

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Commande des systèmes**

Présenté par

Kenza OUKHERFALLAH

Fatiha IHADJADENE

Thème

Modélisation et conception d'une pince à deux doigts et à deux degrés de liberté d'un bras manipulateur.

Mémoire soutenu publiquement le 10/09/ 2015 devant le jury composé de :

M DJENOUNE Said

Pr, U.M.M.T.O, Président

M MELLAH Rabah

M.C.A U.M.M.T.O, Encadreur

M SAIDI Khayredine

M.A.A, U.M.M.T.O , Examineur

M BOUKENDOUR Ouiza

M.A.B, U.M.M.T.O, Examineur

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralité sur la robotique.	
I.1. Introduction à la robotique.....	2
I.2. Les différentes classes des robots	3
I.3. Les catégories des robots les plus communes.....	3
I.3.1. Les humanoïdes.....	3
I.3.2. Les robots mobiles	3
I.3.3. Les robots rigide.	3
I.4. Les propriétés du robot.	4
I.5. Schéma de commande.	4
I.6. Description du schéma de commande.....	5
I.6.1. Source d'énergie.	5
I.6.2. Les actionneurs.	5
I.6.3. La structure mécanique d'un robot rigide.....	5
I.6.4. Les capteurs.	10
I.6.5. Système de commande.	11
I.7. Conclusion	12
Chapitre II : Modélisation géométrique du robot.	
II.1. Introduction	13
II.2. structure géométrique d'un robot rigide	14
II.3. Modélisation géométrique du bras manipulateur.	18
II.3.1. Transformation homogènes.	19
II.3.1.1. Définition.	19
II.3.1.2. Généralités	19
II.3.1.3. Application de la matrice de transformation homogène.	22
II.3.1.4. Propriété de la matrice de transformation homogène.	25
II.3.2. Représentation de l'orientation d'un solide dans l'espace.	26
II.4. Modèle géométrique direct du robot rigide.	27
II.4.1. Définition.....	27

II.4.2. Configuration et situation d'un bras manipulateur	28
II.4.3. Paramètres de Denavit-Hartenberg	29
II.5. Calcul du modèle géométrique direct	30
II.5.1. Calcul de matrice de position	31
II.5.2. Calcul de matrice en orientation.	32
II.6. Modèle géométrique inverse du robot rigide.....	33
II.6.1. Définition.....	33
II.6.2. Solubilité du MGI.....	33
II.7. Calcul du modèle géométrique inverse	34
II.8. Conclusion	35

Chapitre 3 : conception d'une pince.

III.1. Introduction	36
III.2. Le schéma synoptique de la pince.....	36
III.3. Etude mécanique de la pince	37
III.3.1. Les caractéristiques de la pince à concevoir	37
III.3.2. Calcul du couple.	37
III.4. La partie motrice.	38
III.4.1. Le servomoteur.	38
III.4.2. Le capteur de force.	40
III.4.3. La carte de commande.....	43
III.4.3.1. Description de la carte Arduino UNO.....	43
III.4.3.2. Le logiciel Arduino	46
III.4.3.3. Le signal de commande PWM	47
III.5. L'alimentation	49
III.6. Logiciel	51
III.7. Branchement des servomoteurs et du capteur avec la carte Arduino.....	52
III.8. schéma de la pince.....	53
III.9. Configuration des servomoteurs faisant les deux rotations.....	54
III.10. Commande en position.....	54
III.10. 1. Définition	54
III.10.2. Le programme sur Matlab	56

III.11. Test	56
III.12. Interprétation.....	56
III.13. Conclusion.....	60
Conclusion générale	61

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: schéma de base d'un système robotique..... 4

