpha$ et $S\alpha$

On remarque que la matrice de rotation $(3 \times 3)^{j-1}$ peut être obtenue par :

$$A_{j-1,j} = rot(x, \alpha_j) rot(z, \theta_j)$$

La matrice de transformation définissant R_{j-1} dans R_j est donnée par:

$$T_{j,j-1} = Trans(z, -r_j) Rot(z, -\theta_j) Trans(x, -d_j) Rot(x, -\alpha_j)$$

$$= \begin{bmatrix} & -d_j C\theta_j \\ {}^{j-1}A_j^T & d_j S\theta_j \\ & -r_j \\ & 1 \end{bmatrix};$$

REMARQUES:

Pour la définition du repère de référence R_0 , le choix le plus simple consiste à prendre R_0 confondu avec z_1 et $O_0=O_1$ lorsque l'articulation 1 est rotoïde et z_0 est confondu avec z_1 et x_0 est parallèle à x_1 lorsque l'articulation 1 est prismatique. Ce choix n'est pas obligatoire, mais il rend les paramètres α_j , d_1 et \bar{q}_1 nuls;

II.2.3 Description de la géométrie choisie pour notre robot :

La cinématique du porteur est du type **RRR** et le poignet comporte deux rotation d'axes concourants, donc en place d'abord les axes z_j sur les axes articulaires, puis les axes x_j selon les règles énoncées précédemment. On détermine ensuite les paramètres géométriques du robot. Le placement des repères est indiqué sur la (figure 2.4) et les paramètres géométriques sont donnés dans le tableau suivant: (Tableau 2.1)

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	θ	0
2	0	$\pi/2$	0	θ_2	0
3	0	0	D_3	θ_3	0
4	0	0	D_4	θ_4	0
5	0	$\pi/2$	0	θ_5	0

Tableau 2.1 .Paramètres géométrique du robot

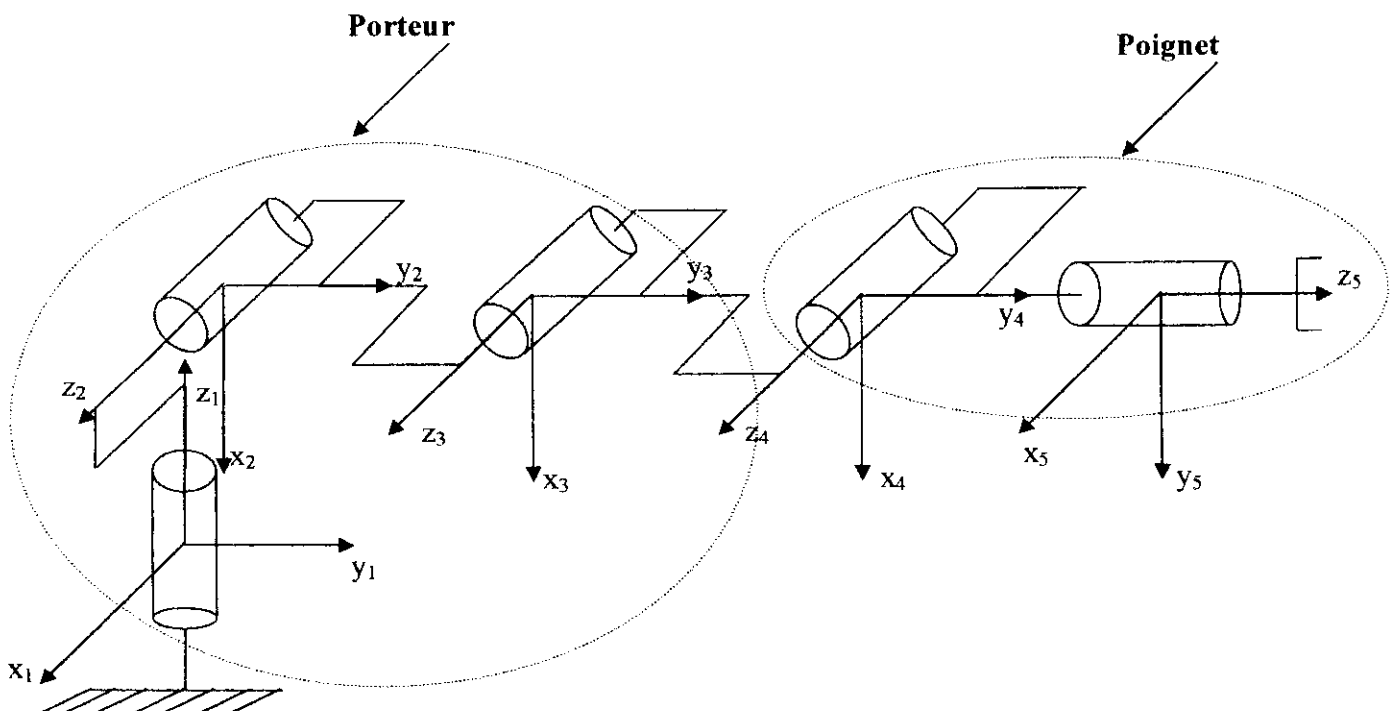


Figure 2.5

II.2.4 Modèle géométrique direct du robot choisie

On utilise la matrice de transformation définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} qui est donnée par $T_{j-1,j} = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j)$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

On calcule $T_{0,1}$, $T_{1,2}$, $T_{2,3}$, $T_{3,4}$, $T_{4,5}$

$$T_{0,1} = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{1,2} = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{2,3} = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D3 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{3,4} = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & D4 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{4,5} = \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S5 & C5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_{3,5} = \begin{bmatrix} C4C5 & -C4S5 & S4 & D4 \\ S4C5 & -S4S5 & -C4 & 0 \\ S5 & C5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$; T_{3,5} = \begin{bmatrix} C3C4C5 - S3S4C5 & -C3C4S5 + S3S4S5 & C3S4 + S3C4 & C3D4 + D3 \\ S3C4C5 + C3S4C5 & -S3C4S5 - C3S4S5 & S3S4 - C3C4 & S3D4 \\ S5 & C5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$= \begin{bmatrix} C34C5 & -C34S5 & S34 & C3D4 + D3 \\ S34C5 & -S34S5 & -C34 & S3D4 \\ S5 & C5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Tel que C34 = C3C4 ;S34 = S3S4.

$$T_{1,5} = \begin{bmatrix} C2C34C5 - S2S34C5 & -C2C34S5 & C2S34 + S2C34 & C2C3D4 - S2S3D4 \\ -S5 & -C5 & 0 & 0 \\ S2C34C5 + C2S34C5 & -S2C34S5 - C2S34S5 & S2S34 - C2C34 & S2C3D4 + S2D3 + C2S3D4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{1,5} = \begin{bmatrix} C234C5 & -C234S5 & S234 & C23D4 + C2D3 \\ -S5 & -C5 & 0 & 0 \\ S234C5 & S234S5 & -C234 & S23D4 + S2D3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \dots\dots\dots (2.4)$$

$$T_{0,5} = \begin{bmatrix} C1C234C5 + S1S5 & -C1C234S5 + S1C5 & C1S234 & C1[C23D4 + C2D3] \\ S1C234C5 - C1S5 & -S1C234S5 - C1C5 & S1S234 & S1[C23D4 + C2D3] \\ S234C5 & -S234S5 & -C234 & S23D4 + S2D3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \dots (2.5)$$

Ce qui donne la matrice de transformation qui exprime le repère R₅ dans R₀ :

$$T_{0,5} = \begin{bmatrix} C1C234C5 + S1S5 & -C1C234S5 + S1C5 & C1S234 & C1[C23D4 + C2D3] \\ S1C234C5 - C1S5 & -S1C234S5 - C1C5 & S1S234 & S1[C23D4 + C2D3] \\ S234C5 & -S234S5 & -C234 & S23D4 + S2D3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Puisque $T_{i,j} = [s_{i,j} \ n_{i,j} \ a_{i,j} \ P_{i,j}] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ donc :

$S_x = C1C234C5 + S1S5$

$S_y = S1C234C5 - C1S5$

$S_z = S234C5$

$N_x = -C1C234S5 + S1C5$

$N_y = -S1C234S5 - C1C5$

$N_z = -S234S5 \dots\dots\dots (2.6)$

$A_x = C1S234$

$A_y = S1S234$

$A_z = -C234$

$P_x = C1[C23D4 + C2D3]$

$P_y = S1[C23D4 + C2D3]$

$P_z = S23D4 + S2D3$

II.3 Espace de travail

L'espace de travail est l'ensemble des position et/ou orientations accessible par l'organe terminal du robot.

Le volume ou l'espace de travail d'un robot dépend généralement de trois facteurs :

- de la géométrie du robot,
- de la longueur des segments,
- du débattement des articulations (limité par des butées).

II.3.1 Analyse de l'espace de travail du robot

L'analyse de l'espace de travail des robots trouve de nombreuses applications. Notamment dans le domaine de la CAO-Rotique pour la conception optimale des robots, des sites robotisés et pour leur programmation hors ligne.

Soit $q = [q_1, \dots, q_n]$ un élément de \mathbb{R}^n représentant une configuration articulaire donnée et soit $X = [x_1, \dots, x_n]$ l'élément de l'espace opérationnel \mathbb{R}^x correspondant, tel que :

$$X = f(q) \dots\dots\dots (2.7)$$

On note Q l'ensemble des configurations accessibles compte tenu des butée articulaires. Par suite, Q sera appelé domaine articulaire :

$$Q = \{q \mid q_{imin} \leq q_i \leq q_{imax}, \forall i = 1, \dots, n\} ;$$

L'image de Q par le modèle géométrique direct f définit l'espace de travail W du robot :

$$W = f(Q)$$

II.3.2 Calcul de l'espace de travail du robot choisi

Comme on l'a définie précédemment, la position de l'organe terminal dans le repère atelier est donnée par le vecteur position dans la matrice de transformation qui exprime le repère R_5 dans R_0 noté :

$$P = \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{Bmatrix} ; \text{ Avec : } \begin{cases} P_x = C1[C23D4 + C2D3] \\ P_y = S1[C23D4 + C2D3] \\ P_z = S23D4 + S2D3 \end{cases}$$

En développant un programme qui a comme paramètres d'entrées les limites articulaires de chaque articulation, et sortie toutes les configuration possible de l'organe terminal.

Algorithme simplifié du programme (*Figure 2.6*):

