
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité Automatique et informatique industrielle

Présenté par

Klaai Mohamed Amine

Conception, modélisation et contrôle d'un bras à trois degrés de liberté

Proposé par : Pr. B. Kazed

Année Universitaire 2018-2019

Dans un premier temps, je souhaite exprimer mon vif remerciement et ma gratitude à mon grand et respectueux professeur Mr. Kazed Boualem d'avoir accepté de m'encadrer pour ce projet de fin d'études, ainsi que pour ses soutiens, ses remarques pertinentes et son encouragement.

Lors de la préparation de ce projet, j'ai également bénéficié de la collaboration bénévole des professeurs, de mes amis et bien-sûr de mon club

« MEGATRONIC » qui ont bien voulu discuter avec moi les différents aspects de mon projet, ce qui m'a permis de mieux préciser certains aspects de ce travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille et à mes proches amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce projet.

Merci à toutes et à tous

ملخص:

ناقشنا في هذه المذكرة حل شامل لمشكل التحكم في ذراع الروبوت، أولاً قمنا بالتمذجة السينماتيكية للذراع، ثم برمجنا طرق معتمدة في التحكم وكشف الأنظمة الخاصة بالأذرع الروبوتية ذات خصائص ديناميكية مجهولة، والذي مكنا من التحكم في الموضوع وكذا تتبع المسار المنشود

كلمات المفاتيح: ذراع الروبوت، تحكم لا خطي، كشف الأنظمة.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous allons présenter une approche globale appliquée à un bras manipulateur doté de 3 degrés de liberté. Dans un premier lieu nous donnerons les éléments théoriques de bases relatifs à la modélisation cinématique du robot pour ensuite entamer la partie commande des actionneurs responsables des mouvements des 3 articulations. Les paramètres de la commande PID utilisée seront directement obtenus en tenant compte de la dynamique du bras.

Mots clés : Robot manipulateur, Commande PID, Commande non-linéaire.

Abstract:

In this thesis we present a global approach applied to a 3 degrees of freedom manipulator arm. The first part is dedicated to the theoretical aspect related to the kinematic model of the robot. This will be followed by a discussion and implementation of a PID control for all three actuators responsible of the joint's movements of this arm. The parameters of the controllers have been obtained from the actual dynamics of the robot arm.

Keywords: Robot manipulator, PID controller, nonlinear control.

Listes des acronymes et abréviations

❖ Les Symboles et les opérateurs :

ξ : La pose relative d'un cadre par rapport à un cadre de coordonnées de référence.

$\{A\}$: le cadre de coordonnées A.

x_i : L'axe des x du $i^{\text{ème}}$ cadre.

y_i : L'axe des y du $i^{\text{ème}}$ cadre.

z_i : L'axe des z du $i^{\text{ème}}$ cadre.

o_i : Le point d'origine du cadre de coordonnées i.

$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$: Vecteurs unitaires des axes x, y, z

${}^A R_B$: Matrice de rotation orthonormale 3x3 du cadre B par rapport au cadre A.

${}^A T_B$: Matrice de transformation homogène 4x4 de la trame B par rapport à la trame A.

q_i : Le $i^{\text{ème}}$ angle de rotation dans le cas d'une articulation rotoïde.

A_i : La matrice de transformation homogène qui exprime la position et l'orientation de $o_i x_i y_i z_i$ par rapport à $o_{i-1} x_{i-1} y_{i-1} z_{i-1}$.

t_n^0 : Le vecteur de position de l'effecteur final par rapport à la centrale inertielle ou de base.

${}^i \tilde{P}$: 4x1 vecteur de position homogène par rapport à la trame i.

θ_i : Rotation autour du z_i , et l'angle entre x_{i-1} et x_i .

d_i : Translation autour du z_{i-1} , et la distance entre x_{i-1} et x_i .

a : Translation autour de x_i , et la distance entre z_{i-1} et z_i .

α : Rotation autour de x_i , et l'angle entre z_i et z_{i-1} .

$\text{trans}_{z_i}(d_i)$: La matrice de translation dans l'axe z avec la distance d_i par rapport au $i^{\text{ème}}$ repères coordonnés.

$\text{Rot}_{z_i}(\theta_i)$: la matrice de rotation autour de l'axe z avec l'angle θ_i par rapport au $i^{\text{ème}}$ repères coordonnés.

ω : La vitesse angulaire .

J_ω : La dérivée de la vitesse angulaire ou matrice anguleuse Jacobienne.

J_v : La dérivée de la vitesse linéaire ou matrice jacobienne linéaire.

J : Le robot manipulateur à matrice jacobienne.

$r(t)$: La référence ou le signal de consigne dans la boucle de régulation.

$e(t)$: Le signal d'erreur entre le point de consigne et le retour dans la boucle de régulation.

$u(t)$: Le signal d'entrée de contrôle du système dans la boucle de contrôle.

$y(t)$: Sortie du système en boucle de contrôle.

K_p, K_d, K_i : Les gains du contrôleur PID

❖ Abréviations et acronymes :

DC : courant continu.

DDL : Degrés de liberté.

MCC : Moteur courant continu.

PID : Contrôleur Dérivé Intégral Proportionnel.

PWM : La modulation de largeur d'impulsion peut générer une tension analogique à partir de la sortie numérique en commutant entre 0 et 1 avec une fréquence élevée et un facteur de marche spécifique.

$$s_1 = \sin(q_1) .$$

$$c_1 = \cos(q_1)$$

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 Généralités	3
1.1 Introduction :.....	3
1.2 Définitions.....	3
1.2.1 Définition d'un robot	3
1.2.2 Définition de la robotique	3
1.3 L'histoire des robots industriels	4
1.4 Types de robots	5
1.4.1 Robots mobiles	5
1.4.2 Robot manipulateur.....	6
1.5 Constituants d'un robot.....	7
1.6 Structure mécanique	7
1.7 Un bras manipulateur.....	8
1.8 Architecture des robots	8
1.8.1 La base.....	9
1.8.2 Le porteur.....	9
1.8.3 L'actionneur.....	10
1.8.4 L'organe terminal.....	10
1.9 Caractéristiques d'un robot	11
1.10 Domaines d'application	11
1.10.1 Tâches simples.....	11
1.10.2 Tâches complexes	11
1.11 Conclusion.....	12
Chapitre 2 Modélisation du bras manipulateur	13
2.1 Objectif.....	13
2.2 Représentation position et orientation	13
2.2.1 Représentation la position en 3 dimensions	15
2.2.2 Représentation de l'orientation en 3 dimensions	16
2.2.3 Combinaison entre translation et rotation	17
2.3 Cinématique directe	17
2.3.1 Les chaînes cinématiques.....	18
2.3.2 Représentation Denavit et Hartenberg " DH"	21
2.3.3 Application sur le robot choisi	24

2.4	Cinématique différentielle	25
2.4.1	Dérivation du Jacobien.....	25
2.4.2	Application sur le robot choisi	28
2.5	Cinématique inverse.....	29
2.5.1	L'approche géométrique	30
2.5.2	Application sur le robot choisi	30
2.6	Conclusion.....	31
Chapitre 3	Résultats de simulations	32
3.1	Implémentation et simulation sur Matlab	32
3.2	Contrôle du bras manipulateur	36
3.2.1	Contrôleur PID	36
3.2.2	Les boucles	36
3.2.3	Correcteur proportionnel kp	37
3.2.4	Correcteur dérivateur kd	38
3.2.5	Correcteur intégrateur ki	39
3.2.6	Correcteur proportionnel dérivateur intégrateur	40
3.3	Conclusion.....	41
Chapitre 4	Conception et Réalisation.....	42
4.1	Introduction	42
4.2	Description du fonctionnement	42
4.3	Matériels utilisés	42
4.3.1	Partie électronique	42
4.3.2	Partie mécanique.....	52
4.4	Conclusion.....	57
Chapitre 5	Tests et résultats	58
5.1	Application sur le robot choisi.....	58
5.1.1	Définitions des différents composants du schéma	59
5.1.2	Les résultats réels du contrôle sur le robot manipulateur	59
5.2	Poursuite d'objectifs prédéterminés :	62
5.3	Conclusion.....	68
	Conclusion Générale	69
	Bibliographie.....	71

Liste des figures

Figure 1 :Robot animate [3].....	4
Figure 2:Robot PUMA[3].	5
Figure 3:Robot mobile[4].	6
Figure 4:Bras manipulateur série[4].	6
Figure 5:Bras manipulateur parallèle[4].....	6
Figure 6: Structure Constituants Unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [5].	7
Figure 7: Structure Constituants Unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [5].	8
Figure 8: Architecture d'un robot[7].	8
Figure 9 :Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes [10].	9
Figure 10:Représentation d'une articulation prismatique sus ses différentes formes [7].	10
Figure 11 :le déplacement du point P par rapport un repère	14
Figure 12:: la position et l'orientation de l'objet par la position et l'orientation de son repère des coordonnées.....	14
Figure 13:deux Repères {A} et {B} et la position relative ${}^A P_B$ qui décrit {B} par rapport à {A}	14
Figure 14:: Deux repères des coordonnées 3D {A} et {B}. {B} est tourné et traduit par rapport à {A}	15
Figure 15:Liens, articulations, cadres des coordonnées et vecteur de transformation sur un manipulateur de coude à 3 degrés de liberté.	20
Figure 16: Liens, articulations, cadres des coordonnées et vecteur de transformation sur un manipulateur de coude à 3 degrés de liberté.....	21
Figure 17:Liens, articulations, cadres des coordonnées et vecteur de transformation sur un manipulateur coude à 3 degrés de liberté.	24
Figure 18:angles et distances d'un manipulateur coude à 3 degrés de liberté	31
Figure 19:la matrice transformation homogènes.....	33
Figure 20:vue sur les 3 axes	34
Figure 21:vue sur les 2 axes (x.z)	34
Figure 22:la matrice transformation homogènes.....	35
Figure 23:vue sur les 3 axes	35
Figure 24:vue sur les 2 axes (y.z)	35
Figure 25:schéma bloc en boucle ouvert	37
Figure 26:schéma bloc en boucle fermée	37
Figure 27: la réponse indicielle de correction proportionnelle	38
Figure 28: la réponse indicielle de correction dérivateur.	39
Figure 29: la réponse indicielle de correction intégrateur	40
Figure 30: Schéma fonctionnel d'un contrôleur PID dans une boucle de retour.	40
Figure 31:Servomoteur	42
Figure 32:Composants de servomoteur.....	43
Figure 33:Carte Arduino MEGA 2560.....	43
Figure 34:MCC	45
Figure 35:Les composants de MCC	46
Figure 36:Principe de fonctionnement de MCC	46
Figure 37: Pont en H	47

Figure 38 :Sens du courant en fonction de l'état des interrupteurs.....	48
Figure 39:Potentiomètre	49
Figure 40 :Encodeur	49
Figure 41: Encodeur	50
Figure 42:Encodeur	51
Figure 43:Signal d'encodeur	51
Figure 44:pièces utilisées	52
Figure 45:Les dimensions des pièces utilisées.....	54
Figure 46:robot à l'état final.....	54
Figure 47:La structure de la base avec le moteur DC à encodeur interne	55
Figure 48:Première liaison du bras	55
Figure 49:Deuxième articulation du bras	55
Figure 50: Deuxième liaison du bras	56
Figure 51:Troisième articulation du bras	56
Figure 52: Troisième liaison du bras	56
Figure 53: quatrième articulation du bras	56
Figure 54:Schéma synoptique du contrôle articulaire indépendant pour le manipulateur.	58
Figure 55 : la réponse indicielle de la première articulation après régulation.....	60
Figure 56: la réponse indicielle de la première articulation de deux consignes.	61
Figure 57: la réponse indicielle de la deuxième articulation après régulation.....	61
Figure 58 :la réponse indicielle de la troisième articulation après régulation	62
Figure 59: Le robot en position initiale	63
Figure 60: Déplacement du premier objet rouge	63
Figure 61 :Passage de la première position à la deuxième	64
Figure 62: Dépôt du premier objet rouge sur le point définit.....	64
Figure 63:Déplacement du premier objet vert.....	65
Figure 64: Passage de la première position à la deuxième	65
Figure 65: Dépôt du premier objet vert dans un point définit	66
Figure 66: Déplacement du deuxième objet rouge	66
Figure 67: Dépôt du deuxième objet rouge sur le premier (au même point)	67
Figure 68: Déplacement du deuxième objet vert	67
Figure 69:Dépôt du deuxième objet vert sur le précédent.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1: DH paramètres pour manipulateur de coude à 3 liaisons.	24
Tableau 2: la table des paramètres de DH.	32
Tableau 3: les caractéristiques de la carte Arduino Méga	44
Tableau 4: Les paramètres pour le contrôle PID de la première articulation	59
Tableau 5: Les paramètres pour le contrôle PID de la deuxième articulation	60
Tableau 6: Les paramètres pour le contrôle PID de la troisième articulation.....	60

Introduction générale

Les robots manipulateurs sont en train de devenir une nécessité. Cet état de fait est dû au fait que presque toutes les industries ont besoin, d'une manière ou d'une autre, de manipuler des objets de différentes tailles et poids de manière répétitive et dans des environnements souvent dangereux. L'apparition des robots manipulateurs est pulsée par le fait d'une époque où la fabrication est de nouveaux produits en chaîne, ce qui nécessite un temps de travail répétitif et pénible. Au cours des dernières décennies, des tâches plus complexes nécessitant des déplacements dans des environnements non autorisés pour les êtres humains (nucléaire, mines, armée, espace, ...etc.) ont favorisé l'installation de robots mobiles.

Le développement rapide de l'industrie a impliqué l'amélioration des robots manipulateurs. Ensuite, le robot doit être géré avec des vitesses et des précisions croissantes. Cela nécessite des structures mécaniques plus appropriées, mais également de nouvelles techniques de contrôle.

Dans ce travail de mémoire, nous nous sommes intéressés aux robots manipulateurs pour des applications en robotique industrielle. L'objectif de notre travail est de réaliser et de commander un bras manipulateur à 3 degrés de liberté en développant une carte de commande autour d'une carte Arduino.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

1. Généralités : un bref historique sur la robotique et les différents types de robots, analyse aussi les différents constituants d'un robot manipulateur qui est l'objet de notre étude, L'objet du premier chapitre est d'apporter quelques définitions

de base et décrire les constituants technologiques d'un robot et enfin définir les principaux termes du domaine.

2. Modélisation : La plupart du temps, le modèle du robot (manipulateur ou mobile), est nécessaire pour exécuter une commande par exemple, mais parfois, le modèle peut être non linéaire et couplé, même avec des paramètres variables, ce qui nécessite une orientation vers des méthodes de modélisation et d'identification non linéaires au lieu d'être satisfait des formalismes de Lagrange et d'Euler.

3. Contrôle : C'est l'étape qui génère le signal de contrôle à envoyer aux actionnaires du robot pour assurer la trajectoire à suivre. Parmi ces commandes, la commande PID, le contrôle adaptatif, le contrôle du retour linéaire.

4. Réalisation du bras : Ce chapitre sera consacré à une explication détaillée de la stratégie que nous avons suivie afin de réaliser le robot manipulateur.

Chapitre 1 Généralités

1.1 Introduction :

La robotique est considérée comme l'un des plus grands axes de progrès scientifiques et Techniques, elle consiste en l'automatisation de nombreux secteurs de l'activité humaine, l'augmentation de la productivité dans les entreprises, la stimulation la compétitivité entre eux et surtout l'aptitude de travailler dans des zones à haut risque (espace, démantèlement nucléaire, déminage ...etc.).

Le secteur d'activité des systèmes robotiques s'est élargi de façon importante en particulier dans le domaine médical, spatial, industriel, militaire et dans le domaine de l'agriculture.

Dans ce chapitre, nous donnons un bref historique sur l'évolution de la robotique Industrielle et un aperçu non exhaustif sur les robots.

1.2 Définitions

1.2.1 Définition d'un robot

Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable [1].

1.2.2 Définition de la robotique

La branche de la technique qui traite la conception, la construction, l'exploitation et l'application des robots [2].

1.3 L'histoire des robots industriels

Dans les années 50, c'était la première période où la vie technologique a rencontré le premier robot : En **1954**, George Charles Devol invente le premier robot industriel programmable, Il fonde en 1956 la première entreprise de robot, Unimation, avec l'ingénieur Joseph Engelberger, Leur robot, appelé Unimate, était capable de manipuler des objets avec des actionneurs hydrauliques.

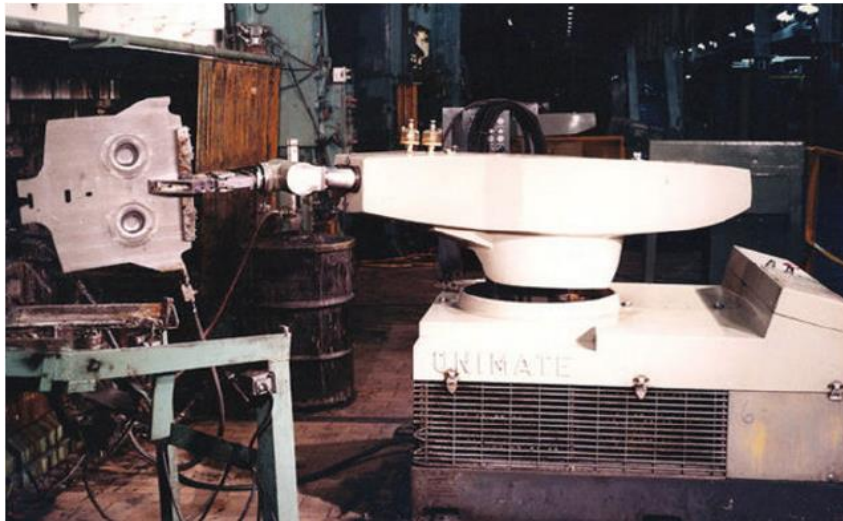


Figure 1 :Robot animate [3].

En 1969, Victor Scheinman de l'Université de Stanford a inventé un bras articulé sur 6 axes. Scheinman vendre son concept à Unimation plus tard.

Dans les années 70, quelques entreprises ont du flair et se lancent dans le design et la fabrication de robots industriels. Voici quelques dates importantes de cette époque :

1973 : KUKA, une entreprise allemande, crée le premier robot industriel avec 6 axes contrôlés électro mécaniquement : le famulus.

1974 : Sheinman fonde Vicarm Inc. et commercialise un robot contrôlé par un ordinateur qui utilise des capteurs de pression destinés à des applications industrielles.

