

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Automatique**

Spécialité : **Commande des Systèmes**

Présenté par
CHEMOUNE Mourad

Thème

Commande en position d'un bras manipulateur à trois degrés de liberté avec une carte Arduino

Mémoire soutenu publiquement, le 12/ 07/ 2018 devant le jury composé de :

M ^r MAIDI Ahmed	Professeur	U.M.M.T.O	Président
M ^r Mellah Rabah	Professeur	U.M.M.T.O	Encadreur
M ^{elle} CHELLALI Ouardia	M.C.B	U.M.M.T.O	Examinatrice
M ^r ALIBEY Mohamed	M.C.B	U.M.M.T.O	Examineur

REMERCIEMENT

Je remercie en premier lieu Allah pour m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Mes remerciements vont à toute ma famille, je cite en particulier, ma mère, mon père, ma femme, mes frères, mes tantes, mon oncle qui m'ont toujours comblé d'affection et de conseils.

Je tiens à remercier mon encadreur Monsieur Mellah Rabah, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour sa patience et sa bonne moralité durant la période de l'encadrement.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'évaluer et de l'enrichir par leurs propositions et critiques.

Je remercie tous les professeurs de l'UMMTO qui m'ont appris avec cœur tout ce que j'ai acquis comme savoir.

Enfin dans le souci de n'oublier personne, que tous ceux qui m'ont aidée, de près ou de loin, que ce soit par leur amitié, leurs conseils ou leur soutien moral et matériel trouvent dans ces quelques aimables et sincères mots l'expression de ma profonde gratitude.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I : Introduction à la robotique

I.1	Introduction.....	2
I.2	Définitions	3
I.3	Les composants de Robots.....	3
I.3.1	Mécanismes	3
I.3.2	Effecteur	4
I.3.3	Actionneurs.....	4
I.3.4	Capteurs	4
I.3.5	Système de contrôle.....	5
I.3.6	Interface de programmation.....	5
I.4	Catégories de robots.....	6
I.4.1	Les robots manipulateurs.....	6
I.4.2	Les robots mobiles.....	6
I.5	Domaines d'application des robots.....	6
I.6	Le bras manipulateur dans son contexte	8
I.7	Constitution du bras manipulateur.....	8
I.7.1	Structure mécanique	9
I.7.2	Les Actionneurs	10
I.7.3	Les capteurs	12
I.7.4	La partie commande	13
I.8	Classification des manipulateurs	13
I.8.1	Les Télémanipulateurs ou manipulateurs à commande manuelle	13
I.8.2	Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés.....	14
I.8.3	Les robots programmables.....	14
I.8.4	Les robots dits "intelligents"	14
I.9	Morphologie.....	14

I.10	Notions géométriques d'un manipulateur	15
I.10.1	Solides	15
I.10.2	Notion de degré de liberté (D.D.L).....	15
I.10.3	Liaison	16
I.10.4	Les articulations.....	16
I.11	Morphologie des porteurs	17
I.11.1	Manipulateur cartésien (ppp).....	18
I.11.2	Les robots cylindriques (RPP).....	19
I.11.3	Les robots sphériques (RRP)	19
I.11.4	Manipulateur anthropomorphe	20
I.12	Conclusion	22

Chapitre II : Modélisation géométrique

II.1	Introduction.....	23
II.2	Rappels géométriques	23
II.2.1	Repère	23
II.2.2	Transformations rigides	24
II.2.3	Transformations homogènes.....	24
II.2.4	Matrice de transformation homogènes : cas de translation pure	26
II.2.5	Matrice de transformation homogène : cas de rotation pure	27
II.2.6	Situation d'un solide dans l'espace	30
II.2.7	Propriétés des matrices de transformation homogène	31
II.2.8	Description de la position d'un solide	32
II.2.9	Description de l'orientation d'un solide	35
II.3	Modèle de Denavit Hartenberg (structure ouverte simple).....	36
II.4	Modèle de Denavit Hartenberg (DH) du manipulateur à commandé	38
II.5	Modèle géométrique direct	40
II.6	Modèle géométrique inverse.....	42

II.7	Conclusion	46
------	------------------	----

Chapitre III : Description de la carte Arduino

III.1	Introduction.....	47
III.2	Présentation d'Arduino.....	47
III.2.1	Qu'est-ce qu'Arduino	47
III.2.2	Applications.....	47
III.2.3	Bonnes raisons de choisir Arduino.....	48
III.2.4	Le principe de fonctionnement d'Arduino	49
III.2.5	Les différentes cartes Arduino.....	49
III.2.6	La carte d'Arduino Méga 2560.....	49
III.2.6.1	Présentation du matériel.....	50
III.2.6.2	Synthèse des caractéristiques	52
III.2.6.3	Présentation du logiciel	52
III.2.7	Programmation sur Arduino	54
III.2.8	Principe d'alimentation d'une carte Arduino Mega2560	55
III.2.9	Arduino et la PWM et les servomoteurs.....	56
III.2.10	Gestion de l'alimentation de la carte Arduino et des servomoteurs	59
III.2.10.1	Principe d'alimentation d'un servomoteur	59
III.3	Conclusion	62

Chapitre IV : Commande en position du robot

IV.1	Introduction.....	63
IV.2	Description de la structure mécanique articulée	63
IV.3	Les actionneurs de manipulateur	64

IV.3.1	Description d'un servomoteur	64
IV.3.1.1	Le rôle de l'électronique et du potentiomètre	64
IV.3.1.2	Role du système réducteur	65
IV.4	Les caractéristique du servomoteur à commandé	65
IV.5	principe d'alimentation des servo et de la carte Arduin	66
IV.6	Commande de la position et l'orientation du robot	67
IV.7	Test expérimentale	70
IV.8	Conclusion	72
	Conclusion générale.....	73

Liste des figures

Figure I.2 : Effecteur d'un manipulateur	4
Figure I.3 : Différents actionneurs d'un robot.....	4
Figure I.4 : Différents capteurs d'un robot	5
Figure I.5 : Images correspondante aux différents domaine d'application des robots..	7
Figure I.6 : Représentation d'un bras manipulateur	10
Figure I.7 : Vérin hydraulique simple effet et double effet	11
Figure I.8 : vérin pneumatique simple et effet et double effet.....	11
Figure I.9 : Servomoteur	12
Figure I.10 : Moteur pas-a-pas.....	12
Figure I.11 : capteur de position	12
Figure I.12 : capteur de vitesse	12
Figure I.13 : La structure utilisée dans la conception des robots.....	15
Figure I.14 : Volume.....	19
Figure I.15 : Configuration cylindriques (RPP).....	19
Figure I.16 : Volume de travail.....	20
Figure I.17 : Configuration sphériques (RRP).....	20
Figure I.18 : Volume de travail.....	21
Figure I.19 : Configuration articulés(RRR).....	21
Figure II.1 : Passage d'un repère R_i à un repère R_f	24
Figure II. 2 : Translation pure d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	26
Figure II.3 : Rotation pure autour de l'axe x d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	28
Figure II.4 : Rotation pure autour de l'axe y d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	29
Figure II.5 : Rotation pure autour de l'axe z d'un repère R_f par rapport à un repère R_i	30
Figure II.6 : Coordonnées cartésiennes.....	33
Figure II.7 : Coordonnées cylindriques	34

Figure II.8 : Coordonnées sphériques	35
Figure II.9 : Robot à structure ouverte simple	36
Figure II.10 : Paramètres de Denavit-Hartenberg.....	37
Figure II.11 : Schéma de la représentation géométrique et placement des repères du manipulateur	39
Figure III.1 : Boitier de l'Arduino mega2560	50
Figure III.2 : Logiciel Arduino	53
Figure III.3 : Barre des boutons du logiciel Arduino.....	54
Figure III.4 : Structure de la programmation	55
Figure III.5 : Illustration du signal de contrôle	57
Figure III.6 : Principe d'alimentation d'un servomoteur	59
Figure III.7 : Alimentation d'un servomoteur avec une carte Arduino	60
Figure III.8: Alimentation d'un servomoteur avec une alimentation externe	61
Figure IV.1 : la structure mécanique articulée du manipulateur.....	63
Figure IV.2 : les différents composants	64
Figure IV.3 : Présentation d'un.....	64
Figure IV.4 : fonctionnement du potentiomètre	65
Figure IV.5 : principe d'alimentation des servo et de la carte Arduino	67
Figure IV.6 : Représentation de l'orientation de la pince	68
Figure IV.7 : représentation des points A et B et la trajectoire réaliser.....	71

Liste des Tableaux

Tableau II.1: tableau des paramètres de Denavit-Hartenberg relatif au manipulateur	39
Tableau III.1 : Synthèse des caractéristiques	52

Introduction Générale

La Robotique représente un champ d'application intéressant pour des disciplines aussi diverses que la Mécanique, L'Electronique, l'Automatique, l'Instrumentation, l'Informatique et l'Intelligence Artificielle.

Depuis la révolution industrielle, une discipline qui a marqué l'évolution du monde technologique c'est la Robotique. Un des objectifs de base en robotique est de pouvoir déplacer des objets conformément aux des trajectoires prescrites, dans le but de remplacer l'homme lors de réalisation des tâches pénibles ou présentant un risque pour l'organisme (le déplacement d'objets lourds, les tâches d'assemblages, les microsoudures... etc). La conception des manipulateurs c'est donc naturellement inspirée d'une architecture sérielle dite anthropomorphe, comprenant une épaule, un bras et un poignet.

L'utilisation des robots sériels pour des opérations d'usinage est devenue un enjeu de développement des robots ces dernières années. Pour la commande et l'utilisation de ces derniers dans leur espace de travail, il est nécessaire en premier lieu d'établir des modèles géométriques, cinématiques, dynamiques appropriés. Un fois que les modèles géométriques, cinématiques et dynamiques de ces robots sériels sont bien établis, divers modes de commande et de contrôle seront par la suite développés et testés.

Ce travail représente une introduction sur le domaine de la robotique et principalement à la commande en position d'un bras manipulateur à structure sérielle à cinq articulation rotoïdes dont chacune entraînée par un servo moteur. Ces servo moteurs sont commandés par une carte Arduino Méga 2560, de telle manière à faire déplacer l'organe terminal dans son espace de travail pour déplacer un objet du point A au point B suivant une trajectoire bien déterminée, cette tache est souvent utilisée dans l'industrie.

L'ensemble de nos travaux est regroupé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur les différents sur la robotique en faisant une représentation détaillé des robots manipulateurs en particulier la structure mécanique d'un robot rigide.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation géométrique de notre robot en utilisant la méthode de Denavit et Hartenberg.

Le troisième chapitre fera l'objet de la présentation du système de commande à base de la carte Arduino.

Dans le dernier chapitre, représentant le noyau du mémoire, la commande en position du bras manipulateur commandé par une carte électronique de type Arduino Méga 2560. Nous terminons ce dernier chapitre avec un teste expérimental.

Chapitre I

Introduction à la robotique

I.1 Introduction

Le concept du robot date de plusieurs siècles, mais le terme robot fut inventé par le tchèque Karel Capek dans une pièce de théâtre écrite en 1920 : "RUR ou les robots universels de Rossum". Ce terme est dérivé du verbe tchèque "robota" signifiant travail forcé ou corvée.

Il est certain que depuis fort longtemps, les réalisateurs d'automates ont cherché à pouvoir insuffler à leurs machines des comportements adaptés aux circonstances. Jusqu'au vingtième siècle, les techniques étaient trop primitives pour permettre de telles réalisations. Il a fallu attendre les fin des années cinquante pour que Georges Devol invente une machine originale polyvalente et reprogrammable, ce qui a permis au robot d'acquérir une réalité industrielle.

Ce robot, appelé Unimate, était capable de manipuler des objets avec des actionneurs hydrauliques. Le fabricant de voitures américain General Motors sera le premier à installer ce bras articulé dans l'une de ses usines en 1961. L'Unimate a alors pour tâche de saisir des pièces chaudes de métal et de les empiler, qui une tâche particulièrement éprouvante pour les ouvriers. A cette époque, aucun ordinateur ne guide les mouvements de ce robot. En revanche, ses instructions lui viennent d'un disque magnétique.

Après ce premier galop d'essai, ce ne fut que vers la fin des années 1970 que les robots industriels de première génération ont vu le jour. À partir de cette date, la course à la robotique industrielle va se mettre en place et chaque année de nouveaux secteurs industriels s'ouvrent à la robotisation au fur et à mesure que les équipements se diversifient, deviennent plus adaptés et surtout meilleur marché. Les robots sont devenus tellement indispensables dans certains secteurs industriels (l'automobile par exemple), que leur emploi conditionne la survie économique des entreprises. Il est alors devenu indispensable de maîtriser leurs technologies.

Aujourd'hui et demain les pays montreront leur puissance par l'étendue de leurs robots.

I.2 Définitions

Plusieurs définitions ont été apportées au mot robot depuis son apparition et parmi elles, nous avons retenues les suivantes :

- "C'est une machine pouvant manipuler des objets en réalisant des mouvements variés dictés par un programme aisément modifiable."

- "Un appareil automatique qui peut effectuer des fonctions semblables à celles des humains."

- « un système capable d'accomplir des tâches, en tout ou en partie, habituellement dévouées aux humains. »

I.3 Les composants de Robots

Un robot, en tant que système, il est composé d'éléments, qui sont intégrés sous forme d'un ensemble. La plupart des robots contiennent les éléments suivants:

I.3.1 Mécanismes

Système de corps articulés disposant d'une haute mobilité. C'est le corps principal du robot qui comprend les segments, les jonctions, les articulations et d'autres éléments de structure du robot.

I.3.1 Effecteur

Cette partie représentée sur la figure suivante, est reliée à la dernière jonction (main) d'un manipulateur qui gère généralement les objets, établit des connexions à d'autres machines ou effectue les tâches requises.

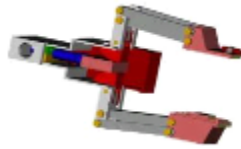


Figure I.1 : Effecteur d'un manipulateur

I.3.2 Actionneurs

Les actionneurs sont les «muscles» de manipulateurs. Le contrôleur envoie des signaux aux actionneurs, qui, à leur tour, déplacent les articulations du robot et des jonctions. Les actionneurs les plus utilisés en Robotique sont les servomoteurs, les moteurs pas à pas, les actionneurs pneumatiques et les vérins hydrauliques. La figure I.3 illustre les différents types d'actionneurs qui sont sous le contrôle du contrôleur.



Figure I.2 : Différents actionneurs d'un robot

I.3.3 Capteurs

Les capteurs sont utilisés pour recueillir des informations sur l'état interne du robot ou pour communiquer avec l'environnement extérieur. Comme chez l'humain, le dispositif de commande de robot doit connaître l'emplacement de chaque lien du robot afin de connaître la configuration du robot. Généralement les robots sont équipés de dispositifs sensoriels externes comme un système de vision, les capteurs tactiles, synthétiseur de parole. Et grâce à ces capteurs, le robot peut communiquer avec le

monde extérieur. La figure I.4 montre les différents types de capteurs utilisés en Robotique.

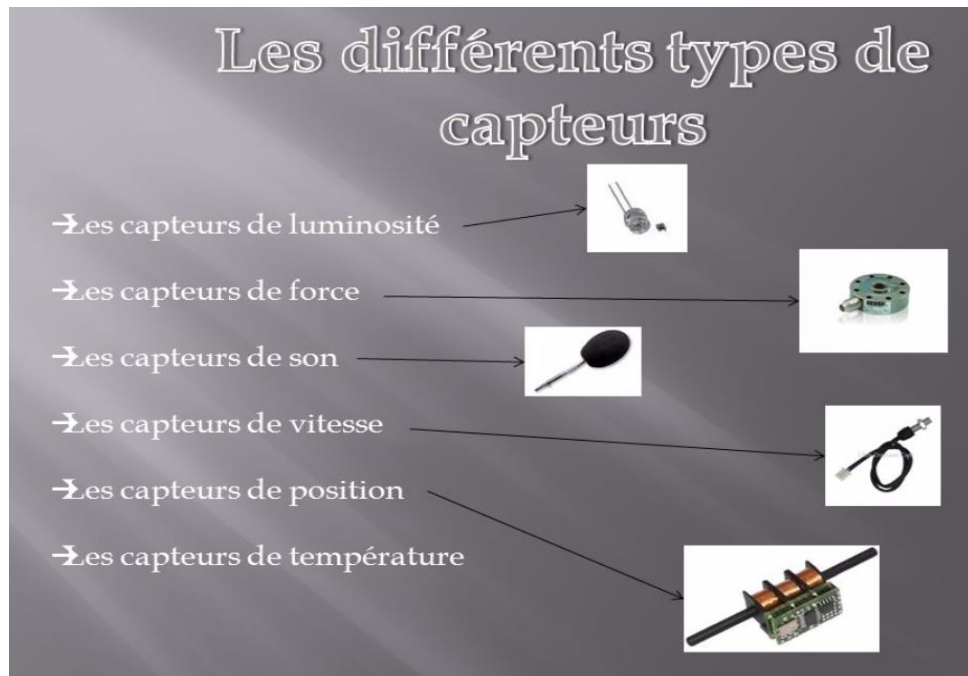


Figure I.3 : Différents capteurs d'un robot

I.3.4 Système de contrôle

C'est un système qui permet au robot d'analyser les données provenant des capteurs et d'envoyer les ordres relatifs aux actionneurs.