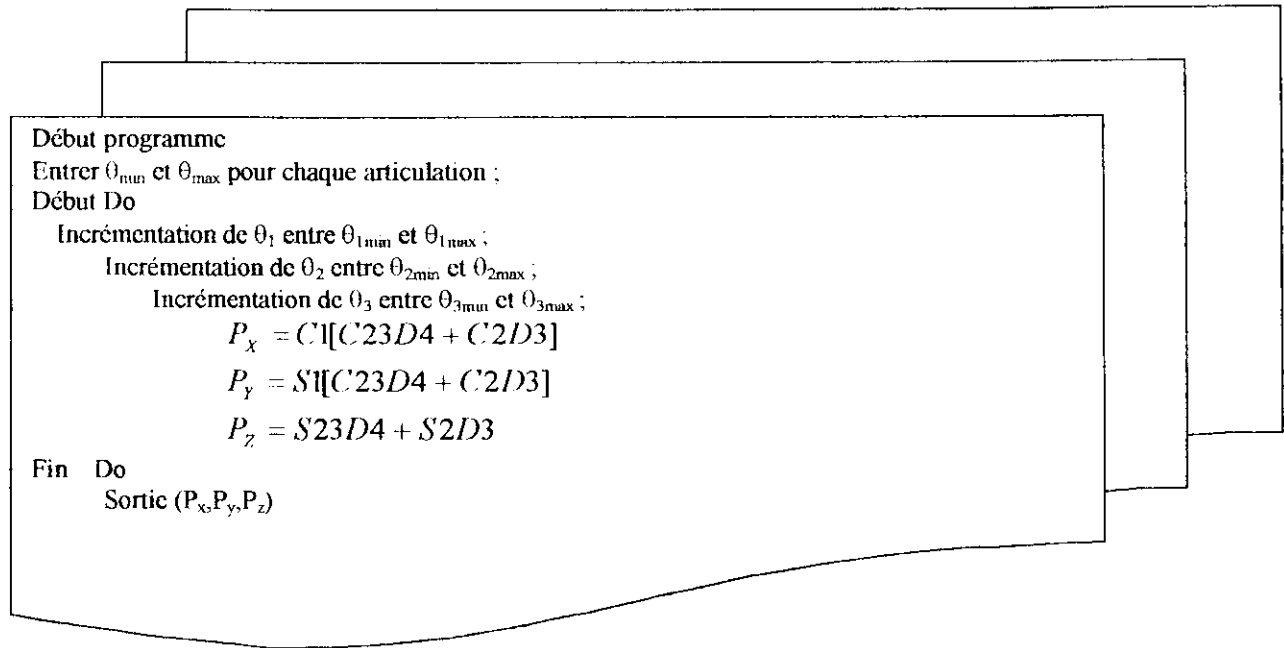
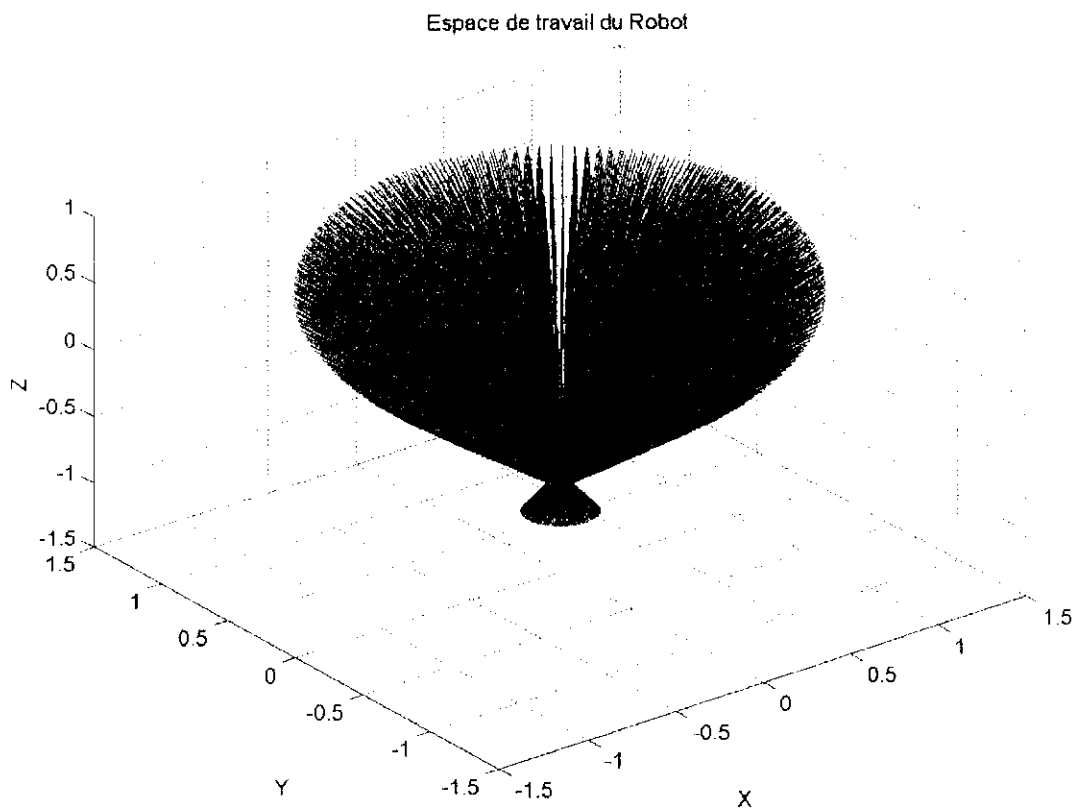


Figure 2.6 .Schéma simplifié du programme qui calcul l'espace de travail du robot

En prend pour le programme réaliser plusieurs configuration des limites articulaires, voilà quelques unes :

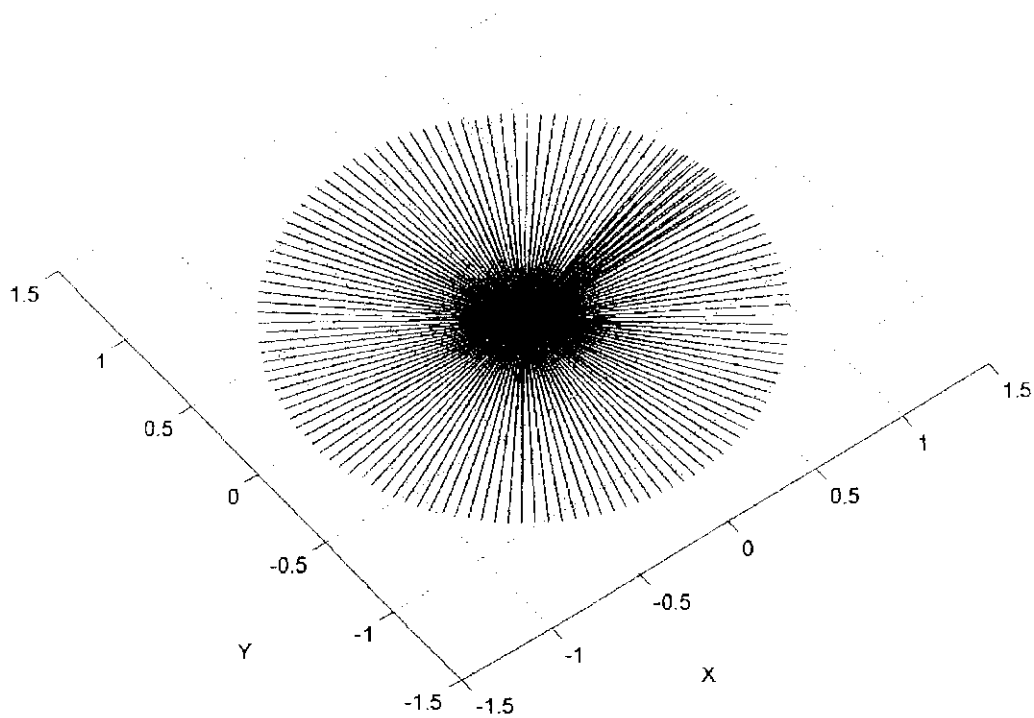
Configuration 1 :

$$\theta_1 = [0, 380] ; \theta_2 = [-45, 45] ; \theta_3 = [-45, 90] ; \theta_4 = [-90, 90] ; \theta_5 = [0, 380]$$

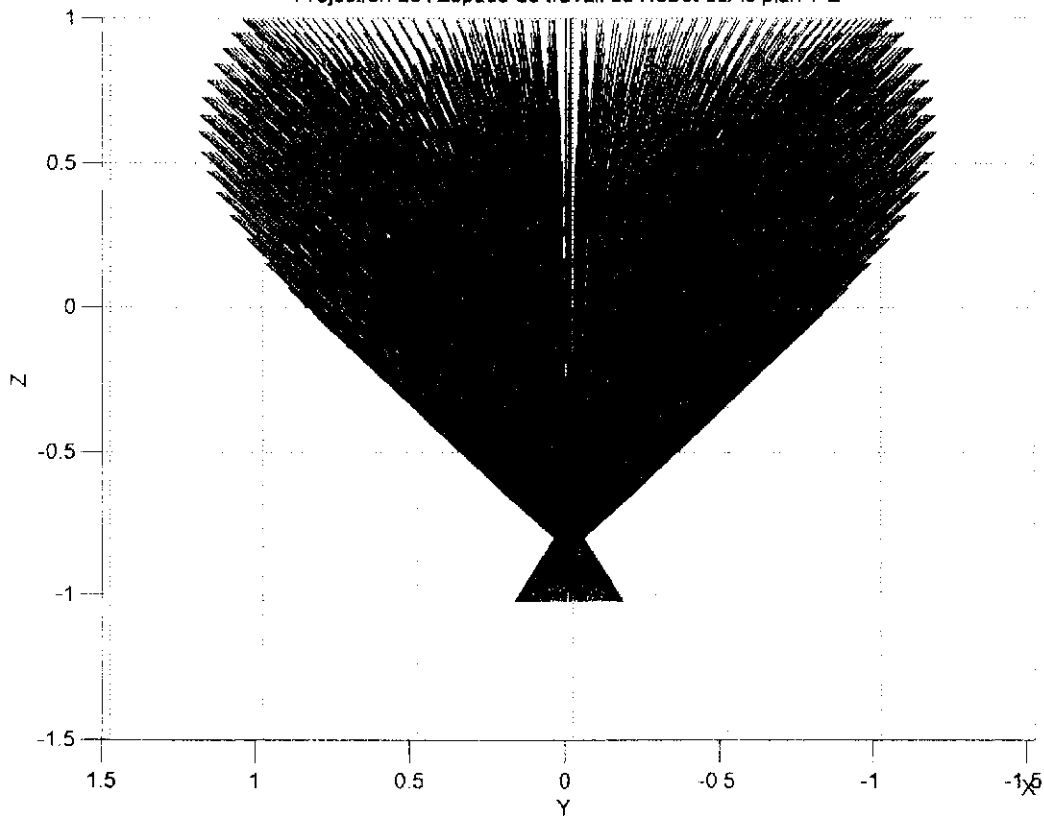


La projection de l'espace de travail sur les plans X-Y e et Y-Z donnent :