1977 : Le Motoman L10, un robot 5 axes capables de soulever une charge de 10 kg, est lancé sur le marché par Yaskawa.

1978 : Unimation propose le PUMA, un robot d'assemblage encore utilisé de nos jours dans plusieurs laboratoires de recherche.



Figure 2: Robot PUMA[3].

Les années 80 sont le début d'une croissance accélérée de l'industrie de la robotique avec une nouvelle entreprise ou un nouveau robot qui voient le jour chaque mois.

1981 : Takeo Kanade construit le premier robot muni de moteurs installés directement aux articulations du bras. Cela a permis des robots plus rapides et plus précis qu'auparavant.

1987 : Asea de Suède et Brown Boveri Ltd de Suisse fusionnent pour former ABB, un des plus importants fabricants de robots industriels.

Les années subséquentes ont vu des améliorations de tous genres et des robots de plus en plus rapides, précis et flexibles. En 1998, par exemple, les systèmes de contrôle pouvaient gérer jusqu'à 27 axes et synchroniser le contrôle de 4 robots [3].

1.4 Types de robots

Il y'a deux types de robots : robots mobiles et robots manipulateurs [4].

1.4.1 Robots mobiles

- Un robot mobile (figure 3) est un système mécanique, électronique et informatique agissant physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné, Cette machine est polyvalente et capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement.
- Robots à poste mobiles capables de se déplacer dans un environnement et peuvent être équipés de manipulateur suivant leurs utilisations.

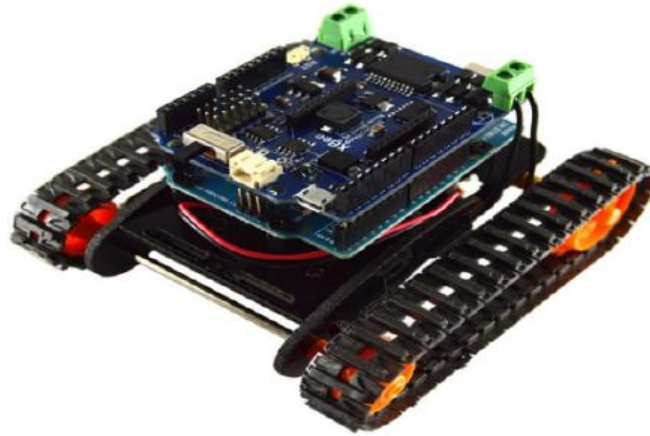


Figure 3:Robot mobile[4].

1.4.2 Robot manipulateur

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 sont des 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, et ils sont des robots installés sur le lieu de travail afin d'exécuter des travaux programmés [4].



Figure 4:Bras manipulateur série [4].



Figure 5:Bras manipulateur parallèle [4].

1.5 Constituants d'un robot

Un robot est un assemblage complexe de pièces mécaniques et de pièces électroniques le tout pouvant être piloté par une intelligence artificielle. Disposées comme suit [5] :

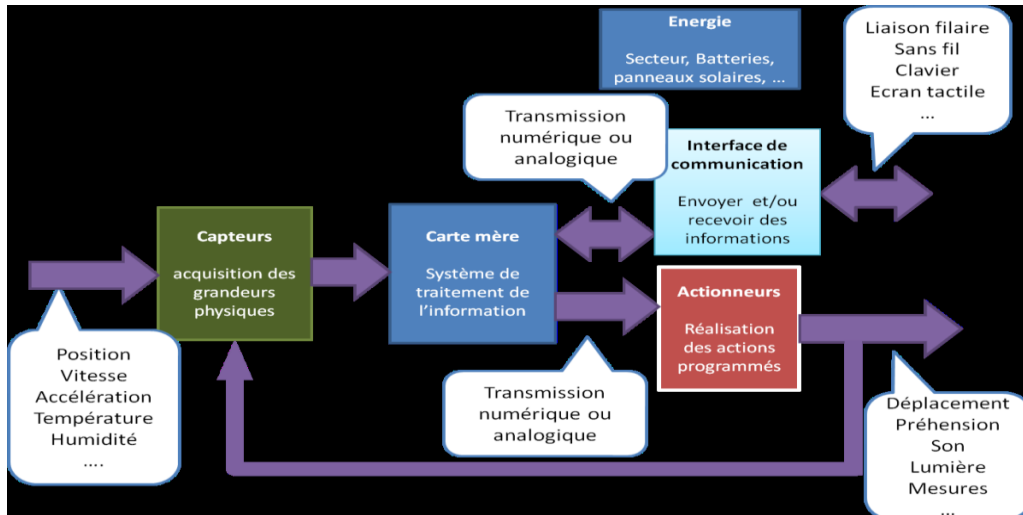


Figure 6: Structure Constituants Unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [5].

1.6 Structure mécanique

Position et orientation des différents corps des robots les uns par rapport aux autres Il existe deux types :

- Une structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple qui contient un nombre des liaisons mécanique inférieur ou égal à deux, relié qu'à un seul corps.
- Une structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée qui consiste une chaîne cinématique qu'il existe un retour mécanique d'un ou plusieurs segments à un autre dans la chaîne [5].

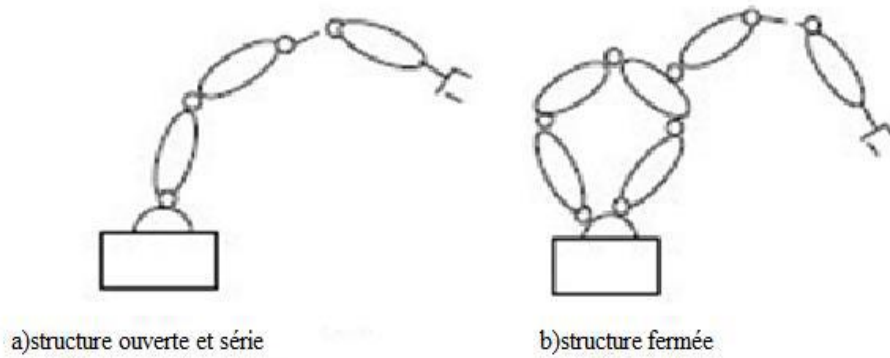


Figure 7: Structure Constituants Unité opérationnelle et fonctionnelle d'un robot [5].

1.7 Un bras manipulateur

- C'est un système de positionnement où les forces agissant au niveau des articulations sont produites par des actionneurs. Ces derniers peuvent être du type électrique, hydraulique ou pneumatique [6].
- Robots à poste fixe ancrés physiquement à leur place de travail pour réaliser une tâche précise et répétitive.

1.8 Architecture des robots

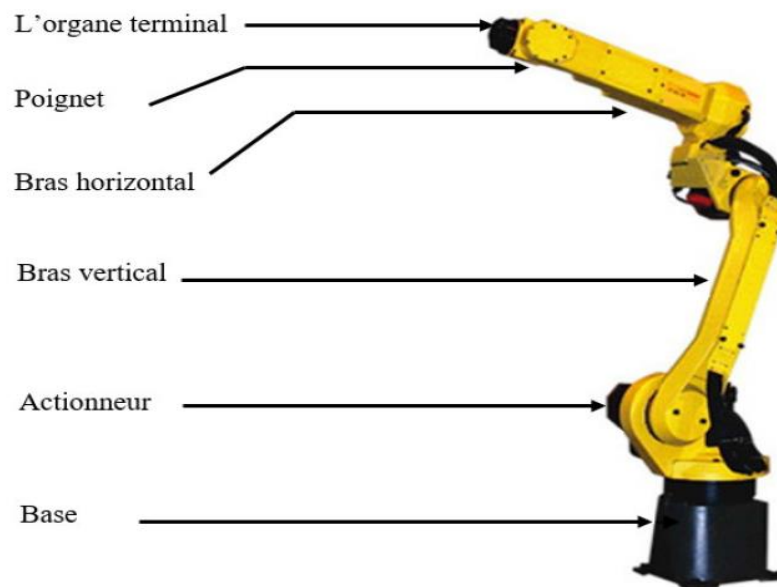


Figure 8: Architecture d'un robot [7].

1.8.1 La base

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail, Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

1.8.2 Le porteur

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé (segment, articulation, actionneur, organe terminal), il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation imposée, Il est constitué de :

- a. Segment** : Corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base du porteur, et les uns par rapport aux autres.
- b. Articulation** : Une articulation liés deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de liberté, de l'un par rapport à l'autre [8].

b.1 Articulation rotoïde : Il s'agit d'une articulation de type pivot (rotoïde), notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour [9].

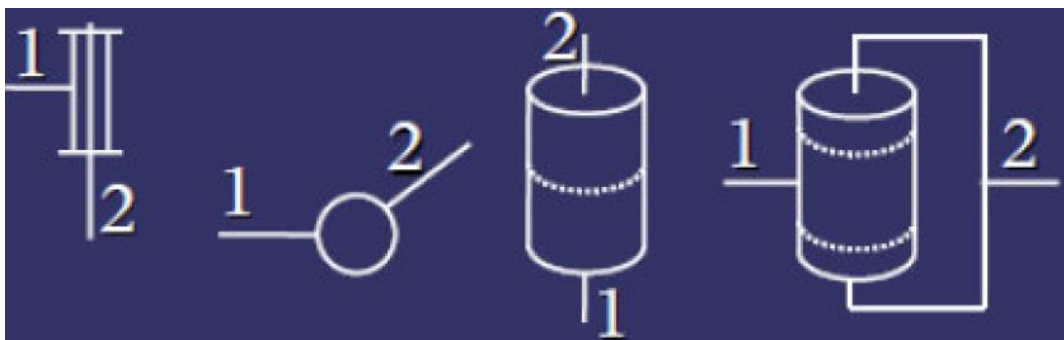


Figure 9 : Représentation d'une articulation rotoïde sous ses différentes formes [10].

b.2 Articulation prismatique : Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe.

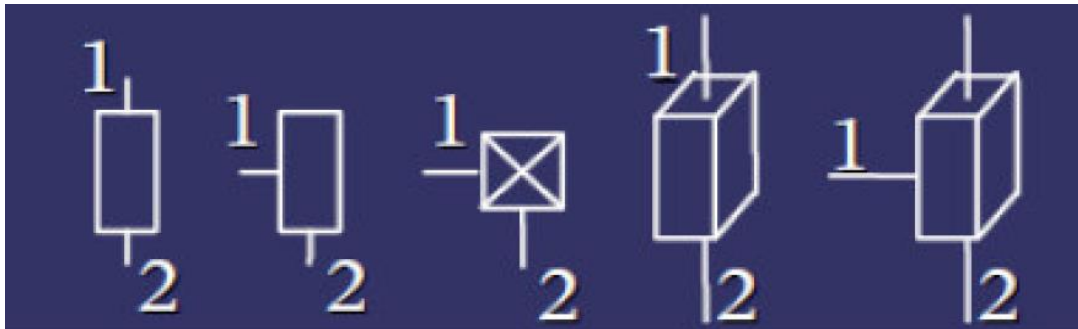


Figure 10: Représentation d'une articulation prismatique sous ses différentes formes [7].

1.8.3 L'actionneur

Pour être animé, la structure mécanique articulée comporte des moteurs le plus souvent associés à des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs, Ils utilisent fréquemment des moteurs, On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou pour de petits robots, des moteurs pas à pas.

Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin, hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). (Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien).

Un manipulateur à cycles est une structure mécanique articulée avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).

1.8.4 L'organe terminal

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 [10].

1.9 Caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve, Voici quelques Paramètres à prendre éventuellement, en compte :

- ✓ La charge utile transportable par le robot.
- ✓ L'espace de travail : c'est l'ensemble des situations de l'espace que l'organe terminal du robot peut atteindre.
- ✓ Les vitesses et les accélérations maximales, qui conditionnent le temps du cycle.
- ✓ Les performances (l'écart entre une situation commandée et la moyenne des Situations atteintes) [8].

1.10 Domaines d'application

Les robots industriels peuvent être utilisés dans plusieurs domaines et peuvent accomplir différentes tâches.

1.10.1 Tâches simples

La grande majorité des robots est utilisée pour des tâches simples et répétitives. Ils sont Programmés une fois pour toute au cours de la procédure d'apprentissage. Les critères de choix de la solution robotique sont :

- ✓ La tâche est assez simple pour être robotisée.
- ✓ Les critères de qualité sur la tâche sont importants.
- ✓ Pénibilités de la tache (peinture, charge lourde, environnement hostile, ...).

Exemples de robots utilisés pour des tâches simples : robots soudeurs par points et robots soudeurs à l'arc.

1.10.2 Tâches complexes

Robotique de service :

- Robot pompiste.
- Robot de construction.
- Robot Computer Motion.
- Robot Assistance aux personnes handicapées [9].

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la robotique : l'histoire des robots, leurs structures, leurs utilisations, leurs différents types, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'application ce qui va nous servir pour la construction de notre bras.

Chapitre 2 Modélisation du bras manipulateur

2.1 Objectif

Notre objectif est d'améliorer le contrôle des 3 degrés de liberté du robot à l'aide d'une carte Arduino et de Matlab, ce qui rend l'informatique plus réactive, stable et efficace, Cela nous permet de surveiller en temps réel tous les signaux, positions et les angles communs. Un problème du contrôle aussi complexe serait mieux résolu en le divisant en mini-objectifs comme suit :

1. Modélisation cinématique du manipulateur robotisé 3 DDL.
2. Simulez le modèle, concevez différentes méthodes de contrôle.
3. Concevez un contrôleur PID pour le manipulateur 3 DDL pour le contrôle de position.
4. Application du contrôle sur le robot pour le suivi de trajectoire.

2.2 Représentation position et orientation

La position et l'orientation d'objets dans un environnement, Ces objets incluent des robots, des pièces de travail, des obstacles et des chemins.

Un point dans l'espace est un concept familier issu des mathématiques et peut être décrits par un vecteur de coordonnées, également appelé vecteur lié, comme montré sur la figure 11 Le vecteur représente le déplacement du point par rapport à un cadre de coordonnées de référence. Un cadre de coordonnées, ou système de coordonnées cartésien, est un ensemble d'axes orthogonaux qui se croisent en un point appelé l'origine.

Plus souvent, nous devons considérer un ensemble de points comprenant un objet. Nous supposons que l'objet est rigide et que ses points constitutifs conservent une position relative constante par rapport au cadre de coordonnées de l'objet, comme illustré à la figure 12 au lieu de décrire les points individuels, nous décrivons la position et

l'orientation de l'objet par la position et orientation de son cadre de coordonnées. Un cadre de coordonnées est étiqueté, {B} dans ce cas, et ses étiquettes d'axe x_B et y_B adoptent l'étiquette de l'image en tant qu'indice.

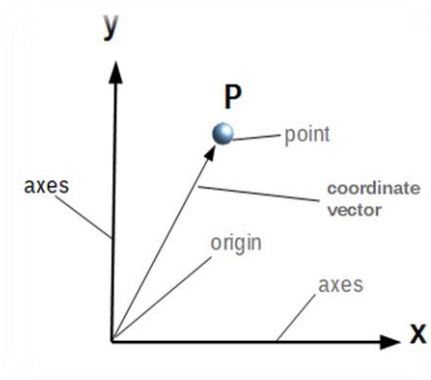


Figure 11 :le déplacement du point P par rapport un repère

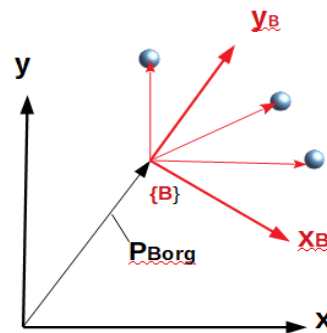


Figure 12:: la position et l'orientation de l'objet par la position et l'orientation de son repère des coordonnées.

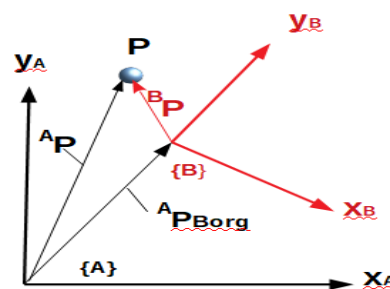


Figure 13:deux Repères {A} et {B} et la position relative ${}^A P_{Borg}$ qui décrit {B} par rapport à{A}

La transformation générale qui décrit le point P dans le repaire {A} est donnée par la relation suivante :

$${}^A P = {}^A R_B \cdot {}^B P + {}^A P_{Borg} \quad (2.1)$$

${}^A R_B$: La matrice de rotation du {B} par rapport à {A}.

2.2.1 Représentation la position en 3 dimensions

Le cas tridimensionnel est une extension du cas bidimensionnel et nous ajoutons un axe de coordonnées supplémentaire, généralement désigné par z, qui est orthogonal aux deux axes x et y.

Le point P est représenté par ses coordonnées x, y, z (x, y, z) ou par un vecteur lié :

$$P = x \hat{x} + y \hat{y} + z \hat{z} \quad (2.2) \quad \text{avec: } \hat{x} = [1,0,0]^t$$

La figure 14 montre un repère de coordonnées {B} que nous souhaitons décrire par rapport au repère de référence {A}. Nous pouvons voir clairement que l'origine de {B} a été déplacée par le vecteur $t = (x, y, z)$ et a ensuite fait l'objet d'une rotation complexe. La façon dont nous représentons l'orientation est très importante. Notre approche consiste à considérer un point P arbitraire par rapport à chacun des cadres de coordonnées et à déterminer la relation entre eux. Nous examinerons ensuite le problème en deux parties : la rotation et ensuite la translation. La rotation est étonnamment complexe pour le cas tridimensionnel et nous y consacrons toute la section suivante.

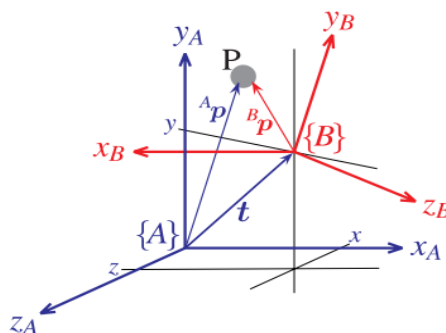


Figure 14:: Deux repères des coordonnées 3D {A} et {B}. {B} est tourné et traduit par rapport à {A}

2.2.2 Représentation de l'orientation en 3 dimensions

a. Matrice de rotation ortho normale :

Nous pouvons représenter l'orientation d'un repère de coordonnées par ses vecteurs unitaires exprimés en termes du repère des coordonnées de référence. Chaque vecteur unitaire a trois éléments et forme les colonnes d'une matrice orthonormale 3×3 ${}^A R_B$:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = {}^A R_B \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Les matrices de rotation autour les axes x, y et z sont :

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

b. Représentations à trois angles :

Le théorème de rotation d'Euler nécessite des rotations successives autour de trois axes de sorte que deux rotations successives ne soient autour du même axe. Il existe deux classes de séquence de rotation : Eulérien et Cardanien, nommées d'après Euler et Cardano, respectivement.