Figure I.2.a: système mécanique du robot rigide..... 6

Figure I.2.b: Schéma d'un système mécanique du robot rigide..... 6

Figure I.3: Les différents types de pince..... 9

Figure I.4: a. Préhension par obstacle..... 9

b. Préhension par adhérence..... 9

Figure I.5 : Classification des capteurs 10

Chapitre II

Figure II. 1 : Présentation d'une liaison rotoïde 14

Figure II.2: Présentation d'une liaison prismatique 14

Figure II.3: La chaîne cinématique 15

Figure II.4 : Mécanisme d'un bras manipulateur..... 15

Figure II.5 : Principales architectures du porteur 16

Figure II.6: Les différentes structures du poignet..... 17

Figure II.7: Représentation d'un point..... 19

Figure II.8: Transformation de repère 21

Figure II.9: Transformation de vecteurs 21

Figure II.10: Translation d'un repère..... 21

Figure II.11: transformation de rotation autour de l'axe X 22

Figure II.12: Transformation de rotation autour de l'axe Y 23

Figure II.13: Transformation de rotation autour de l'axe Z..... 24

Figure II.14 : Les angles de roulis, tangage et lacet 25

Figure II.15: Paramètres de Denavit et Hartenberg 28

Figure II.16: L'application des paramètres de Denavit sur un robot rigide..... 29

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma synoptique de la pince 36

Figure III.2 : constituants d'un servomoteur 38

Figure III.3 : Principe de fonctionnement de l'électronique de commande d'un servomoteur	39
Figure III.4 : les servomoteurs utilisés	40
Figure III.5 : branchement du la jauge de contrainte avec le pont de Wheatstone.....	41
Figure III.6 : capteur FSR 402.....	42
Figure III.7 : Tester un FSR	42
Figure III.8 : Branchement d'un FSR.....	42
Figure III.9 : Carte arduino UNO	43
Figure III.10 : Brochage de la carte Arduino	44
Figure III.11 : Schéma du microcontrôleur ATmega328.....	45
Figure III.12 : Logiciel arduino	46
Figure III.13 : Le terminal série	46
Figure III.14 : signal du PWM	47
Figure III.15 : Fréquence du PWM	48
Figure III.16 : Le rapport cyclique	49
Figure III.17 : Exemple de connexion d'un servomoteur sur un Arduino	50
Figure III.18 : Fonctionnement du servomoteur avec le PWM.....	50
Figure III.19 : L'organigramme de fonctionnement.....	51
Figure III.20 : Branchement des composants avec la carte Arduino.....	52
Figure III.21 : Vue de dessus de la pince	53
Figure III.22 : Les signaux PWM.....	59

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Les paramètres Denavit-Hartenberg	30
---	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Résultats des tests.....	55
---	----

-Introduction générale:

Le problème de manipulation d'objets est l'un des sujets de recherche qui passionnent depuis longtemps les chercheurs en robotique.

Les robots assurant cette tâche s'appellent les robots manipulateurs. On les retrouve dans les chaînes de production dans l'industrie d'automobile et l'industrie électronique ou dans les milieux hostiles; les milieux à haute pression (milieux sous-marin), basse pression (l'exploration spatiale), hautes températures, fortes radiations, ...etc.

Selon le type de tâche à réaliser et le secteur d'application, le robot aura une architecture mécanique et un système de commande-contrôle différent.

Les robots manipulateurs ont pu remplacer l'homme dans beaucoup de tâches en industrie manufacturière. Ils réalisent les mécanismes de préhension humaine pour effectuer des actions diverses. Les bras manipulateurs utilisés dans des chaînes de montages sont souvent munis de pinces dotées, de deux doigts ou plus, ainsi que de forte capacité de préhension (mobilité et force de pression accrues).

Et pour la plupart des pinces qui existent, elles sont en fonction des dimensions de l'objet à saisir pour ne pas le déformer, et donc à chaque fois qu'on veut prendre un objet il faut connaître ses dimensions afin de les introduire à la commande.

Notre projet est de concevoir une pince d'un bras manipulateur à deux degrés de liberté. Et dont l'objectif est d'introduire un capteur qui permettra à la pince de prendre des objets sans les déformer et sans connaître leurs dimensions.