Projection de l'Espace de travail du Robot sur le plan X-Y

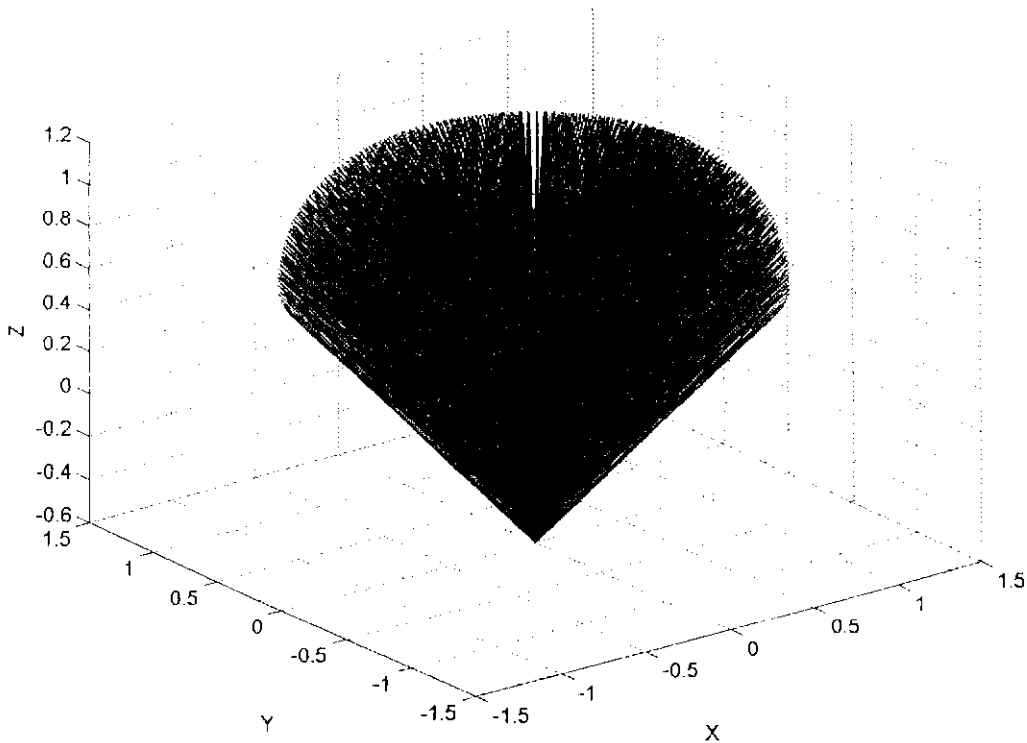


Projection de l'Espace de travail du Robot sur le plan Y-Z

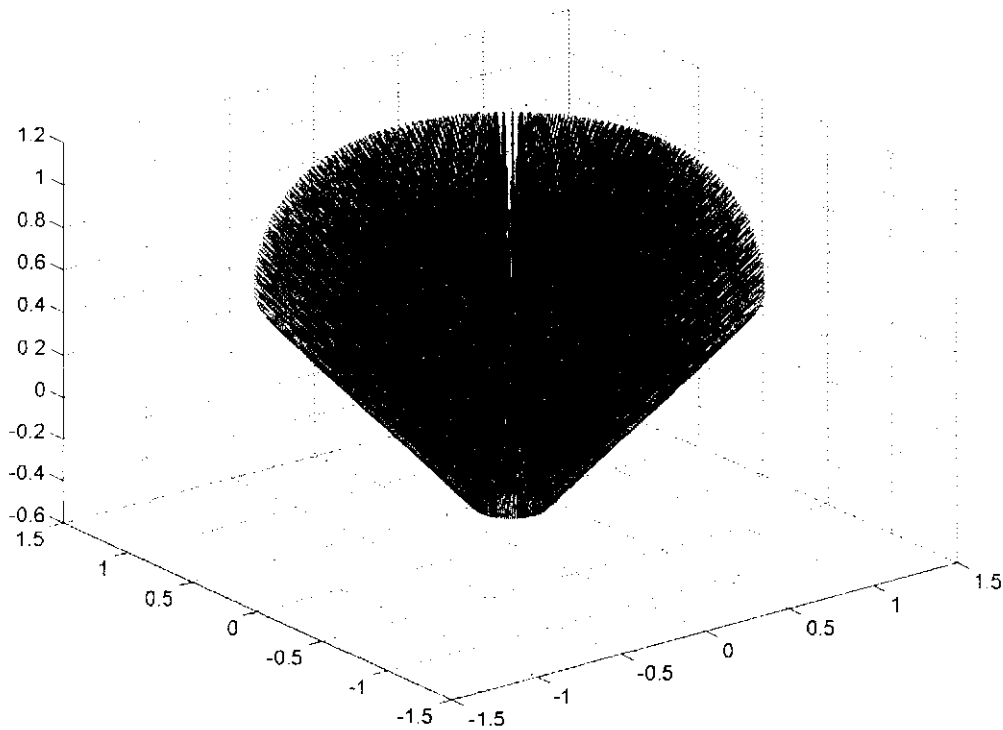


$$\theta_1 = [00,380] ; \theta_2 = [00,90] ; \theta_3 = [-90,90] ; \theta_4 = [-90,90] ; \theta_5 = [0,380]$$

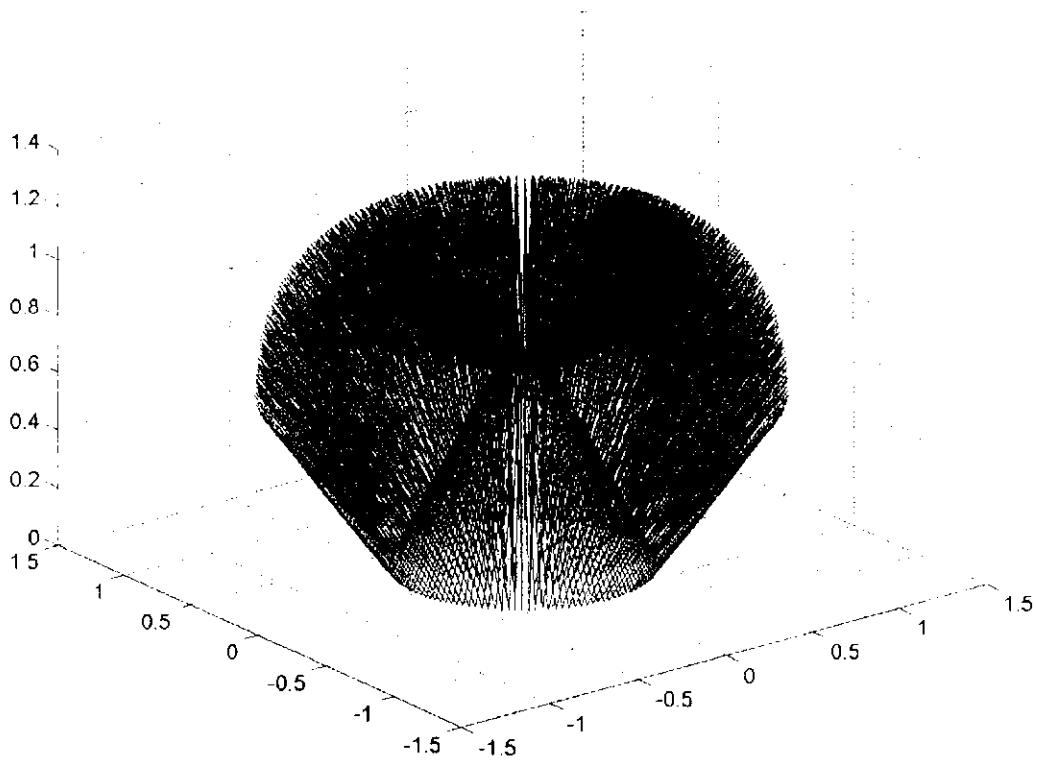
Espace de travail du Robot



$$\theta_1 = [00,380] ; \theta_2 = [00,90] ; \theta_3 = [-45,90] ; \theta_4 = [-90,90] ; \theta_5 = [0,380]$$



$$\theta_1 = [00,380] ; \theta_2 = [00,90] ; \theta_3 = [-90,90] ; \theta_4 = [-90,90] ; \theta_5 = [0,380]$$



II.4 Modèle Géométrique Inverse : (MGI)

Le modèle géométrique direct d'un robot permet de calculer les coordonnées opérationnelles donnant la situation de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires. Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'elle existe, la forme explicite qui donne toutes les solutions possibles (il y a rarement unicité de solution) constitue ce que l'on appelle le modèle géométrique inverse (MGI).

Nous présentons trois méthodes pour le calcul du MGI

- la méthode de Paul [Paul 81] qui traite séparément chaque cas particulier et convient pour la plupart des robots industriels,
- la méthode de Pieper [Pieper 68] qui permet de résoudre le problème pour les robots à six degrés de liberté possédant trois articulations rotoïdes d'axes concourants ou trois articulations prismatiques ;
- la méthode générale de Raghavan et Roth [Raghavan 90], donnant la solution générale des robots à six articulations à partir d'un polynôme de degré au plus égal à 16.

On détaillera dans ce chapitre la méthode de Paul pour le calcul du MGI pour notre robot.

II.4.1 La méthode de Paul pour le calcul du MGI

Principe :

Considérons un robot manipulateur dont la matrice de transformation homogène a pour expression

$$T_{0,n} = T_{0,1}(q_1)T_{1,2}(q_2)T_{2,3} \dots T_{n-1,n}(q_n) \dots \dots \dots (2.8)$$

Soit U_0 la situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = T_{0,1}(q_1) T_{1,2}(q_2) \dots T_{n-1,n}(q_n)$$

Pour trouver les solutions de cette équation, Paul [Paul 81] a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices $T_{j,j-1}$ pour j variant de 1 à $n-1$, opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche.

La succession des équations permettant le calcul de tous les q_j est pour un robot de six degrés de liberté est la suivante :

$$U_0 = T_{0,1} T_{1,2} T_{2,3} T_{3,4} T_{4,5} T_{5,6} ;$$

$$T_{1,0} U_0 = T_{1,2} T_{2,3} T_{3,4} T_{4,5} T_{5,6} ;$$

$$T_{2,1} U_1 = T_{2,3} T_{3,4} T_{4,5} T_{5,6} ;$$

$$T_{3,2} U_2 = T_{3,4} T_{4,5} T_{5,6} ;$$

$$T_{4,3} U_3 = T_{4,5} T_{5,6} ;$$

$$T_{5,4} U_4 = T_{5,6} ;$$

$$\text{Avec } U_{j+1} = T_{j+1,6} = T_{j+1} U_j \quad \text{pour } j = 0, \dots, 4$$

II.4.2 Calcul du modèle géométrique inverse pour le robot choisi

On utilise la méthode de Paul sur notre robot :

$$T_{0,5} = \begin{bmatrix} C1C234C5 + S1S5 & -C1C234S5 + S1C5 & C1S234 & C1[C23D4 + C2D3] \\ S1C234C5 - C1S5 & -S1C234S5 - C1C5 & S1S234 & S1[C23D4 + C2D3] \\ S234C5 & -S234S5 & -C234 & S23D4 + S2D3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour facilité l'écriture des équations suivantes on note $T_{0,5}$ par $\langle D \rangle$ donc :

$$T_{0,5} = \langle D \rangle ;$$

Multiplions les deux membres de cette relation à gauche par la matrice $T_{1,0}$, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{1,0} T_{0,5} = T_{1,0} \langle D \rangle \\ T_{1,5} = T_{1,0} \langle D \rangle \end{array} \right\}$$

$$\langle D \rangle = \begin{bmatrix} D11 & D12 & D13 & D14 \\ D21 & D22 & D23 & D24 \\ D31 & D32 & D33 & D34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{1,0} \langle D \rangle = \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 & 0 \\ -S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D11 & D12 & D13 & D14 \\ D21 & D22 & D23 & D24 \\ D31 & D32 & D33 & D34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$T_{1,5} = \begin{bmatrix} C1D11 + S1D21 & C1D12 + S1D22 & C1D13 + S1D23 & C1D14 + S1D24 \\ -S1D11 + C1D21 + C1D21 & -S1D12 + C1D22 & -S1D13 + C1D23 & -S1D14 + C1D24 \\ D31 & D32 & D33 & D34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

..... (2.10)

Puisque $T_{1,5}$ a été calculé dans le MGD (2.4), En comparant avec le résultat précédant (2.10), on considère la relation (2.10) et les éléments de la quatrième colonne :

- $C23 h3 + C2 h2 = C1 D14 + S1 D24 \quad (a)$
- $0 = -S1 D14 + C1 D24 \quad (b)$
- $S23 h3 + S2 h2 = D34 \quad (c)$

La relation (b) nous fournit deux valeurs par θ_1 :

Calcul de θ_1

$$\theta_1 = \text{Arctg}(D24/D14) \text{ et } \theta_1 + \pi \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Calcul de θ_3

$$\left. \begin{array}{l} \text{(a) } C23 h3 + C2 h2 = A \\ \text{(b) } S23 h3 + S2 h2 = B \end{array} \right\} \Rightarrow C3 = \frac{A^2 + B^2 - h2^2 - h3^2}{2h2h3}$$

$$\theta_3 = \text{Arc cos}\left(\frac{A^2 + B^2 - h2^2 - h3^2}{2h2h3}\right) \text{ et } -\theta_3 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Calcul de θ_2

$$\text{(a)} \Rightarrow C2 (C3 h3 + h2) - S2 S3 h3 = A$$

$$\text{(b)} \Rightarrow C2 S3 h3 + S2 (C3 h3 + h2) = B$$

D'où l'on déduit C2 et S2 en fonction de θ_3 et de θ_1 :

$$C2 = \frac{A(C3h3 + h2) + B(S3h3)}{(C3h3 + h2)^2 + S3^2 h3^2} \quad ; \quad S2 = \frac{B(C3h3 + h2) - A(S3h3)}{(C3h3 + h2)^2 + S3^2 h3^2} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Soit une valeur pour θ_2 (modulo 2π) pour un ensemble (θ_1, θ_2) choisi.

Calcul de θ_4

Considérons maintenant les éléments de la troisième colonne, première et troisième ligne, les deux relations :

$$S_{234} = C_1 D_{13} + S_1 D_{23} \quad \dots\dots\dots (e)$$

$$-C_{234} = D_{33} \quad \dots\dots\dots (f)$$

On a alors définie $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = \tau$ modulo 2π d'où:

$$\text{Sin}(\tau) = (C_1 D_{13} + S_1 D_{23}) \quad ; \quad \text{Cos}(\tau) = -D_{33} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\theta_4 = \tau - \theta_2 + \theta_3 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Calcul de θ_5

Enfin en considérant les éléments de la deuxième ligne première et deuxième colonnes, on a les relations :

$$-S_5 = -S_1 D_{11} + C_1 D_{21} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$-C_5 = -S_1 D_{12} + C_1 D_{22} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Qui définissent θ_5 modulo 2π

A partir de ces résultats, on peut construire l'arbre représentant des diverses solutions mathématiques.