Le type eulérien implique la répétition, mais non successive, de rotations autour d'un axe particulier: XYX, XZX, YXY, YZY, ZXZ ou ZYZ. Le type cardanien est caractérisé par des rotations autour des trois axes: XYZ, XZY, YZX, YXZ, ZXY ou ZYX. En usage courant, toutes ces séquences sont appelées angles d'Euler et vous pouvez en choisir un total de douze.

La séquence XYZ est couramment utilisée en aéronautique et en dynamique mécanique et en robotique. qui représentent les rotations autour de φ , θ et ψ , appelées angles de **roulis** (*roll*), de **tangage** (*pitch*) et de **lacet** (*yaw*):

$$R = R_x(\varphi)R_y(\theta)R_z(\psi) \quad (2.7)$$

2.2.3 Combinaison entre translation et rotation

On peut également utiliser une matrice de transformation homogène pour décrire la rotation et la translation :

$$\begin{bmatrix} {}^A x \\ {}^A y \\ {}^A z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A R_B & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B x \\ {}^B y \\ {}^B z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Le vecteur de translation cartésienne entre les origines des coordonnées $\{A\}$ et $\{B\}$ est 't', et le changement d'orientation est représenté par une sous-matrice R, orthonormée 3×3 , les vecteurs sont exprimés sous une forme homogène et nous écrivons:

$${}^A \tilde{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} {}^A R_B & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} {}^B \tilde{\mathbf{P}} = {}^A T_B {}^B \tilde{\mathbf{P}} \quad (2.9)$$

Avec ${}^A T_B$ est une transformation homogène de 4×4 . La matrice a une structure très spécifique et appartient au groupe spécial euclidien de 3 dimensions. [11]

2.3 Cinématique directe

Dans cette section, nous développons les équations cinématiques directes ou en configuration pour les robots rigides, Le problème de la cinématique directe concerne la relation entre les différentes articulations du manipulateur du robot et la position et l'orientation de l'outil ou de l'effecteur.

Le problème de la cinématique directe consiste à déterminer la position et l'orientation de l'effecteur terminal, en fonction des valeurs des variables de liaison du robot. Les variables articulaires sont les angles entre les liaisons dans le cas des articulations rotoïdes et l'extension de la liaison dans le cas des articulations prismatiques. Le problème de la cinématique directe doit être mis en contraste avec le problème de la cinématique inverse, qui sera étudié dans le chapitre suivant et qui concerne la

détermination des valeurs des variables articulaires qui permettent d'obtenir la position et l'orientation souhaitées pour l'effecteur final du robot.

2.3.1 Les chaînes cinématiques

Un robot manipulateur est composé d'un ensemble de liaison reliée entre eux par différentes articulations. Les articulations peuvent être très simples, comme une articulation pivot ou prismatique, ou bien elles peuvent être plus complexes.

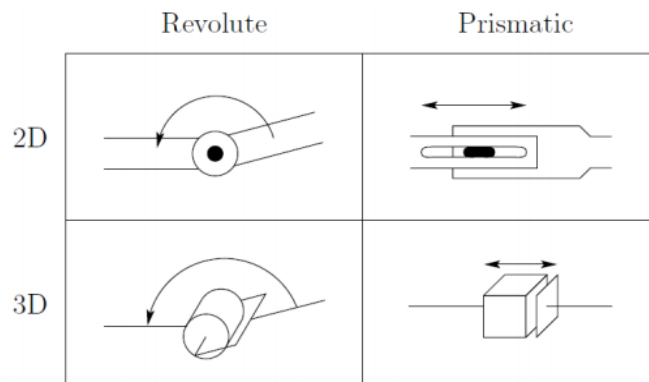


Figure 15: Représentation symbolique des articulations du robot

En supposant que chaque articulation a un seul degré de liberté, l'action de chaque articulation peut être décrite par un seul nombre réel : l'angle de rotation dans le cas d'une articulation rotoïde ou le déplacement dans le cas d'une articulation prismatique, L'analyse cinématique directe a pour objectif de déterminer l'effet cumulatif de l'ensemble des variables associées.

Un robot manipulateur à n articulations aura $n + 1$ liaisons, car chaque articulation connecte deux liaisons, Nous numérotions les articulations de 1 à n , et les liaisons de 0 à n , en partant de la base, Par cette convention, articulation i connecte le lien $i-1$ au lien i . Nous considérerons que l'emplacement de l'articulation i est fixe par rapport au lien $i-1$. Lorsque l'articulation i est actionnée, le lien i se déplace. Par conséquent, le lien 0 (le premier lien) est fixe et ne bouge pas lorsque les articulations sont actionnées.

Au $i^{\text{ème}}$ articulations on associe une variable commune noté q_i , Dans le cas d'une articulation rotoïde, θ_i est l'angle de rotation et dans le cas d'une articulation prismatique d_i est le déplacement de l'articulation :

$$q_i = \begin{cases} \theta_i : \text{articulation } i \text{ rotoïde} \\ d_i : \text{articulation } i \text{ prismatique} \end{cases}$$

Pour effectuer l'analyse cinématique, nous attachons de manière rigide un cadre de coordonnées à chaque lien. En particulier, nous attachons " $o_i x_i y_i z_i$ " au lien i . Cela signifie que quel que soit le mouvement exécuté par le robot, les coordonnées de chaque point du lien i sont constantes lorsqu'elles sont exprimées dans le $i^{\text{ème}}$ cadrent de coordonnées. De plus, lorsque L'articulation i est actionnée, le lien i et son cadre, " $o_i x_i y_i z_i$ ", subissent un mouvement résultant. La trame " $o_0 x_0 y_0 z_0$ ", qui est attachée à la base du robot, est appelée trame initiale.

Supposons maintenant qu' A_i soit la matrice de transformation homogène qui exprime la position et l'orientation de " $o_i x_i y_i z_i$ " par rapport à " $o_{(i-1)} x_{(i-1)} y_{(i-1)} z_{(i-1)}$ ".

La matrice ' A_i ' n'est pas constante, mais varie en fonction de la configuration du robot. Cependant, l'hypothèse selon laquelle tous les points sont soit rotoïde, soit prismatiques signifie que ' A_i ' n'est fonction que d'une seule variable conjointe, à savoir q_i . En d'autres termes.

$$A_i = A_i(q_i) \quad (2.10)$$

Maintenant, la matrice de transformation homogène qui exprime la position et l'orientation de " $o_j x_j y_j z_j$ " par rapport à " $o_i x_i y_i z_i$ " est appelée, par convention, une matrice de transformation notée T_j^i .

$$T_j^i = A_{i+1} A_{i+2} \dots A_{j-1} \quad \text{if } i < j \quad (2.11)$$

$$T_j^i = I \quad \text{if } i = j \quad (2.12)$$

$$T_j^i = (T_j^i)^{-1} \quad \text{if } i > j \quad (2.13)$$

Par la manière dont nous avons attaché rigidement les différents cadres aux liaisons correspondantes, il s'ensuit que la position de tout point sur l'effecteur final, lorsqu'elle est exprimée dans le cadre n , est une constante indépendante de la configuration du

robot. Indiquer la position et l'orientation de l'effecteur final par rapport au cadre initial ou de base par un vecteur à trois t_n^0 (qui donne les coordonnées de l'origine du cadre d'effecteur final par rapport au cadre de base). et la matrice de rotation $3 \times 3 R_n^0$ et définissent la matrice de transformation homogène:

$$T_n^0 = \begin{bmatrix} R_n^0 & t_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Ensuite, la position et l'orientation de l'effecteur terminal dans le cadre inertiel sont données par :

$$T_n^0 = A_1(q_1) \dots A_n(q_n). \quad (2.15)$$

Chaque transformation homogène A_i est de la forme :

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & t_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Par conséquent :

$$T_j^i = A_{i+1} \dots A_j = \begin{bmatrix} R_j^i & t_j^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La matrice R_j^i exprime l'orientation de $o_j x_j y_j z_j$ par rapport à $o_i x_i y_i z_i$ et est donnée par les parties rotationnelles des matrices A comme

$$R_j^i = R_{i+1}^i \dots R_j^{j-1} \quad (2.18)$$

Les vecteurs de coordonnées t_j^i sont donnés récursivement par la formule :

$$t_j^i = t_{j-1}^i + R_{j-1}^i t_j^{j-1} \quad (2.19)$$

Ces expressions seront utiles quand on étudiera les matrices jacobéennes [12]

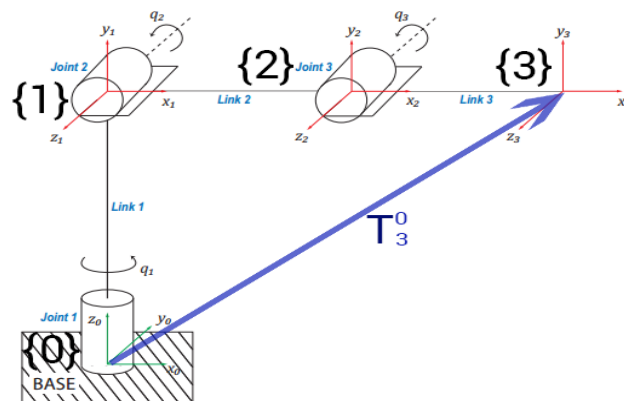


Figure 16: Liens, articulations, cadres des coordonnées et vecteur de transformation sur un manipulateur de coude à 3 degrés de liberté.

2.3.2 Représentation Denavit et Hartenberg “DH”

Une convention couramment utilisée pour sélectionner les cadres de référence dans les applications robotiques est la convention Denavit et Hartenberg (D – H), introduite par Jacques Denavit et Richard S. Hartenberg. Dans cette convention, des cadres de coordonnées sont attachés aux articulations entre deux liens, de sorte qu'une transformation est associée aux articulations [Z] et que la seconde est associée au lien [X]. Les transformations des coordonnées le long d'un robot série composé de n liens forment les équations cinématiques du robot.

Afin de déterminer les transformations de coordonnées [Z] et [X], les liaisons reliant les liaisons sont modélisées sous forme de liaisons articulées ou de liaisons coulissantes, chacune ayant une ligne unique S dans l'espace formant l'axe de la liaison et définissant le mouvement relatif des deux liens. Un robot sérié typique est caractérisé par une séquence de six lignes S_i , $i = 1, \dots, 6$, une pour chaque articulation du robot. Pour chaque séquence de lignes S_i et S_{i+1} , il existe une ligne normale commune $A_{i, i+1}$. Le système à six axes de jointure S_i et à cinq lignes normales $A_{i, i+1}$ constitue le squelette cinématique du robot sérié typique à six degrés de liberté. Denavit et Hartenberg ont introduit la convention selon laquelle les axes de coordonnées Z sont attribués aux axes de liaison S_i et les axes de coordonnées X sont attribués à la normale commune $A_{i, i+1}$.

Cette convention permet de définir le mouvement des liaisons autour d'un axe d'articulations commun S_i par le déplacement de la vis :

$$[Z_i] = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

où θ_i est la rotation autour de X et d_i est la glissière le long de l'axe Z, l'un des paramètres pouvant être une constante, en fonction de la structure du robot. Selon cette convention, les dimensions de chaque liaisons de la chaîne en série sont définies par le déplacement de la vis autour de la normale commune $A_{i, i+1}$ de l'articulation S_i à S_{i+1} , qui est donné par :

$$[X_i] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_{i,i+1} & -\sin\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i,i+1} & \cos\alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Ici, α_i , $i + 1$ et $a_{i, i + 1}$ définissent les dimensions physiques du lien en fonction de l'angle mesuré autour et de la distance mesurée le long de l'axe des X. [13]

a. Quatre paramètres : Les quatre paramètres de transformation suivants sont appelés paramètres D-H [13].

d : Translation le long de z_{i-1} , et la distance entre x_{i-1} et x_i .

θ : Rotation autour de z_i , et l'angle entre x_{i-1} et x_i .

a : Translation autour de x_i , et la distance entre z_{i-1} et z_i .

α : Rotation autour de x_i , et l'angle entre z_i et z_{i-1} .

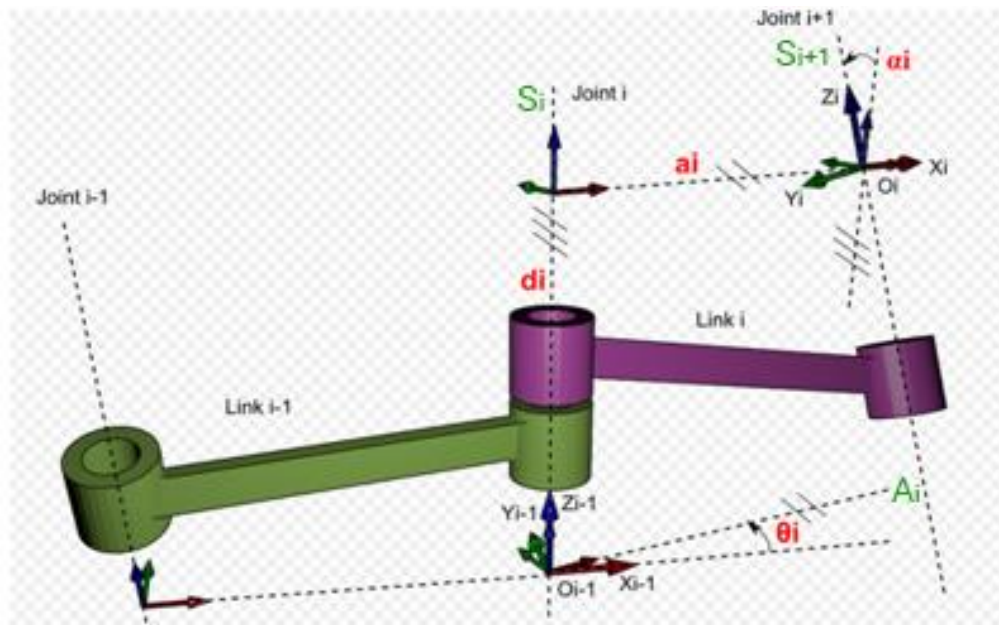


Figure 17: Paramètres DH, axe des articulations et représentation normale commune.

Commune de séparer un déplacement de la vis dans le produit d'une translation pure le long d'une ligne et d'une rotation pure autour de la ligne, de sorte que :

$$[Z_i] = \text{trans}_{z_i}(d_i) \text{Rot}_{z_i}(\theta_i) \quad (2.23)$$

Et :

$$[X_i] = \text{trans}_{x_i}(a_{i,i+1}) \text{Rot}_{x_i}(\alpha_{i,i+1}) \quad (2.24)$$

Notez que ceci est le produit de deux déplacements de vis. Les matrices associées à ces opérations sont :

$$\text{trans}_{z_{i-1}}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

$$\text{Rot}_{z_i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\text{trans}_{x_i}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

$$\text{Rot}_{x_i}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Cela donne :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & R & & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Où R est la sous-matrice 3 × 3 décrivant la rotation et t la sous-matrice 3 × 1 décrivant la translation [13]

2.3.3 Application sur le robot choisi

Considérons maintenant le manipulateur 3 DDL représenté symboliquement par la figure

18

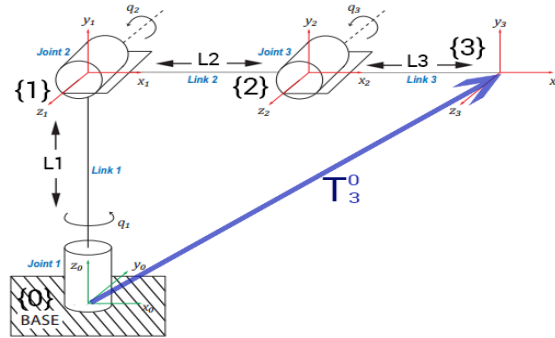


Figure 18:Liens, articulations, cadres des coordonnées et vecteur de transformation sur un manipulateur de coude à 3 degrés de liberté.

i	θ_{i-1}	d_{i-1}	a_i	α_i
1	q_1	l_1	0	$\pi/2$
2	q_2	0	l_2	0
3	q_3	0	l_3	$-\pi/2$

Tableau 1: DH paramètres pour manipulateur de coude à 3 liaisons.

On a :

$$T_3^0 = [T_1^0] [T_2^1] [T_3^2]$$

Donc :

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & l_3 c_3 \\ s_3 & 0 & c_3 & l_3 s_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_{23}c_1 & -s_1 & -s_{23}c_1 & c_1(l_3c_{23} + l_2c_2) \\ c_{23}s_1 & c_1 & -s_{23}s_1 & s_1(l_3c_{23} + l_2c_2) \\ s_{23} & 0 & c_{23} & l_1 + l_3s_{23} + l_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Et nous pouvons en tirer :

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} c_{23}c_1 & -s_1 & -s_{23}c_1 \\ c_{23}s_1 & c_1 & -s_{23}s_1 \\ s_{23} & 0 & c_{23} \end{bmatrix} \quad (2.30.1) \quad \text{et} \quad t_3^0 = \begin{bmatrix} c_1(l_3c_{23} + l_2c_2) \\ s_1(l_3c_{23} + l_2c_2) \\ l_1 + l_3s_{23} + l_2s_2 \end{bmatrix} \quad (2.30.2)$$

De noter que nous avons :

$$\begin{aligned} c_{23} &= \cos(q_2 + q_3) \quad , \quad c_1 = \cos(q_1) \quad , \quad c_2 = \cos(q_2) \\ s_1 &= \sin(q_1) \quad , \quad s_{23} = \sin(q_2 + q_3) \\ \cos(q_2 + q_3) &= c_2c_3 - s_2s_3 \quad , \quad \sin(q_2 + q_3) = s_2c_3 + c_2s_3 \end{aligned}$$

2.4 Cinématique différentielle

2.4.1 Dérivation du Jacobien

En analyse vectorielle, la matrice jacobienne est une matrice associée à une fonction vectorielle en un point donné. Son nom vient du mathématicien Charles Jacobi. Le déterminant de cette matrice, appelé jacobien, joue un rôle important dans la résolution de problèmes non linéaires. La dérivée temporelle des équations cinématiques donne le jacobien du robot, qui relie les vitesses des articulations à la vitesse linéaire et angulaire de l'effecteur terminal. Le robot jacobien aboutit à un ensemble d'équations linéaires reliant les vitesses des articulations aux six vecteurs formés à partir de la vitesse angulaire et linéaire de l'effecteur terminal.