Une fois l'objet est saisi, deux rotations sont possibles selon la tâche à réaliser.

L'ouverture de cette pince pour qu'elle pose l'objet est aussi commandé par l'utilisateur.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres qui peuvent être résumés comme suit:

- Le premier chapitre est consacré à une étude générale sur les robots et la structure robotique.
- Le deuxième chapitre présente la structure géométrique des robots et l'étude géométrique du bras manipulateur tout en s'intéressant à l'orientation de l'organe terminal.
- Le troisième chapitre comporte la conception de la pince à deux doigts et son fonctionnement.

I.1. Introduction à la robotique :

L'origine du mot robot est issue du tchèque, il est apparu pour la première fois vers 1920 dans une pièce de théâtre du tchèque K. Tschapek où il désignait de petits êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maître : « " robota" signifie travail forcé ».

Un robot est une machine qui évolue en fonction de son environnement, soit de manière répétitive en effectuant une tâche programmée sans se tromper, soit de manière pseudo intelligente en évoluant dans un environnement aléatoire. Cela signifie qu'il va réagir en fonction de diverses contraintes qui lui seront soumises comme des obstacles, un objet, un trou, un changement de luminosité...

Face à ces contraintes, le robot va devoir réagir, mais avant de réagir, il faut aussi qu'il reconnaisse la contrainte.

Parmi les premières réalisations qui ont été faites, on site:

- _ 1947 : Premier manipulateur électrique téléopéré.
- _ 1954 : Premier robot programmable.
- _ 1961 : Utilisation d'un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION (USA), sur une chaîne de montage de General Motors.
- _ 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.
- _ 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.

Le domaine de la robotique est toujours en développement, les robots prennent actuellement une place importante dans notre vie. Les robots se trouvent dans toutes les entreprises, pour accélérer la production ou pour agir là où l'homme ne le peut. De façon générale, les systèmes robotisés ont pour objectif de se substituer à des opérateurs humains pour effectuer une tâche donnée.

L'avantage d'un robot sur l'homme est sa régularité : il peut exécuter le même mouvement des milliers de fois d'affilée sans ressentir la moindre lassitude ou fatigue.

De plus, les robots peuvent être construits de manière à pouvoir résister à des conditions qui seraient dangereuses, voire mortelles pour l'homme (gaz nocifs, fortes chaleurs, froid intense, radiations, ...).

I.2. Les différentes classes de robots :

- Le premier type de machine que l'on peut appeler robot correspond aux "Automates". Ceux-ci sont généralement programmés à l'avance et permettent d'effectuer des actions répétitives.

- Le second type correspond à ceux équipés par des capteurs. On trouve des capteurs de température, photo électronique, à ultrasons pour par exemple éviter les obstacles et/ou suivre une trajectoire.

Ces capteurs permettent au robot une relative adaptation à son environnement afin de prendre en compte des paramètres aléatoires qui n'aurait pu être envisagés lors de leur programmation initiale. Ces robots sont donc bien plus autonomes que les automates mais nécessitent un investissement en temps de conception et en argent plus conséquent.

- Enfin le dernier type de robot existant correspond à ceux disposant d'une intelligence artificielle et reposant sur des modèles mathématiques complexes tels que les réseaux de neurones.

En plus de capteurs physiques comme leurs prédécesseurs, ces robots peuvent prendre des décisions beaucoup plus complexes et s'appuient également sur un apprentissage de leurs erreurs comme peut le faire l'être humain.

Bien sûr il faudra attendre encore longtemps avant que le plus "intelligent" des robots ne soit égal, tant par sa faculté d'adaptation que par sa prise de décision, à l'homme.

I.3. Les catégories de robots les plus communes :

I.3.1. Les humanoïdes :

Ces robots ont généralement un torse, une tête, deux bras et deux jambes. Les robots anthropomorphiques sont probablement la principale motivation des roboticiens. Ces robots sont capables de faire des choses que seul l'humain était capable de faire à ce jour.