II.5 Conclusion

Lors de la programmation du MGI, on doit introduire dans le programme un système de vérification des valeurs trouver, se qui veut dire qu'il faut vérifier chaque angle, si il ne sort pas des limites articulaire imposer et ça pour chaque configuration. On auras alors éliminer quelque configuration impossible à avoir.

Chapitre
III

MODELISATION CINEMATIQUE

III.1 Introduction

Le modèle cinématique comporte deux aspects, le premier aspect consiste dans le calcul des singularités et de la dimension de l'espace accessible du robot, et le deuxième aspect dans la commande d'un robot manipulateur.

Le modèle cinématique direct représente le premier aspect, et le modèle inverse représente le deuxième aspect.

III.2 Modèle cinématique directe :(MCD)

Le modèle différentiel direct d'un robot manipulateur est le modèle qui permet de calculer la différentielle $d\mathbf{x}$, des coordonnées opérationnelles, en fonction de la différentielle

$d\mathbf{q}$, des coordonnées généralisées (articulaires). Ce modèle fait intervenir une matrice $\mathbf{J}(\mathbf{q})$, fonction de la configuration du robot manipulateur, dénommée matrice jacobienne du robot manipulateur :

$$d\mathbf{x} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) d\mathbf{q}$$

Lorsque on calcule les dérivées par rapport au temps (et non plus les différentielles) des coordonnées opérationnelles et généralisées \dot{x} et \dot{q} on obtient le modèle cinématique direct du robot manipulateur :

$$\dot{x} = \mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{q} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Selon la définition précédente le calcul du modèle différentiel direct d'un robot manipulateur se ramène à celui de la matrice jacobienne.

III.3 Calcul de la matrice jacobienne

III.3.1 Calcul de la matrice de base

Considérons la $K^{\text{ième}}$ articulation d'une chaîne articulée. La vitesse \dot{q}_k induit sur le repère terminal R_n la vitesse de translation $V_{k,n}$ et la vitesse de rotation $\omega_{k,n}$. Deux cas se présentent :

- si l'articulation est prismatique ($\sigma_k = 1$)

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \\ \omega_{k,n} = 0 \end{cases} ;$$

Où l'on rappelle que a_k est le vecteur unitaire porté par l'axe z_k de l'articulation k ;

- si l'articulation est rotoïde ($\sigma_k = 0$) :

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \times L_{k,n} \\ \omega_{k,n} = a_k \dot{q}_k \end{cases} ;$$

Pour notre cas on prend le cas d'une articulation rotoïde donc ($\sigma_k = 0$) (*figure 3.1*)

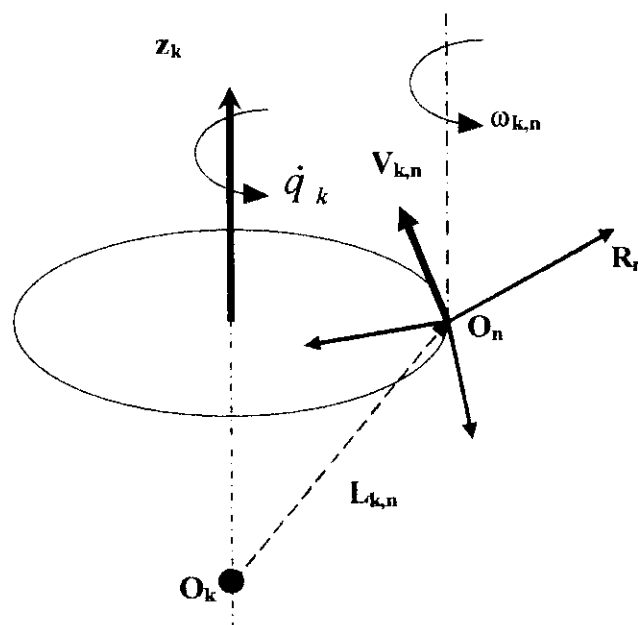


Figure 3.1. Cas d'une articulation rotoïde

En appliquant le théorème de composition des vitesses, les vitesses de translation et de rotation du repère terminal s'écrivent :

$$\left\{ \begin{aligned} V_n &= \sum_{k=1}^n V_{k,n} = \sum_{k=1}^n \left[\bar{\sigma}_k (a_k \times L_{k,n}) \right] \dot{q}_k \\ \omega_n &= \sum_{k=1}^n \omega_{k,n} = \sum_{k=1}^n \left[\bar{\sigma}_k a_k \times \dot{q}_k \right] \end{aligned} \right. ; \dots \dots \dots (3.2)$$

En mettant ce système sous forme matricielle et en l'identifiant à la relation :

$$\begin{bmatrix} V \\ \omega \\ n \end{bmatrix} = J_n \dot{q} ; \dots \dots \dots (3.4)$$

On obtient :

$$J_n = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_1 (a_1 \times L_{1,n}) & \dots & \dots & \dots & \bar{\sigma}_n (a_n \times L_{n,n}) \\ \bar{\sigma}_1 a_1 & \dots & \dots & \dots & \bar{\sigma}_n a_n \end{bmatrix} ; \dots \dots \dots (3.5)$$

On projette les éléments de la relation (3,5) dans un repère R_i , on obtient le jacobien $J_{n,i}$

III.3.2 Calcul de la matrice $J_{n,i}$

En remarque bien que le produit vectoriel $a_k \times L_{k,n}$ peut se transformer en

$\hat{a}_k L_{k,n}$, la $K^{i\text{ème}}$ colonne de $J_{n,i}$ notée $J_{n,i}(k)$ devient :

$$J_{n,i}(k) = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k A_{i,k} a_{k,k} \times I_{k,n}(k) \\ \bar{\sigma}_k a_{i,k} \end{bmatrix}; \dots\dots\dots (3.6)$$

De façons analogue, la K^{ième} colonne de J_{n,0} s'écrit :

$$J_{0,n}(k) = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k \hat{a}_{0,k} \times (p_{0,n} - p_{0,k}) \\ \bar{\sigma}_k a_{0,k} \end{bmatrix}; \dots\dots\dots (3.7)$$

Avec : L_{k,n}(k) = P_{k,n}

Donc les éléments de la colonne K s'obtiennent à partir de ceux de la matrice T_{0,k} et du vecteur P_{0,n}. On doit donc calculer les matrices T_{0,k} pour K=1,..., n.

III.4 Calcul de la matrice jacobienne pour le robot choisi

On utilise la relation (3.7), on doit calculer pour chaque colonne les paramètres a et p :

$$J_{0,n}(k) = \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_k \hat{a}_{0,k} \times (p_{0,n} - p_{0,k}) \\ \bar{\sigma}_k a_{0,k} \end{bmatrix};$$

Ici puisque notre robot possède cinq degrés de liberté (donc cinq axe), le terme n prend la valeur de cinq donc :

$$p_{0,n} = p_{0,5} = \begin{bmatrix} c1(c23d4 + c2d3) \\ s1(c23d4 + c2d3) \\ c23d4 + c2d3 \end{bmatrix};$$

$$p_{0,1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; p_{0,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$p_{0,4} = p_{0,5} = \begin{bmatrix} c1(c23d4 + c2d3) \\ s1(c23d4 + c2d3) \\ c23d4 + c2d3 \end{bmatrix};$$

Calcul des $\hat{a}_{0,k}$:

$$a_{0,1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; a_{0,2} = \begin{bmatrix} s1 \\ -c1 \\ 0 \end{bmatrix}; a_{0,3} = \begin{bmatrix} s1 \\ -c1 \\ 0 \end{bmatrix}; a_{0,4} = \begin{bmatrix} s1 \\ -c1 \\ 0 \end{bmatrix}; a_{0,5} = \begin{bmatrix} c1s234 \\ s1c234 \\ -c234 \end{bmatrix};$$

Donc :

$$\hat{a}_{0,1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\hat{a}_{0,2} = \hat{a}_{0,3} = \hat{a}_{0,4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c1 \\ 0 & 0 & -s1 \\ c1 & s1 & 0 \end{bmatrix}; \hat{a}_{0,5} = \begin{bmatrix} 0 & c234 & s1s234 \\ -c234 & 0 & -c1s234 \\ -s1s234 & c1s234 & 0 \end{bmatrix};$$

Maintenant on peut calculer les éléments de la matrice jacobienne :

$$J_{5,0}(1) = \begin{bmatrix} -s1(c23d4 + c2d3) \\ c1(c23d4 + c2d3) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; J_{5,0}(2) = \begin{bmatrix} -c1(s23d4 + s2d3) \\ -s1(s23d4 + s2d3) \\ c23d4 + c2d3 \\ s1 \\ -c1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$J_{5,0}^{(3)} = \begin{bmatrix} -d_4 s_2 s_3 c_5 \\ -d_4 s_1 s_2 s_3 \\ c_2 s_3 d_4 \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad J_{5,0}^{(4)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad J_{5,0}^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1 s_2 s_3 \\ s_1 s_2 s_3 \\ -c_2 s_3 \end{bmatrix};$$

En regroupons les résultats précédents, on obtient alors la matrice jacobienne (relation 3.8) :

$$J_{5,0} = \begin{bmatrix} -s_1(c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3) & -c_1(s_2 s_3 d_4 + s_2 d_3) & -d_4 s_2 s_3 c_5 & 0 & 0 \\ c_1(c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3) & -s_1(s_2 s_3 d_4 + s_2 d_3) & -d_4 s_1 s_2 s_3 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3 & c_2 s_3 d_4 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & s_1 & c_1 s_2 s_3 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1 & s_1 s_2 s_3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -c_2 s_3 \end{bmatrix}$$

Donc on obtient le modèle cinématique direct en utilisons la relation (3.4), qui est le suivant :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = J_{5,0} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix};$$

On obtient alors la relation (3.9) :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3) & -c_1(s_2 s_3 d_4 + s_2 d_3) & -d_4 s_2 s_3 c_5 & 0 & 0 \\ c_1(c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3) & -s_1(s_2 s_3 d_4 + s_2 d_3) & -d_4 s_1 s_2 s_3 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 s_3 d_4 + c_2 d_3 & c_2 s_3 d_4 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & s_1 & s_1 & c_1 s_2 s_3 \\ 0 & -c_1 & -c_1 & -c_1 & s_1 s_2 s_3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -c_2 s_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix}$$

Le robot choisi possède cinq degrés de liberté, les paramètres $v_1; v_2; v_3; \omega_1; \omega_2; \omega_3$ ne sont pas indépendants. On peut déterminer la relation entre ces paramètres en considérant les deux relations géométriques suivantes :

$O_0 \vec{E} \cdot \vec{y}_1 = 0$ et $\vec{z}_5 \cdot \vec{y}_1 = 0$; En dérivons cette relation on obtient la relation suivante :

$$s_{234}(s_1 v_1 - c_1 v_2) = -(c_{23} d_4 + c_2 d_3)[(\omega_1 c_1 + \omega_2 s_1) c_{234} + \omega_3 s_{234}] ;$$

On peut supprimer V_1 et la première ligne de $J_{5,0}$ pour obtenir une matrice carrée.

Le calcul du déterminant de la matrice $[5 \times 5]$ restante nous fournit le résultat :

$$\text{Det}[J_{5,0}] = d_3 d_4 s_1 s_3 s_{234}$$

III.5 Modèle cinématique inverse : (MCI)

Le modèle cinématique inverse a pour but de calculer à partir d'une configuration q donnée, les vitesses articulaire \dot{q} qui satisfont la condition imposée sur la vitesse opérationnelle \dot{x} .

Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique directe, la mise en œuvre peut être faite de façon analytique ou numérique.

III.6 Conclusion

La méthode analytique est assez lourde si l'on cherche à obtenir l'expression littérale de J^{-1} ; toutefois cette inversion peut se faire numériquement.