I.3.5 Interface de programmation

C'est un système de communication entre l'opérateur et la machine ou entre les machines (Interface graphique, interface de télé opération, langage structuré, etc...)

I.4 Catégories de robots

Il existe deux grandes familles de robots à savoir les robots manipulateurs et les robots mobiles :

I.4.1 Les robots manipulateurs

Un robot manipulateur est en forme d'un bras et se compose d'un certain nombre de segments qui est conçu pour manipuler ou déplacer des matériaux, outils et pièces sans contact humain direct. Ils représentent les dispositifs qui permettent aux humains d'interagir avec des objets dans un environnement en toute sécurité.

Les robots manipulateurs sont utilisés dans des applications industrielles pour effectuer efficacement des tâches telles que l'assemblage, soudage, traitement de surface, et le forage.

I.4.2 Les robots mobiles

Un robot mobile est celui qui peut se déplacer dans son environnement de façon indépendante. Pour ce faire, le robot doit pouvoir naviguer. Ainsi, la portée et la précision de navigation requise varie en fonction de la taille du robot et du type de sa tâche.

I.5 Domaines d'application des robots

Les systèmes robotiques intéressent de très nombreux domaines civils et militaires. Les grands champs d'application de la robotique sont :

- La production manufacturière (usinage, assemblage, soudure, polissage, formage, etc..)
- Les interventions en milieux hostiles (sous-marin, nucléaire, etc...)

- Les systèmes de transport des biens et des personnes (véhicules intelligents, robots mobiles, etc...)
- L'aide et l'assistance aux personnes (robots personnels, aides techniques, etc...)
- Les nombreux domaines de la sante (chirurgie, rééducation, etc...)
- Le ludique (robots jouets)

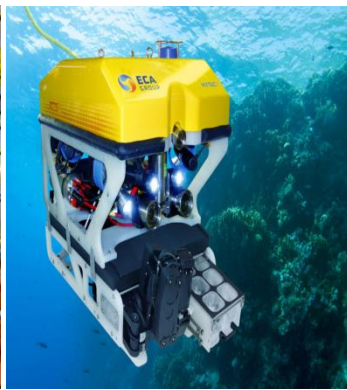


Figure I.4 : Images correspondant aux différents domaines d'application des robots

I.6 Le bras manipulateur dans son contexte

Un bras manipulateur est le bras d'un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Les liens de ce manipulateur sont reliés par des axes permettant, soit du mouvement de rotation, ou de translation (linéaire) de déplacement.

Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut être utilisé pour effectuer une variété de tâches avec une grande précision. Les bras manipulateurs peuvent être fixes ou mobiles (c'est-à-dire à roues) et peuvent être conçus pour des applications industrielles. Généralement, un robot manipulateur est considéré comme un système articulé rigide. Nous avons trouvé dans la littérature différentes définitions de ce système dynamique tel que :

Celle donnée par **AFNOR (Association Française de Normalisation)** : 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 ont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

I.7 Constitution du bras manipulateur

Un bras manipulateur est composé de quatre parties principales :

- **Structure mécanique.**
- **Les actionneurs.**

- **Les capteurs.**
- **La partie commande.**

I.7.1 Structure mécanique

Une structure mécanique qui sera le squelette du robot, peut être divisée en trois parties distinctes comme le montre la figure I.6.

➤ **La base :**

Pour qu'un manipulateur exécute des tâches dans un lieu donné, il faut d'abord l'amener sur place. C'est le rôle du véhicule : engin terrestre, sous-marin, satellite etc.... Pour les robots à poste fixe, dépourvue de véhicule, on parle alors de base du manipulateur qui est fixée sur le lieu de travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

➤ **Le porteur :**

C'est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il, permet de remplacer, ou de prolonger, son action. Son rôle 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, assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés. Généralement une structure articulée, dont le rôle est d'amener l'extrémité du robot en divers points de son espace de travail.

➤ **L'organe terminal :**

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). En d'autres termes,

il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, dont chacun portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

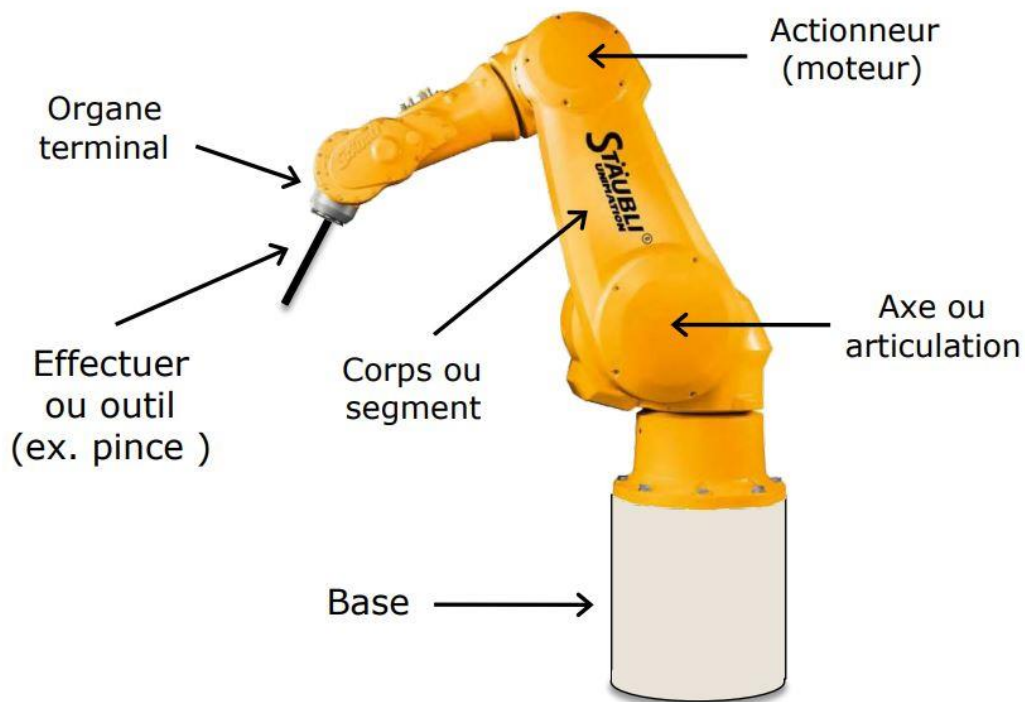


Figure I.5 : Représentation d'un bras manipulateur

I.7.2 Les Actionneurs

Un axe robotisé comprend un organe moteur, permettant la mise en mouvement relatif de deux solides successifs. Cet organe moteur est appelé, et il transforme le type d'énergie qui lui est fournie en énergie mécanique.

Il existe trois types d'actionneurs à savoir : actionneurs hydrauliques, actionneurs pneumatiques et actionneurs électriques.

➤ **Actionneurs hydrauliques :**

Les actionneurs hydrauliques ce sont des systèmes qui transforment l'énergie hydraulique (l'huile) en énergie mécanique. Il existe deux types d'actionneurs hydrauliques les vérins doubles effets et simples effets pour les mouvements de translation et les moteurs pour des mouvements rotatifs.

L'actionnement hydraulique est utilisé pour les manipulant de très grosses charges : exploitation forestière, portiques de grand gabarit, engins robotisés...etc.,



Figure I.6 : Vérin hydraulique simple effet et double effet

➤ **Actionneurs pneumatiques :**

Tous les systèmes qui transforment l'énergie pneumatique (l'air) en énergie mécanique sont des actionneurs pneumatiques. En robotique on parle généralement de vérins double et simple effet, qui sont considérés comme des actionneurs linéaires, et commandés en tout ou rien pour des automatismes de transfert.



Figure I.7 : vérin pneumatique simple et effet et double effet

➤ **Actionneur électrique :**

La plus part des robots proposés par des constructeurs sont à actionnement électrique, en raison aux nombreux avantages que présentent les actionneurs électriques.

Il existe plusieurs types de ces derniers parmi eux : moteur à courant continu, moteur pas à pas, servomoteurs...etc.



Figure I.8 : Servomoteur



Figure I.9 : Moteur pas-a-pas

I.7.3 Les capteurs

Les capteurs sont utilisés pour effectuer des mesures. Cependant, leurs résolutions ainsi que leurs technologies sont des éléments importants pour la précision de positionnement.

Les robots sont équipés de capteurs leur permettant de percevoir l'environnement dans lequel ils évoluent. En robotique on utilise généralement deux types de capteurs à savoir : les capteurs proprioceptifs et les capteurs extéroceptifs.

➤ Les capteurs proprioceptifs :

Ces capteurs mesurent l'état du robot lui-même (capteur de position (GPS), capteur de vitesse, capteur de charge de batteries,...)



hydrauliques, ou le plus souvent électriques. Ces manipulateurs sont employés en forge, fonderie, meulage-ébarbage, milieux "hostiles", etc., mais nécessitent toujours la présence et l'intervention constante d'un opérateur. Appelés aussi robots télécommandés ils ont aucune autonomie.

I.8.2 Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés

Leurs mouvements sont limités par des butées et cames réglables à la main. Ils sont commandés à l'aide de logiques à relais ou pneumatiques (séquences fixes), ou par automates programmables et cartes à microprocesseurs (séquences variables). Généralement modulaires, ces appareils sont conçus pour une application déterminée.

I.8.3 Les robots programmables

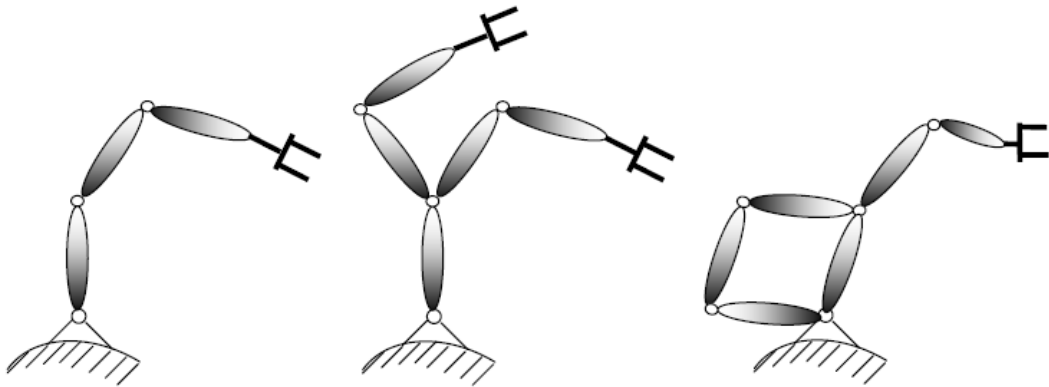
Ils sont pilotés par des ordinateurs ou des armoires de commande numérique. Leurs mouvements continus dans l'espace sont alors programmés par apprentissage ou en langage symbolique par l'intermédiaire d'un clavier, ou encore sur l'écran d'un poste de CAO. Ils assurent des manipulations complexes, des opérations de soudage, usinage, découpe, peinture et pulvérisation, etc.

I.8.4 Les robots dits "intelligents"

Equipés de capteurs (par exemple un système de vision artificielle ou de suivi de joint en soudage), ils peuvent analyser les modifications de leur environnement ou de leur trajectoire et réagir en conséquence. Ces machines appelées robots de "deuxième génération" commencent à être répandus dans l'industrie. La "troisième génération" disposant de capacités de raisonnement grâce à l'intelligence artificielle qui fait aujourd'hui l'objet de recherches approfondies.

I.9 Morphologie

La structure mécanique d'un robot manipulateur est composée de plusieurs corps connectés les uns aux autres par des liaisons appelées articulations ou joints, à un seul d.d.l de translation ou de rotation. Cette structure mécanique peut constituer une chaîne cinématique continue ouverte simple, une chaîne arborescente ou une chaîne complexe.



Chaîne continue ouverte

Chaîne Arborescente

Chaîne complexe Structures

Figure I.12 : La structure utilisée dans la conception des robots

I.10 Notions géométriques d'un manipulateur

I.10.1 Solides

Un solide S est dit indéformable si, pour toute paire de points de ce solide de coordonnées m et n , on a $\|m(t) - n(t)\| = \|m(0) - n(0)\| = \text{constante}$ au cours du temps.

I.10.2 Notion de degré de liberté (D.D.L)

Dans l'espace réel à trois dimensions, un solide indéformable libre possède trois possibilités de translation et trois possibilités de rotation. On dit alors que le solide a six degrés de liberté. Par conséquent, sa position, à un instant donné, peut être décrite par six paramètres indépendants : trois paramètres de rotation définissant l'orientation du solide par rapport à un trièdre fixe « R_0 » et trois paramètres décrivant les

coordonnées d'un point particulier du solide dans ce même trièdre. Ainsi, les possibilités de translation assurent le déplacement tandis que les possibilités de rotation assurent l'orientation du solide.

I.10.3 Liaison

Une liaison entre deux solides indéformables limite le D.D.L d'un solide par rapport à l'autre. On appelle D.D.L e la liaison le nombre de paramètres indépendants permettant de définir la localisation (position et orientation) d'un solide par rapport à l'autre dans tout déplacement.

On définit aussi :

- **Degrés de liberté d'une liaison** : C'est le nombre de déplacements élémentaires indépendants autorisés par cette liaison.
- **Classe d'une liaison** : C'est le nombre de déplacements élémentaires interdits. On notera que pour une liaison, la somme des degrés de liberté et de la classe de la liaison est égale à 6.

Exemples :

- Un cube sur un plan à trois D.D.L. : 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 1 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une porte par rapport au mur a 1 D.D.L.

I.10.4 Les articulations

Les articulations sont des dispositifs qui lient deux corps successifs ; cette disposition permet le mouvement entre ces corps, ce qui a comme conséquence l'obtention d'un mouvement relatif des segments voisins.

Si les segments peuvent avoir des formes variées, les articulations qui sont des liaisons bilatérales ont par contre des caractéristiques bien précises. On peut ainsi distinguer deux groupes d'articulations :

- **Les articulations simples** : Elles sont caractérisées par une mobilité unique : c'est-à-dire que la liaison entre deux segments adjacents permet un seul mouvement relatif. Il s'agit :
 - **articulation rotoïde** : c'est une articulation de type pivot, ayant comme principe la réduction du mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun, ce qui donne comme résultante un angle de rotation autour de cet axe.
 - **articulations prismatique** : c'est une articulation de type glissière, réduisant le mouvement entre corps à une translation le long d'un axe commun, ce qui signifie qu'il se produira un déplacement linéaire mesuré par une distance le long de cet axe.

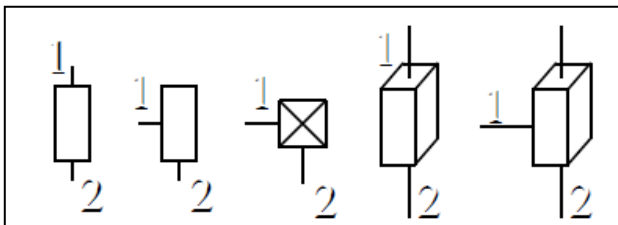


Figure I.16 : Articulations prismatiques

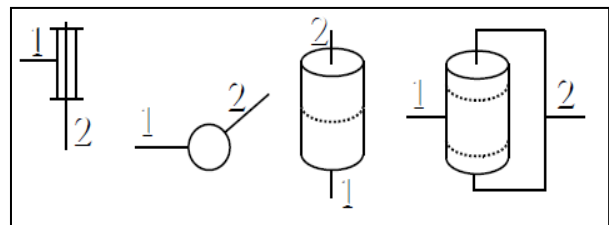


Figure I.17 : Articulations rotoïde

- **Les articulations complexes** : Elles autorisent plusieurs degrés de mobilité et sont en général constituées par des dispositifs composés eux-mêmes de plusieurs articulations simples. Cependant, en robotique, chaque articulation est généralement motorisée. De ce fait, les porteurs sont presque toujours composés exclusivement d'articulations simples.