I.3.2. Les robots mobiles :

Cette catégorie englobe tous les robots à base mobile, mais elle désigne de façon générale la sous-catégorie des robots mobiles à roues ; les autres robots étant généralement appelés par leur nom de catégorie correspondant à leur fonctionnalité.

I.3.3. Les robots rigides:

La majorité de ces robots sont à base fixe. Quand la base n'est pas fixe, elle est généralement montée à un rail. On retrouve dans cette catégorie les robots de manipulation, type « Pick And Place », des robots soudeurs ou encore des robots de peintures. Cela représente la majorité des robots actuellement en service.

I.4. Les propriétés du robot :

Le passage de la machine automatique au robot, résulte du besoin de rendre la machine apte à remplacer un opérateur humain autant que faire se peut dans l'exécution de certains types de tâches. Il en découle deux propriétés essentielles et ce sont la versatilité et l'adaptativité.

➤ **La versatilité :**

C'est la propriété rattachée à la structure géométrique et mécanique du robot. Elle définit son aptitude à atteindre des positions et des orientations physiques diverses et par ce fait, sa potentialité à exécuter une multitude de tâches d'une part et, d'autre part, sa potentialité à exécuter la même tâche de plusieurs façons différentes. La versatilité caractérise donc un robot à géométrie variable. Elle ne dépend pas uniquement du nombre de degrés de liberté, mais aussi d'autres paramètres tels que la structure du poignet par exemple. [1]

➤ **L'adaptativité :**

Le niveau de technologie actuel permet de parler plutôt d'auto-adaptativité. Cette propriété caractérise la capacité du robot à prendre des initiatives afin d'exécuter correctement une tâche partiellement décrite ou non entièrement spécifiée, et ceci même en présence de modifications imprévues de l'environnement. Cette propriété que l'on s'efforce de perfectionner, est en général limitée par les performances des capteurs, la vitesse des calculateurs et les imperfections des algorithmes d'intelligence artificielle. [1]

I.5. Schéma de base d'un système robotique :

La figure I.1 représente une modélisation plus au moins générale d'un système robotique.

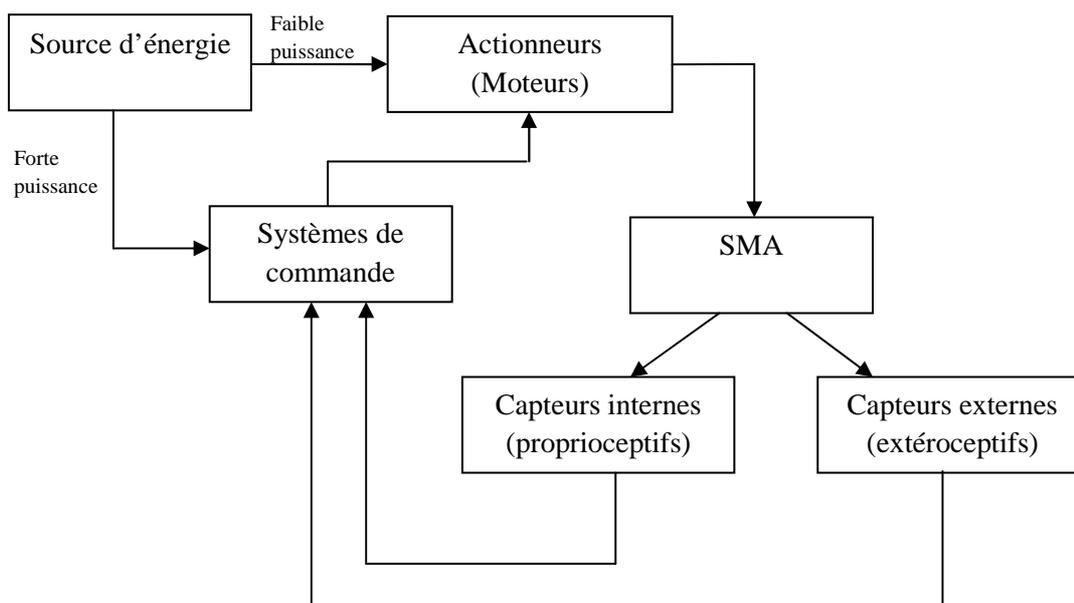


Figure I.1: schéma de base d'un système robotique

I.6. Description du schéma du schéma de base :