On opte pour la méthode numérique qui est mieux adaptée pour notre cas, un programme sera fait pour le calcul de J^{-1} pour chaque configuration (q, \dot{x}) donnée.

CONTRIBUTION
A
L'ETUDE
DU
ROBOT

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU ROBOT

Chapitre IV

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, on a pu déterminer les caractéristiques géométriques du robot et les modèles mathématiques pour la commande du robot, nous allons maintenant contribuer à l'étude de la conception du robot selon un cahier des charges bien déterminé.

IV.2 Objectifs de l'étude

Les manipulateurs actuels restent particulièrement lourds, la masse propre des bras dépasse largement sa charge utile, cela constitue un facteur pénalisant pour des systèmes de commandes de plus en plus performant.

Il s'agit donc d'étudier sous divers angles la faisabilité de bras manipulateur léger en respectant les conditions du cahier des charges.

IV.3 Cahier des charges

Le cahier des charges nous fournit les données suivantes :

- ✚ Un bras manipulateur a cinq degrés de liberté, cinq liaisons roïondes.
- ✚ Longueur des segments $L_1 = L_2 = L_3 = 0,6 \text{ m}$, ($L_2=d_3$ et $L_3=d_4$).
- ✚ La masse de la charge et de la pince est égale à 4Kg (la présente étude ne faisant objet de la pince).
- ✚ La loi de mouvement pour les cinq liaisons est une loi à profil de vitesse trapézoïdale.

Articulation	1	2	3	4	5
Débattement	[0 360°]	[0-90°]	[-90 90°]	[-90 90°]	[0 380°]
Vitesse rd/s	1	1	1	1	1
Accélération rd/s ²	2	2	2	2	2

Tableau récapitulatif des θ_{\max} θ'_{\max} θ''_{\max}

IV.4 Travail demandé

Conception technologique de la structure mécanique du bras :

- Dimensionnement des articulations.
- Dimensionnement de la structure porteuse.
- Choix des matériaux.
- Principes de motorisation.
- Définition et positionnement des capteurs assurant les bouclages nécessaires à la mesure des efforts généralisés (particulièrement couples moteurs)

IV.5 Actionneurs

IV.5.1 Choix de la source d'énergie

Dans les porteurs de robots, l'actionnement des articulations asservies peut se faire à partir de trois sources d'énergie.

- électrique
- hydraulique
- pneumatique

L'énergie électrique

L'énergie électrique présente les avantages suivants :

- énergie distribuée par réseau ou au moyen de batteries.
- énergie non polluante
- la commande est précise et fiable.
- permettant des connections faciles.
- certains moteurs électriques actuels peuvent être montés directement sur les axes d'articulations sans réducteurs. (Moteur à induit plat)

L'inconvénient principal des actionneurs électriques est leurs poids, les moteurs électriques tournent à grande vitesse et fournissent un faible couple massique par rapport à des moteurs hydrauliques.

Énergie hydraulique

bien qu'elle nous offre une bonne puissance massique par rapport à énergie électrique et cela en utilisant des pressions qui peuvent atteindre plusieurs centaines de bar, mais l'utilisation en robotique de canalisations souple limite en général la pression à 100 bar ce qui pénalise le gain en puissance massique.

Les principaux problèmes à résoudre sont aux niveaux :

- de la véhiculation de l'huile sous pression aux organes d'utilisations, lorsque ceux-ci sont embarqués sur une structure mécanique poly articulée à géométrie fortement variable.
- de l'étanchéité des raccords
- de la filtration correcte du fluide
- de la purge de l'air.
- d'associer à chaque robot une centrale hydraulique fournissant une pression régulée à partir d'un groupe moteur électrique et une pompe hydraulique.

Énergie pneumatique

L'air comprimé qui est distribué à basse pression généralement inférieure à 10 bars présente l'avantage d'une mise en oeuvre simple, au moyen de canalisations souples et moins encombrantes. Cela ne pose donc pas de problème d'étanchéité trop contraignants et permet cependant une conception d'organes simples et à coût modéré.

D'un autre côté la puissance massique à une valeur intermédiaire entre celle de énergie électrique et hydraulique.

Mais ce qui pénalise énergie pneumatique c'est surtout au niveau de la réalisation d'un asservissement performant qui s'avère difficile à maîtriser à cause de la compressibilité des fluides gazeux, qui se traduit par une forte élasticité provoquant un comportement dynamique oscillatoire à faible amortissement, bien que cette caractéristique congère aux systèmes pneumatique une certaine capacité à résister à des surcharges brutales.

Nous avons effectués notre choix pour l'énergie électrique qui en plus des avantages qu'elle présente pour une structure léger et souple elle convient le mieux à la modularité clé notre structure qui est l'objet de notre conception.

IV.5.2 Choix du type de moteur

Les moteurs électrique couramment utilisés sont les moteurs à courant continue, les moteurs pas à pas les moteurs synchrone et les moteurs à induit plat sont les plus utilisés actuellement.

Nous avons effectué notre choix sur les moteurs à courant continue.

En effet les moteurs pas à pas ne nous semblent pas approprié cependant aux taches que l'on demande à un robot. La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend du couple résistant, qui lui même dépend de la position du bras et de la charge du manipulateur un couple excessif provoque la perte d'un ou de plusieurs pas .les moteurs pas à pas lie présente donc pas une résolution très fine, et de plus ils sont bruyant.

Les moteurs asservies a courant continu presente une excellente régulation de vitesse, acceptent des couples élevés et pressentent un rendement excellent ils peuvent être dimensionnement de façon à satisfaire une large gamme de puissance, c'est pour ça qu'il conviennent particulièrement bien aux applications robotique de petites et moyennes dimensions.

Moteurs à courant continu

Le moteur à courant continu est une machine tournante capable de fonctionner en générateur comme en récepteur Je rotor en courant au moyens de balais de commutation, tourne au centre du stator, (lue parcourt le courant d'excitation du moteur. les moteurs utilisés en robotique sont du modèle à excitation constante, obtenue au moyen d'une source électrique spécifique ou grâce à la magnétisation permanente du stator.

IV.6 Problèmes de motricité

En générale il y'a trois type de motricité :

IV.6.1 Motricité centrale

Tous les actionneurs sont placés sur la base du robot et transmet les mouvements aux diverses articulations par des chaînes cinématiques appropriées qui peuvent posés des problèmes :

- sur la difficulté de transmettre le mouvement au travers de plusieurs articulations dans une structure à géométrie fortement variable.
- les frottements, générateurs de pertes énergie et surtout de perte de précision
- élasticité de certains éléments conduit à l'apparition de saccades et de vibrations mécanique.

IV.6.2 Motricité répartie

Solution préconisée dans notre présente étude du à la modularité de notre système facilité de changement des segments sans perturbé la fixation des autre segments.

Cette solution est simple, et consiste à placés des actionneurs entraînants directement l'axe; d'articulation correspondant, ce qui supprime les problèmes intervenants aux systèmes de transmission

- les actionneurs fournissent des vitesses élevés, mais des efforts faibles, ce qui impose l'utilisation d'adaptateur d'impédances mécanique ou réducteur.

Certains inconvénients existent :

L'actionneur, avec son réducteur éventuel possède un encombrement notable qui peut s'avère gênant pour l'accomplissement de la tâche.

- chaque actionneur possède une masse et des moments d'inertie qui s'ajoutent à ceux des organes de structures (segments et articulations), cette charge supplémentaire doit être prise en compte dans le dimensionnement des organes et d'actionneurs d'articulations situé en amont.

IV.6.3 Motricité mixte

C'est une solution intermédiaire de motricité dans laquelle on utilise la motricité centrale et répartie.

IV.7 Type de réducteur choisi pour chaque articulation

IV.7.1 Articulations (1), (2) et (3)

En a associé a leur moteurs des réducteurs **HARMONIQUE DRIVE** du aux avantages qu'en va cités ultérieurement.

IV.7.2 Articulation (4) et (5)

En à associe aux articulation (4) et (5) des **Mini Servo Actionneurs AC-Série RS**, doter de réducteur HD intégrer, ce type d'actionneurs présente l'avantage de son très faible poids et son encombrement très réduit ce qui très important lors de la conception de poignet de robot.

IV.8 Réducteurs harmonique drive

IV.8.1 Définition

Les réducteurs *harmonique drive* permettent de réduire la vitesse jusqu'à 320 en un seul train, et à faible encombrement ou les réducteurs à un seul train sont composés de 3 ou 4 éléments de base et sont plus légers et plus compacts que les systèmes de réduction traditionnels à rapports de réduction comparables.

IV.8.2 Principe de fonctionnement d'un réducteur HD

Le réducteur "Harmonique Drive" est basé sur un principe de fonctionnement nouveau. La transmission des forces est effectuée par un cylindre déformable en acier, utilisant une cannelure élastique "Flexspline" (b) (*figure 4.1*). L'arbre d'entraînement transmet la rotation du moteur sur un excentrique (1). La réduction est obtenue par la cannelure élastique (b) raccordée à l'arbre de sortie.

La cannelure élastique est crantée sur sa circonférence extérieure et s'engrène au niveau de 2 zones situées l'une en face de l'autre, avec les dents de la cannelure circulaire (c). Ces zones d'engrenage couvrent, en fonction du rapport de réduction, 15 à 30% du nombre total des dents.

Le mouvement circulaire de l'excentrique agit, à travers un roulement à billes (a) sur la cannelure et la déforme. C'est pourquoi les zones d'engrenage entre la cannelure et le cylindre cranté se décalent en permanence.

Ainsi la cannelure tourne, en fonction de l'excentrique, à 1/80 de la vitesse du moteur (réduction = 80 : 1), dans le sens contraire, tout en se déformant en fonction de la vitesse du moteur. Comme la cannelure a 2 dents de moins que le cylindre cranté, il se décale de 2 dents à chaque tour, par rapport au cylindre cranté.

L'arbre d'entraînement et l'arbre de sortie tournent en sens contraire.

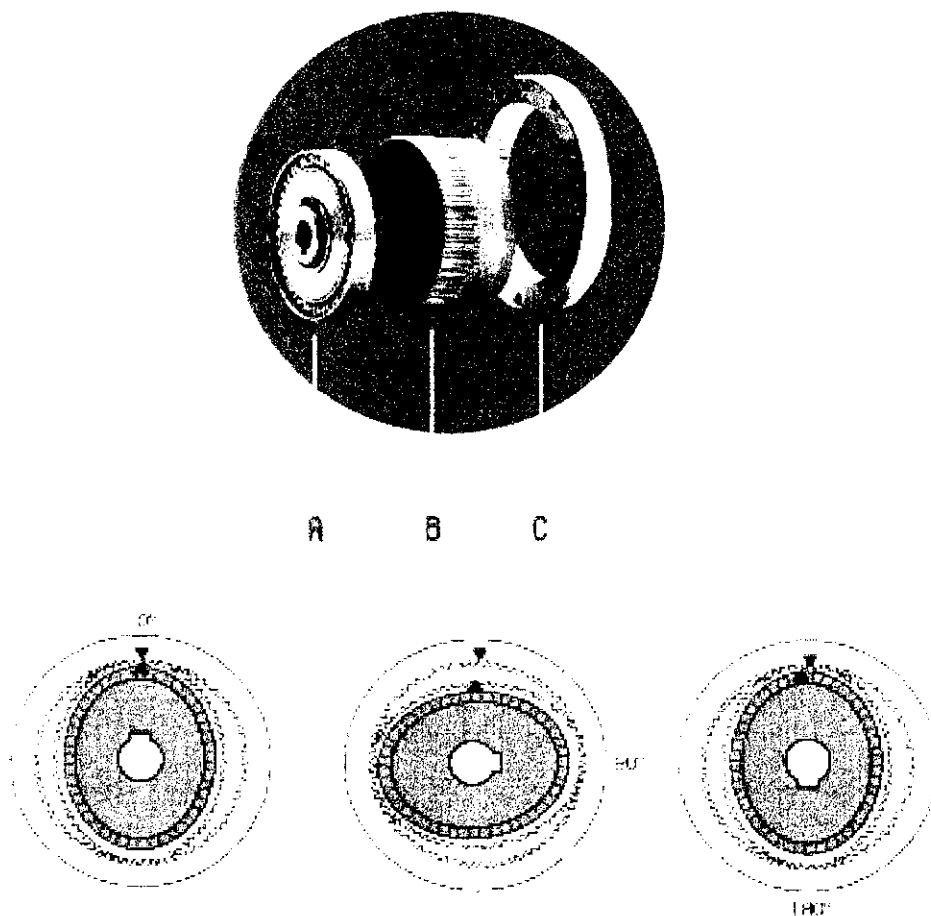


Figure 4.1. Schéma représentent le principe de fonctionnement les différentes parties du réducteur

IV.8.3 Avantage d'un réducteur HD

Les réducteurs HD présente plusieurs avantages, sont :

- les HD sont réversibles un positionnement peut être obtenue par freinage sur l'élément moteur.
- moins encombrants et plus légers que les réducteurs traditionnels, cela représente un grand avantage lorsqu'il s'agit de construction pour laquelle le poids et l'encombrement sont des paramètres critiques.
- rendement élevé, entre 0,8 et 0,9 pour des vitesses primaires inférieures à 1450 tr / min.
- grâce au nombre important de dents constamment en contact les réducteurs HD peuvent transmettre des couples élevés, adaptateur 15 à 30 % des dents sont perpétuellement en contact .
- pour la conception concentrique des éléments constitutifs, le système HD offre la possibilité d'un montage coaxial des éléments moteurs et récepteurs.
- le jeu angulaire des réducteurs HD est faible (entre 9 et 1 min-arc)

IV.8.4 La lubrification

Les réducteurs HD peuvent être lubrifiés à la graisse. On graisse le roulement du WG intérieur du flexspline ainsi que la denture.