I.11 Morphologie des porteurs

La structure d'un porteur est caractérisée par des corps rigides, les segments susceptibles de se mouvoir par rapport à une base et par des articulations limitant le mouvement relatif entre deux segments adjacents. On désigne fréquemment les bras manipulateurs en accolant les lettres R (pour rotoïdes) et P (pour prismatique) pour décrire la succession des liaisons. Les porteurs sont souvent classés, du point de vue de la structure, suivant le système de coordonnées dans lequel ils opèrent. On définit ainsi cinq types de manipulateur plus utilisés :

I.11.1 Manipulateur cartésien (ppp)

- ✓ 3 articulations prismatiques dont les axes sont typiquement mutuellement orthogonaux (PPP) ; 3 DDL
- ✓ La structure cartésienne offre une très bonne rigidité mécanique et une grande précision
- ✓ Cependant, la structure présente une faible dextérité car toutes les articulations sont prismatiques
- ✓ Utilisation typique : manutention et assemblage
- ✓ Actionneurs : généralement électriques, parfois pneumatiques

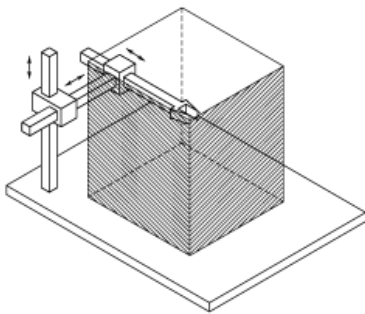


Figure I.18 : Volume de travail (parallélépipède rectangulaire)

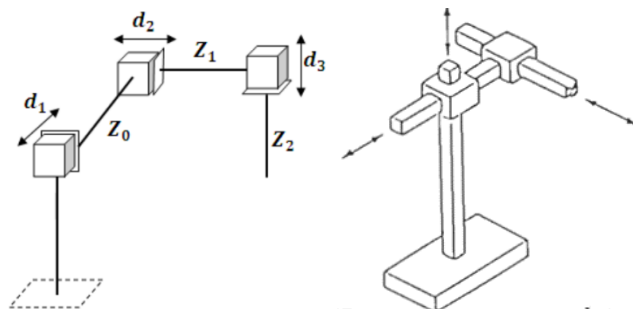


Figure I.19 : Configuration cartésienne (PPP)

I.11.2 Les robots cylindriques (RPP)

- ✓ La géométrie cylindrique diffère de la géométrie cartésienne en ce que la 1ère articulation prismatique est remplacée par une articulation rotoïde (RPP) ; 3 DDL
- ✓ La structure cylindrique offre une très bonne rigidité mécanique
- ✓ L'articulation prismatique horizontale permet à l'organe terminal d'accéder à des cavités horizontales
- ✓ Utilisation typique : transport d'objets, même de grande taille (dans un tel cas, des moteurs hydrauliques sont préférés aux moteurs électriques)

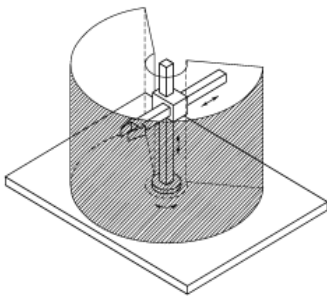


Figure I.13 : Volume de travail portion de (cylindre creux)

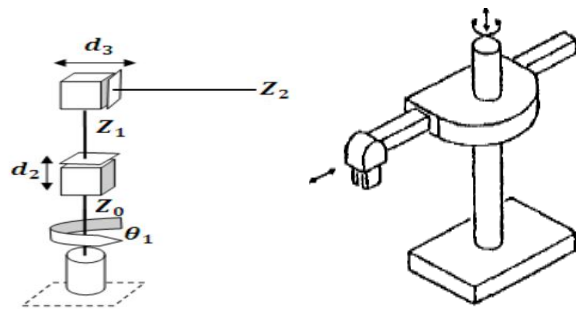


Figure I.14 : Configuration cylindriques (RPP)

I.11.3 Les robots sphériques (RRP)

- ✓ La géométrie sphérique diffère de la géométrie cylindrique en ce que la 2ème articulation prismatique est remplacée par une articulation rotoïde (RRP) ; 3 DDL

- ✓ La rigidité mécanique est inférieure à celle des deux manipulateurs précédents et la construction mécanique est plus complexe
- ✓ Le volume de travail peut comprendre la base de support du robot, ce qui permet la manipulation d'objets sur le plancher
- ✓ Utilisation typique : usinage

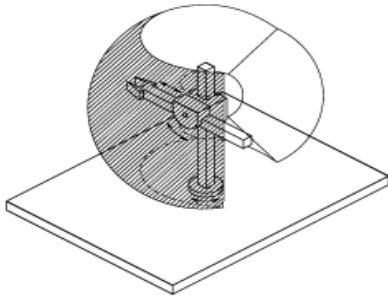


Figure I.15 : Volume de travail
(Portion de sphère creuse)

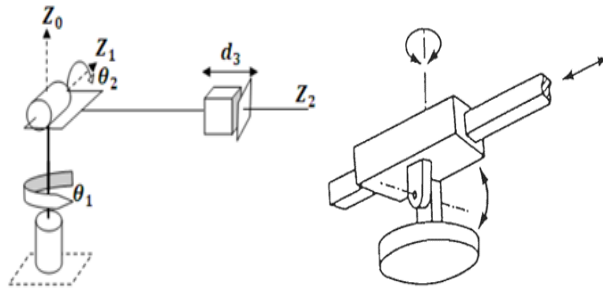


Figure I.16 : Configuration sphériques (RRP)

I.11.4 Manipulateur anthropomorphe

- ✓ 3 articulations rotoïdes (RRR) : l'axe de la 1ère articulation est orthogonale aux axes des deux autres qui sont parallèles ; 3 DDL
- ✓ En raison de sa ressemblance avec le bras humain, la 2ème articulation est appelée l'articulation de l'épaule et la 3ème, l'articulation du coude puisqu'elle relie le bras avec l'avant-bras
- ✓ Manipulateur le plus agile car tous les articulations sont rotoïdes
- ✓ Grand volume de travail par rapport à l'encombrement du robot
- ✓ Large gamme d'applications industrielles

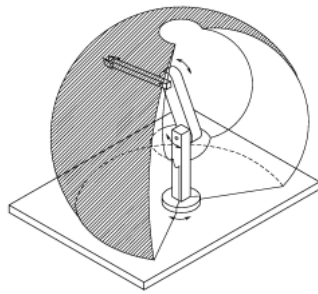


Figure I.17 : Volume de travail
(Portion de sphère)

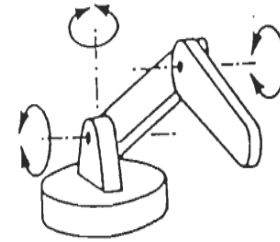
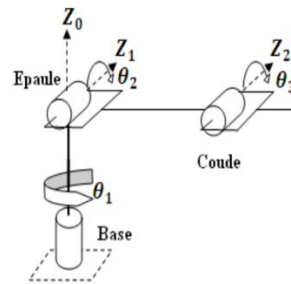


Figure I.18 : Configuration articulés(RRR)

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les concepts généraux utilisés en Robotique à savoir : l'historique de la robotique, les différentes définitions relatives au mot robot utilisées dans la littérature. Par la suite, nous avons décrit les différents types de robot où on a basé sur le robot rigide à travers la description de sa structure ainsi que leur composants, leur catégorie etc. Ensuite on a représenté le robot manipulateur dans son contexte d'une façon détaillé, ceci va nous aidez car notre travail concerne la commande on position de ce dernier.

Chapitre II

Modélisation géométrique

II.1 Introduction

Quel que soit l'objectif qu'on se fixe, concevoir, simuler ou commander un système mécanique, il est nécessaire, entre autres, de disposer les modèles appropriés au mécanisme. Ces modèles sont nécessaires à la commande du robot soit dans l'espace opérationnel dans lequel est définie la situation de l'organe terminal, soit dans l'espace articulaire dans lequel est définie la configuration du robot.

Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles, qui dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée : modèles géométriques, différentiels ou dynamiques. Le sujet de cette thèse porte sur la commande en position du manipulateur rigide. Donc une modélisation géométrique est nécessaire.

Dans la littérature scientifique, le modèle géométrique est souvent défini à l'aide d'une séquence de transformations homogènes partant de la base du robot jusqu'à l'effecteur final. Ces transformations homogènes sont déterminées à l'aide de matrices homogènes de rotation (\mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_z) et de translation (\mathbf{T}_x , \mathbf{T}_y , \mathbf{T}_z). Différentes méthodes sont développées pour définir, de manière générique, les modèles géométriques de robots sériels. Celle que nous suivrons est dite convention de Denavit Hartenberg (DH).

II.2 Rappels géométriques

II.2.1 Repère

Les repères sont utilisés pour représenter graphiquement des données. En mathématiques, un repère est une collection d'éléments de référence permettant de désigner de manière simple n'importe quel objet d'un ensemble donné, il est constitué un point de référence, en général noté 'O', qu'on appelle l'origine du repère, et de trois droites orientées passant par l'origine qui sont le plus souvent de directions orthogonales. Ainsi, en géométrie, un repère permet de définir les coordonnées de chaque point.

II.2.2 Transformations rigides

On appelle transformation rigide le résultat d'un mouvement rigide amenant un solide d'une situation initiale à une situation finale. Une transformation rigide est représentée par une application unique qui transforme les coordonnées des points du solide S de leur position initiale vers leur position finale.

A l'inverse, une application représentera une transformation rigide si elle conserve à la fois les distances et l'orientation.

II.2.3 Transformations homogènes

Dans le cas d'une transformation homogène, le type de représentation est matriciel. Le passage d'un repère initial R_i à un repère final R_f s'exprime par l'intermédiaire d'une matrice M ou T , appelée matrice de changement de repère, matrice de passage ou matrice de transformation homogène.

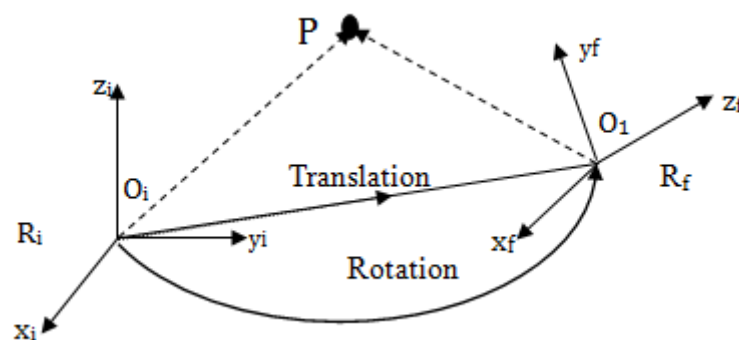


Figure II.1 : Passage d'un repère R_i à un repère R_f

En robotique, cette matrice de dimension (4×4) , notée iM_f s'exprime sous la forme suivante :

$${}^i T_f = {}^i M_f = ({}^i s_j \ {}^i n_j \ {}^i a_j \ {}^i p_j) = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i R_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ou :

${}^i s_j$, ${}^i n_j$ et ${}^i a_j$ sont les vecteurs unitaires, suivant les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i repère et ${}^i p_j$ est le vecteurs exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i et avec :

- ${}^i R_f$: matrice (3×3) des rotations donnant l'orientation notée ${}^i A_f$ (de R_f dans R_i)
- ${}^i P_f$: matrice (3×1) des translations donnant la position

$${}^i M_f = \begin{pmatrix} {}^i R_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i A_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} {}^i A_f & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A l'aide de la matrice ${}^i M_f$, il est possible d'exprimer les coordonnées d'un point quelconque p de l'espace dans le repère R_i à partir de ces coordonnées homogènes exprimées dans le repère R_f par la relation :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}_{R_i} = {}^i M_f \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_f} = \begin{pmatrix} {}^i R_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{R_f}$$

II.2.4 Matrice de transformation homogènes : cas de translation pure

Lorsque deux repères sont uniquement liés par une translation, il est possible de passer de l'un à l'autre en utilisant une matrice de transformation homogène de translation pure. Nous utiliserons les notations suivantes :

- $\text{Trans}(a, b, c)$ pour indiquer une translation (a selon l'axe x , b selon l'axe y et c selon l'axe z)
- $\text{Trans}(x, a)$ pour indiquer une translation a selon l'axe x
- $\text{Trans}(y, b)$ pour indiquer une translation b selon l'axe y
- $\text{Trans}(z, c)$ pour indiquer une translation c selon l'axe z

Considérons une translation T composée de :

- d'une translation a selon l'axe $x \rightarrow \text{Trans}(a, 0, 0) = \text{Trans}(x, a)$
- d'une translation b selon l'axe $y \rightarrow \text{Trans}(0, b, 0) = \text{Trans}(y, b)$
- d'une translation c selon l'axe $z \rightarrow \text{Trans}(0, 0, c) = \text{Trans}(z, c)$

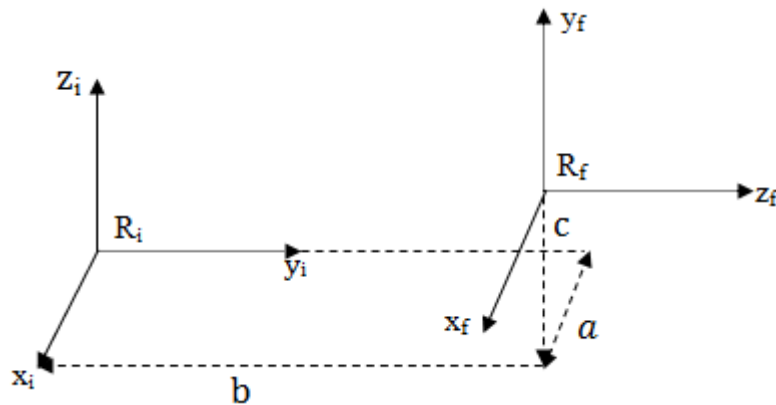


Figure II. 2 : Translation pure d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

Les matrices de translation sont liées par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \text{Trans}(a, b, c) &= \text{Trans}(a, 0, 0) \cdot \text{Trans}(0, b, 0) \cdot \text{Trans}(0, 0, c) \\ &= \text{Trans}(x, a) \cdot \text{Trans}(y, b) \cdot \text{Trans}(z, c) \end{aligned}$$

La matrice de transformation homogène de translation pure iM_f associée à cette translation s'exprime alors :

$${}^iM_f = \begin{pmatrix} I_3 & \begin{matrix} a \\ b \\ c \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_3 & \begin{matrix} a \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_3 & \begin{matrix} 0 \\ b \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_3 & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ c \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

II.2.5 Matrice de transformation homogène : cas de rotation pure

Lorsque deux repères sont uniquement liés par une rotation, il est possible de passer de l'un à l'autre en utilisant une matrice de transformation homogène de rotation pure. Nous utiliserons les notations suivantes :

- Rot (x, θ_x) pour indiquer une rotation (θ_x autour de l'axe x)
- Rot (y, θ_y) pour indiquer une rotation (θ_y autour de l'axe y)
- Rot (z, θ_z) pour indiquer une rotation (θ_z autour de l'axe z)

Dans la matrice de transformation homogène, la rotation est décrite par la matrice R. Lorsque la rotation est nulle autour des trois axes, R devient la matrice identité (c'est le cas pour les translations pures) :

$$R = I_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

➤ Une rotation θ_x autour de l'axe x est définie comme suit :

$$R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix}$$

Pour simplifier les écritures on pose :

$$\cos\theta_x = c\theta_x$$

$$\sin \theta_x = s\theta_x$$

On aura:

$$R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_x & -s\theta_x \\ 0 & s\theta_x & c\theta_x \end{pmatrix}; \quad {}^iM_f = R_{(\theta_x, x)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_x & -s\theta_x & 0 \\ 0 & s\theta_x & c\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

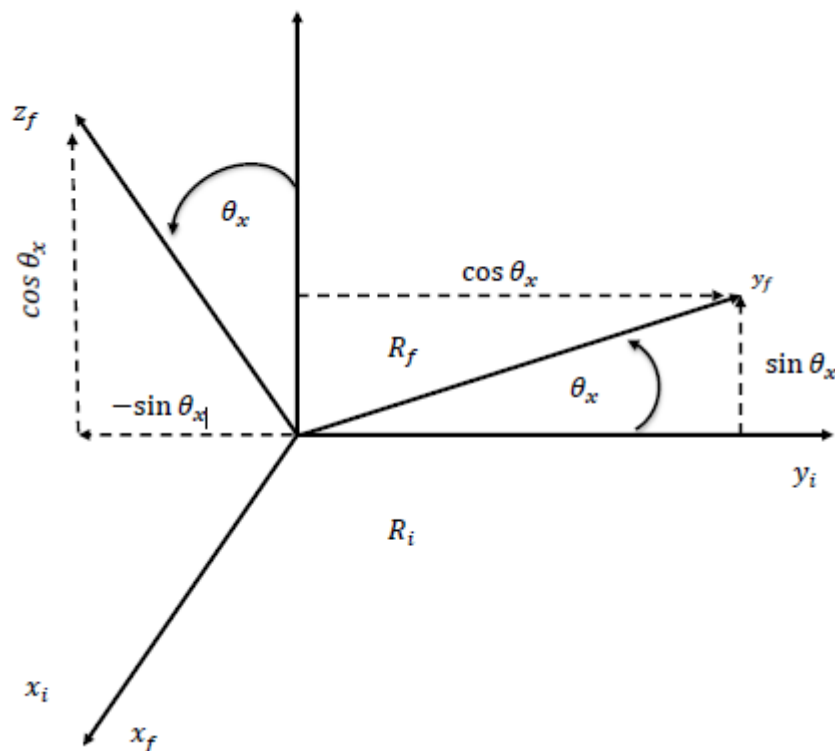


Figure II.3 : Rotation pure autour de l'axe x d'un repère Rf par rapport à un repère Ri

➤ Une Rotation θ_y autour de l'axe y est définie comme suit :

$$R_{(\theta_y, y)} = \begin{pmatrix} c\theta_y & 0 & s\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_y & 0 & c\theta_y \end{pmatrix}, \quad {}^iM_f = R_{(\theta_y, y)} = \begin{pmatrix} c\theta_y & 0 & s\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta_y & 0 & c\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