I.6.1. Source d'énergie :

La source d'énergie peut être :

-pneumatique : Cette énergie est fréquemment employé sur les manipulateurs à cycles prééglés ou « tout ou rien » pour lesquels la précision n'est pas obtenue par une boucle d'asservissement mais par les butées mécanique.

-hydraulique : C'est l'une des plus intéressantes dans le domaine de la robotique pour de multiples raisons telles que la puissance massique élevée, temps de réponse court et la précision. L'énergie est générée par un groupe moto-pompe qui réalise la mise sous pression par la compression du fluide.

-électrique : Elle est la mieux maîtrisée à l'heure actuelle. Les commandes sont aisées, précises et fiables. Des développements importants ont été effectués et les applications à la robotique sont de plus en plus nombreuses. [2]

I.6.2. Les actionneurs :

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

Le mouvement est imposé au robot par un ou plusieurs actionneurs par transformation d'une énergie source en énergie mécanique.

Selon la source d'énergie, on distingue trois types d'actionneurs :

-Les actionneurs pneumatiques.

-Les actionneurs hydrauliques.

-Les actionneurs électriques.

Ces derniers sont les plus utilisés dans la robotique car leur commande est précise et fiable.

Les actionneurs électriques les plus communs sont : les moteurs pas à pas, les moteurs à courant continu. [2]

I.6.3. La structure mécanique d'un robot rigide :

Les robots rigides se présente en général sous forme de structure mécanique poly-articulée se terminant par un organe terminal, comme il existe une certaine différence entre ces deux organes, notamment au niveau fonctionnel on a tendance à les considérer comme deux sous ensembles distincts : d'un SMA et l'effecteur comme il est représenté dans la figure I.2 [3].



Figure I.2.a : Système mécanique d'un robot rigide

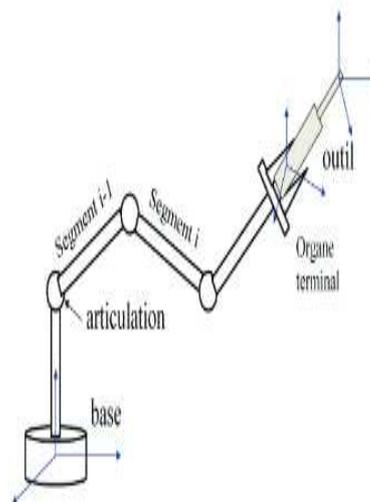


Figure I.2.b: Schéma d'un système mécanique du robot rigide [3].

a. Le système mécanique articulé :

Le système mécanique articulé (S.M.A) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne

cinématique de corps, généralement rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations. La structure mécanique d'un robot se distingue par trois ensembles :

-Le véhicule:

Il assure le transport de la structure mécanique vers la zone d'action. Il est inexistant sur les robots industriels à poste fixe.

-Le porteur :

C'est la partie de la structure mécanique comprise entre la base de robot et le poignet [1].

Le rôle du porteur consiste à mener un point du robot vers un lieu précis de l'espace. Une combinaison de trois degré de liberté (rotation ou/et translation) est nécessaire. Les différentes configurations permettent de classer les robots comme suit:

-La structure cartésienne : trois degré de liberté en translation [2], (porteur comporte trois articulations prismatiques à la suite à partir de la base) [1].

-La structure cylindrique : deux degré de liberté en translation et une en rotation [2], (une articulation prismatique, une articulation rotoïde, puis une autre articulation prismatique) [1].