La lubrification à la graisse dépend cependant de plusieurs facteurs comme par exemple la vitesse d'entrée, la durée de fonctionnement ...

Le remplacement de la graisse avec démontage et nettoyage doit être effectué toutes les 1000 heures de service, la durée de ces intervalles dépend cependant de la vitesse d'entrée ainsi que le couple appliqué au réducteur.

IV.9 Conception de la structure mécanique

IV.9.1 Choix du matériau des segments

Le choix est en fonction de deux critères déterminants

- minimum de masse: P (densité massique min)
- maximum de rigidité: E (module élasticité longitudinal max)
- un coût raisonnable avec la disponibilité du matériau.

Il faut donc envisager l'utilisation de matériaux tels que le rapport E/ρ soit maximum, mais ce critère de choix laisse assez peu de liberté d'appréciations entre les matériaux conventionnels car seul les matériaux composites présentent un rapport E/ρ important, mais un coût d'élaboration très élevé.

Quelques valeurs de caractéristiques physiques de matériaux susceptibles d'être utilisés :

Matériaux	E (dan/mm ²)	ρ (Kg/m ³)	E/ρ
Acier	20000	7800	2,56
Aluminium	7300	2700	2,7
Magnésium	4500	1800	2,5
Titane	11000	4500	2,45
Composites	10000	1400	7,2

Notre choix s'est porté sur un alliage d'aluminium AG-6 qui présente de bonnes caractéristiques mécaniques

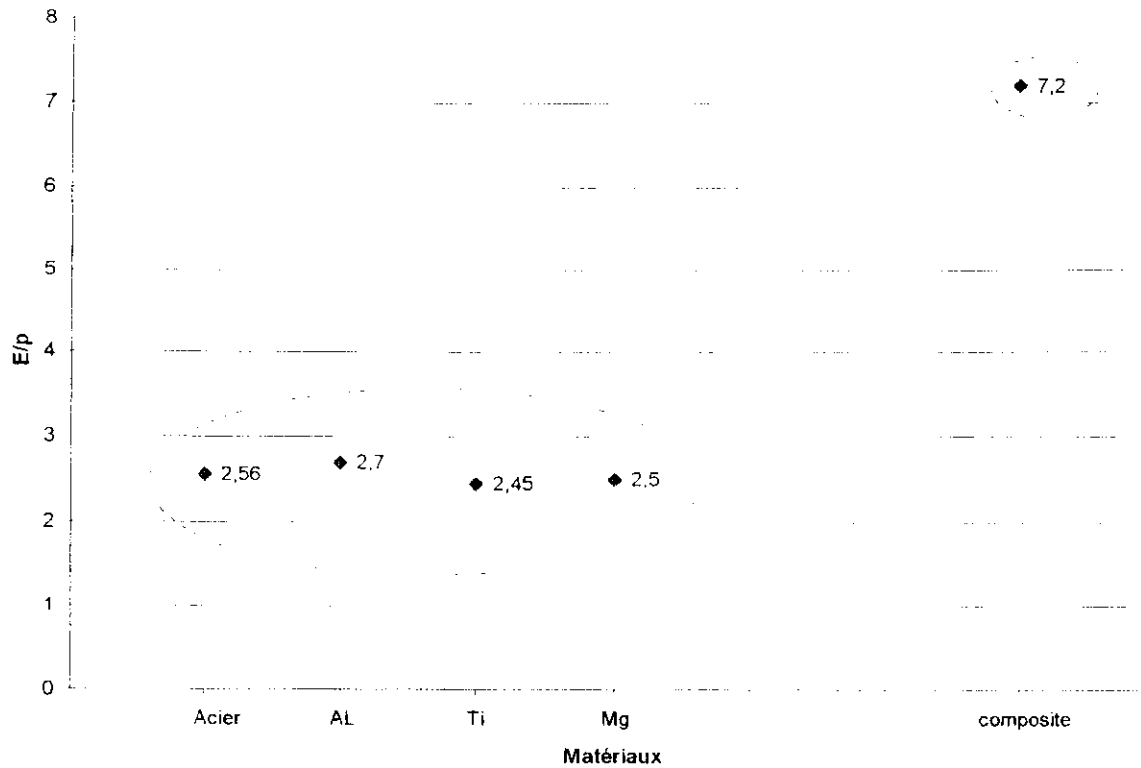


Figure 4.2. Nature de quelque matériaux en fonction de E/ρ

IV.9.2 Choix de la section et de la forme des segments

Dans le cas générale la rigidité des segments s'exprime non linéairement en fonction de la sollicitation il faut donc définir la loi d'évolution de la section, mais a cause du coût élevé de réalisation des poutres à sections variables, on s'impose en générale une contrainte maximale constante dans chaque sections. L'élément déterminant dans le choix d'un profil de section (assurant un bon comportement de rigidité) est son moment quadratique I_{GZ} .

Donc c'est suivant la sollicitation prépondérante qu'on fait notre choix.

Dimensions relatives aux segments

Les dimensions des segments sont fixées en fonction

- des dimensions normalisées
- l'encombrement de l'articulation correspondante
- une flèche admissible.

IV.10 Architecture du Porteur

L'objet de notre étude fait état d'une structure articulée animée au moyen d'actionneurs électriques à courant continu.

L'articulation de base et du bras et de l'avant-bras est entraînée aux moyens de réducteurs HD.

Les segments 2 et 3 sont montés en chape pour garantir une certaine symétrie ainsi que le positionnement de leurs moteurs qui sont montés en opposition par rapport au plant de symétrie du porteur.

IV.11 Méthode d'approche simplifiée [DEMAUREX 79]

La méthode qu'on propose pour le dimensionnement des actionneurs suit le chemin suivant :

1- calcul des différents couples à leur valeurs maximales (dans le cas le plus défavorable de la position du segment par rapport à l'articulation) à la sortie du réducteur. Ces couples sont :

- couple statique ou couple nécessaire pour vaincre l'effet du champ de pesanteur,

$$C_p = \sum P_i.L_i$$

2- couple inertiel ou dynamique proportionnel à l'accélération, nécessaire à mouvoir l'inertie de la charge totale. C_i

$$C_i = J_{ch} \cdot \theta''_{MAX}$$

3- calcul du couple résultant à la sortie du séducteur, rapport de la somme des couples,, statique et inertiel avec le rendement au niveau de l'articulation i .

$$C_{SR} = (C_p + C_i) / \eta_{ART}$$

4- en connaissant le couple à la sortie du réducteur et la vitesse de sortie exigée à l'articulation on fait le choix des réducteurs pour les articulation 2 et 3 qui sont en amont de la structure pour connaître ensuite les rapports de transmission.

Pour l'articulation 1 on a utilisé un réducteur conventionnel de rapport de réduction déjà fixé.

Calcul du couple à l'entrée du réducteur C_{ER} , c'est à dire à l'axe du moteur pour cela on doit ramener les couples C_i et C_p à l'axe du moteur en tenant compte du rapport de réduction du réducteur associé.

Les inerties ramenés à l'axe du moteur :

$$J/M = J_r + J_R + J_{ch} / k^2$$

$C_{ER} = (C_{p_{ER}} + C_{i_{ER}}) / \eta_{ART} \cdot \eta_R$: Inertie du rotor du moteur

J_r : inertie du rotor moteur

J_R : Inertie des parties tournantes du réducteur

k : Rapport de réduction

J_{ch} : Inertie de la charge totale à entraîner.

Ne connaissant pas l'inertie du rotor on doit fixé un choix de moteur pour ensuite

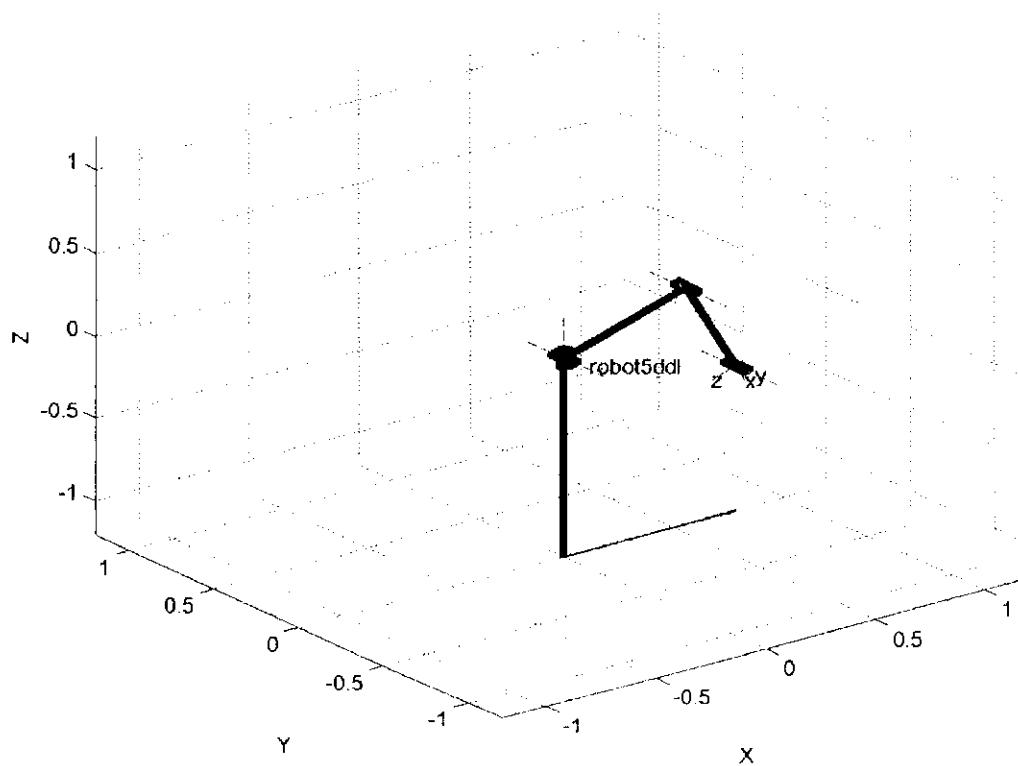
Vérifier avec le couple du moteur.