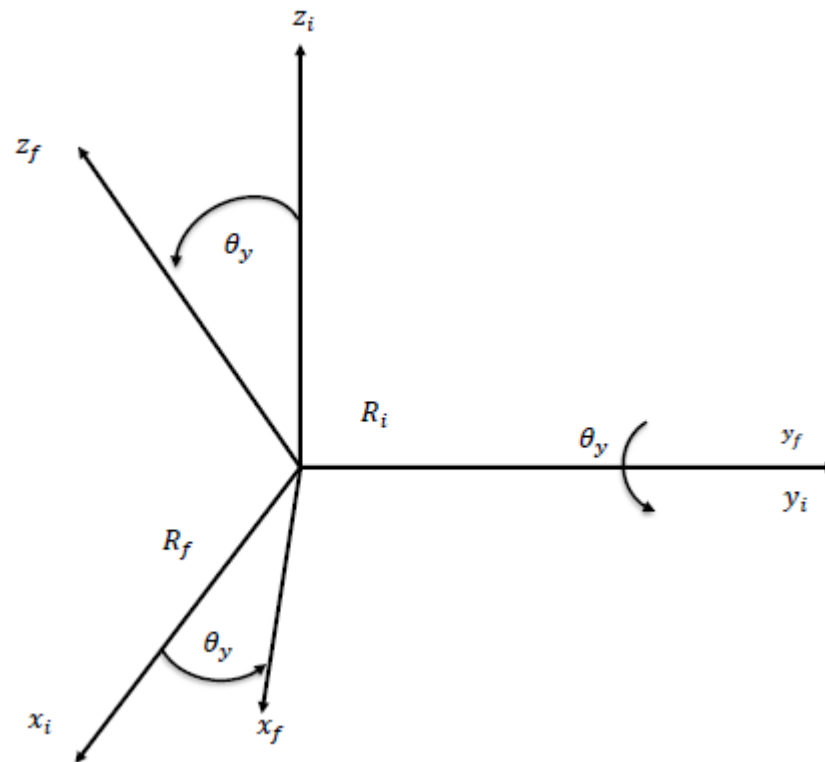


Figure II.4 : Rotation pure autour de l'axe y d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

➤ Une Rotation θ_z autour de l'axe z est définie comme suit :

$$R_{(\theta_z, z)} = \begin{pmatrix} c\theta_z & -s\theta_z & 0 \\ s\theta_z & c\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad {}^iM_f = R_{(\theta_z, z)} = \begin{pmatrix} c\theta_z & -s\theta_z & 0 & 0 \\ s\theta_z & c\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

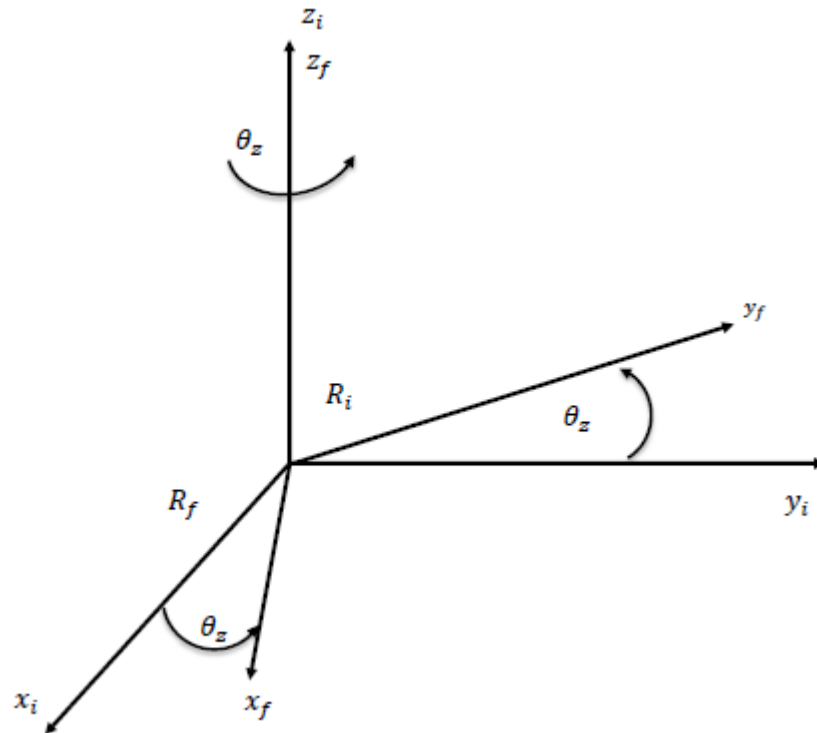


Figure II.5 : Rotation pure autour de l'axe z d'un repère R_f par rapport à un repère R_i

II.2.6 Situation d'un solide dans l'espace

La situation d'un solide dans l'espace est exprimée par une matrice de transformation homogène de la forme :

$${}^i T_f = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i R_f & {}^i P_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec :

- A matrice (3×3) des rotations donnant l'orientation du solide dans un repère fixe R_0

- P matrices (3×1) des translations donnant la position du solide dans un repère fixe R_0

II.2.7 Propriétés des matrices de transformation homogène

- **Propriété 1 :** La matrice de rotation A est orthogonale : $A^{-1} = A^T$.
- **Propriété 2 :** Soit la matrice ${}^i T_j$ de transformation homogène prenant le repère R_i pour l'amener sur le repère R_j . Si ${}^j T_i$ est la matrice de transformation homogène prenant le repère R_j pour l'amener sur le repère R_i , alors ${}^i T_j$ et ${}^j T_i$ sont liés par la relation :

$$({}^i T_j)^{-1} = {}^j T_i$$

- **Propriété 3 :** Soit la matrice T de transformation homogène effectuant une rotation d'angle θ_u autour de l'axe u (indifféremment x, y ou z). La matrice inverse T^{-1} est également une matrice de transformation homogène effectuant une rotation autour de l'axe u, mais d'angle $-\theta_u$:

$$(T)^{-1} = (\text{Rot}(u, \theta_u))^{-1} = \text{Rot}(u, -\theta_u) = \text{Rot}(-u, \theta_u)$$

En utilisant cette propriété, on en déduit :

$$\text{Rot}(x, -\theta_x) = (\text{Rot}(x, \theta_x))^T = (\text{Rot}(x, \theta_x))^{-1}$$

$$\text{Rot}(y, -\theta_y) = (\text{Rot}(y, \theta_y))^T = (\text{Rot}(y, \theta_y))^{-1}$$

$$\text{Rot}(z, -\theta_z) = (\text{Rot}(z, \theta_z))^T = (\text{Rot}(z, \theta_z))^{-1}$$

Cette propriété est également vraie pour les matrices de transformation homogène de translation pure :

$$\text{Trans}(x, a) = \text{Trans}(-x, a) = \text{Trans}(x, -a)$$

$$\text{Trans}(y, b) = \text{Trans}(-y, b) = \text{Trans}(y, -b)$$

$$\text{Trans}(z, c) = \text{Trans}(-z, c) = \text{Trans}(z, -c)$$

- **Propriété 4 :** Si un repère R_0 à subir K transformations consécutives, et si la $i^{\text{ème}}$ ($i = 1, 2, \dots, k$) est définie par rapport au repère R_{i-1} , alors :

$${}^0T_k = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \dots {}^{k-1}T_k$$

- **Propriété 5 :** Dans le cas de transformations consécutives autour du même axe u , ce dernier reste inchangé par la transformation :

$$\text{Rot}(u; \theta_1) + \text{Rot}(u; \theta_2) = \text{Rot}(u; \theta_1 + \theta_2)$$

II.2.8 Description de la position d'un solide

La position de l'origine d'un repère lié à un solide R_n , par rapport à un repère de référence R_0 , peut être définie par différents types de coordonnées :

Cartésiennes : C'est la méthode la plus générale. Elle donne directement les composantes du vecteur de position $P(x,y,z)$. Les coordonnées x, y, z sont des nombre réels. Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est cartésienne. La matrice de position est la suivante :

$$P_{car} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Avec:

p_x : correspond a l'abscisse du point P .

p_y : correspond a l'ordonnée du point P .

p_z : correspond a la cote ou hauteur du point P .

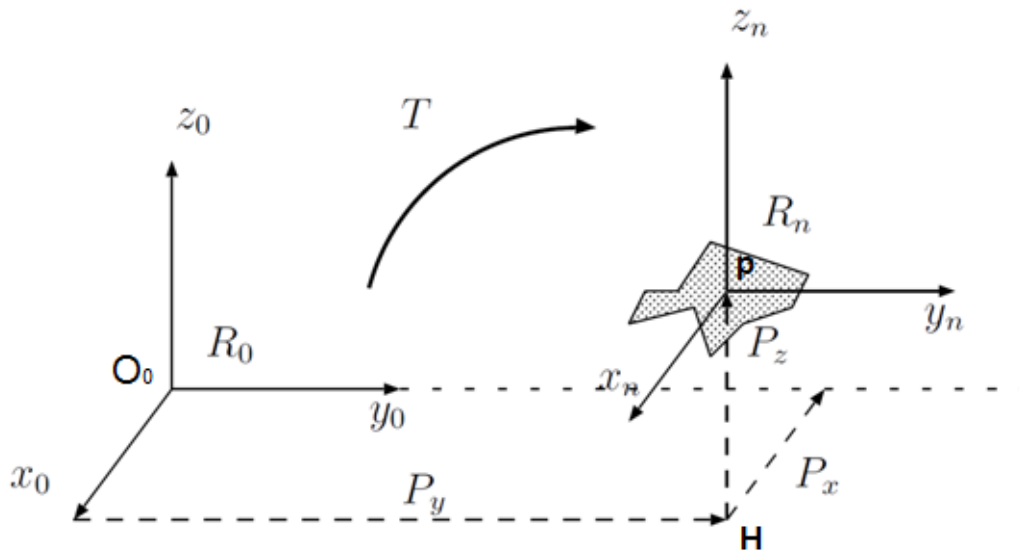


Figure II.6 : Coordonnées cartésiennes

- **Cylindriques** : Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est cylindrique.

La matrice de position est la suivante :

$$P_{cyl} = \begin{pmatrix} r \cdot c\alpha \\ r \cdot s\alpha \\ z \end{pmatrix}$$

Avec:

r : la distance entre le point H et le centre du repère de référence R_0 .

α : correspond a l'angle que fait l'axe $O_0 x_0$ et OH avec l'axe $O_0 x_0$

Où H est le projeté orthogonal de P .

z : correspond a la cote ou hauteur du point P.

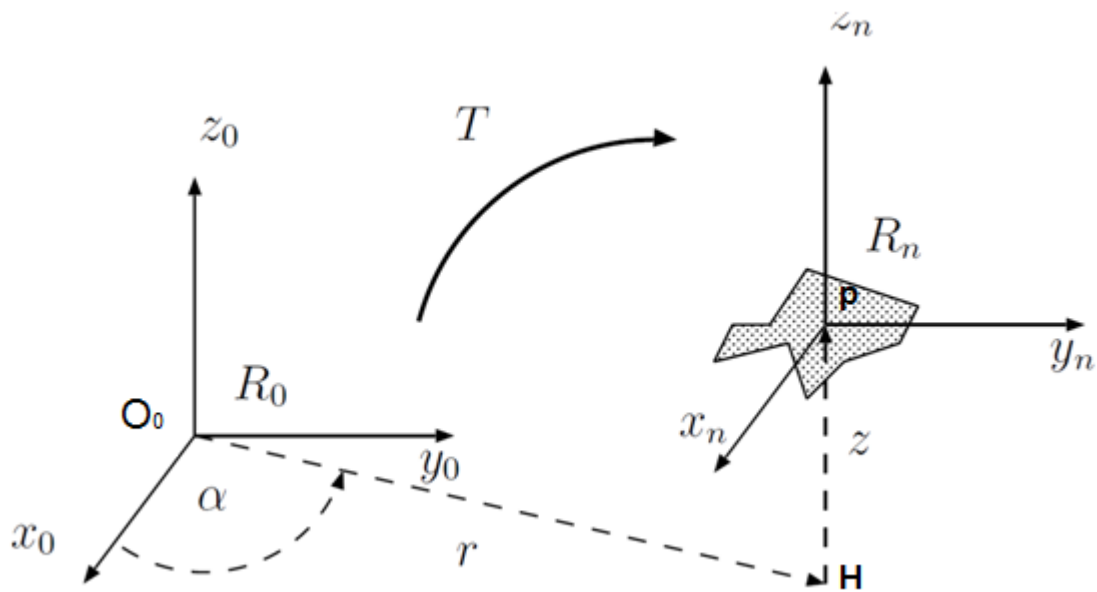


Figure II.7 : Coordonnées cylindriques

- **sphériques** : Cette représentation est utilisée lorsque la structure du robot est sphérique. La matrice de position est la suivante :

$$P_{sph} = \begin{pmatrix} r \cdot c\alpha \cdot s\beta \\ r \cdot s\alpha \cdot s\beta \\ r \cdot c\beta \end{pmatrix}$$

Avec:

r : la distance entre le point P et le centre du repère référence R_0 .

α : correspond à l'angle que fait l'axe $O_0 z_0$ et OH avec l'axe $O_0 x_0$, où H est le projeté orthogonal de P.

β : correspond à l'angle que fait l'axe $O_0 P$ avec l'axe $O_0 z_0$.

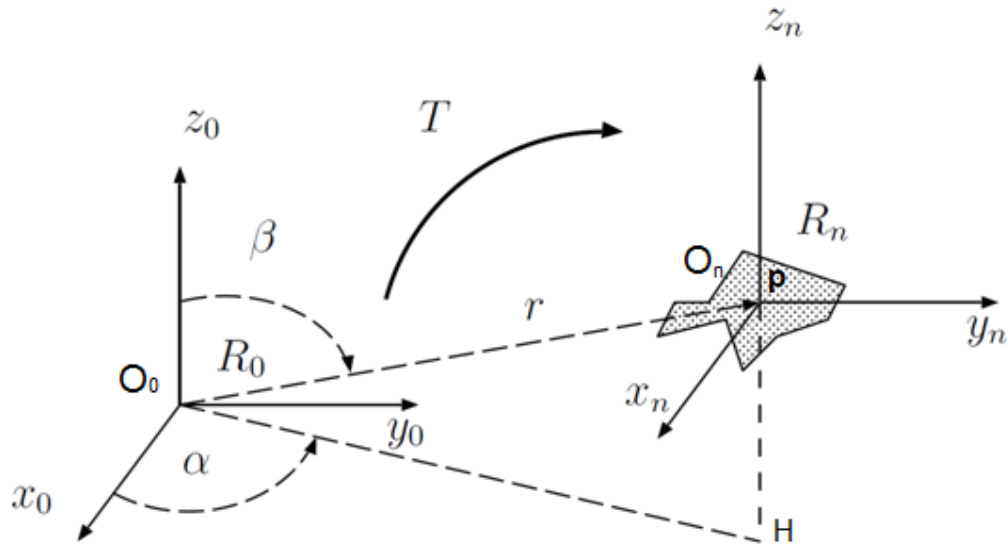


Figure II.8 : Coordonnées sphériques

II.2.9 Description de l'orientation d'un solide

Pour décrire l'orientation d'un solide différentes représentations peuvent être utilisées (la méthode analytique, les cosinus directeurs, les angles d'Euler, les angles de Bryant..etc).

Celle qu'on a choisie pour déterminer l'orientation de notre organe terminal est la méthode analytique qui sera expliqué dans le quatrième chapitre c'est-à-dire après le calcul du modèle géométrique directe et inverse de manipulateur ainsi que la description de la structure mécanique de ce dernier et ses actionneurs.

II.3 Modèle de Denavit Hartenberg (structure ouverte simple)

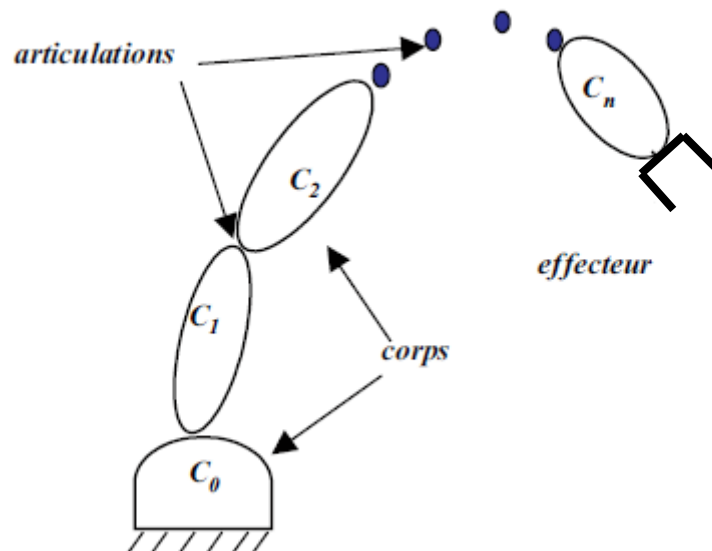


Figure II.9 : Robot à structure ouverte simple

Soit un système mécanique constitué par des corps rigides assemblés entre eux par des liaisons mécaniques simples, appelées articulations, avec un seul degré de liberté par articulation. Elles peuvent être de deux types : rotoïde (pivot) ou prismatique. Afin d'obtenir le modèle géométrique du système, il faut définir les repères attachés à chaque corps. Le système (voir Figure II.9) est composé de $n+1$ corps C_0 à C_n et de n articulations. Le corps C_0 désigne la base du robot. Le corps C_n est celui qui porte l'organe terminal. L'articulation j connecte le corps C_j au corps C_{j-1} .