α . Vitesse angulaire : Considérez que la vitesse angulaire est notée ω . Maintenant, lorsqu'un corps rigide se déplace dans une rotation pure autour d'un axe fixe, chaque point du corps se déplace dans un cercle. Les centres de ces cercles sont situés sur l'axe de rotation.

Lors de la rotation du corps, une perpendiculaire à partir de n'importe quel point du corps par rapport à l'axe balaie un angle θ , cet angle est identique pour chaque point du corps. [14] La vitesse angulaire ω par rapport à un cadre d'articulation est exprimée par sa vitesse angulaire et son axe de rotation et peut être écrite ainsi :

$\omega = \hat{Z}\dot{q}$, avec : \hat{Z} est le vecteur unitaire qui décrit l'axe de rotation de l'articulation, indique que :

$$\hat{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Pour un robot manipulateur, on considère ω la vitesse angulaire de l'effecteur terminal, cette vitesse angulaire est la somme vectorielle de la vitesse angulaire fournie de chaque articulation exprimée par rapport à un repère coordonné commun, dans notre cas le repère coordonné de base, et tous les axes de rotation doivent être représentés dans le cadre de base, ω peut être exprimés par :

$$\omega = \sum_{i=1}^n Z_i \dot{q}_i \quad (2.32)$$

Nous savons que Z_i est l'axe de rotation de la $i^{\text{ème}}$ articulation exprimé dans le cadre de base (cadre $\{0\}$), nous pouvons donc l'écrire.

$$Z_i = {}^0R_i \hat{Z} \quad (2.33)$$

En remplaçant Z_i dans (1.32), devient :

$$\omega = [{}^0R_1 \hat{Z} \quad {}^0R_2 \hat{Z} \quad \dots \quad {}^0R_n \hat{Z}] * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Et nous pouvons écrire :

$$\omega = J_\omega \dot{q} \quad (2.35)$$

Ce qui nous donne :

$$J_\omega = [{}^0R_1 \hat{Z} \quad {}^0R_2 \hat{Z} \quad \dots \quad {}^0R_n \hat{Z}] \quad (2.36)$$

Et J_ω est la dérivée de la vitesse angulaire.

b. Vitesse linéaire : Nous considérons maintenant la vitesse linéaire d'un point attaché rigidement à un cadre en mouvement.

Supposons le point t^0 est rigidement attaché au cadre $o_1 x_1 y_1 z_1$, et que $o_1 x_1 y_1 z_1$ est en rotation par rapport au cadre $o_0 x_0 y_0 z_0$, de sorte que nous pouvons exprimer la vitesse linéaire du cadre {1} par rapport à {0}, et elle peut être écrite ainsi : [14]

$$V = \frac{d t^0}{dt} = \frac{d t^0}{d q_1} \frac{d q_1}{dt} = \frac{d t^0}{d q_1} \dot{q}_1$$

En cas de robot manipulateur, t_n^0 est le vecteur de la position de l'effecteur terminal, les vitesses linéaires peuvent être ajoutées vectorielles et deviennent :

$$V = \left[\frac{d t_n^0}{d q_1} \dot{q}_1 + \frac{d t_n^0}{d q_2} \dot{q}_2 + \dots + \frac{d t_n^0}{d q_n} \dot{q}_n \right] \quad (2.37)$$

Et ça devient :

$$V = \left[\begin{array}{ccc} \frac{d t_n^0}{d q_1} & \frac{d t_n^0}{d q_2} & \dots & \frac{d t_n^0}{d q_n} \end{array} \right] * \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Et nous pouvons l'écrire comme :

$$V = J_V \dot{q} \quad (2.39)$$

Par conséquent :

$$J_V = \left[\begin{array}{ccc} \frac{d t_n^0}{d q_1} & \frac{d t_n^0}{d q_2} & \dots & \frac{d t_n^0}{d q_n} \end{array} \right] \quad (2.40)$$

Et J_v est la dérivée de la vitesse linéaire.

c. Combinant les jacobiens angulaires et linéaires :

La matrice jacobienne exprimée en combinant jacobien, linéaire et angulaire. [14]

On a :

$$\begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_V \\ J_\omega \end{pmatrix} \dot{q} \quad (2.41)$$

Et nous pouvons écrire :

$$J = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Et J la matrice jacobienne du manipulateur.

2.4.2 Application sur le robot choisi

À partir de ce que nous avons étudié précédemment, nous pouvons obtenir :

$$V = J_v \dot{q} \quad ; \quad \omega = J_\omega \dot{q} \rightarrow \begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_v \\ J_\omega \end{pmatrix} \dot{q} \rightarrow J = \begin{pmatrix} J_v \\ J_\omega \end{pmatrix}$$

Et nous savons de (2.41) Cette :

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{d t_3^0}{d q_1} & \frac{d t_3^0}{d q_2} & \frac{d t_3^0}{d q_3} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Nous avons d'abord percé le vecteur de position de notre robot (2.30.2)

$$t_3^0 = \begin{bmatrix} c_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) \\ s_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) \\ l_1 + l_3 s_{23} + l_2 s_2 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\frac{d t_3^0}{d q_1} = \begin{bmatrix} -s_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) \\ c_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\frac{d t_3^0}{d q_2} = \begin{bmatrix} -c_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2) \\ -s_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2) \\ l_3 c_{23} + l_2 c_2 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\frac{d t_3^0}{d q_3} = \begin{bmatrix} -l_3 c_1 s_{23} \\ -l_3 s_1 s_{23} \\ l_3 c_{23} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

De là :

$$J_v = \begin{bmatrix} -s_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) & -c_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2) & -l_3 c_1 s_{23} \\ c_1(l_3 c_{23} + l_2 c_2) & -s_1(l_3 s_{23} + l_2 s_2) & -l_3 s_1 s_{23} \\ 0 & l_3 c_{23} + l_2 c_2 & l_3 c_{23} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Et nous savons d'après (1.36) que le jacobien angulaire est :

$$J_\omega = [{}^0R\hat{Z} \quad {}^0R\hat{Z}_2 \quad {}^0R\hat{Z}_3] \quad (2.49)$$

Où :

$$J_\omega = [Z_0 \quad Z_1 \quad Z_2] \quad (2.50)$$

Avec :

$$Z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

Z_1 : le 3eme colon de la matrice T_1^0 .

$$Z_1 = \begin{bmatrix} s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Z_2 : le 3eme colon de la multiplication des 2 matrices T_1^0 et T_2^1 .

$$Z_2 = \begin{bmatrix} s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$J_\omega = [Z_0 \quad Z_1 \quad Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & s_1 & s_1 \\ 0 & -c_1 & -c_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

En combinant les deux jacobiens on obtient :

$$J = \begin{bmatrix} -s_1(l_3c_{2.3} + l_2c_2) & -c_1(l_3s_{2.3} + l_2s_2) & -l_3s_{2.3}c_1 \\ c_1(l_3c_{2.3} + l_2c_2) & -s_1(l_3s_{2.3} + l_2s_2) & -l_3s_{2.3}s_1 \\ 0 & l_3c_{2.3} + l_2c_2 & l_3c_{2.3} \\ 0 & s_1 & s_1 \\ 0 & -c_1 & -c_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

2.5 Cinématique inverse

Le problème de la cinématique inverse est étant donné la position et l'orientation du cadre de l'outil, et de calculer les angles des articulations correspondants. Le problème de la cinématique inverse est beaucoup plus complexe que le problème de la cinématique directe, dans lequel une solution unique de forme fermée existe toujours plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour obtenir la cinématique inverse.

2.5.1 L'approche géométrique

Cette méthode est utilisée pour résoudre les angles d'articulation inconnue requise pour le positionnement autonome d'un bras robotisé. Une pléthore de processus mathématiques complexes est réduite en utilisant la trigonométrie de base dans la modélisation du bras robotique.

2.5.2 Application sur le robot choisi

Comme nous l'avons mentionné, nous devons trouver les angles inconnus pour chaque articulation, et dans notre cas, nous avons 3 articulations, nous devons donc trouver (q_1, q_2, q_3) pour cela nous avons utilisé des équations trigonométriques de base.

Pour la première articulation d'angle q_1 , nous avons :

$$q_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.56)$$

Et pour le 3eme angle q_3 :

Et nous avons : $\Delta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.57)$

Et : $r^2 = \Delta^2 + z_1^2 \quad (2.58)$

D'après la loi de coslaw :

$$r^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos\alpha \quad (2.59)$$

De là : $\cos \alpha = \frac{(l_2^2 + l_3^2 - r^2)}{2l_2l_3} \quad (2.60)$

Et: $q_3 = \pi - \alpha \quad (2.61)$

et: $\cos q_3 = -\cos\alpha \quad (2.62)$

alors: $\cos q_3 = -\frac{(l_2^2 + l_3^2 - r^2)}{2l_2l_3} \quad (2.63)$

De là: $q_3 = \arccos\left(-\frac{(l_2^2 + l_3^2 - r^2)}{2l_2l_3}\right) \quad (2.64)$

Avec : $r^2 = x^2 + y^2 + (z_c - l_1)^2 \quad (2.65)$

Et pour la 2eme angle q_2 :

$$\cos(\gamma) = \frac{\Delta}{r} \Leftrightarrow \gamma = \cos^{-1}(\Delta/r) \quad (2.66)$$

d'après la loi de coslaw:

$$l_3^2 = l_2^2 + r^2 - 2l_2r \cos B \quad (2.67)$$

De là
$$B = \cos^{-1} \frac{(l_2^2 + l_3^2 - r^2)}{2l_2l_3} \quad (2.68)$$

$$q_2 = \Upsilon - B \quad (2.69)$$

$$q_2 = \cos^{-1}(\Delta/r) - \cos^{-1} \frac{(l_2^2 + r^2 - l_3^2)}{2l_2r} \quad (2.70)$$

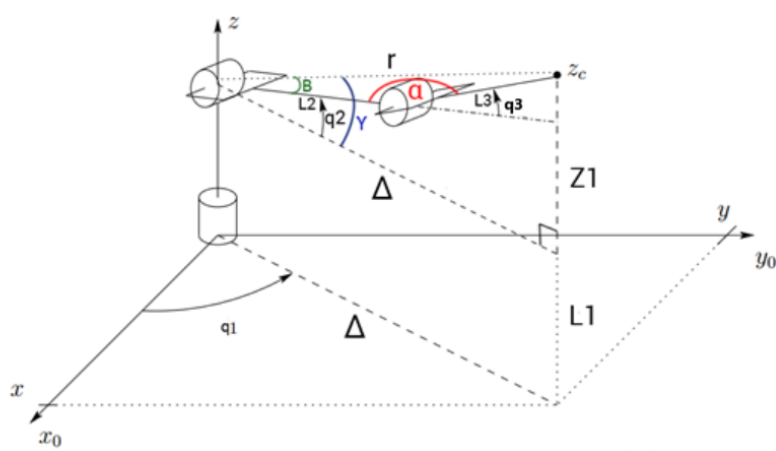


Figure 19: angles et distances d'un manipulateur coude à 3 degrés de liberté

2.6 Conclusion

Le modèle géométrique direct du robot nous permet de trouver les coordonnées opérationnelles en donnant les informations de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires.

Le problème inverse consisté à calculer les coordonnées articulaires correspondantes à une location de l'organe terminal.

À travers ce chapitre on acquiert déjà une bonne connaissance sur l'étude théorique du robot, Il nous reste maintenant d'attaquer le côté pratique pour en savoir utiliser une multitude de commande sur le robot. Ce côté va être abordée dans le troisième chapitre qui est le plus important pour notre projet.

Chapitre 3 Résultats de simulations

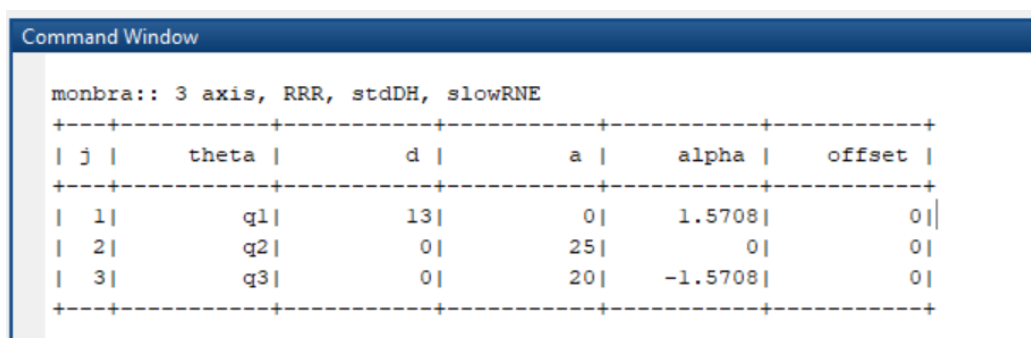
3.1 Implémentation et simulation sur Matlab

D'après le chapitre précédent on a calculé les paramètres D-H(Denavit et Hartenberg) dans le cinématique direct, nous simulons ces paramètres sur Matlab (toolbox) utilisant la méthode de Peter Corke .

En choisissant les paramètres du manipulateur comme suit :

```
l1=13; l2=25;l3=20;
L_1 = Link ('d',l1, 'a', 0, 'alpha',pi/2);
L_2 = Link ('d',0, 'a',l2 , 'alpha', 0);
L_3 = Link ('d', 0, 'a', l3, 'alpha',-pi/2 );
monbra=SerialLink([L_1 L_2 L_3], 'name', 'monbra')
T=monbra.fkine([0 0 0])
a=[-50,50,-50,50,-20,70];
m=[q1 q2 q3];
monbra.plot(m, 'workspace', a)
```

Ce programme pour donner la table des paramètres de DH.



```
Command Window
monbra:: 3 axis, RRR, stdDH, slowRNE
+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |      theta |      d |      a |      alpha |      offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |      q1 |      13 |      0 |      1.5708 |      0 |
| 2 |      q2 |      0 |      25 |      0 |      0 |
| 3 |      q3 |      0 |      20 |     -1.5708 |      0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+
```

Tableau 2:la table des paramètres de DH.

Pour calculer la matrice de transformation globale, nous utilisons l'instruction suivante :

```
fkine([q1 q2 q3 ]);
```

```
T=monbra.fkine([q1 q2 q3 ] ) ;
```

Pour déterminer l'espace articulaire de travail, nous utilisons les instructions suivantes :

```
a=[-50,50,-50,50,-20,70];  
m=[q1 q2 q3];  
monbra.plot(m,'workspace',a)
```

1ere cas :

Nous supposons que les 3 angles de rotation à égale 0 donc :

```
T=monbra.fkine([ 0 0 0 ] ) ;  
a=[-45,45,-45,45,-15,60];  
m=[0 0 0];  
monbra.plot(m,'workspace',a)
```

Les résultats obtenus sont :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 45 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 13 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 20:la matrice transformation homogènes

La matrice de rotation globale est :

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Le vecteur de position que donner (x,y,z) est :

$$t_3^0 = \begin{bmatrix} 45 \\ 0 \\ 13 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La simulation des deux cas est :

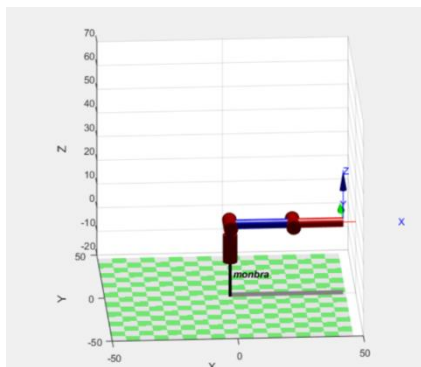


Figure 21:vue sur les 3 axes

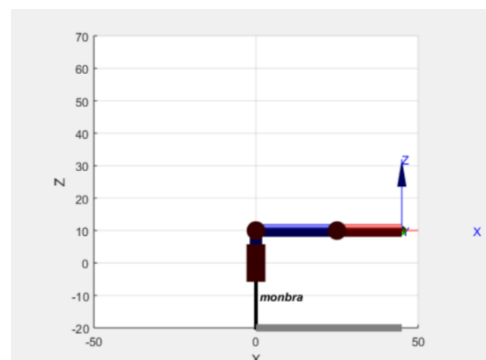


Figure 22:vue sur les 2 axes (x.z)

2eme cas :

Maintenant en supposant que les valeurs des angles sont :

$$q_1 = -\pi/2, q_2 = -\pi/2, q_3 = 0$$

```
T=monbra.fkine([ q1 q2 q3 ]) ;
a=[-50, 50, -50, 50, -20, 70] ;
m=[q1 q2 q3] ;
monbra.plot(m, 'workspace', a)
```

Les résultats obtenus sont :

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 58 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 23:la matrice transformation homogènes

La matrice de rotation globale est :

$$R_3^0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Le vecteur de position que donner (x,y,z) est :

$$t_3^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 58 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

La simulation des deux cas est :

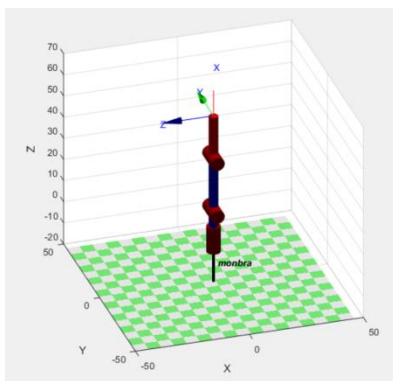


Figure 24:vue sur les 3 axes

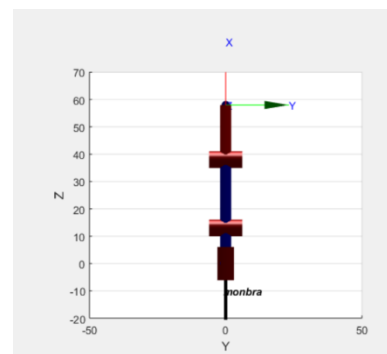


Figure 25:vue sur les 2 axes (y.z)

3.2 Contrôle du bras manipulateur

Le problème du contrôle pour les manipulateurs de robot est le problème de détermination de l'historique temporel des entrées de liaison nécessaires pour amener l'effecteur final à exécuter un mouvement commandé.

De nombreuses techniques et méthodologies de contrôle peuvent être appliquées au contrôle des manipulateurs.

3.2.1 Contrôleur PID

Dans cette section, nous examinons le type de stratégie de contrôle le plus simple, à savoir le contrôle conjoint indépendant. Dans ce type de contrôle, chaque axe du manipulateur est contrôlé en tant que système à entrée/sortie unique.