-La structure sphérique ou polaire : deux rotations et une translation [2], ce porteur comporte dans l'ordre, à partir de la base, une articulation rotoïde suivie d'une articulation prismatique puis d'une autre articulation rotoïde [1].

-La structure angulaire : trois rotations [2].

-La structure SCARA : une translation et deux rotations [2], ce porteur comporte dans l'ordre, à partir de la base, deux articulations rotoïde suivie d'une articulation prismatique [1].

-Le poignet :

Il assure l'orientation d'un vecteur passant par l'extrémité du porteur.

b. L'effecteur (organe terminal) :

Les effecteurs sont les composants du robot qui forment l'interface avec l'environnement. Il existe deux types :

-Les préhenseurs :

Le préhenseur est un système permettant de manipuler des objets. On considère plusieurs techniques de préhension ; par exemple ; la préhension par serrage mécanique, par dépression, les crochets, les cuillères, les plateformes (pour soulever des pièces volumineuses) [2].

-Les outils :

La tâche du robot n'est pas toujours liée à la manipulation de pièce. Des outils viennent se substituer au préhenseur dans de nombreuses applications. Citons quelques exemples d'outils employés couramment : tête de soudage, pistolet de peinture, visseuse, perceuse [2].

c. Types de pinces :

Notre projet est de réaliser un effecteur de type préhenseur par serrage qui est une pince à deux doigts. Il existe plusieurs types de pinces qui peuvent être classées en fonction de type de déplacement des doigts :

- Pinces parallèles :

Les doigts ont un déplacement linéaire. Ils peuvent être au nombre de 2, 3 ou parfois 4.

- Pinces angulaires :

Les doigts sont articulés et décrivent un mouvement en arc de cercle. Elles ont, en général un coût plus réduit que les pinces parallèles, mais avec quelques limitations.

- Pinces angulaires avec doigts rétractables :

Les doigts ont un angle d'ouverture d'environ 90° . Les doigts de serrage peuvent s'effacer complètement sur la surface supérieure de la pince, permettant ainsi dans certains cas, d'éviter un mouvement linéaire de reculement.

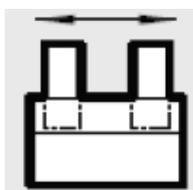
- Pinces à genouillère :

Pinces angulaires avec un mécanisme à genouillère, assurant une grande force de serrage. Le serrage est irréversible même lorsqu'il n'y a plus de pression, aussi la pièce ne peut être relâchée accidentellement. L'angle d'ouverture est de 90° , elle agit comme une pince à doigts rétractables. La force de serrage n'est importante que sur une plage d'angle de rotation limitée.

- Pince à serrage concentrique:

Les pinces à deux doigts sont utilisées pour les pièces de forme prismatique, ou cylindrique à un seul diamètre. Les pinces à trois doigts peuvent être utilisées sur des pièces cylindriques à différents diamètres.

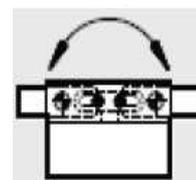
Ces différents types de pince sont illustrés dans la figure I.3 :



a. Pince parallèle rétractables



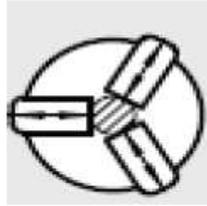
b. Pince angulaire



c. Pince angulaire avec doigts rétractables



d. Pince à genouillère



e. Pince à serrage concentrique

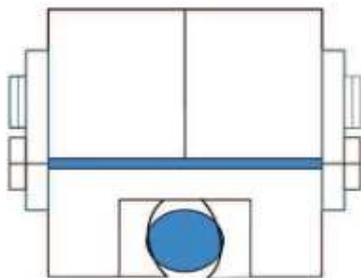
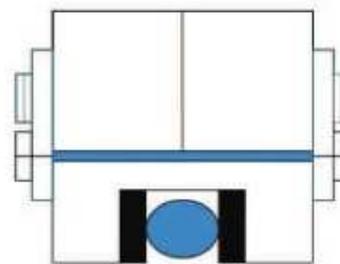
Figure I.3: Les différents types de pince.**d. Le dimensionnement des pinces :**

Le dimensionnement permettra de définir la taille de la pince, c'est-à-dire la force de serrage développée capable d'assurer l'équilibre de toutes les forces statiques et dynamique agissant sur la pièce à manipuler.