Denavit et Hartenberg ont proposés une méthode pour décrire la transformation homogène entre deux solides adjacents avec une position et orientation particulière des repères.

Soit le repère R_j associé au corps C_j . Il est défini par son origine O_0 et par une base orthonormée dont les axes notés $(x_j; y_j; z_j)$ sont définis de la manière suivante :

- z_j est porté par l'axe articulaire j

- x_j est porté par la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j+1} . Si z_j et z_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, le choix de x_j n'est pas unique. Dans ce cas, des considérations de symétrie ou simplicité permettent alors un choix rationnel.
- y_j est l'axe qui forme un trièdre direct : $y_j = z_j \wedge x_j$

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j , s'exprime en fonction de 4 paramètres suivants :

- α_j est l'angle entre z_{j-1} et z_j autour de x_j
- d_j est la distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_{j-1}
- θ_j est l'angle entre x_{j-1} et x_j autour de z_{j-1}
- r_j est la distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_j

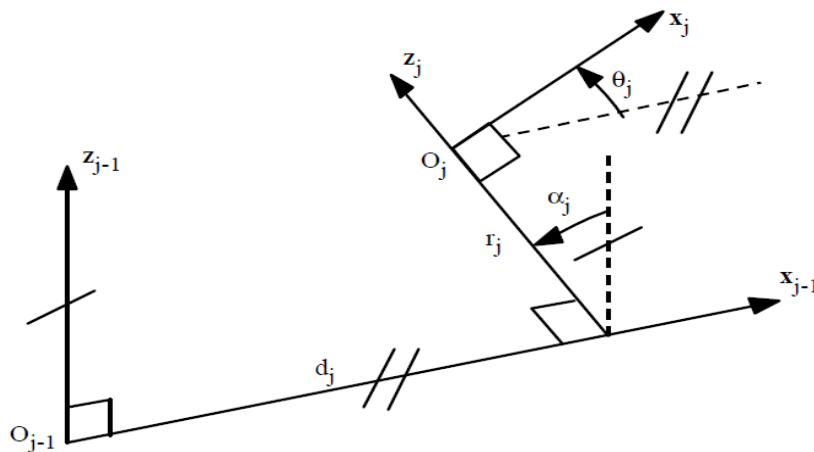


Figure II.10 : Paramètres de Denavit-Hartenberg

Ces quatre paramètres r_j , d_j , α_j et θ_j sont appelés les paramètres de Denavit et Hartenberg.

La configuration de Denavit et Hartenberg est constitué de quatre transformations élémentaires pour une transformation de R_{j-1} à R_j :

- 1- Rotation autour de z d'un angle θ_j
- 2- Translation le long de z d'une distance d_j

3- Translation le long de x d'une distance r_j

4-Rotation autour de x d'un angle α_j

La matrice de transformation homogène définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est défini comme suite :

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

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j & 0 & 0 \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j & 0 \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation homogène s'écrit donc :

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \cos \alpha_j & \sin \theta_j \sin \alpha_j & r_j \cos \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\cos \theta_j \sin \alpha_j & r_j \sin \theta_j \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

II.4 Modèle de Denavit Hartenberg (DH) du manipulateur à commandé

Dans notre cas la structure du manipulateur à modélisé est une chaine ouverte simple. Pour déterminer les matrices de transformation homogène du robot, on suit les étapes de la méthode de Denavit et Hartenberg vue précédemment. Le schéma de la représentation géométrique et le placement des repères est illustré par la figure ci-dessous.

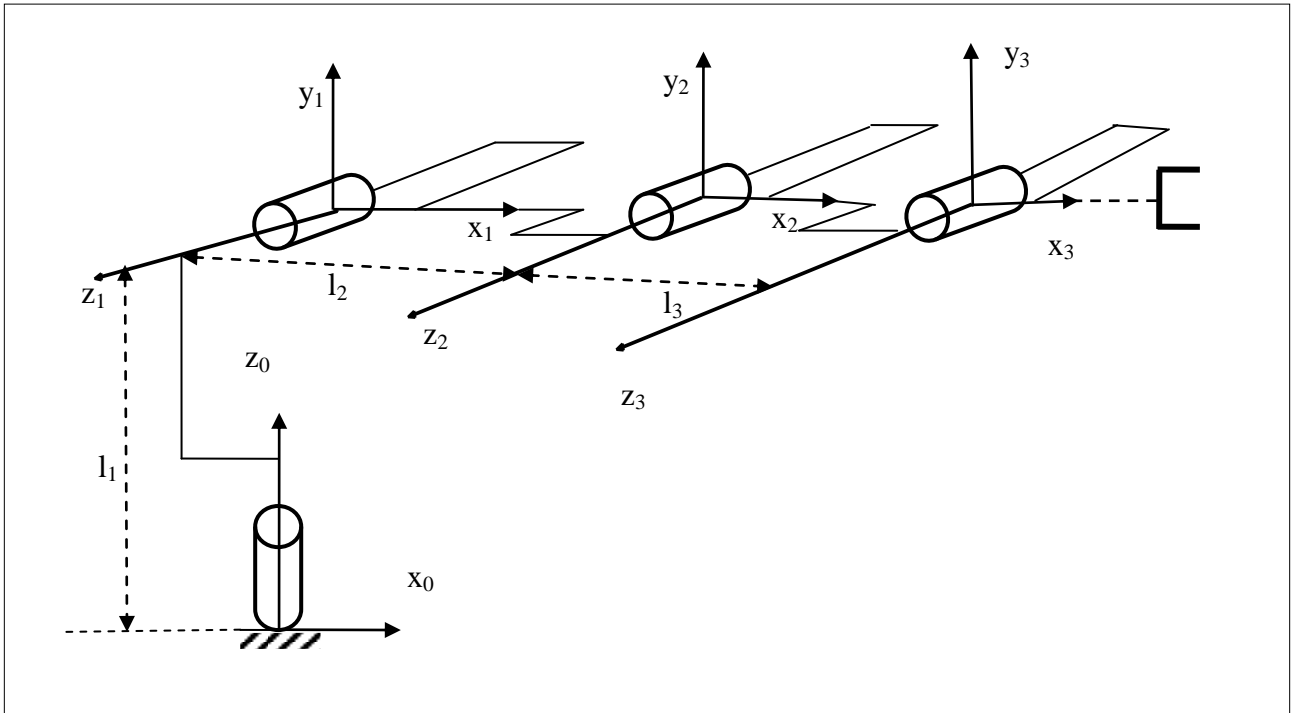


Figure II.11 : Schéma de la représentation géométrique et placement des repères du manipulateur

Le tableau des paramètres de Denavit-Hartenberg relatif au manipulateur est le suivant :

Segment	θ_j	r_j	d_j	α_j
1	θ_1	0	l_1	$\frac{\pi}{2}$
2	θ_2	l_2	0	0
3	θ_3	l_3	0	0

Tableau II.1: tableau des paramètres de Denavit-Hartenberg relatif au manipulateur

II.5 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) permet de déterminer la position et l'orientation de l'organe terminal du manipulateur par rapport à un repère de référence en fonction des variables articulaires, le modèle s'écrit :

$$\mathbf{X} = f(\boldsymbol{\theta})$$

Telle que, \mathbf{X} est le vecteur des coordonnées choisies pour représenter la position de l'organe terminal et $\boldsymbol{\theta}$ est le vecteur des coordonnées articulaires.

Le calcul du MGD reviendrait simplement à définir les composantes de la matrice de transformation homogène 0T_n , qui exprime le repère de l'organe terminal du bras manipulateur dans le repère de la base telle que :

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dans notre configuration on a :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3$$

Pour le premier corps on obtient : ${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Pour le deuxième corps on obtient : ${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Pour le troisième corps on obtient : ${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Et on aura :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par identification on obtient :

$$s_x = \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_x = -\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_2 = -\cos \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_x = \sin \theta_1$$

$$s_y = \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_1 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_y = -\cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_3 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = -\sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_y = -\cos \theta_1$$

$$s_z = \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_3 \sin \theta_2 = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$n_z = \cos \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_3 = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$a_z = 0$$

Équation de position :

$$\begin{cases} p_x = \cos \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ p_y = \sin \theta_1 (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \\ p_z = l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{cases}$$

Pour étudier l'orientation du coude par rapport au repère de base, on utilise la méthode qui sera détaillée en quatrième chapitre.

II.6 Modèle géométrique inverse

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

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n$$

On note :

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Cette matrice U_0 est la donnée du problème. Elle représente la situation de l'organe terminal dans le repère de base du robot R_0 .

Trouver les variables articulaires à partir de l'équation :

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n$$

En fonction des éléments articulaires s , n , a et P est très difficile. Paul a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les 2 membres de l'équation par les matrices de transformation homogène inverse ${}^jT_{j-1}$ pour j variant de 1 à $n - 1$. Cette méthode qui traite séparément chaque cas particulier et convient pour la plupart des robots industriels. Elle permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche.

Pour notre robot à trois degrés de liberté, on procède comme suit :

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (1)$$

– multiplication à gauche de l'expression [1] par 1T_0

$${}^1T_0 U_0 = {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (2)$$

Le terme de droite est fonction des variables θ_1 et θ_2 . Le terme de gauche n'est fonction que des éléments de U_0 et de la variable θ_1 ;

– identification terme à terme des deux membres de l'équation [2]. On se ramène à un système d'une équation fonction de θ_1 uniquement comme suit :

$$p_x \sin \theta_1 - p_y \cos \theta_1 = 0 \quad (a)$$

De l'équation (a) on tire

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_1 = \text{arctan2}(p_y, p_x) \\ \text{ou} \\ \theta_1' = \theta_1 + \pi \end{array} \right.$$

où **atan2** est une fonction qui calcule l'arc tangente à partir de la donnée de deux arguments. Les avantages de cette fonction est qu'elle renvoie l'angle entre $-\pi$ et π , et détermine son quadrant à partir de l'examen des signes des arguments passés en paramètres.

– multiplication à gauche de l'expression [2] par 2T_1 et calcul de θ_2 et θ_3 .

$${}^2T_1 \cdot {}^1T_0 \cdot U_0 = {}^2T_3 \quad (3)$$

– identification terme à terme des deux membres de l'équation [3]. On se ramène à un système de deux équations fonction de θ_2 et θ_3 uniquement comme suit :

$$X \sin \theta_2 + Y \cos \theta_2 - L = \cos \theta_3 \quad (b)$$

$$X \cos \theta_2 - Y \sin \theta_2 = \sin \theta_3 \quad (c)$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \frac{p_z - l_1}{l_3} \\ Y = \frac{p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1}{l_3} \\ L = l_2/l_3 \end{array} \right.$$

a partir de (b) et (c) on obtient :

$$X \sin \theta_2 + Y \cos \theta_2 = Z \quad (d)$$

Avec :

$$\left\{ Z = \frac{X^2 + Y^2 + L^2 - 1}{2L} \right.$$

De (d) on aura :

- Si $Z = 0$, deux solutions sont possibles :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_2 = \arctan2(-Y, X) \\ \text{ou} \\ \theta'_2 = \theta_2 + \pi \end{array} \right.$$

- Si $Z \neq 0$, On résout le système en sinus et en cosinus, puis on prend l'arc tangente : On peut réécrire l'équation (d) de deux manières différentes.

$$(A) \quad \left\{ \begin{array}{l} YC\theta_2 = Z - XS\theta_2 \\ XS\theta_2 = Z - YC\theta_2 \end{array} \right.$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} C\theta_2 = \cos\theta_2 \\ S\theta_2 = \sin\theta_2 \end{array} \right.$$

la résolution de (A) nous donne :

$$\left(\begin{array}{l} S\theta_{2i} = \frac{ZX + \varepsilon \cdot Y\sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \\ \\ C\theta_{2i} = \frac{ZY - \varepsilon \cdot X\sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \begin{array}{l} , \text{ avec } \varepsilon = \pm 1 \\ \\ , i = 1, 2 \end{array}$$

Le signe – devant ε vient du fait que nous devons vérifier à chaque instant que :

$$S^2 \theta_{2i} + C^2 \theta_{2i} = 1 .$$

Si $X^2 + Y^2 - Z^2 \geq 0$ alors :

$$\left[\theta_{2i} = \text{atan2}(S\theta_{2i}, C\theta_{2i}) \quad , i = 1, 2 \quad \text{Deux solution } \varepsilon = \pm 1 \right.$$

À partir de (b) et (c) on tire :

$$\left[\theta_{3i} = \text{atan2}((X C \theta_{2i} - Y S \theta_{2i}), (X S \theta_{2i} + Y C \theta_{2i} - L)) \right.$$

$$i = 1, 2 \quad \text{Deux solution } \varepsilon = \pm 1$$

II.7 Conclusion

On a exposé dans ce chapitre la procédure de calcul du modèle géométrique direct et inverse des robots à structure ouverte simple. Cette procédure repose sur l'utilisation des matrices de transformation homogène et la méthode de Denavit et Hartenberg.

Par ailleurs le modèle géométrique direct (MGD) du notre manipulateur a été établi, ce qui a permis de trouver le modèle géométrique inverse (MGI), en utilisant la méthode de Paul.

Chapitre III

Description de la carte

Arduino

III.1 Introduction

Tout système automatisé est composé d'une installation (machine) et d'une partie commande constituée par l'appareillage d'automatisme. Cette dernière partie synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs à partir des ordres de l'utilisateur. Le domaine de la commande des robots est très vaste, il est encore en pleine évolution, différentes techniques ont proposé pour la commande des robots. Celle qu'on a choisie pour notre manipulateur est la commande par la carte Arduino comme elle est indiqué dans le titre de ce projet.

III.2 Présentation d'Arduino

III.2.1 Qu'est-ce qu'Arduino

Arduino est un projet créé par des passionnés en Italie (2005) pour des étudiants. C'est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif, constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation. Sans tout connaître ni tout comprendre de l'électronique, cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne.

Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, Arduino permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine.

III.2.2 Applications

Le système Arduino nous permet de réaliser un grand nombre de choses, qui ont une application dans tous les domaines, nous pouvons donner quelques exemples :

- Contrôler les appareils domestiques
- Faire un jeu de lumières
- Communiquer avec l'ordinateur
- Télécommander un appareil mobile (modélisme) etc.
- Fabriquer votre propre robot.

Avec Arduino, nous allons faire des systèmes électroniques tels qu'une bougie électronique, une calculatrice simplifiée, un synthétiseur, etc. Tous ces systèmes seront conçus avec pour base une carte Arduino et un panel assez large de composants électroniques.

III.2.3 Bonnes raisons de choisir Arduino

Il existe pourtant dans le commerce, une multitude de plateformes qui permettent de faire la même chose. Notamment les microcontrôleurs « PIC » du fabricant Micro chip. Nous allons voir pourquoi choisir l'Arduino.

- ✓ **Le prix:** En vue des performances qu'elles offrent, les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses, ce qui est un critère majeur pour le débutant.

- ✓ **La compatibilité :** Le logiciel, tout comme la carte, est compatible sous les plateformes les plus courantes (Windows, Linux et Mac), contrairement aux autres outils de programmation du commerce qui ne sont, en général, compatibles qu'avec Windows.

- ✓ **La communauté :** La communauté Arduino est impressionnante et le nombre de ressources à son sujet est en constante évolution sur internet. De plus, on trouve les références du langage Arduino ainsi qu'une page complète de tutoriels sur le site arduino.cc (en anglais) et arduino.cc (en français).

- ✓ **Un environnement de programmation clair et simple :** l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.

III.2.4 Le principe de fonctionnement d'Arduino

Les différentes versions des Arduino fonctionnent sous le même principe général:

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution de programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (pile 9 volts par exemple).
8. On vérifie que notre montage fonctionne.

III.2.5 Les différentes cartes Arduino

Des cartes Arduino il en existe beaucoup ! Peut-être une centaine toutes différentes les une au autres parmit elles et les plus utiliser Les cartes Mega ,Uno , Duemilanove,Leonardo, NANO et la carte Mega Adk Pour notre projet nous avons choisis d'utiliser la carte portant le nom de « Mega » en raison que la carte Méga offre toutes les fonctionnalités des précédentes, mais avec des options en plus. On retrouve notamment un nombre d'entrées et de sorties plus importantes ainsi que plusieurs liaisons séries. Dans ce qui suit nous allons présenter ses caractéristiques ainsi que son fonctionnement.

III.2.6 La carte d'Arduino Méga 2560

A présent, rapprochons-nous de « l'utilisation » du système Arduino et voyons comment il se présente. Il est composé de deux choses principales, qui sont : le matériel et le logiciel.

III.2.6.1 Présentation du matériel

Il s'agit d'une carte électronique sous forme d'un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d'époxy ou de fibre de verre. Elle possède des pistes électriques disposées sur une, deux ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées. Cette carte est basée autour d'un microcontrôleur Atmega du fabricant Atmel de référence ATmega2560. L'ATmega2560 est un microcontrôleur 8 bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. La figure ci dessous nous montre ces différents composants.