SIMULATION

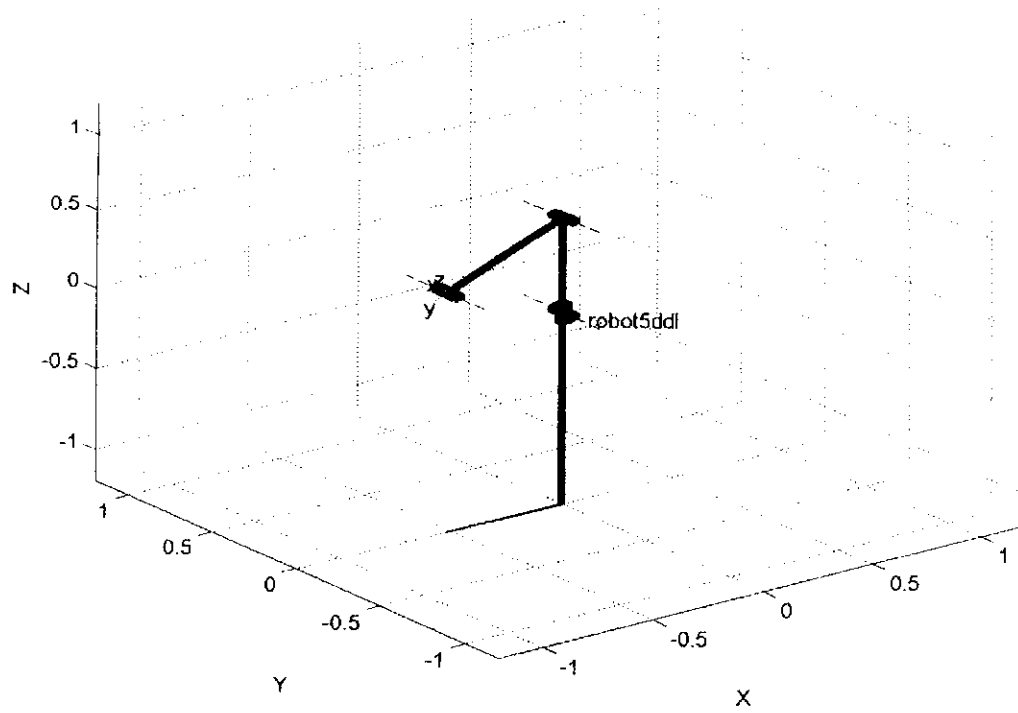
On crée l'objet robot avec un exécutable dans le « robotic toolbox » sous Matlab avec tous les paramètres géométriques et dynamiques, on peut obtenir une simulation qui approche le comportement réel du robot dans un environnement 3D. Avec quelques illustrations, on décrira le fonctionnement de ce toolbox.

Exemples d'applications :

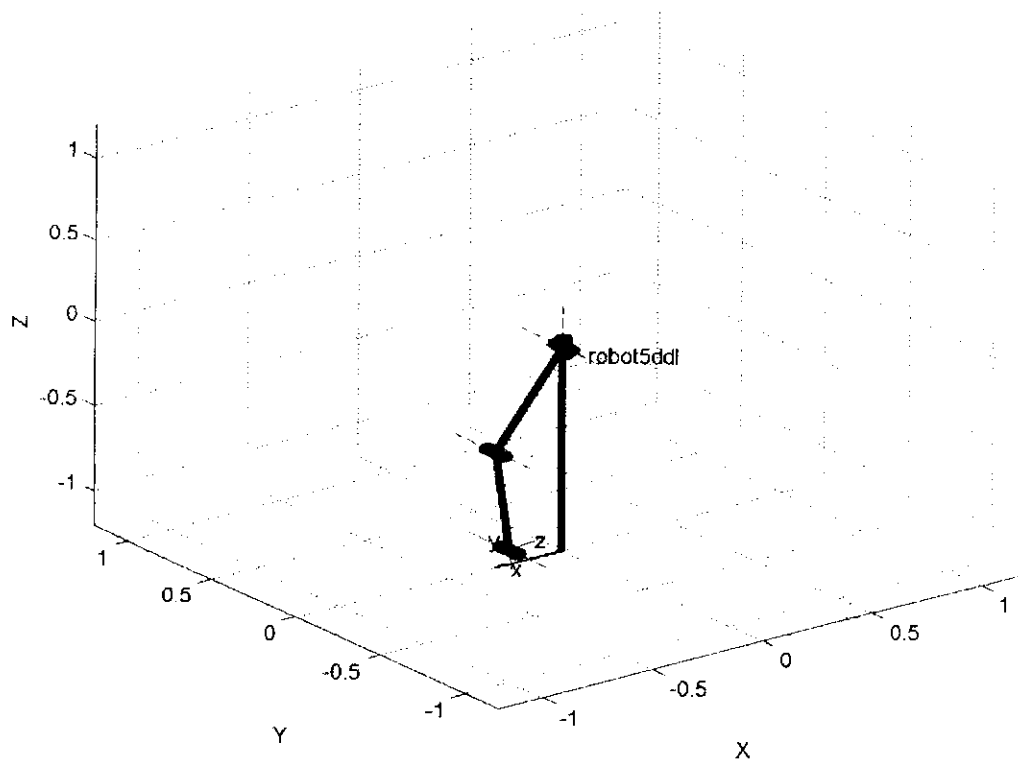
Position du robot $q_r = [0, \pi/8, -2 \cdot \pi/4, 0, 0]$:



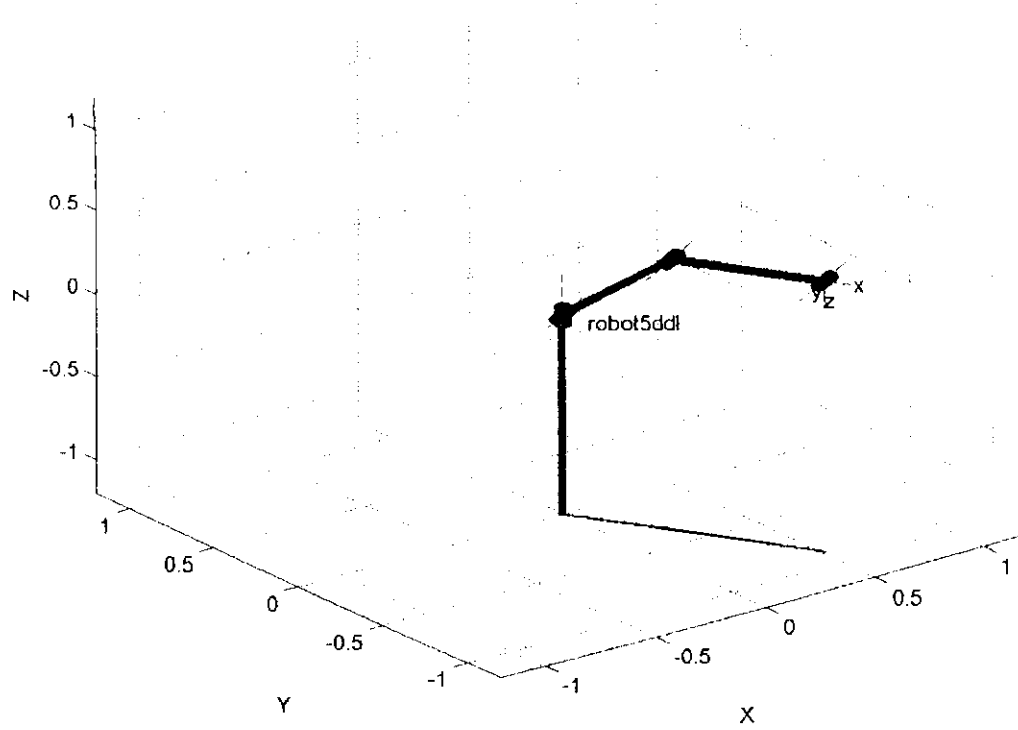
Après déroulement de la simulation, le robot atteint le point $q_2 = [\pi, \pi/2, -2 \cdot \pi/3, \pi, \pi/2]$:



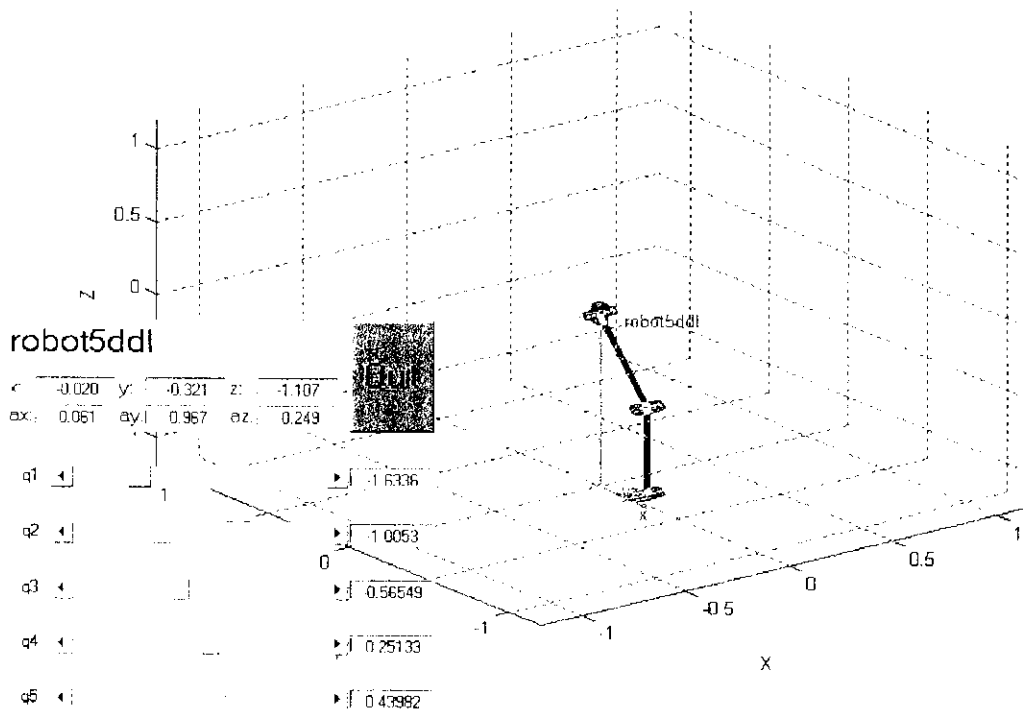
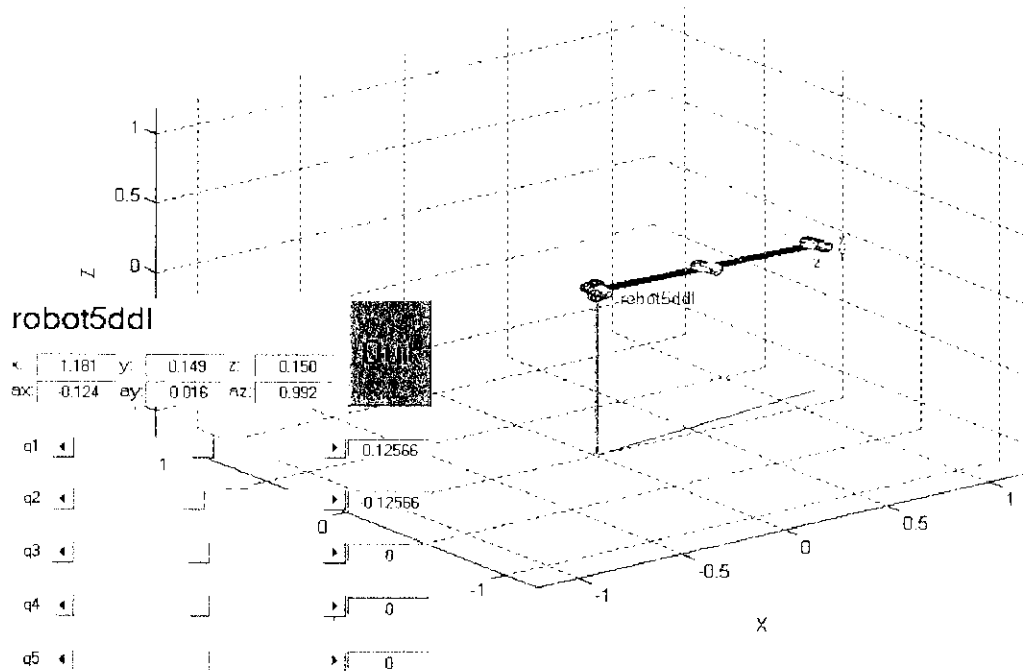
Puis le robot atteint le point $q_3 = [\pi, -\pi/3, -2 \cdot \pi/10, 0, 0]$



Le robot atteint sa destination finale $q_z = [\pi + (2\pi/3), \pi/4, -\pi/4, 0, 0]$



On peut aussi commander le robot avec une boîte de commande, on donnera ici quelques illustrations sur son fonctionnement :



Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a porté sur la modélisation, l'étude et la simulation d'un robot manipulateur à cinq degrés de liberté.