Un contrôleur proportionnel – intégral – dérivé (contrôleur PID) est un mécanisme de boucle de rétroaction (feedback loop), couramment utilisé dans les systèmes de contrôle industriels. Un contrôleur PID calcule en permanence une valeur d'erreur $e(t)$ comme étant la différence entre une consigne désirée $r(t)$ et une variable de processus mesurée $y(t)$, et applique une correction basée sur les termes proportionnel, intégral et dérivé (parfois notée P, I et D) qui donnent leur nom au type de contrôleur.

- **Action proportionnelle** : l'erreur est multipliée par une constante k_p .
- **Action intégrale** : L'erreur est intégrée sur un intervalle de temps, puis multipliée par une constante k_i .
- **Action dérivée** : L'erreur est dérivée par rapport au temps, puis multipliée par une constante k_d .

3.2.2 Les boucles

a. Boucle ouvert : La commande en boucle ouverte consiste à ajuster la commande directement à partir de la consigne sans tenir compte de la valeur du signal de sortie.

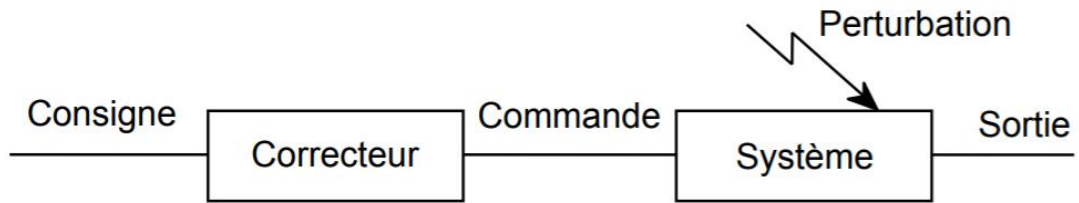


Figure 26:schéma bloc en boucle ouvert

b. Boucle fermée : la commande en boucle fermée est une forme de contrôle d'un système qui intègre la réaction de ce système.

- **Objectifs**

- rendre le système bouclé robuste aux variations du système
- rejeter les perturbations

- **Principe**

- mesurer la sortie pour ajuster la commande par un régulateur

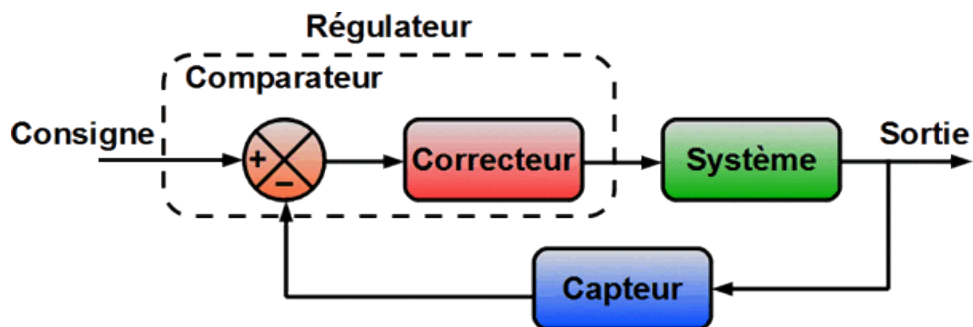


Figure 27:schéma bloc en boucle fermée

3.2.3 Correcteur proportionnel k_p

L'erreur est multipliée par une constante k_p .

$$E(t) = R(t) - y(t)$$

$$U(t) = k_p * E(t)$$

Avec :

$e(t)$: l'erreur

$R(t)$: consigne désirée

$y(t)$: variable de processus mesuré

Plus k_p est grand, plus la réponse est rapide mais on obtient une Erreur statique.

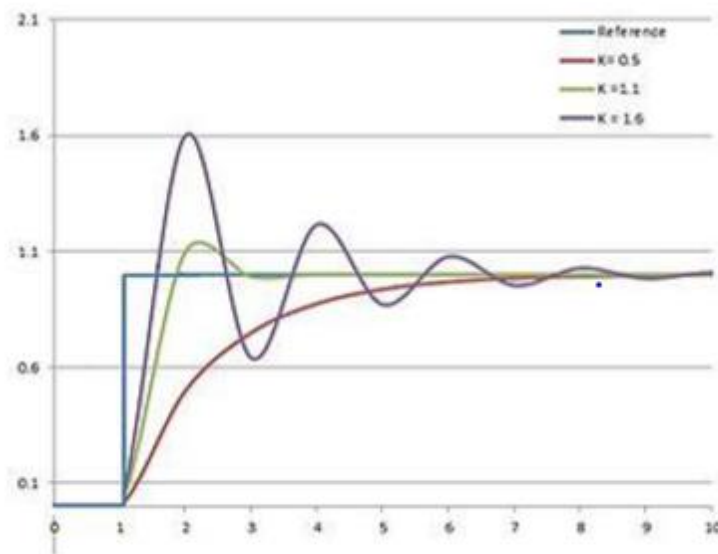


Figure 28: la réponse indicielle de correction proportionnelle

3.2.4 Correcteur dérivateur k_d

L'erreur est dérivée par rapport au temps, puis multipliée par une constante

k_d

Avec :

$$E(t) = R(t) - y(t)$$

$$U(t) = k_d * \frac{de(t)}{dt}$$

- Réduit le dépassement et le temps de stabilisation mais aussi notre système sera sensible au bruit.
- Amélioration de la rapidité.

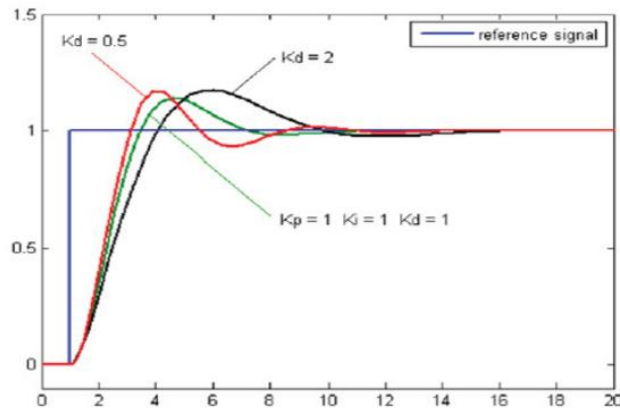


Figure 29: la réponse indicielle de correction dérivateur.

3.2.5 Correcteur intégrateur k_i

L'erreur est intégrée sur un intervalle de temps, puis multipliée par une constante k_i .

$$E(t) = R(t) - y(t)$$

$$U(t) = k_i * \int e(t) dt$$

Le corriger l'erreur statique, Plus Qui est élevé, plus l'erreur statique est corrigée.

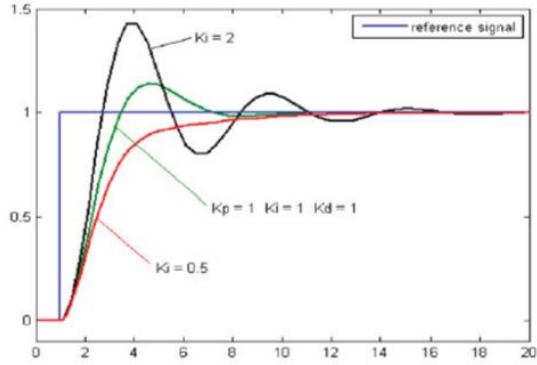


Figure 30: la réponse indicielle de correction intégrateur

3.2.6 Correcteur proportionnel dérivateur intégrateur

La formule générale de correcteur PID sont :

$$u(t) = k_p * e(t) + k_d * \frac{de(t)}{dt} + k_i * \int e(t)dt \quad (3.1)$$

Avec $e(t)=r(t)-y(t)$

Où k_p, k_i and k_d , tous non négatifs, désignent les coefficients des termes proportionnels, intégral et dérivé. Dans ce modèle :

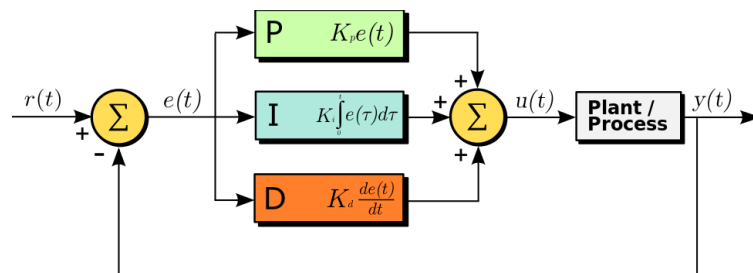


Figure 31: Schéma fonctionnel d'un contrôleur PID dans une boucle de retour.

Pour un robot manipulateur en série, nous avons appliqué une loi de contrôle PID pour chaque articulation, en considérant que les positions souhaitées des articulations sont constantes, ce qui est communément appelé contrôle indépendant des articulations.

3.3 Conclusion

Dans ce projet, nous avons mis en œuvre une méthode efficace de contrôle d'un manipulateur avec des paramètres dynamiques inconnus. Le PID utilisé pour le contrôle de position en tant que contrôleur indépendant pour chaque articulation.

Chapitre 4 Conception et Réalisation

4.1 Introduction

Généralement, la fonction d'un robot manipulateur est de situer dans l'espace son organe terminal, la commande d'un bras manipulateur nécessite la commande de ses articulations une à une, afin de réaliser une tâche.

4.2 Description du fonctionnement

Le robot a des tâches précises à faire à l'aide de trois moteurs, il démarre d'un point A vers un point B en effectuant des rotations à l'aide du programme contenu dans la carte Arduino, les moteurs s'actionnent dès l'arrivée au point précis. Cet engin suit une trajectoire prédéfinie.

4.3 Matériels utilisés

4.3.1 Partie électronique

a. Servomoteur

a.1 Définition : 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.



Figure 32: Servomoteur

a.2 Composition d'un servomoteur : Plus précisément, le servomoteur est composé d'un moteur à courant continu, un réducteur et d'un axe solidaire d'un plateau de rotation, la plupart du temps en forme de croix ou de cercle. Un potentiomètre est relié à l'axe, la résistance étant proportionnelle à la position, la carte électronique intégrée peut réaliser un asservissement en tentant d'annuler à chaque instant l'écart avec la commande.

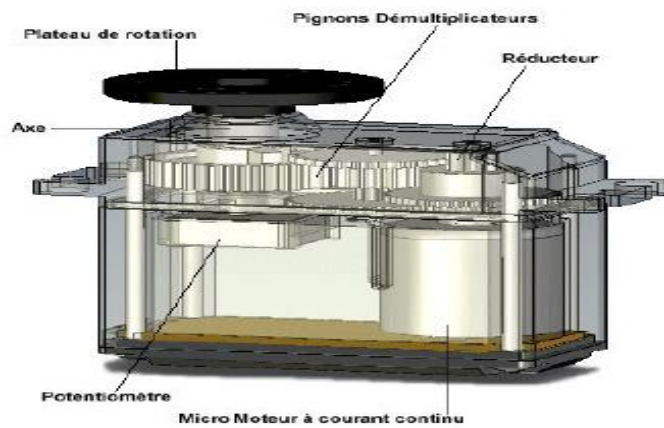


Figure 33: Composants de servomoteur

b. Carte Arduino Méga 2560

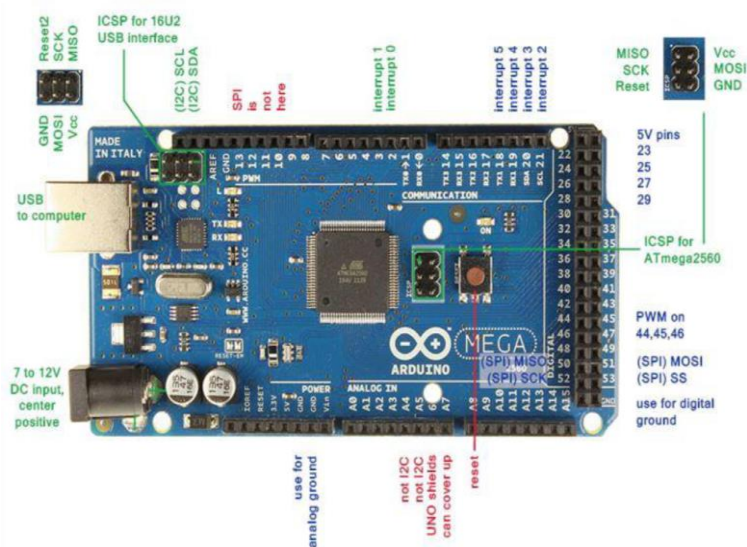


Figure 34: Carte Arduino MEGA 2560

La carte Arduino Mega 2560 est une carte à microcontrôleur basée sur un ATmega2560

Cette carte dispose de :

- ✦ 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)).
- ✦ 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques).
- ✦ 4 UART (port série matériel).
- ✦ Un quartz 16Mhz.
- ✦ Une connexion USB.
- ✦ Un connecteur d'alimentation jack.
- ✦ Un connecteur ICSP (programmation "in-circuit").
- ✦ Un bouton de réinitialisation (reset).

Microcontrôleur	ATmega2560
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 (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 bootloader
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	8 KB
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	4 KB
Vitesse d'horloge	16 MHz

Tableau 3:les caractéristiques de la carte Arduino Méga

c. Moteur a courant continue (MCC) avec réducteur : Un appareil à courant continu est un appareil électrique, Les moteurs courant continu sont des convertisseurs de puissance : Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique, lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement, On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur, Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur.

- ✦ En mode « moteur », l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.
- ✦ En mode « générateur » ou « dynamo », l'énergie mécanique est convertie en une énergie électrique capable de se comporter comme un frein.



Figure 35:MCC

c.1 Principe de fonctionnement : Le moteur à courant continu se compose de :

- ✦ L'inducteur (ou du stator).
- ✦ L'induit (ou du rotor).
- ✦ Collecteur et des balais.

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent, il crée un champ magnétique

(flux d'excitation) de direction Nord-Sud. Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur. D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner.

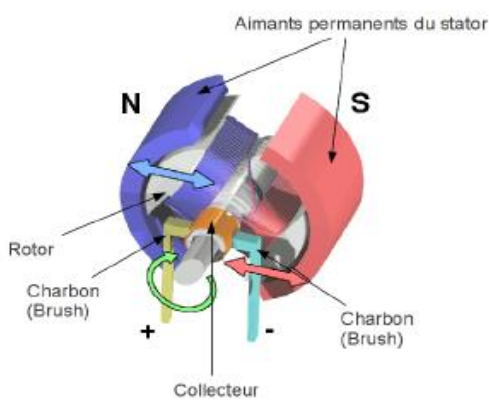


Figure 36: Les composants de MCC

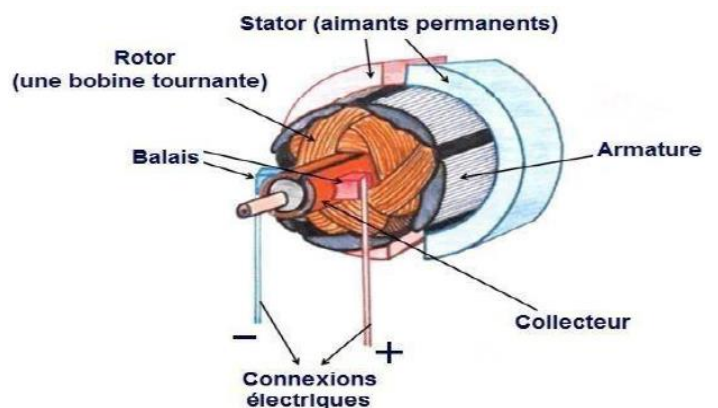


Figure 37: Principe de fonctionnement de MCC

d. La carte de puissance : Cette carte a deux fonctions principales. Tout d'abord, elle doit fournir aux autres cartes électroniques, leur tension d'alimentation (0/5V stabilisé). Ensuite elle doit alimenter les moteurs qui permettent au robot de se déplacer. Elle reçoit donc des signaux de commande la carte de protection du port parallèle, deux alimentations externes (batteries) et produit une tension d'alimentation stabilisée et deux tensions pour les moteurs (comprises entre -12 et +12V).

d.1 Constituants :

d.1.1 2x ponts en H :

Le pont en H est une structure électronique servant à contrôler la polarité aux bornes d'un dipôle. Il est composé de quatre éléments de commutation généralement disposés schématiquement en une forme de H d'où le nom. Les commutateurs peuvent être des relais, des transistors, ou autres éléments de commutation en fonction de l'application visée.

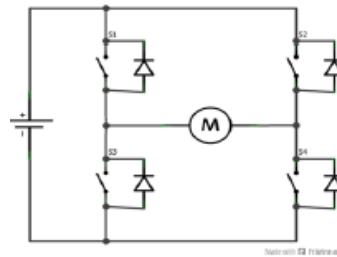


Figure 38: Pont en H

d.1.2 Le principe de fonctionnement :

Les interrupteurs fonctionnent deux par deux. Le A est associé au D et le B est associé au C. Dans le schéma ci-dessus, rien ne se passe car tous les interrupteurs sont ouverts (ils ne laissent pas passer le courant). Le moteur est arrêté. Voyons maintenant ce qui arrive lorsqu'on actionne en même temps les interrupteurs A et D (schéma de gauche), ou les interrupteurs B et C (schéma de droite) :

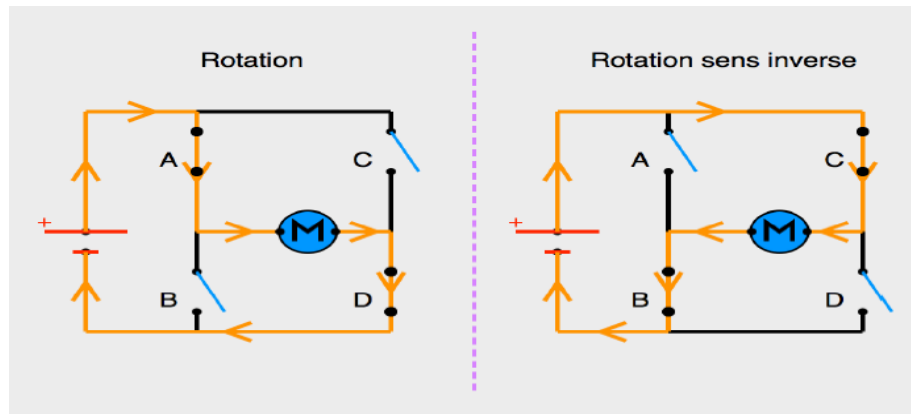


Figure 39 : Sens du courant en fonction de l'état des interrupteurs.