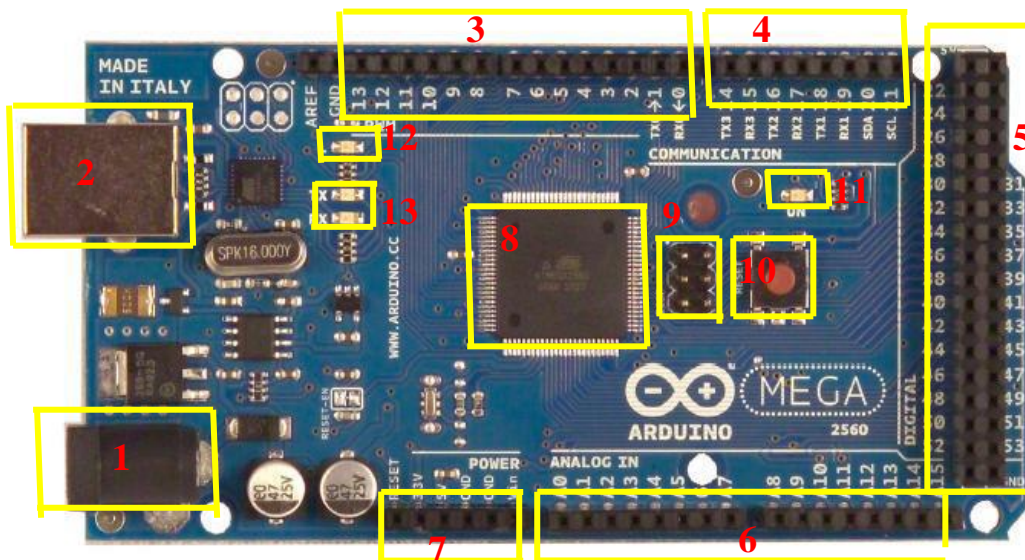


Figure III.1 : Boitier de l'Arduino mega2560

1. Prise d'alimentation(connecteur jack). Sert à alimenter la carte.
2. Port série. Sert à l'alimentation et au transfert de données par USB.
3. Les ports PWM (largeur d'impulsion modulée) broches 0 à 13. Ils servent d'entrée ou de sortie analogique ou digitale. Ils servent aussi à créer des fréquences.

4. Les ports de communication. Des ports séries.
5. 31 Pins digital d'entrée ou de sortie. Elles ont deux états: LOW et HIGH (0v et 5v).

6. 16 Pins d'entrée analogiques permettent de convertir une tension analogique V_e de 0 à 5 V en une valeur numérique N (en décimale) d'une résolution de 10 bits (1024 niveaux).

- Si $V_e = 0V$ on lit $N = 0$
- Si $V_e = 5 V$ on lit $N = 1023$

7. Broches d'alimentation. elles contiennent :

- 5V : tension régulée par la carte
- 3,3V : tension régulée par la carte
- V_{in} : tension issue de l'alimentation externe de 7/12V
- GND : la masse
- Entrée reset. Connectez-la au ground pour reset la carte.(comme le bouton reset)

8. Le microcontrôleur Atmega2560

9. Une prise ICSP. Elle sert à télécharger le bootloader dans le microcontrôleur.

Pour info ; le boot loader est un programme préprogrammé une fois pour toute dans l'ATMéga et qui permet la communication entre l'ATMéga et le logiciel Arduino via le port USB, notamment lors de chaque programmation de la carte.

10. Bouton reset (remise a zéro). Sert à redémarrer la carte pour relancer le programme.

11. LED verte qui montre que la carte est allumée.

12. LED jaune qui indique l'activité du processeur. Peut être commandée

par le pin PWM 13.

13. LEDs jaunes qui indiquent l'utilisation du port série

Elle contient tout ce qui est nécessaire pour le fonctionnement du microcontrôleur; pour pouvoir l'utiliser et se lancer, il suffit simplement de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB (ou de l'alimenter avec un adaptateur secteur ou une pile, mais ceci n'est pas indispensable, l'alimentation étant fournie par le port USB).

III.2.6.2 Synthèse des caractéristiques

Microcontrôleur	AT Méga2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	54 (dont 14 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	16 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA (ATTENTION : 200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 Ma
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max si port USB utilisé seul
Mémoire Programme Flash	256 KB dont 8 KB sont utilisés par le boot loader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	4 KB
Vitesse d'horloge	16 MHz

Tableau III.1 : Synthèse des caractéristiques

III.2.6.3 Présentation du logiciel

Le logiciel open source (Windows, Linux ou Mac) fournit avec l'Arduino est un éditeur de texte qui permet :

- de programmer la carte en utilisant un langage simple proche du C
- de communiquer avec la carte grâce au "terminal série" (faire apparaître des informations de la carte sur l'écran de l'ordinateur)

La fenêtre de l'application Arduino comporte les éléments suivants:

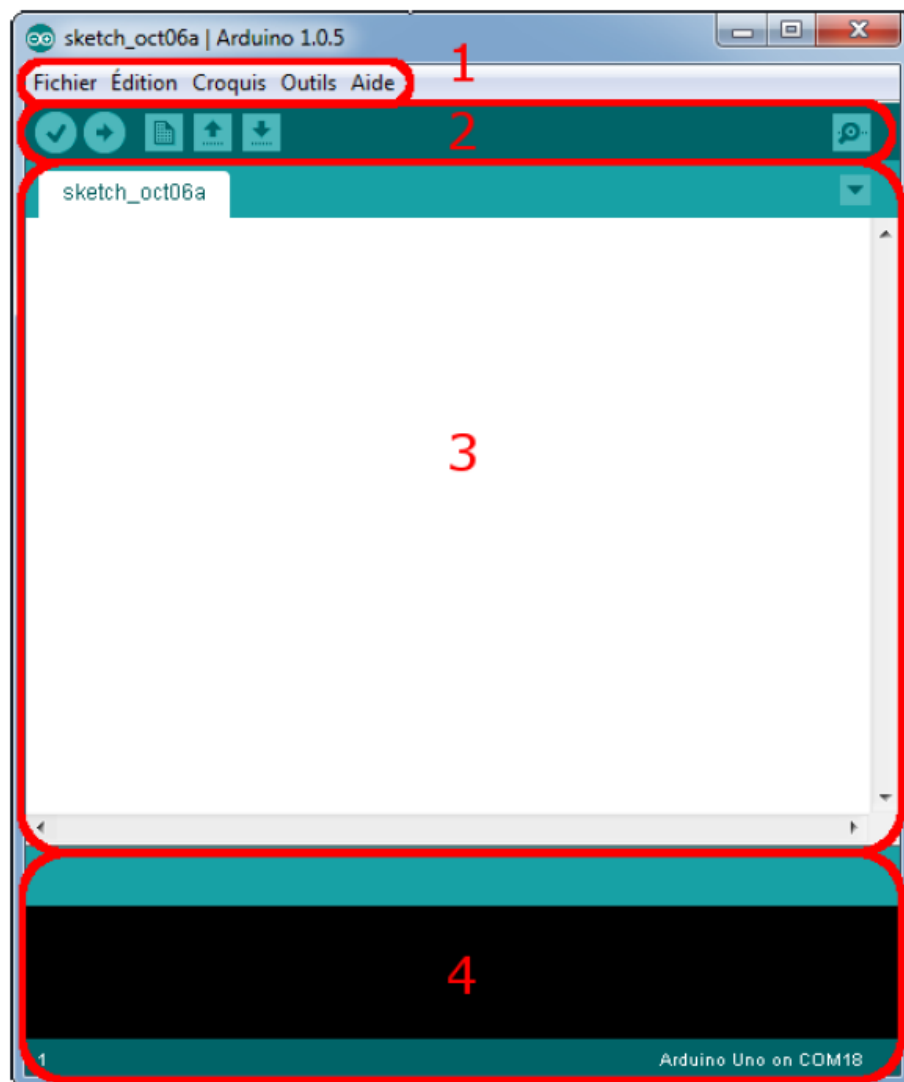


Figure III.2 : Logiciel Arduino

1. Barre de Menu: elle contient les options de configuration du logiciel
2. Barre des boutons: elle contient les boutons qui serviront lors de la programmation des cartes.
3. Fenêtre de programmation: ce bloc contient le programme créé
4. Block d'affichage des messages de compilation: une console qui affiche les informations et erreurs de compilation et de téléversement du programme, celui ci est

important, car il aide à corriger les fautes présentent dans le programme. C'est le débogueur.

La figure ci-dessous nous montre les différents boutons du logiciel.

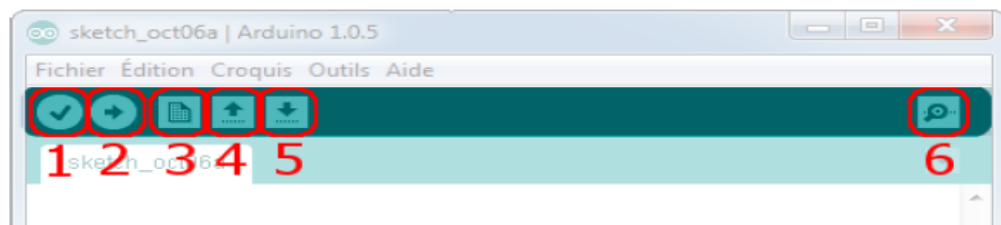


Figure III.3 : Barre des boutons du logiciel Arduino

1. Bouton « Verify » (Vérifier) ; il permet de compiler votre programme et de vérifier si des erreurs s'y trouvent.
2. Charge (télé verse) le programme dans la carte Arduino.
3. Crée un nouveau fichier (sketch)
4. Ouvre un fichier
5. Il permet de sauvegarder votre sketch
6. Ouvre le moniteur série

III.2.7 Programmation sur Arduino

Le langage Arduino est très proche du C et du C++. Le contenu du programme, donc le programme en lui même est ce qui va définir chaque action que va exécuter la carte Arduino. Mais ce n'est pas tout ! Dans le programme il y a plusieurs zones, qui ont chacune un rôle particulier.

- La première zone sert principalement à la déclaration d'informations propre au programme et les garder en mémoire, comme par exemple la déclaration des variables et des constantes.

- La zone secondaire sert à l'initialiser de certains paramètres du programme.
- La dernière zone est la zone principale où se déroule le programme. Tout ce qui va être écrit dans cette zone sera exécuté par la carte, se sont les actions que la carte fera.

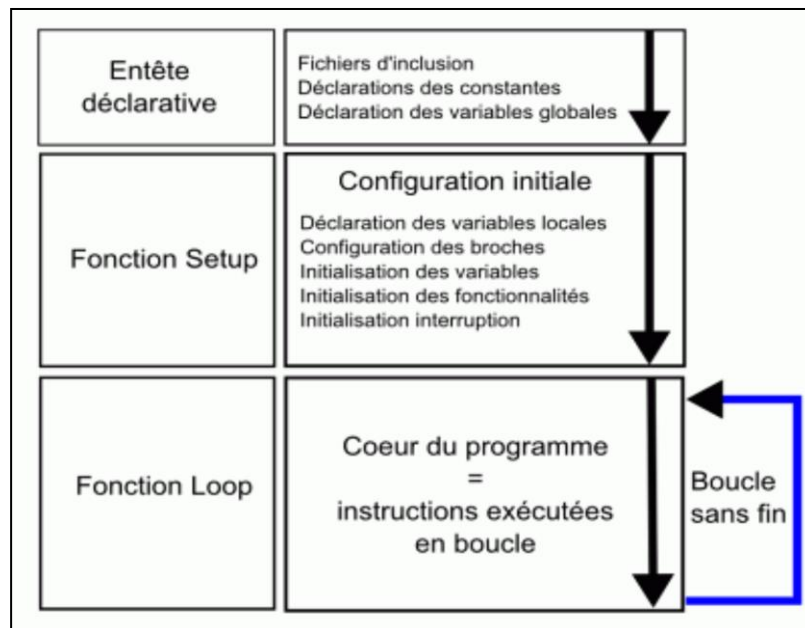


Figure III.4 : Structure de la programmation

III.2.8 Principe d'alimentation d'une carte Arduino Mega2560

La carte Arduino Méga 2560 peut-être alimentée soit via la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) ou à l'aide d'une alimentation externe. La source d'alimentation est sélectionnée automatiquement par la carte. L'alimentation externe (non-USB) peut être soit un Adaptateur secteur (pouvant fournir typiquement de 3V à 12V sous 500mA) ou des piles (ou des accus).

L'adaptateur secteur peut être connecté en branchant une prise 2.1mm positif au centre dans le connecteur jack de la carte. Les fils en provenance d'un bloc de piles ou d'accus peuvent être insérés dans les connecteurs des broches de la carte appelées Gnd (masse ou 0V) et Vin (Tension positive en entrée) du connecteur d'alimentation. La carte peut fonctionner avec une alimentation externe de 6 à 20 volts.

Cependant, si la carte est alimentée avec moins de 7V, la broche 5V pourrait fournir moins de 5V ce qui engendre l'instabilité de la carte. Si on utilise plus de 12V, le régulateur de tension de la carte pourrait chauffer et endommager la carte. Ainsi, la plage idéale recommandée pour alimenter la carte Mega est entre 7V et 12V.

III.2.9 Arduino et la PWM et les servomoteurs

Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe. C'est un actionneur (système produisant une action) qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique. Il est capable d'attendre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui ont été donné, puis de les maintenir.

Un servomoteur est composé :

- d'un moteur à courant continu
- un réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse mais augmentant le couple
- d'un axe de rotation
- un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre)
- une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu

Le servomoteur a l'avantage d'être asservi en position angulaire grâce à un potentiomètre couplé à l'axe du moteur, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée en son entrée, ce dernier a besoin de trois fils de connexion pour fonctionner. Un fil rouge est relié à l'alimentation positive (+5 ou +6 V selon le servo), le fil noir est relié à la masse (GND) et le fil jaune est utilisé pour la commande. La couleur dépend du constructeur (FUTABA, HITEC, ...)

Le signal de commande envoyée au servomoteur est un signal électronique de type (PWM) Pulse Width Modulation en français appelée Modulation à Largeur d'Impulsion (MLI). La durée de l'impulsion est limité entre la valeur de 1ms au minimum et 2ms au maximum, soit entre 5% et 10% de la durée totale. Il dispose cependant de deux caractéristiques indispensables pour que le servo puisse fonctionner : la fréquence fixe et la durée de l'état haut, cette durée indique au servomoteur l'angle précis qui est souhaité par l'utilisateur.

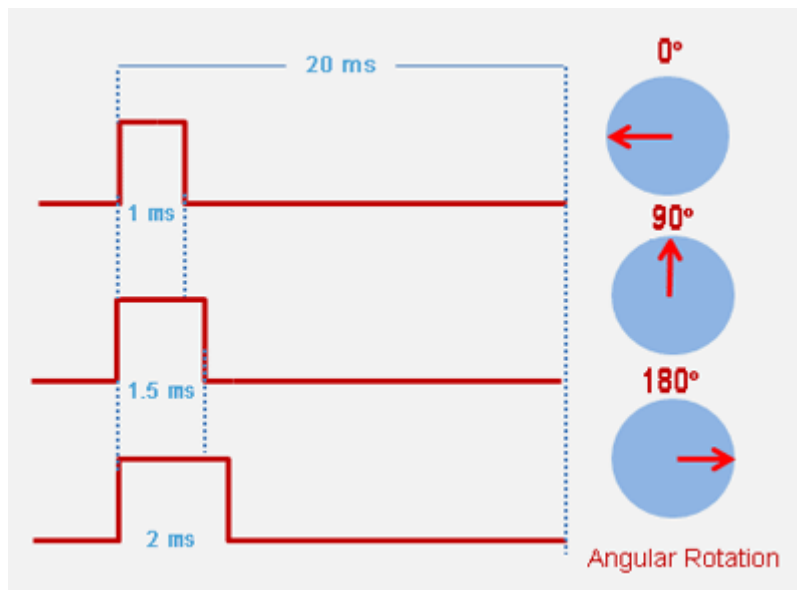


Figure III.5 : Illustration du signal de contrôle

Un signal ayant une durée d'état HAUT de 1ms donnera un angle à 0°, une durée de 1.5ms donnera un angle de 90°, le même signal avec une durée d'état HAUT de 2ms donnera un angle au maximum de ce que peut admettre le servomoteur.

La carte Arduino Mega est basée sur un microcontrôleur (ATmega2560) qui permet de créer des signaux de (PWM) qui nous facilitent la commande des servomoteurs. Et pour ce faire, la fonction "analogWrite (pin_pwm, nombre entre 0 et 255) " a été intégrée. Elle prend en considération deux arguments :

- Le premier est le numéro de la broche numérique où l'on veut générer la PWM.

- Le second argument représente la valeur du rapport cyclique à appliquer.

Mais commander un servomoteur avec cette instruction n'est pas recommandé du fait que :

- La PWM générée avec `analogWrite` a une fréquence de découpage de 490Hz, et pour piloter un servo il faudrait une fréquence de 50Hz. (c'est assez compliqué de modifier la fréquence d'un Arduino cela peut empiéter sur d'autres fonctions).
- Comme nous le savons un servo n'utilise que 5% à 10% de la durée totale de la PWM, et avec `analogWrite` on peut prendre 256 durées différentes entre 0 et 100%, ça veut dire un peu moins de 13 valeurs entre 5% et 10% et c'est très peu quand on veut le piloter de 0° à 180° car il ne peut prendre que 13 valeurs d'angles différentes.