Avant toute conception de robot, la modélisation est une étape indispensable. En se basant sur les modèles mathématiques obtenus, des programmes informatiques ont été réalisés avec le puissant langage de programmation (visuel fortran), pour servir de support à la réalisation et à la commande en ligne du robot.

En nous conformant à un cahier des charges bien défini, on a pu choisir les actionneurs à utiliser sur chaque articulation et proposer une méthode de calcul de la structure mécanique du robot.

Pour une valorisation de notre étude, nous avons élaboré, comme première application, une simulation sous Matlab, sous diverses configurations, permettant de visualiser le fonctionnement du robot dans son environnement de travail.

Comme perspectives, on souhaite qu'une autre étude soit menée dans le cadre d'un PFE ou autre, soit pour élaborer le modèle dynamique du robot, soit pour réaliser le manipulateur après calcul et acquisition des organes constitutifs.

ANNEXES

```

*****
! PROGRAM: ESPACE DE TRAVAIL
!
! PURPOSE: Entry point for the console application.
*****
      program ESPACEDETRAVAIL

*****
! Déclaration des variables
*****

      ! Variables

integer n,i,j,k
real   a,b,c,e,f,p
real   ydmax,ydmin,ymin,ymax,ydmaxi,ydmini,ymini,ymaxi,pi,y1,y2,y3
real   px,py,pz
real   d3,d4
dimension T(3),ymin(5),ymax(5)

*****
open (2,file='espace_de_travail.txt')
open (4,file='espace_de_travail_plot.txt')
open (5,file='espace_de_travail_plot_2D_xz.txt')
open (8,file='espace_de_travail_plot_2D_xy.txt')
open (6,file='thetamax.txt')
open (7,file='thetamin.txt')

!introduction de la dimension des matrices de passages

pi=3.1415926535897932384626433832795 !déclaration de PI pour la transformation des
entré degré en radiant

n=5
d3=0.6
d4=0.6

*****
! Entrer des paramètre de Dénavit-Hertenberg
*****
write(*,*)'
*****!'
write(*,*)'-----chargement des limites artiulaires-----'
write(*,*)'*****!'

do k=1,n !incrimentation pour pour chaque matrice de passage

write(*,*) 'donner les limites angulaires des butés mécanique de l articulation',k

write(*,*) 'theta min='

```

```
read(*,*) ydmin
ymini=(ydmin*pi)/180

write(*,*) 'theta max='
read(*,*) ydmax
ymaxi=(ydmax*pi)/180

write(2,*) 'theta min',k,'=',ydmin,'theta max',k,'=',ydmax
write(2,*)'*****'

ymin(k)=ymini
ymax(k)=ymaxi

end do

write(6,*) (ymax(i)*180/pi,i=1,5)
write(7,*) (ymin(i)*180/pi,i=1,5)

!*****
! calcul des matrice de transformation
!*****
a=ymin(1)
b=ymax(1)
c=ymin(2)
e=ymax(2)
f=ymin(3)
p=ymax(3)

write(*,*) 'calcul du vecteur P(Px,Py,Pz) position des coordonnées articulaires'
do 11 y1=a,b,0.05
do 11 y2=c,e,0.1
do 11 y3=f,p,0.1

!calcul des élément de T(m,m) et son remplissage
T(1)=cos(y1)*((sin(y2+y3)*d4)+(cos(y2)*d3))
T(2)=sin(y1)*((sin(y2+y3)*d4)+(cos(y2)*d3))
T(3)= (sin(y2+y3)*d4)+(sin(y2)*d3)

px=T(1)
py=T(2)
pz=T(3)

write(2,10) (T(i),i=1,3)
write(4,*) (T(i),i=1,3),','
write(5,*) T(1),T(3)
write(8,*) T(1),T(2)
10 format (3f)
11 write(*,*)

! Body of Espace de travail
end program ESPACEDETRAVAIL
```

```

write(*,*) 'theta3r=',theta3

write(*,*) 'donner la valeur de theta4'

read(*,*) theta4

theta4=(theta4*Pi)/180

write(*,*) 'theta4r=',theta4

write(*,*) 'donner la valeur de theta5'

read(*,*) theta5

theta5=(theta5*Pi)/180

write(*,*) 'theta5=',theta5

!*****
!calcul des éléments de la matrice de transformation homogène T<0,5>
!*****

c1=cos(theta1)
s1=sin(theta1)
c2=cos(theta2)
s2=sin(theta2)

c5=cos(theta5)
s5=sin(theta5)

c234=cos(theta2+theta3+theta4)
s234=sin(theta2+theta3+theta4)

c23=cos(theta2+theta3)
s23=sin(theta2+theta3)

write(*,*)
'c1=cos(theta1)=',c1,'s1=sin(theta1)=',s1,'c2=cos(theta2)=',c2,'c5=cos(theta5)=',c5,'s5=sin(theta
a5)=',s5
write(*,*)
'c234=cos(theta2+theta3+theta4)=',c234,'s234=sin(theta2+theta3+theta4)=',s234,'c23=cos(thet
a2+theta3)=',c23,'s23=sin(theta2+theta3)=',s23

T(1,1)=c1*c234*c5+s1*s5
T(1,2)=-c1*c234*s5+s1*c5
T(1,3)=c1*s234
T(1,4)=c1*(c23*d4+c2*d3)

T(2,1)=s1*c234*c5-c1*s5

```

```

|*****
! PROGRAM: MCI
! PURPOSE: Entry point for the console application.
|*****

      program MCI

         ! Variables
         integer i,j,k
         real d3,d4
         real s1,c1,s2,c2,s23,c23,c234,s234
         real theta1,theta2,theta3,theta4,theta5
         dimension Jacob(5,5),invjacob(5,5),theta(5),invjacob(5,5)
         d3=d4
         d4 =0.6

         ! Body of MCI

         open (60,file='D:\Program Files\prog fortran\VERIFMGI\solution_theta.txt')
         read (60,*) (theta(i),i=1,5)
         write (*,*) (theta(i),i=1,5)

         theta1=theta(1)
         theta2=theta(2)
         theta3=theta(3)
         theta4=theta(4)
         theta5=theta(5)

         Jacob(1,1)=cos(theta1)*(cos(theta2+theta3)*d4+cos(theta2)*d3)
         Jacob(1,2)= -sin(theta1)*(sin(theta2+theta3)*d4+sin(theta2)*d3)
         Jacob(1,3)= -d4*sin(theta1)*sin(theta2+theta3)
         Jacob(1,4)= 0   Jacob(1,5)= 0   Jacob(2,1)= 0
         Jacob(2,2)= cos(theta2+theta3)*d4+cos(theta2)*d3
         Jacob(2,3)= cos(theta2+theta3)
         Jacob(2,4)= 0   Jacob(2,5)= 0   Jacob(3,1)= 0
         Jacob(3,2)= sin(theta1)
         Jacob(3,3)=sin(theta1)
         Jacob(3,4)=sin(theta1)
         Jacob(3,5)= cos(theta1)*sin(theta2+theta3+theta4)
         Jacob(4,1)= 0
         Jacob(4,2)=-cos(theta1)   Jacob(4,3)= -cos(theta1)   Jacob(4,4)=-cos(theta1)
         Jacob(4,5)= sin(theta1)*sin(theta2+theta3+theta4)
         Jacob(5,1)= 1   Jacob(5,2)= 0   Jacob(5,3)= 0   Jacob(5,4)= 0
         Jacob(5,5)=-cos(theta2+theta3+theta4)

         write(*,1) ((Jacob(i,j),j=1,5),i=1,5)
         invjacob=inv(jacob(5,5))
         write(*,1) ((invjacob(i,j),j=1,5),i=1,5)

         1 format (5f)
         end program MCI

```

```
*****
! PROGRAM: VERIFMGI
!
! PURPOSE: Entry point for the console application.
*****

      program VERIFMGI

      ! Variables

      integer i,k,j
      real a,b,c

      dimension theta(4,5)

      dimension thetamax(5)

      dimension thetamin(5)

      open (22,file='solution_theta.txt')

      open (20,file='D:\Program Files\prog fortran\MGI2\theta_en_degré.txt')

      open (30,file='D:\Program Files\prog fortran\ESPACE_DE_TRAVAIL\thetamax.txt')

      open (40,file='D:\Program Files\prog fortran\ESPACE_DE_TRAVAIL\thetamin.txt')

      !*****
      read(20,*) ((theta(i,j),j=1,5),i=1,4)

      write(*,*) ((theta(i,j),j=1,5),i=1,4)

      write(*,*)!*****

      read(30,*) (thetamax(i),i=1,5)

      write(*,*) (thetamax(i),i=1,5)
      !*****
      read(40,*) (thetamin(i),i=1,5)

      write(*,*) (thetamin(i),i=1,5)
      !*****

      write(*,*) 'les valeur appertenant aux limites articulaire'

      do i=1,4

      k=0

      do j=1,5
```


BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] J-D. BOISSONAT, B. FAVERJON, J-P. MERLET

Technique de la robotique, tome 1 : Architecture et commande
Edition Hermes, Paris 1984

[2] W. KHALIL, E. DOMBRE

Modélisation identification et commande des robots
Edition Hermes, Paris 1999

[3] J.C PRUVOST

Point en robotique, volume II
Edition Lavoisier, 1985

[4] A. PRUSKI

Robotique générale
Edition Ellipses, 1988

[5] M. CAZIN, J. METGE

Mécanique de la robotique
Edition Dunod

[6] R. CAEN

Actionneurs en robotique
Technique de l'ingénieur, Doc. B7760 01-1990, volume S3

[7] P. COIFFET

La robotique : principes et applications
Edition Hermes, Paris, 1986

[8] P. COIFFET

Robots : Définition et classification

Technique de l'ingénieur, Doc. B7700 04-1996, volume S3

[9] M. FAYOLLE

Applications robotisées : Robots de soudage

Technique de l'ingénieur, Doc. R7860 04-1994, volume S3

[10] M. FAYOLLE

Aspects mécaniques en robotique

Technique de l'ingénieur, Doc. B7190 05-1998 volume BT2

[11] A. GIET

Problème de résistance des matériaux : Tome1

Edition Dunod, Paris, 1973

[12] M. GIORDANO, J. LOTTIN

Cours de robotique : description et fonctionnement des robot industriels

Edition Armand colin, Paris, 1990

[13] B. GORLA, M. RENAUD

Modèle des robots manipulateurs, application à leur commande

Edition Cépadues, Toulouse, 1984

[14] Y. KOREN

La robotique pour ingénieurs

Mc Graw-Hill, paris, 1986

[15] S. LAROZE, R. BOUDET

Résistance des matériaux appliquée aux organes de machines

Technique de l'ingénieur, Doc. B601 11-1981 volume BD1

[16] A. LIEGEOIS

Modélisation et commande des robots manipulateurs

Technique de l'ingénieur, Doc. B7730 06-2000 volume S3

[17] D. SPENLE, R. GOURHANT

Guide du calcul en mécanique

Edition Hachette, Paris, 2000

[18] C. VIBET

Robot : Principes et contrôle

Edition Ellipses, Paris, 1987

[20] R. FONTAINE

Construction mécanique, Tome 1, 2, 3

Aide mémoire DUNOD

[21] M-O. DEMAUREX

Approche théorique de la conception de la structure mécanique d'un robot industriel

Thèse No 322 (1979) Présentée au département de mécanique de LAUSANNE.

[22] M. MOKHTARI, A. MESBAH

Apprendre et maîtriser MATLAB

Edition Springer, Paris, 1997