- ✦ Sur le schéma de gauche : les interrupteurs A et D sont fermés. Le courant entre par la patte gauche du moteur et sort par sa droite. Le moteur tourne.
- ✦ Sur le schéma de droite : les interrupteurs B et C sont fermés. Le courant entre par la patte droite du moteur et sort par sa gauche. Le moteur tourne donc dans le sens inverse.

d.4 Potentiomètre : Appelé aussi "Résistance variable", et parfois Rhéostat, Le potentiomètre peut être considéré comme une résistance dont on peut faire varier la valeur ohmique entre deux points, par simple action mécanique sur un axe rotatif ou rectiligne.

Il est constitué d'une piste résistive sur laquelle entre en contact un curseur mobile, qui peut se promener d'une extrémité à l'autre de la piste.

Il existe plusieurs formes et tailles de potentiomètres, mais ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

Potentiomètres ajustables et potentiomètres de tableau.

Chacune de ces catégories peut être subdivisée à son tour en plusieurs familles, selon la forme du potentiomètre, la courbe de variation,

Le nombre de tours pouvant être effectués, le matériau utilisé pour réaliser la piste résistive.

Un potentiomètre simple possède souvent trois broches, mais il en existe avec plus de broches. On peut n'utiliser que deux broches sur les trois (montage en résistance variable) ou utiliser les trois broches (Montage potentiométrique).



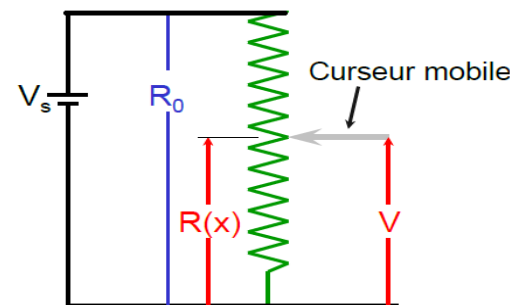
Figure 40: Potentiomètre

d.4.1 Principe de fonctionnement : On sait que la résistance électrique d'un matériau est directement proportionnelle à la longueur de celui-ci. On peut donc exploiter ceci pour en faire un capteur de déplacement. C'est le capteur potentiométrique. L'objet est fixé à un curseur mobile :

$$V = V_s \frac{X}{D}$$

où : - X : position du curseur.

- D : longueur totale de la résistance.



e. Encodeur : Un encodeur est un dispositif électromécanique qui génère un signal électrique en fonction de la position ou du déplacement de l'élément mesuré. En robotique mobile, les encodeurs rotatifs sont utilisés pour mesurer le déplacement (sens et vitesse de rotation) de chacune des roues du robot. On ne parlera pas des encodeurs linéaires ici mais leur fonctionnement est semblable.



Figure 41 : Encodeur

Un encodeur permet d'obtenir une information en quasi-temps réel sur la position et vitesse du moteur et donc d'appliquer des corrections (on parle de boucle de contrôle) si le comportement du moteur n'est pas conforme à l'ordre qu'on lui a transmis, ce qui arrive fréquemment en fonction de la pente, de la capacité de la roue à agripper sur le sol (la roue tourne plus vite si elle patine), de la charge utile.

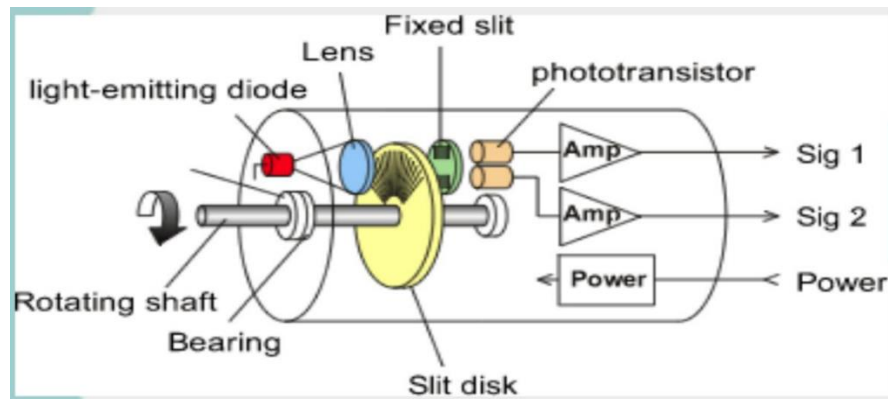


Figure 42: Encodeur

e.1 Mode de fonctionnement :

La plupart des encodeurs pour robots utilisent des capteurs optiques (mais il existe des encodeurs utilisant une information mécanique ou magnétique). L'idée est de placer un disque alternant des zones transparentes et opaques devant un capteur de lumière et de rendre le disque solidaire de l'axe de rotation de la roue. La fréquence d'apparition des zones blanches et noires (ou de tout autre principe offrant un contraste suffisant) devant le capteur de lumière va indiquer la vitesse de rotation. Le schéma suivant présente le principe de fonctionnement basique de l'encodeur :

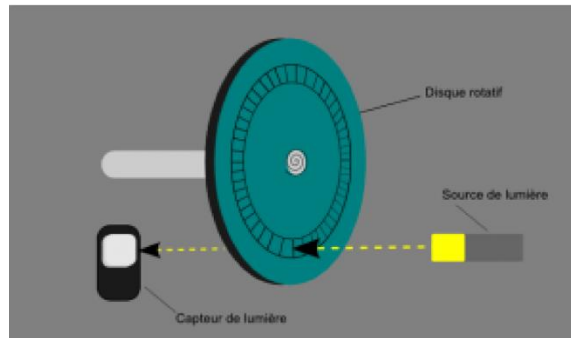


Figure 43:Encodeur

Lorsque le disque tourne, les segments opaques bloquent la lumière alors que les segments transparents la laissent passer. Ceci génère des impulsions d'onde carrée qui peuvent ensuite être interprétées comme position ou mouvement.

Si le fonctionnement précédent indique la vitesse de rotation, il n'indique pas le sens de rotation. Ce problème est résolu dans par l'encodeur en quadrature (l'encodeur en quadrature le nom que l'on donne à l'encodeur rotatif incrémental). L'encodeur en quadrature comporte deux pistes de code dont les secteurs sont décalés de 90 degrés d'une piste à l'autre. Ces deux pistes génèrent deux signaux de sortie. Si le premier signal devance le second alors le disque tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et dans l'autre sens dans le cas contraire. Par conséquent, en mesurant à la fois le nombre d'impulsions et les phases relatives des deux signaux on peut mesurer la position et la direction de la rotation des roues du robot.

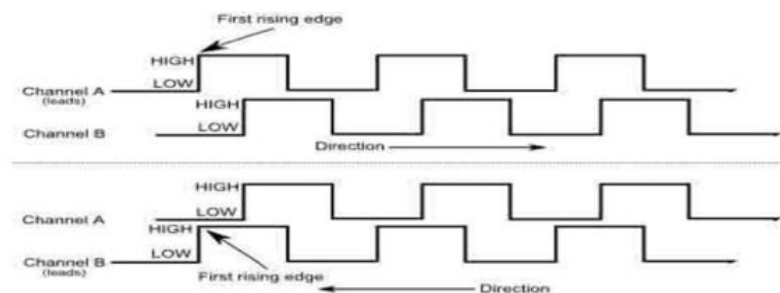


Figure 44:Signal d'encodeur

4.3.2 Partie mécanique

Le but de cette partie est de construire un bras manipulateur capable de se déplacer dans l'espace (3 DDL) pour atteindre un point prédéfini avec des coordonnées XYZ. Ce bras manipulateur doit répondre à des contraintes économiques strictes d'une production à faible coût.

La structure mécanique de ce robot a été conçue pour répondre à quelques préoccupations majeures :

- ✦ Solidité de la structure.
- ✦ La puissance de la motorisation pour doter le robot d'une bonne dynamique.
- ✦ La précision dans le déplacement.

a. Les pièces utilisées dans le bras :

Les pièces montrées ci-dessous sont conçues avec le logiciel de design « Adobe Illustrator CC » des mesures réelles ont été prises afin de faciliter le découpage avec la machine CNC.

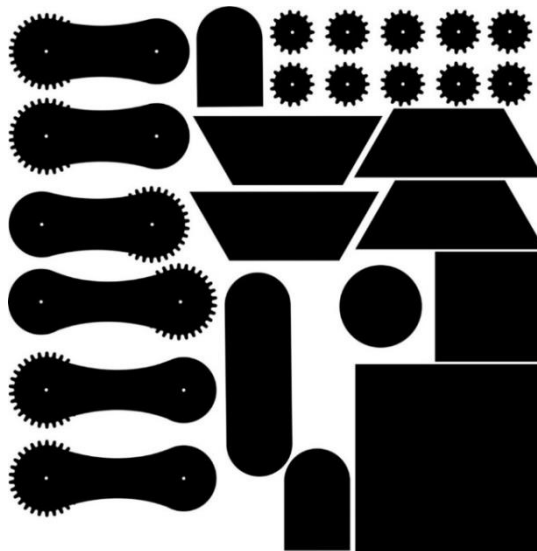
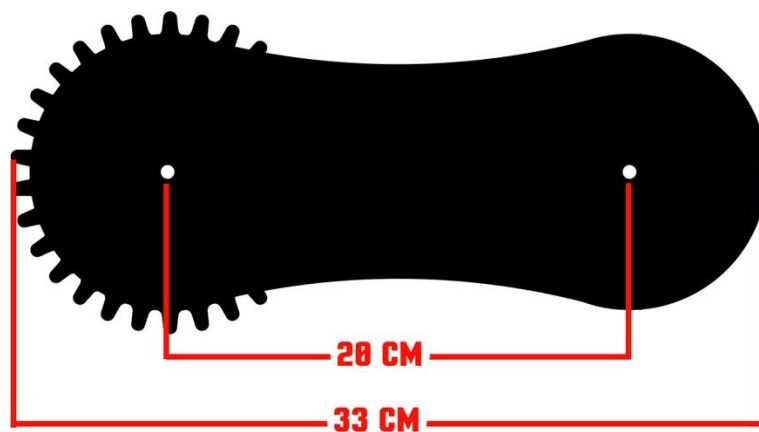
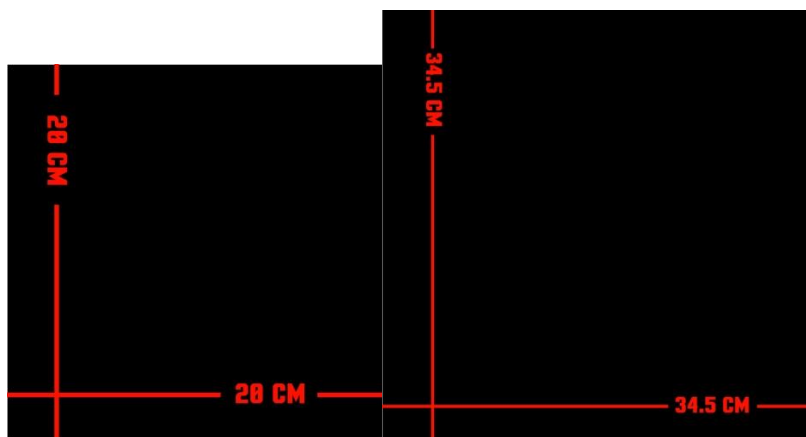
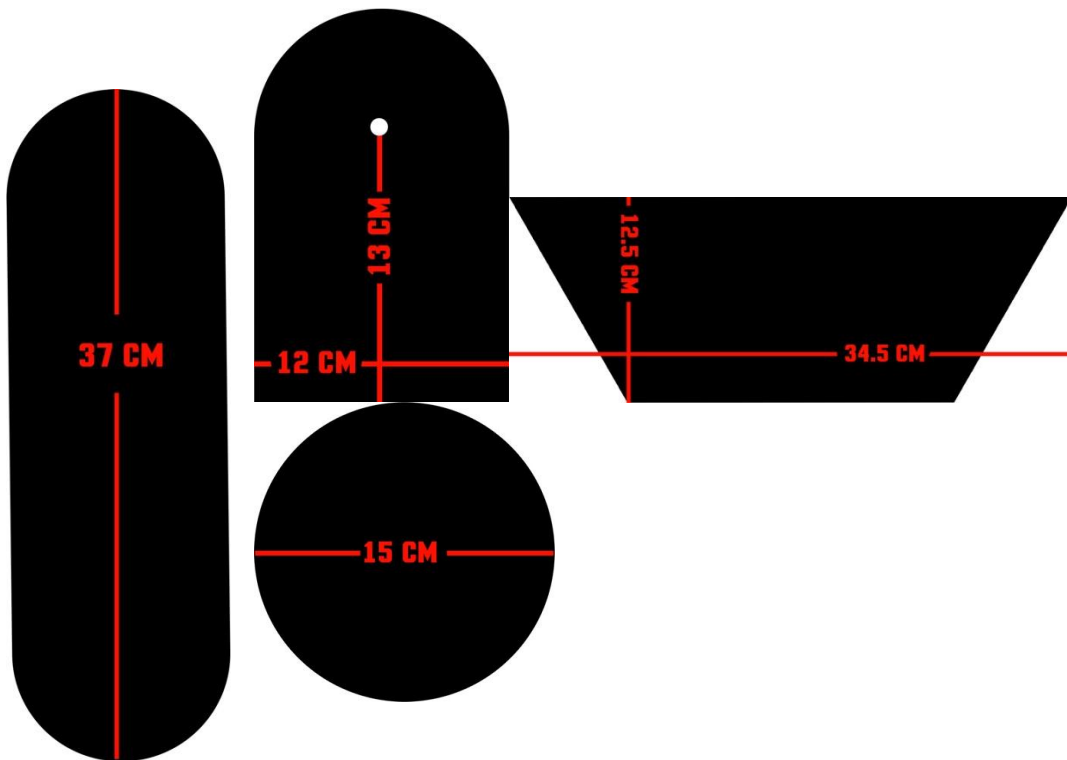


Figure 45:pièces utilisées

NB : Lors de la conception mécanique, des moteurs puissants avec un fort couple ont été favorisés au lieu des pinions qui étaient un peu fragiles.

- LES MESURES DES PIECES :



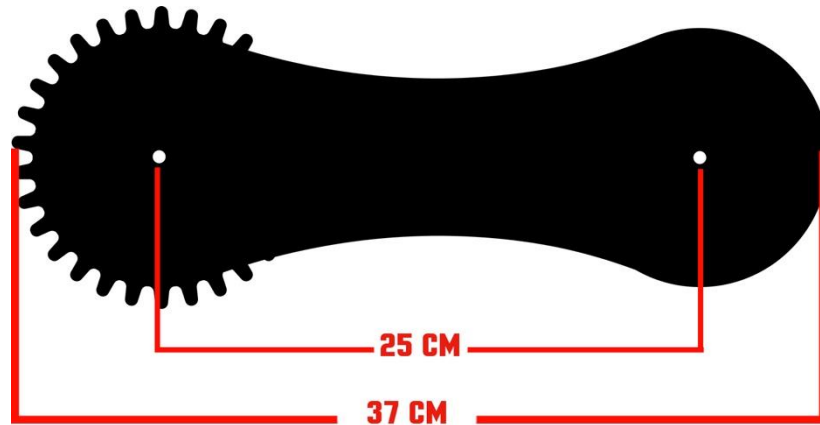


Figure 46:Les dimensions des pièces utilisées

b. La conception du robot (bras) :

La conception du robot (bras) est une phase très importante, Elle doit se faire de façon à répondre aux spécificités de la feuille de route adoptée, tout en assurant le minimum de contraintes aux phases qui en découleront - réalisation, modélisation et commande. Il est donc clair que le succès de celles-ci reposera sur la réussite de la phase de conception.

Dans cette section, nous expliquerons la démarche de conception adoptée, Nous détaillerons les solutions envisagées, et nous justifierons la structure finale à laquelle nous avons abouti.



Figure 47:robot à l'état final

b.1 La base & la première articulation : La partie haute de la base maintient un moteur DC avec un encodeur interne qui fait tourner l'intégralité du robot

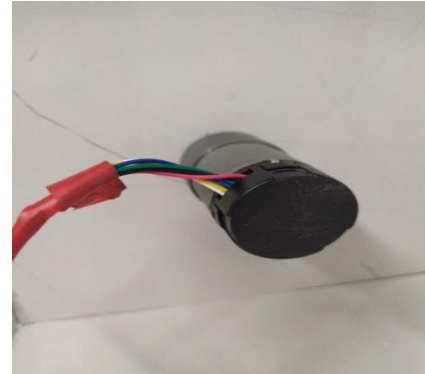
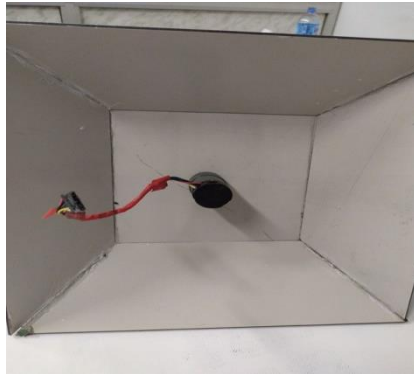


Figure 48:La structure de la base avec le moteur DC à encodeur interne

b.2 Première liaison & deuxième articulation : La première liaison est le passage de la première articulation (Moteur DC avec ENC) vers la deuxième articulation qui-elle possède un moteur DC à fort couple positionné en face à face avec un potentiomètre linéaire (potentiomètre : pour le contrôle du moteur).

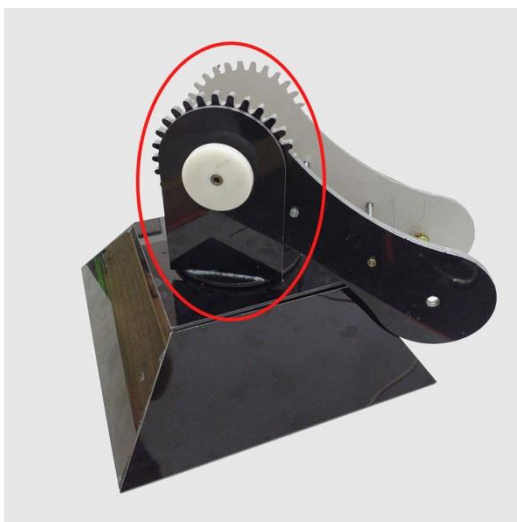


Figure 49:Première liaison du bars



Figure 50:Deuxième articulation du bras

b.3 Deuxième liaison & troisième articulation : La deuxième liaison est le passage de la deuxième articulation (Moteur DC à fort couple) vers la troisième articulation qui-elle possède un autre moteur DC à fort couple positionné en face à face avec un potentiomètre linéaire (potentiomètre : pour le contrôle du moteur).