Pour remédier à cela une librairie `<servo.h>` a été développée par l'équipe de développeurs d'Arduino. Elle permet de créer des signaux de commande de servomoteurs sur n'importe quelle sortie digitale. Ce qui veut dire: les pins digitaux 0 à x, notés PWM OU PAS; les pins analogiques A0 à Ax qui sont des sorties digitales en même temps. Donc on peut commander jusqu'à 48 servos au même temps avec une carte Arduino Mega2560.

III.2.10 Gestion de l'alimentation de la carte Arduino et des servomoteurs

III.2.10.1 Principe d'alimentation d'un servomoteur

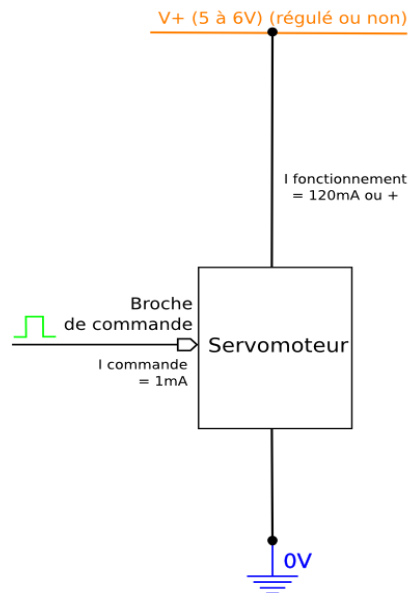


Figure III.6 : Principe d'alimentation d'un servomoteur

La tension d'alimentation diffère d'un servomoteur à un autre, dont chacun a ses caractéristiques. La figure III.15 représente un servomoteur standard, tel que le Futaba S3003, doit être alimenté par une alimentation comprise entre 4V et 6V continus (variable selon les modèles), régulé ou non. Cet ordre de grandeur de tension est compatible avec la carte Arduino qui fonctionne en 5V régulé.

Voici le schéma d'alimentation d'un servomoteur avec une carte Arduino :

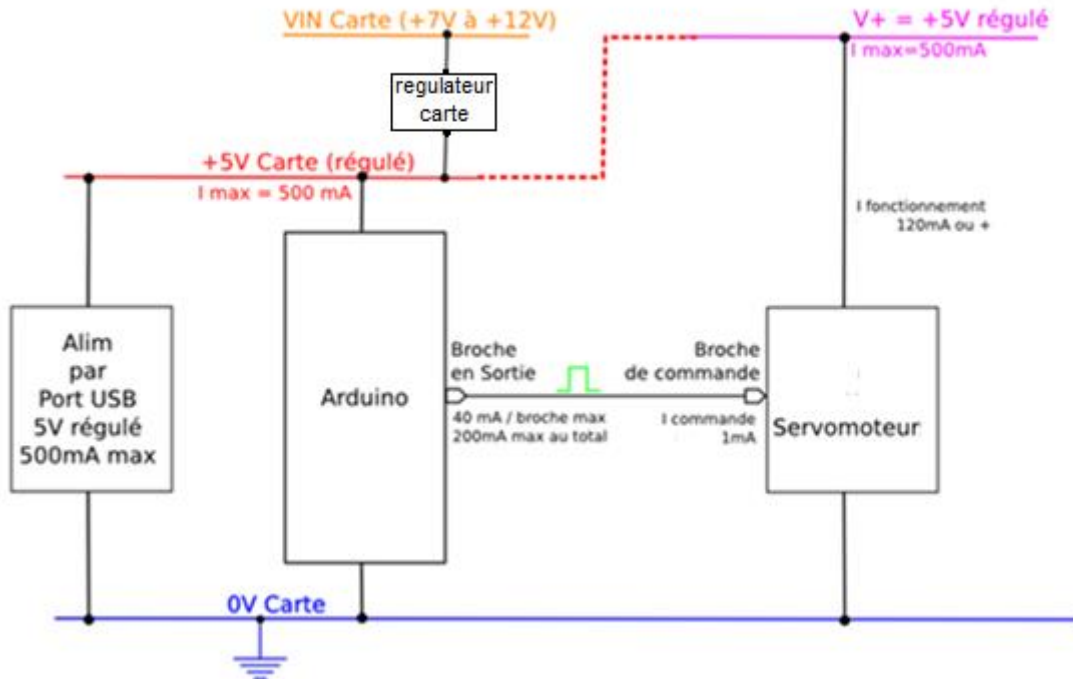


Figure III.7 : Alimentation d'un servomoteur avec une carte Arduino

Pour la carte arduino on a :

- l'intensité maximale disponible sur une broche est de 40mA
- l'intensité maximale cumulée pour l'ensemble des broches est 200mA
- l'intensité maximale que peut fournir l'alimentation 5V de la carte est 500mA.

En ce qui concerne la ligne de commande du servomoteur par la carte Arduino :

- on pourra commander directement autant de servomoteur que l'on veut (broche de commande) avec une carte Arduino, le nombre maximal étant $200\text{mA} / I_{\text{commande}}$, soit 100 environ dans le cas du Futaba S3003, ce qui est largement supérieur au nombre de broches de la carte.

En ce qui concerne l'alimentation principale des servomoteurs par une carte Arduino :

- on ne peut alimenter que 3 à 4 servomoteurs simultanément par l'alimentation 5V de la carte Arduino, le nombre maximal étant $500\text{mA} / I_{\text{fonctionnement}}$ = $500 / 120 = 4$ servomoteurs dans le cas du Futaba S3003.

Une alimentation externe sera indispensable dès que l'on dépassera ce nombre pour ne pas risquer de "griller" la carte Arduino.

Le schéma ci-dessous représente le principe d'alimentation d'un servomoteur commandé avec la carte Arduino avec une alimentation externe.

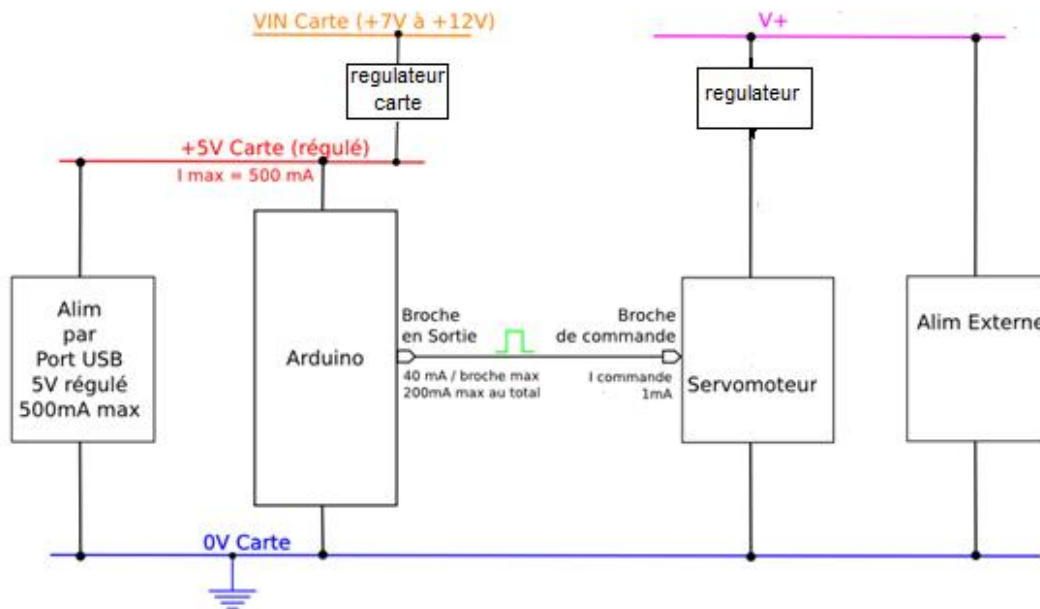


Figure III.8: Alimentation d'un servomoteur avec une alimentation externe

Si l'alimentation externe n'est pas régulée, on utilise un régulateur comme dans la figure III.8, le type de régulateur est choisie selon les caractéristiques de servomoteur.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord présenté l'outil de commande de notre bras manipulateur (Arduino Mega2560), leurs principaux composants (matériel et logiciel) ainsi que la commande des servomoteurs. Par la suite, nous avons donné les différents schémas de commande et de l'alimentation des servomoteurs.

Chapitre IV

Commande en position du robot

IV.1 Introduction

La bonne maîtrise de la commande des manipulateurs en position nécessite la connaissance des différents parties de ce dernier, telle que les actionneurs, la longueurs des porteurs .. etc.

IV.2 Description de la structure mécanique articulée

Notre bras manipulateur est constituée d'un chainage de deux segments porté par une base rotative et liés entre eux par deux articulations rotoïdes (la première pour faire articulé le premier segment et la deuxième pour faire articulé le deuxième segment) comme le montre la figure ci-dessous :

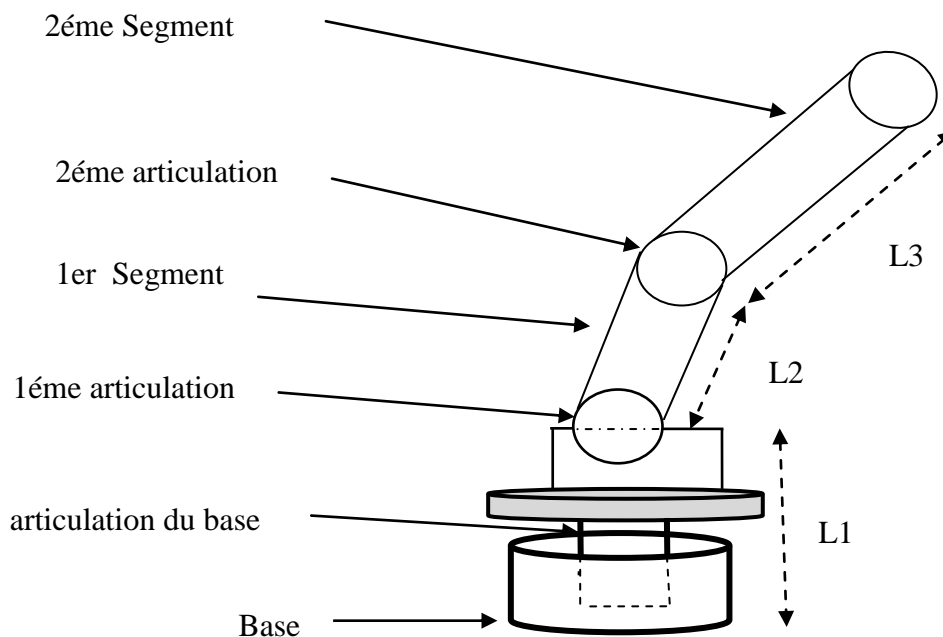


Figure IV.1 : la structure mécanique articulée du manipulateur.

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} L1 = 8 \text{ cm} \\ L2 = 8 \\ L3 = 11.5 \text{ cm} \end{array} \right.$$

IV.3 Les actionneurs de manipulateur

Il existe différents types d'actionneurs utilisés dans la robotique tels que les actionneurs électriques, pneumatiques et hydrauliques, Chaque articulation de notre bras manipulateur contient un actionneur qui est un servomoteur, ce dernier est un actionneur électrique.

IV.3.1 Description d'un servomoteur

Comme on a vu dans le chapitre précédent un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe, C'est un actionneur (système produisant une action) qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique. Il est capable d'attendre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui on était donné, puis de les maintenir.

Un servomoteur est composé :

- d'un moteur à courant continu
- un réducteur en sortie de ce moteur diminuant la vitesse mais augmentant le couple
- d'un axe de rotation
- un potentiomètre
- une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu



Figure IV.3 : Présentation d'un servomoteur

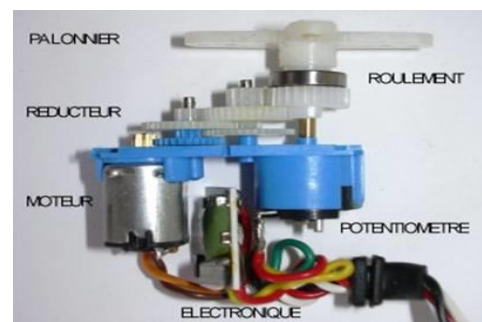


Figure IV.2 : les différents composants d'un servomoteur

IV.3.1.1 Le rôle de l'électronique et du potentiomètre

Le servo utilise une électronique de commande qu'on peut nommer électronique d'asservissement, car c'est elle qui va gérer la position du bras du servomoteur. Cette électronique est constituée d'une zone de comparaison qui compare la position du bras du

servo au signal de commande. Le deuxième élément qui constitue cette électronique, c'est le capteur de position du bras. Ce capteur n'est autre qu'un potentiomètre couplé à l'axe du moteur. La mesure de la tension au point milieu de ce potentiomètre permet d'obtenir une tension image de l'angle d'orientation du bras. Cette position est ensuite comparée, à la consigne (le signal de commande) qui est transmise au servomoteur. Après une rapide comparaison entre la consigne et valeur réelle de position du bras, le servomoteur (du moins son électronique de commande) va appliquer une correction si le bras n'est pas orienté à l'angle imposé par la consigne.

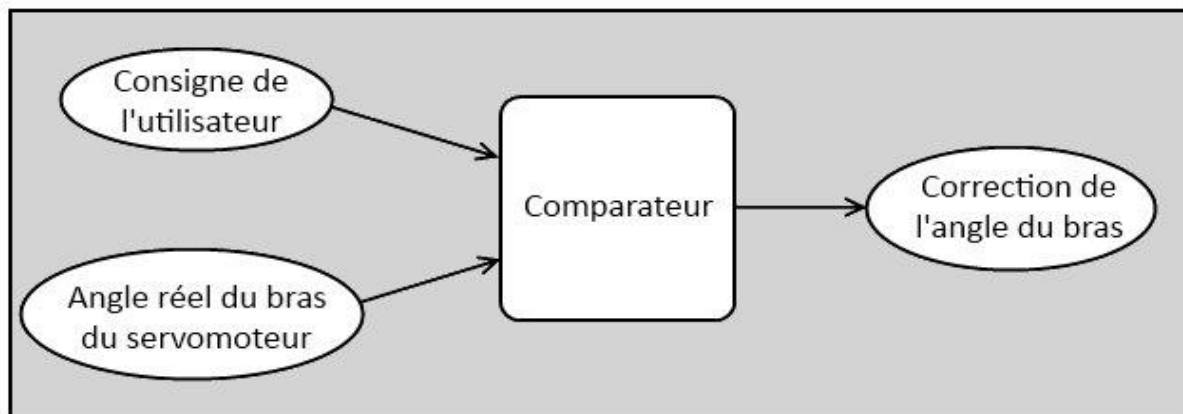


Figure IV.4 : fonctionnement du potentiomètre

IV.3.1.2 **Role du système réducteur**

le servomoteur possède plusieurs pignons (engrenages) en sortie du petit moteur CC. Cet ensemble est ce qui constitue le réducteur. Ce réducteur fait deux choses : d'une part il réduit la vitesse de rotation en sortie de l'axe du servomoteur (et non du moteur CC), d'autre part il permet d'augmenter le couple en sortie du servomoteur .