Figure 51: Deuxième liaison du bras



Figure 52: Troisième articulation du bras

b.4 Troisième liaison & quatrième articulation : La troisième liaison est le passage de la troisième articulation (Moteur DC à fort couple) vers la quatrième articulation qui-elle possède un Servomoteur 180°.

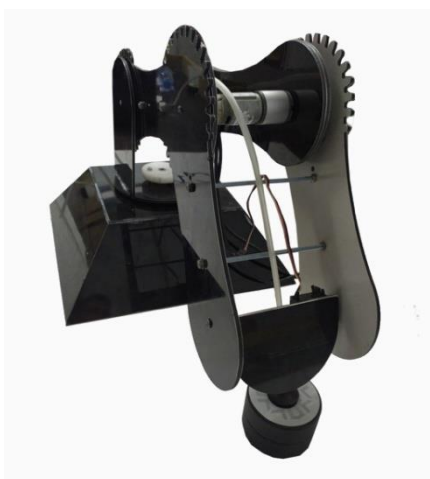


Figure 53: Troisième liaison du bras



Figure 54: quatrième articulation du bras

4.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'expliquer de façon détaillée la stratégie que nous avons suivie afin de réaliser le robot manipulateur, la première étape était de définir les structures proposées, à partir des quelle nous avons choisi la structure de notre bras et dimensionné ses pièces.

Les plans des pièces donnés mettent en évidence leur simplicité, Celle-ci nous a permis de réaliser le robot dans des délais raisonnables ce qui est en fait l'une de nos priorités de conception, ainsi nous avons favorisé l'utilisation des encodeurs et des potentiomètres pour accentuer notre travail et diversifier la méthode de contrôle.

Chapitre 5 Tests et résultats

5.1 Application sur le robot choisi

La réalisation du PID parfait se fait après plusieurs tentatives et modification des paramètres de contrôle (proportionnel, intégrateur, dérivateur). Le contrôle se fait par l'observation des courbes qu'on obtient à partir du déplacement de capteur grâce à la fonction contenue dans le programme.

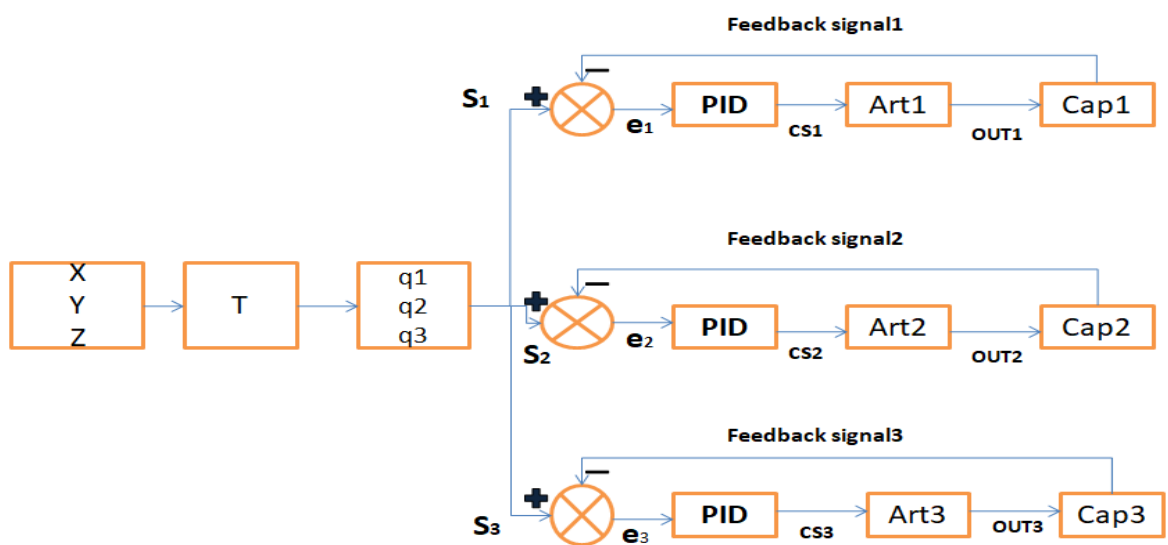


Figure 55:Schéma synoptique du contrôle articulaire indépendant pour le manipulateur.

5.1.1 Définitions des différents composants du schéma

- **X, Y, Z** : Les coordonnées cartésiennes de la position voulue
- **T** : Conversion des coordonnées XYZ en angles en utilisant un model géométrique inverse (Voir chapitre précédent : 2.56 / 2.69 / 2.64)
- **q** : Valeurs des angles après la conversion
- **s** : La consigne, en d'autre terme l'angle final qu'on veut avoir
- **e** : l'erreur obtenue après comparaison entre la valeur mesure par le capteur et l'angle voulu
- **PID** : Correcteur PID
- **$CS2$** : Le signal contrôlé après traitement et correction du PID
- **ART** : Articulation concernée par le changement de position
- **$CAP 1$** : Capteur (Encodeur) compte le nombre d'impulsions qui sera convertie ensuite en angle pour faire un feedback au comparateur.
- **$CAP (2 \text{ et } 3)$** : Capteur (potentiomètre) compte le nombre des angles pour faire un feedback au comparateur.

5.1.2 Les résultats réels du contrôle sur le robot manipulateur

a. Les constantes du PID finale qui sont applique sur le robot manipulateur

b.

Kp	Kd	Ki
10.3	0.52	0.07

Tableau 4:Les paramètres pour le contrôle PID de la première articulation

Kp	Kd	Ki
38	2.7	0.01

Tableau 5: Les paramètres pour le contrôle PID de la deuxième articulation

Kp	Kd	Ki
12	0.6	0

Tableau 6: Les paramètres pour le contrôle PID de la troisième articulation

Après 10 secondes de simulation, on trouve les figures ci-dessous :

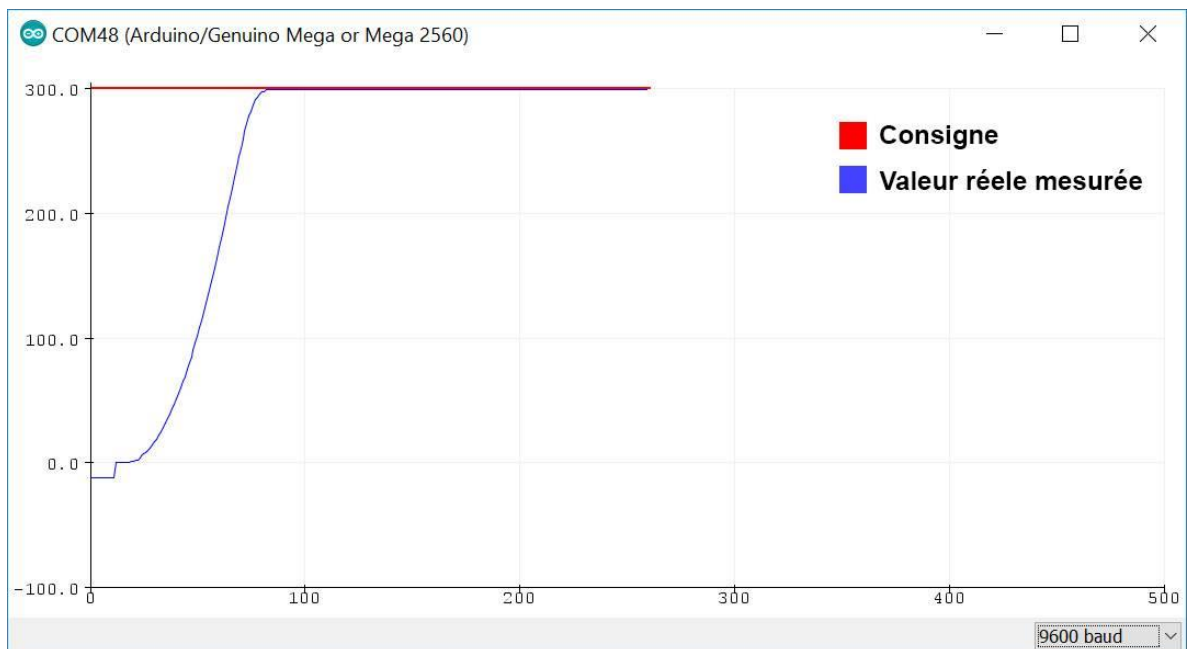


Figure 56 : la réponse indicielle de la première articulation après régulation.

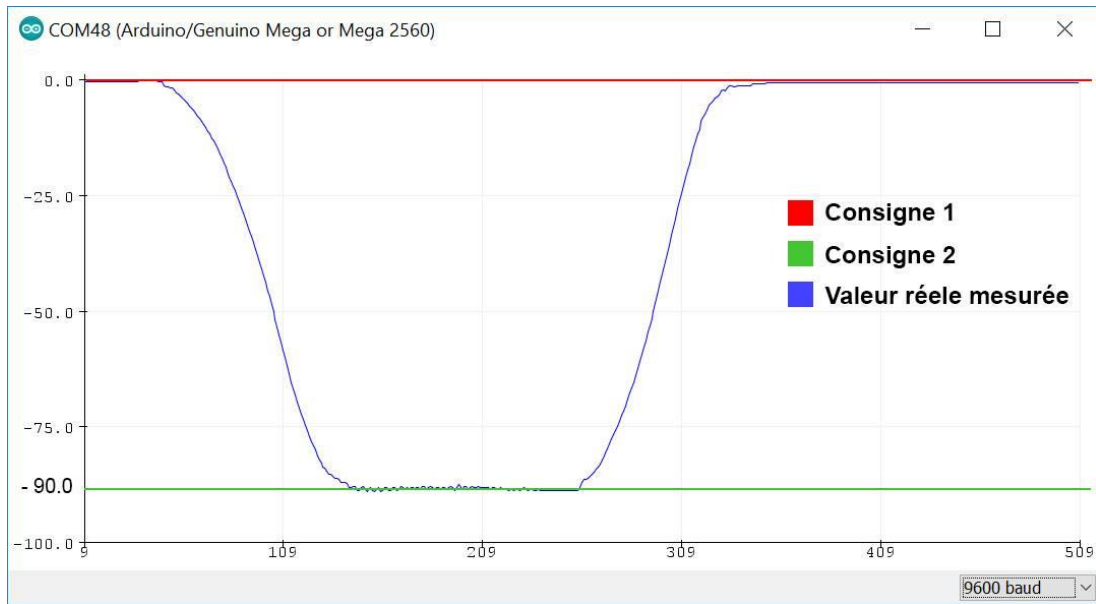


Figure 57: la réponse indicielle de la première articulation de deux consignes.

Dans les figures ci-dessus (figure 56 et figure 57), on remarque que la réponse est proche de l'idéal sur les 2 cas. Dans le 2^{ème} cas, on a 2 consignes avec des réponses des angles positifs et négatifs.

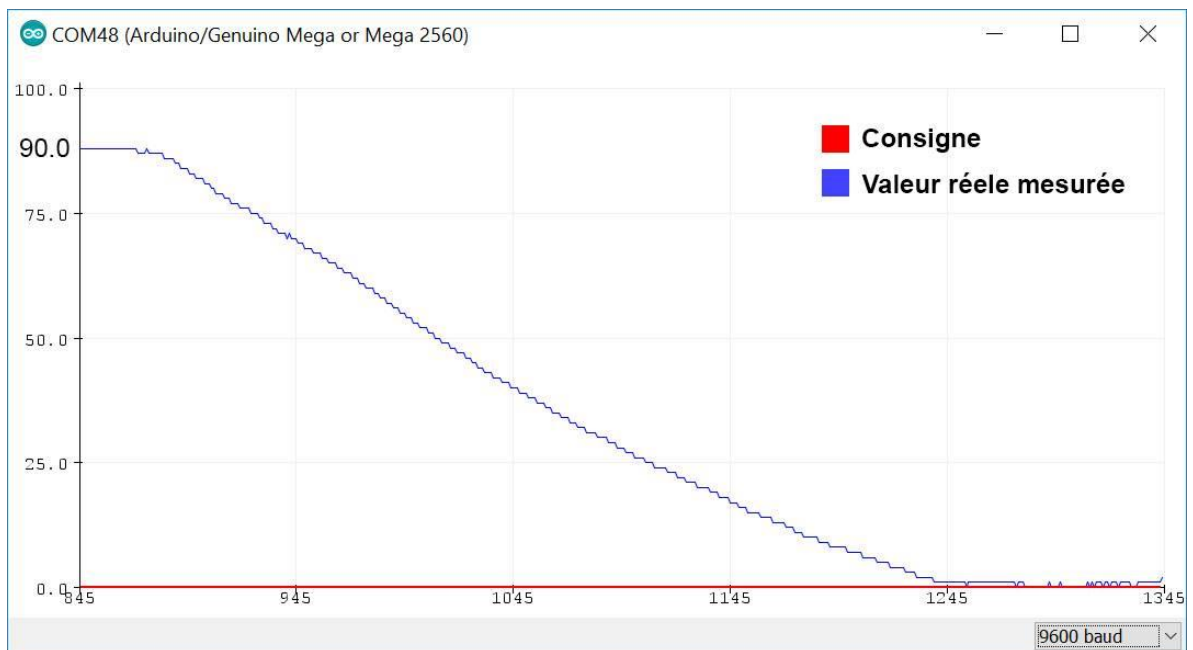


Figure 58: la réponse indicielle de la deuxième articulation après régulation.

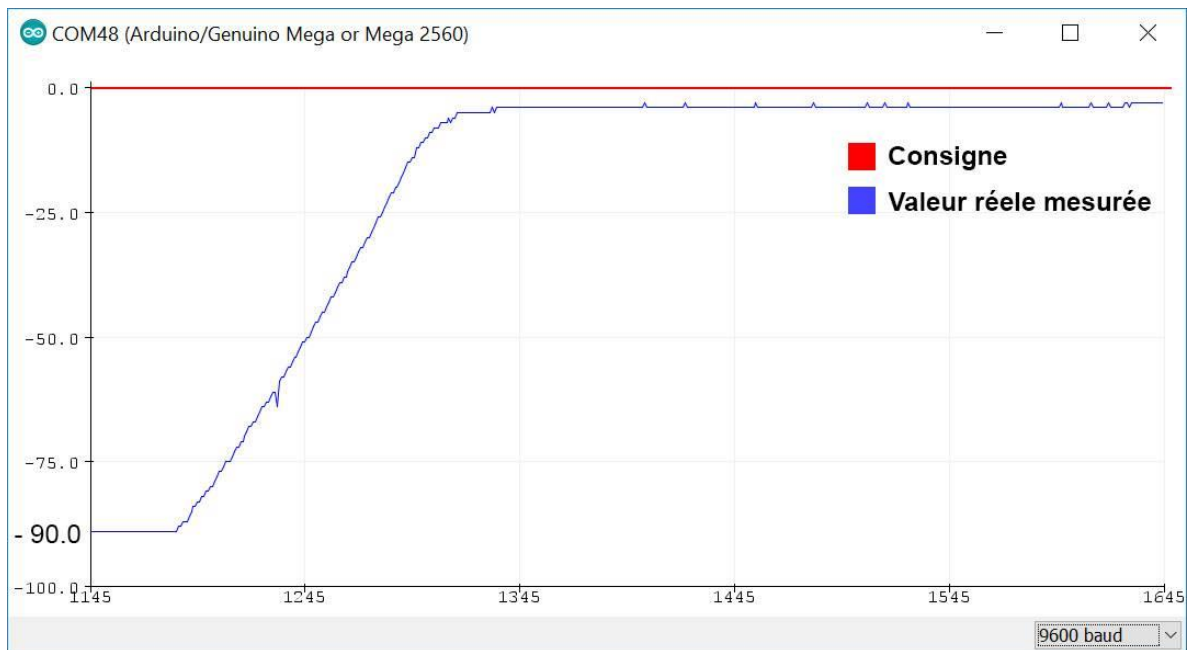


Figure 59 :la réponse indicielle de la troisième articulation après régulation

Dans les figures ci-dessus (figure 58 et figure 59), on remarque qu'il y'a un léger bruit sur cette réponse. Ce bruit est causé par l'influence du moteur sur la réponse du capteur, mais cela n'a pas vraiment faussé le résultat attendu.

5.2 Poursuite d'objectifs prédéterminés :

Afin de pouvoir attraper des objets, on doit donner les coordonnées (x, y, z) au système pour qu'il puisse se diriger vers les objets.

Dans la figure ci-dessous (figure 60), on peut apercevoir le robot en position initiale.

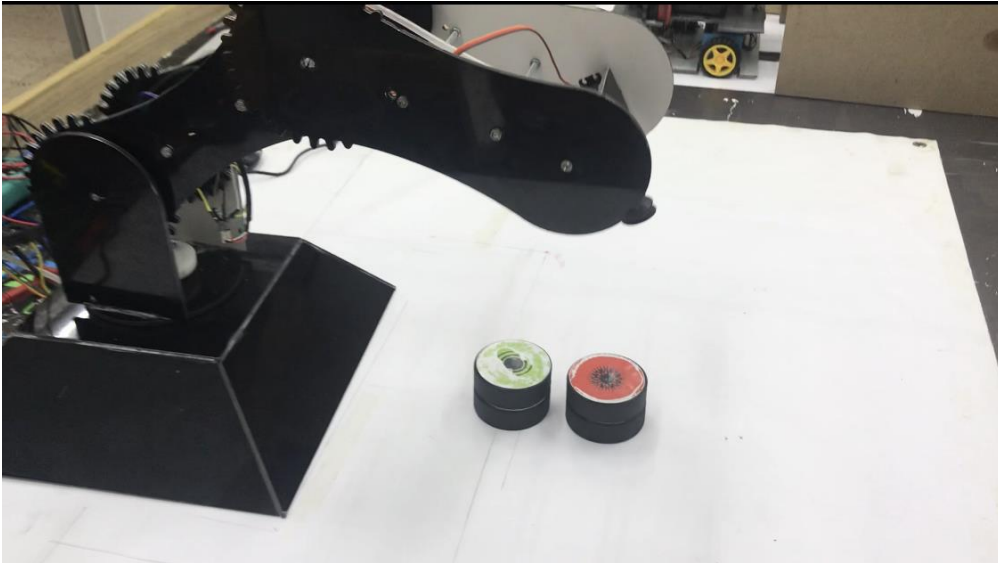


Figure 60: Le robot en position initiale

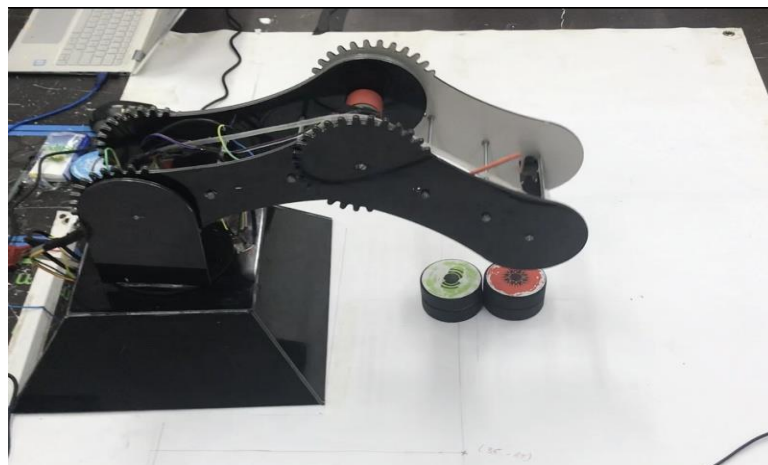


Figure 61: Déplacement du premier objet rouge

- Comme montré sur la figure (figure 61), le robot change de position en suivant les coordonnées (40,0,5), pour attraper le premier objet (rouge)

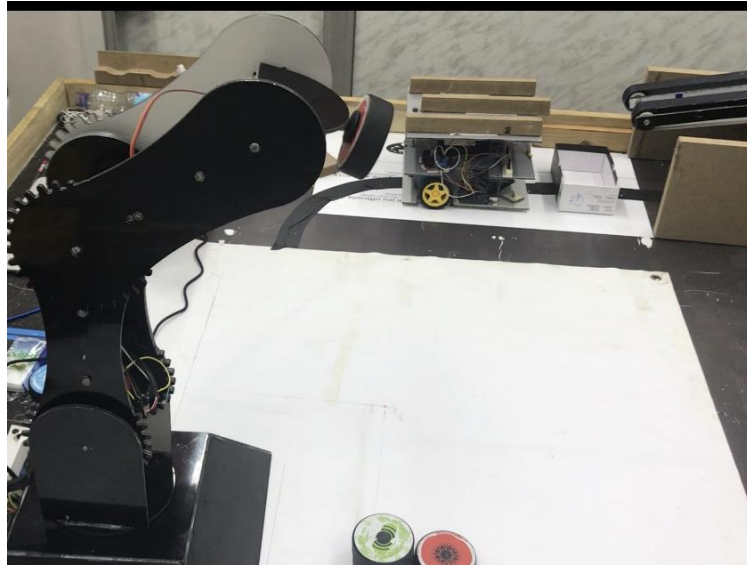


Figure 62 :Passage de la première position à la deuxième

- Le robot s'apprête à déposer le premier objet rouge dans sa position en suivant les coordonnées. (Figure 62)

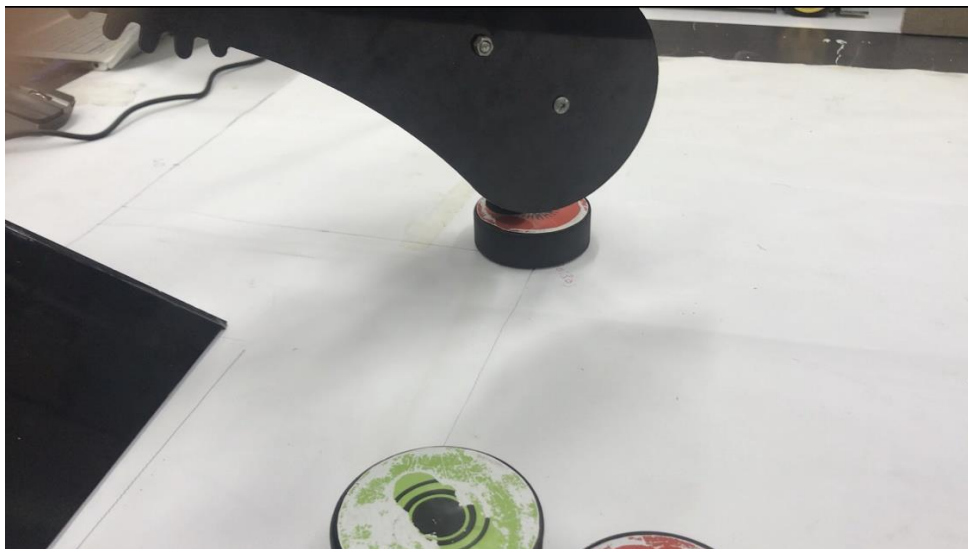


Figure 63: Dépôt du premier objet rouge sur le point défini

- Le bras dépose le premier objet (rouge) dans un point défini (en suivant les coordonnées (30,30,2)). (Figure 63)

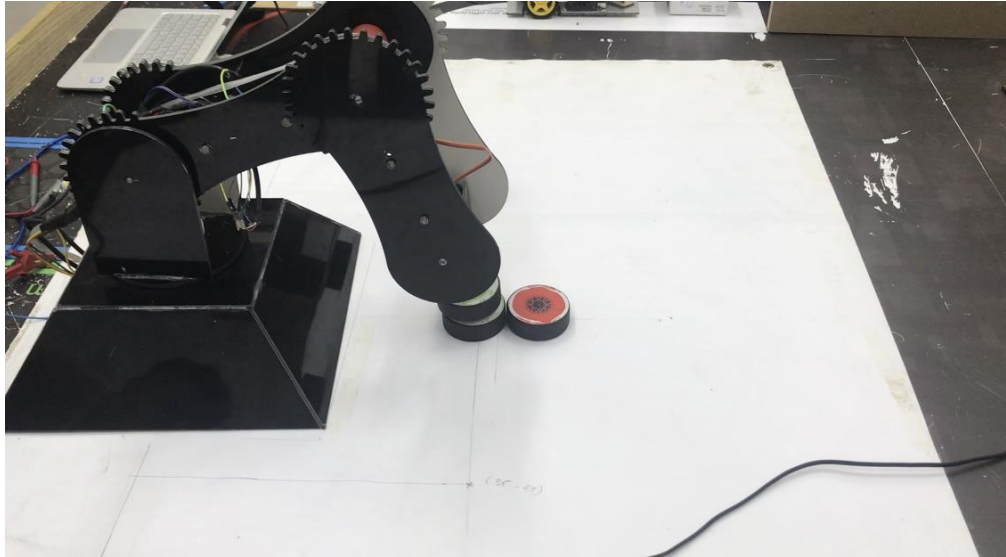


Figure 64: Déplacement du premier objet vert

- Le robot se penche vers l'objet vert pour l'attraper, en suivant les coordonnées (27,0,5) données. (Figure 64)

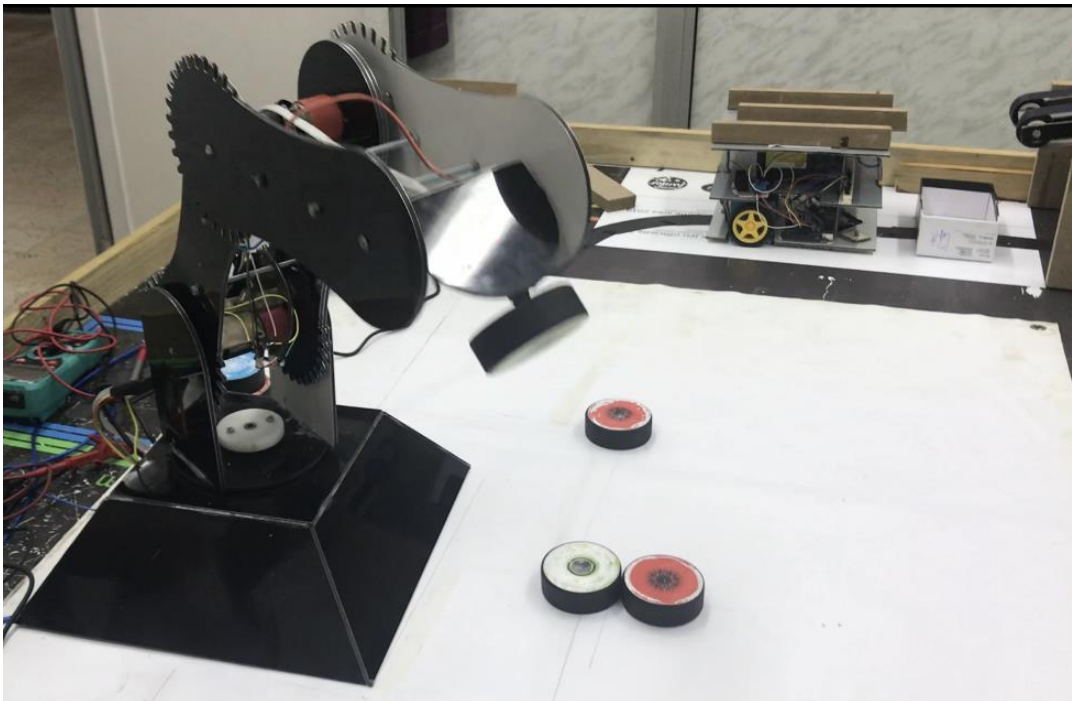


Figure 65: Passage de la première position à la deuxième

- Le robot s'apprête à déposer l'objet vert dans sa place. (Figure 5.2.6)
- Le robot dépose le premier objet vert dans un point défini, selon les coordonnées (30,-25,2). (Figure 66)

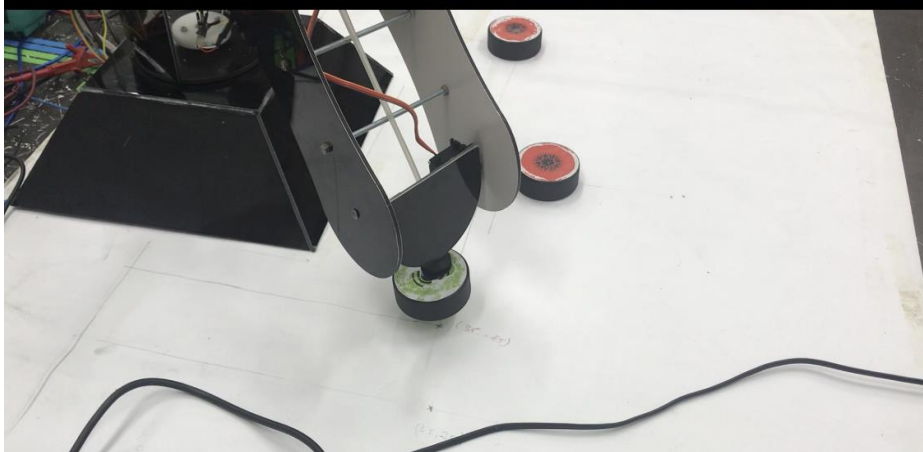


Figure 66: Dépôt du premier objet vert dans un point défini

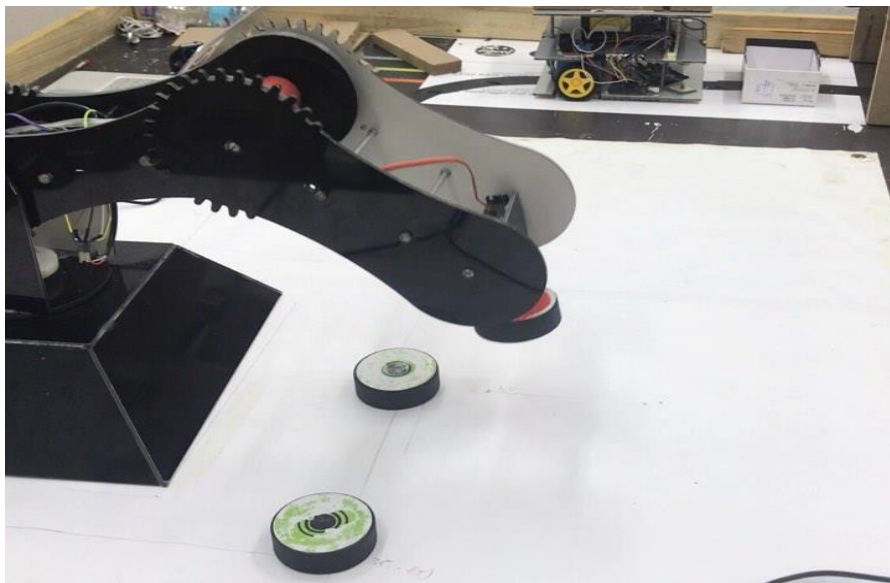


Figure 67: Déplacement du deuxième objet rouge

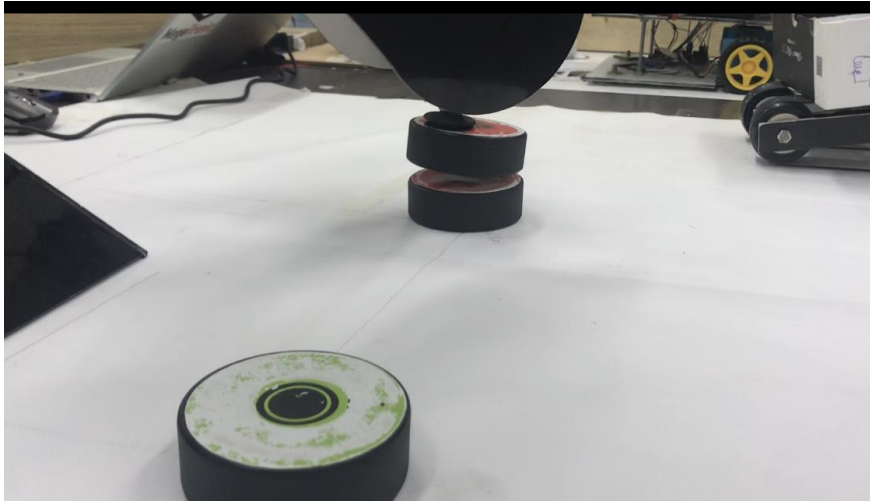


Figure 68: Dépôt du deuxième objet rouge sur le premier (au même point)

- Le robot attrape le deuxième objet rouge, en suivant les coordonnées (40,0,2). (Figure 67)
- Le robot dépose le deuxième objet rouge sur le précédent, en suivant les coordonnées (30,30,5). (Figure 68)
- Le bras attrape le deuxième objet vert, en suivant les coordonnées (27,0,2). (Figure 69)
- Le robot dépose le deuxième objet vert sur le précédent, en suivant les coordonnées (30,25,5). (Figure 70)



Figure 69: Déplacement du deuxième objet vert



Figure 70:Dépôt du deuxième objet vert sur le précédent

5.3 Conclusion

Le contrôle des articulations du bras manipulateur a été bien fait, parce que ça nous a permis d'atteindre les objectifs désirés. Cependant, il y'a eu quelques erreurs de précision (pour les coordonnées x et y) qu'on peut améliorer par la suite.

Conclusion Générale

Au cours de ce projet dont le but était de réaliser un bras manipulateur de type PUMA à 3 degrés de liberté, nous avons abordé tout les aspects relatifs à ce genre de travaux. En effet il fallait d'abord concevoir et réaliser la partie mécanique constituée des bras et des articulations dont les mouvements sont assurés par des moteurs à courant continu. Afin de mesurer les angles de rotation des trois articulations, nous avons installé sur les deux dernières articulations un potentiomètre sur chacune d'elles, concernant la rotation de base l'angle de rotation est mesuré grâce à un encodeur quadratique. Comme pour tout système automatisé, nous avons toujours besoin d'un moyen matériel pour faire communiquer la partie perception avec la partie intelligente et les différents actionneurs du système concerné.

S'agissant d'un système relativement complexe, avant d'entamer la programmation directe du système embarqué sur le robot nous avons dû faire une étude géométrique pour obtenir un modèle qui nous a permis de réaliser des simulations concernant la cinématique directe et inverse de notre robot. Les résultats de cette modélisation nous ont permis par la suite d'implémenter le même modèle, sur le module Arduino MEGA 2560.

Etant donné l'inertie de notre bras et afin d'améliorer la fluidité des mouvements nous avons implémenté une commande de type PID pour chacune des trois articulations, les paramètres de ces commandes ont été obtenus grâce à plusieurs tests effectués.

A travers les résultats obtenus et compte tenu des problèmes rencontrés notamment ceux relatifs à la partie mécanique nous pouvons considérer que le cahier de charge proposé a été respecté d'une manière très satisfaisante, ceci a bien été démontré par la qualité des résultats présentés dans le chapitre 5.

Pour avoir des résultats comparables à ceux utilisés dans l'industrie le premier point sur lequel il faut agir c'est le remplacement des moteurs utilisés par d'autres actionneurs beaucoup plus performants. Le deuxième point concerne les capteurs utilisés et qui pourraient être remplacés par des encodeurs absolus avec un maximum de résolution pour améliorer la précision des mouvements du robot.

Bibliographie

- [1] « Robot », dans *Dictionnaire de français Larousse*, [En ligne]. Disponible : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/robot/88768#QjzRfwFzCqu4WDCJ.99>
- [2] « Robotics », dans *English Oxford Living Dictionaries*. [En ligne]. Disponible : <https://en.oxforddictionaries.com/definition/robotics>.
- [3]. <http://www.usinenouvelle.com/article/bios-de-robots-unimate-le-premierouvriermecanique.N276769>
- [4]. J.-P. Lallemand, S. Zegloul ,1994, Robotique. Aspects fondamentaux, Masson, 312 pages.
- [5]. https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds_cours_robot_boimond.pdf
- [6] E. Dombre, *Analyse et modélisation des robots manipulateurs*, 2ème éd. France : Hermès Sciences, 2001.
- [7] « Introduction à la Robotique » dans *FANCU*. 2014. [Enligne]. <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/>
- [8] R. Gourdeau, ELE4203 — Robotique : Modélisation des Robots Manipulateurs, Département de génie électrique, Ecole Polytechnique de Montréal, 4 novembre 2010.
- [9] W.Khalil et E. Dombre, *Modélisation identification et commande des robots*, 2e éd. Paris : Hermès Sciences, 1999.

[10]« Caractéristiques techniques des manipulateurs pneumatiques série partner EQUO », dans Dalmec, (2013). [En ligne]. Disponible sur <http://www.dalmec.com/fr/manipulateurpartner-equo>.

[11] Mr. Bennila Noureddine, cours Commande de Robots de Manipulation

[12] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, Second Edition, pages 61-64; January 28, 2004.

[13] Mr. Bennila noureddine, cours Commande de Robots de Manipulation.

[14] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot Dynamics and Control, Second Edition, pages 108-109; January 28, 2004.