IV.4 **Les caractéristique du servomoteur à commandé**

Notre bras manipulateur contient cinq servomoteurs qui sont réparti sur le manipulateur commençons de la base vers l'organe terminal comme suit :

Le premier et le quatrième sont identique l'un pour la rotation de la base et l'autre pour l'orientation de la pince, leurs caractéristique est :

- Référence : Futaba S3010
- Alimentation : 4.8 a 6 volte
- Couple : 5.18 Kg.cm sous 4.8v , 6.48 Kg.cm sous 6v
- Débattement angulaire : 180°
- Poids : 41g

Le deuxième servo pour faire articuler le premier segment, ces caractéristiques sont :

- Référence : Futaba S3306
- Alimentation : 4.8 a 6 volte
- Couple : 19.23 Kg.cm sous 4.8v - 23.98 Kg.cm sous 6v
- Débattement angulaire : 180°
- Poids : 126g

Le troisième servo pour faire articuler le deuxième segment, ces caractéristiques sont :

- Référence : TowerPro MG995
- Alimentation : 4.8 a 6 volte
- Couple : 11 Kg.cm sous 4.8v , 13 Kg.cm sous 6v
- Débattement angulaire : 180°
- Poids : 60g

Le cinquième servo pour l'ouverture et la fermeture de la pince, ces caractéristiques sont :

- Référence : Futaba S3003
- Alimentation : 4.8 a 6 volte
- Couple : 3.2 Kg.cm sous 4.8v , 4.10 Kg.cm sous 6v
- Débattement angulaire : 180°
- Poids : 37g

IV.5 principe d'alimentation des servo et de la carte Arduin

Pour l'alimentation de la carte on a utilisé le câble USB et pour les servo on utilisé une alimentation externe comme le montre la figure ci-dessous :

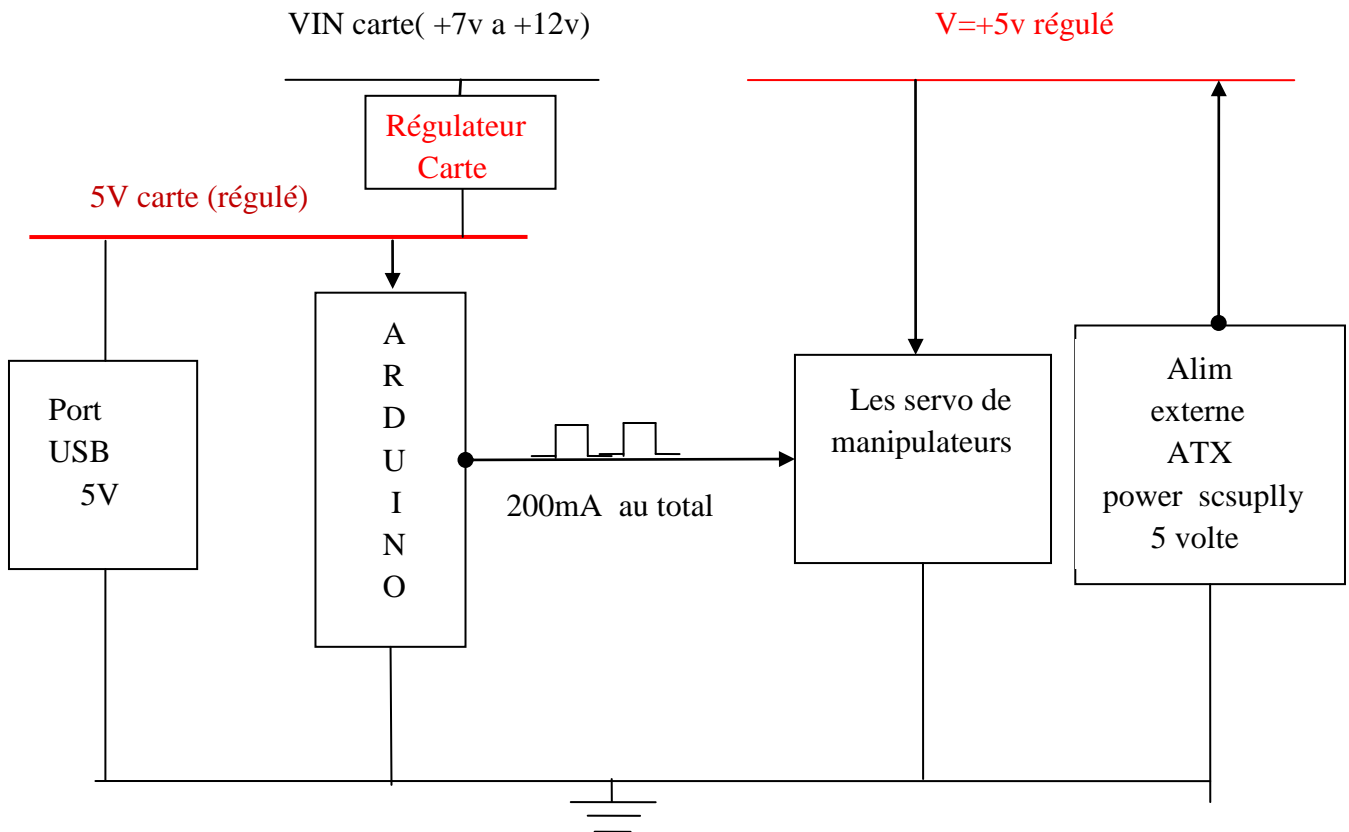


Figure IV.5 : principe d'alimentation des servo et de la carte Arduino

IV.6 Commande de la position et l'orientation du robot

pour commander notre bras manipulateur avec la carte Arduino il faut d'abord trouvé les angles qu'on doit fournir aux servomoteurs pour atteindre la position désirée.

Soit la position désirée $P_1 (P_{1x0}, P_{1y0}, P_{1z0})$, tell que $P_{1x0}, P_{1y0}, P_{1z0}$ les coordonnées du point P_1 dans le repère $R_0=(O_0 ; x_0, y_0, z_0)$ qu'on a associé à l'articulation de la base. Pour que le point P_1 soit atteignable par la pince qui est attachée à l'articulation qu'on à associer le repère R_3 d'origine O_3 , On doit mettre la base du repère R_3 à une position $P(P_{x0}, P_{y0}, P_{z0})$ bien précis puis on détermine le MGI de ce dernier et l'orientation de la pince pour obtenir les angles nécessaires pour se met à la position désirée.

Soit le schéma suivant :

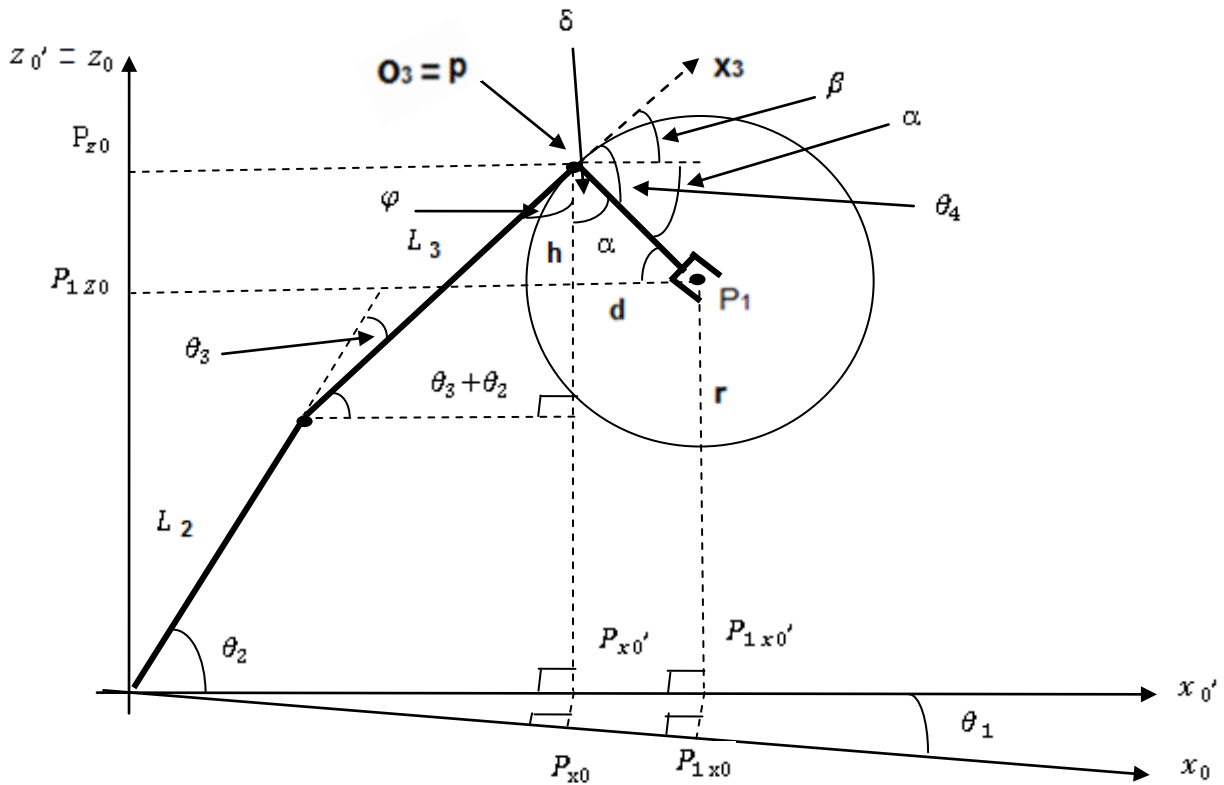


Figure IV.6 : Représentation de l'orientation de la pince

$r = 9.5\text{cm}$, c'est l'axe de la pince, la distance entre la base de repère R_3 et le centre de la pince.

D'après le schéma, pour obtenir la position exacte de la base du repère R_3 sur le point P qui nous permet l'arrivé au point désirée il faut que le point P appartien au cercle de rayon r et d'origine $P_1 (P_{1x0'}, P_{1z0'})$.

Donc on obtient :

$$(P_{x0'} - P_{1x0'})^2 + (P_{z0} - P_{1z0})^2 = r^2 \quad (1)$$

Car on a $z_{0'} = z_0$

Avec $P_{x0'}^2 = P_{x0}^2 + P_{y0}^2$ et $P_{1x0'}^2 = P_{1x0}^2 + P_{1y0}^2$

Pour obtenir les coordonnées du point P on fait comme suit :

On développe [1] :

$$(P_{x0'} - P_{1x0'})^2 + (P_{z0} - P_{1z0})^2 = r^2$$

$$(P_{x0'} - P_{1x0'})^2 = r^2 - (P_{z0} - P_{1z0})^2$$

$$P_{x0'} - P_{1x0'} = (r^2 - (P_{z0} - P_{1z0})^2)^{\frac{1}{2}}$$

On aura :
$$P_{x0'} = (r^2 - (P_{z0} - P_{1z0})^2)^{\frac{1}{2}} + P_{1x0'} \quad (3)$$

On a aussi :

$$\begin{cases} P_{x0} = \cos(\theta_1) P_{x0'} & (4) \\ P_{y0} = \sin(\theta_1) P_{x0'} & (5) \end{cases}$$

Avec
$$\theta_1 = \tan\left(\frac{P_{1y0}}{P_{1x0}}\right)$$

Du schéma on a :

$$P_{1z0} - r \leq P_{z0} \leq P_{1z0} + r \quad (6)$$

Donc pour avoir le point p en choisissons le P_{z0} (Il dépend du point désirée P_1), un choit rationnel dans l'intervalle donné par l'équation [6] puis on calcul $P_{x0'}$ avec [3] pour obtenir P_{x0} et P_{y0} de [4] et [5] .

Et pour placer la base de repère R_3 sur le point $P(P_{x0}, P_{y0}, P_{z0})$ en détermine le MGI de ce dernier pour trouvé les angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ puis en utilise le MGD.

L'orientation de la pince l'angle (θ_4) est donner par :

On a du schéma :

$$\theta_4 = \alpha + \beta \quad \text{avec :}$$

$$\sin(\alpha) = h/r$$

$$\alpha = \text{asin}\left(\frac{h}{r}\right) \quad \text{avec } h = P_{z0} - P_{1z0}$$

$$\beta = \pi - (\varphi + \delta + \alpha)$$

$$\varphi = \pi - (\theta_3 + \theta_2 + \frac{\pi}{2})$$

$$\cos(\delta) = h/r$$

$$\delta = \arccos\left(\frac{h}{r}\right)$$

$$\theta_4 = \arcsin\left(\frac{h}{r}\right) + \pi - \left(\pi - \left(\theta_3 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) + \arccos\left(\frac{h}{r}\right) + \arcsin\left(\frac{h}{r}\right)\right)$$

$$\theta_4 = \left(\theta_3 + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right) - \arccos\left(\frac{h}{r}\right)$$

IV.7 Test expérimentale

Les bras manipulateurs sont faits généralement pour effectuer la même fonction de façon cyclique pour remplacer les ouvrières dans les tâches pénibles répétitives ou dangereuses, ils peuvent aussi être adaptés à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel. Pour ceci on a choisi comme test expérimental de faire déplacer un objet (bout de polyester) d'un point A à un point B de façon répétitive, c'est une tâche qui est souvent utilisée dans l'industrie. On a utilisé comme objet à déplacer le bout de polyester à cause de sa légèreté, pour être sûr que le couple fourni par les servomoteurs pour s'élever la charge soit largement suffisant.

Pour diminuer les vibrations du robot l'heure d'effectuer sa tâche, on a choisi quelques points d'une façon à diminuer la tangente entre un point et son voisin pour réduire l'accélération du robot, le robot va suivre les points pour aller de A à B aussi pour revenir de B vers A, afin de réaliser une génération de trajectoire comme le montre la figure ci-dessous :

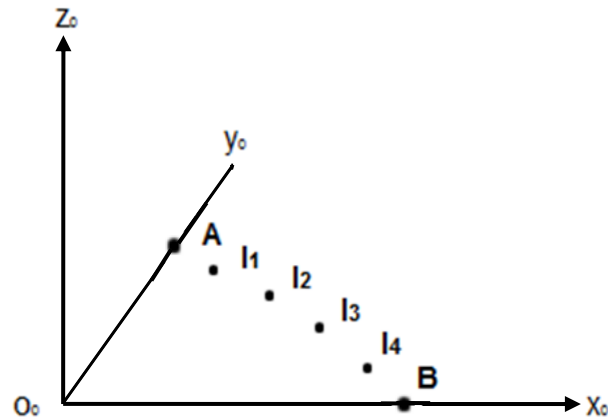


Figure IV.7 : représentation des points A et B et la trajectoire réaliser

Avec :

$(O_0 ; x_0, y_0, z_0)$, le repère de base.

et

A , I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , B telle que :

$A=(0, 11.5, 3.5)$, $I_1 = (3.5, 11, 6.1)$, $I_2(6.8, 9.3, 6.1)$, $I_3(9.3, 6.8, 6.1)$, $I_4(11, 3.5, 6.1)$

et $B=(11.5, 0, 3.5)$, les coordonnées de des point(A, I_1, I_2, I_3, I_4, B) dans le repère de base $(O_0 ; x_0, y_0, z_0)$.

On calcul pour chaque point(A, I_1, I_2, I_3, I_4, B) les angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ nécessaire pour atteindre ce point on appliquant la procédure vue précédemment, et pour l'ouverture et la fermeture de la pince on utilise le servo pince qui est commandé avec θ_5 ,pour tenir l'objet du point A on ferme la pince et pour le déposer au point B on la ouvre.

Après le calcul les angle le programme Arduino est facile à réaliser à l'aide de la bibliothèque (servo.h) qu'on à vue en troisième chapitre, une fois le programme est terminer et compiler on le téléverser dans la carte avec le câble USB pour l'exécuter.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le plus important de notre travail, on a d'abord exposé notre manipulateur, sa structure mécanique ces actionneurs ainsi le rôle des différentes parties et les caractéristiques de ces derniers. Après on a donné le principe d'alimentation de notre carte de commande et de notre servo, puis on a expliqué comment notre robot peut atteindre un point quelconque dans son espace de travail. Vers la fin de ce chapitre, on a présenté un test effectué expérimentalement. Ce test concerne la commande par la carte Arduino d'un robot de telle manière que l'organe terminal du robot se déplace du point A au point B en poursuivant une trajectoire planifiée au préalable.

Conclusion générale

La robotique peut être définie comme l'ensemble des techniques et études tendant à concevoir des systèmes mécaniques, informatiques ou mixtes, capables de se substituer à l'homme dans ses fonctions motrices, sensorielles et intellectuelles.

Le travail que nous avons présenté vise d'une part à évaluer l'intérêt des commandes en position d'un robot manipulateur que ce soit dans un espace de tâche ou articulaire et d'autre part à examiner l'apport des cartes arduino à ce problème.

Par conséquent, ce mémoire représente une étude du projet théorique mais aussi un peu de pratique, qui explique la commande en position de notre bras manipulateur. Sur la base des connaissances et des informations des chapitres précédents, on a commandé notre manipulateur à trois degrés de liberté.

Le système actionneur utilisé pour notre robot est composé : d'un ensemble de cinq servomoteurs, qui sont répartis sur notre robot, commandé avec la carte d'Arduino Méga 2560, pour faire animer le corps du bras manipulateur.

Au terme de ce projet de fin d'études, nous soulignons l'occasion qui nous a été offerte de s'approfondir dans le domaine de la robotique, domaine très en vogue dans l'industrie d'aujourd'hui.

Bibliographie

- [1] Jlassi Sarra. 'FORMULATION ET ETUDE DES PROBLEMES DE COMMANDE EN CO-MANIPULATION ROBOTIQUE', UNIVERSITÉ PARIS-SUD, 2013
- [2] M. Belmahdi Mohamed Amine. 'Modélisation et commande adaptative d'un bras manipulateur rigide à 2 degré de liberté'. Université de Ferhat Abbas-Setif, 2012
- [3] Khiar Nait Chabane. 'Exploitation de la redondance pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile d'assistance aux personnes handicapées'. UNIVERSITE D'EVRY – VAL D'ESSONNE ECOLE DOCTORALE SITEVRY. 2006
- [4] Jose Gutierrez Tapia. 'Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage'. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016.
- [5] Bernard Bayle. 'Introduction à la Robotique' Université Louis Pasteur de Strasbourg, année 2004–2005
- [6] Ph. Bidaud. 'Cours de Modélisation des Systèmes Robotiques' Université Pierre et Marie Curie
- [7] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo, 'Chapitre 1 du livre Robotics: Modelling, Planning and Control', 2009
- [8] Wisama Khalil¹ et Etienne Dombre², 'Bases de la modélisation et de la commande des robots-manipulateurs de type série'
- [9] <https://www.memoireonline.com/01/16/9368/Conception-et-realisation-d-un-robot-mobile--base-d-arduino.html>
- [10] <https://www.memoireonline.com/01/16/9368/Conception-et-realisation-d-un-robot-mobile--base-d-arduino.html>

- [11] <https://www.memoireonline.com/01/16/9368/Conception-et-realisation-d-un-robot-mobile--base-d-arduino.html>
- [12] <https://tutoelectronique.wordpress.com/2015/02/12/les-bases-avec-arduino/>
- [13] <https://www.supinfo.com/articles/single/296-qu-est-ce-qu-servomoteur>
- [14] <http://users.polytech.unice.fr/~ferrero/TPelec2/arduino4.pdf>
- [15] <http://www.fgrand.fr/scidoc/docimg/sciphys/arduino/ondepwm/ondepwm.html>