Le maintien d'un objet dans la pince se fait soit :

-Par obstacle : où le maintien est basé sur une constriction de l'objet entre les doigts (Figure I. 4(a)), ces derniers entourent l'objet, au moins en partie, et bloquent tout mouvement relatif de l'objet par rapport à la pince (lorsque celle-ci est serrée).

-Par adhérence : dans ce cas, le maintien est basé sur la force de frottement entre les doigts et l'objet (Figure I. 4(b)).

**Figure I.4: a.** Préhension par obstacle.**b.** Préhension par adhérence

Lorsque l'objet est maintenu par des forces de frottement, il faut que celles-ci soient suffisantes pour retenir l'objet malgré les autres forces qui s'exercent sur lui (pesanteur, inertie, force de réaction due à la tâche exécutée, ...). Souvent, la partie de la pince en contact avec l'objet est faite d'une matière non dure, ce qui accroît le coefficient de frottement et peut aussi protéger la surface de l'objet manipulé de dommages tels que griffes, coups, En outre, il en résulte généralement aussi une déformation locale, qui entraîne un contact sur toute une ligne ou une surface et un certain effet de constriction.

I.6.4. Les capteurs :

Le capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente très souvent électrique.

Il a pour objet de traduire en une information exploitable des données représentant des caractéristiques de l'environnement.

Une classification des capteurs est réalisée par décomposition des informations par rapport à trois caractéristiques qui sont : la fonction, la génération et la forme [2].

Cette classification est représentée par le schéma de la figure I. 5 :

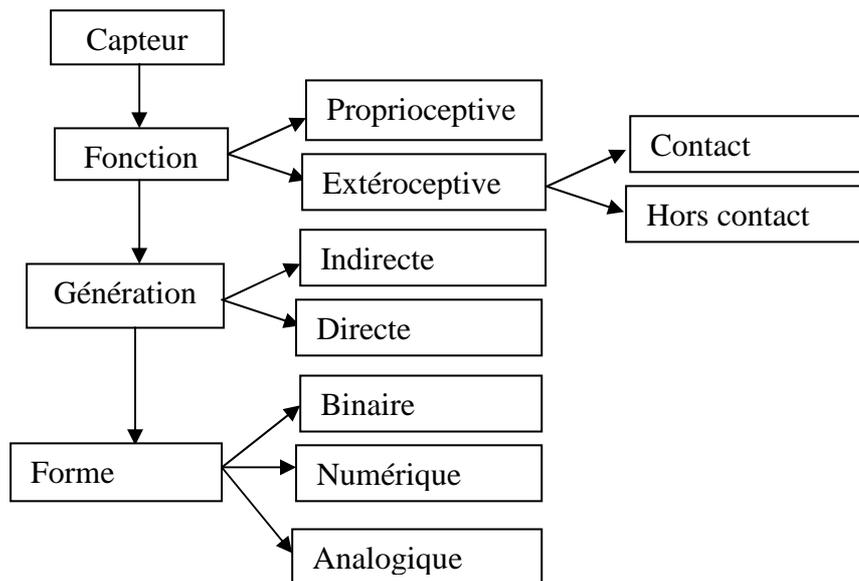


Figure I.5 : Classification des capteurs [2].

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

-La structure mécanique articulée : capteurs proprioceptifs

Qui assurent au robot le contrôle permanent du système mécanique articulé. Ils interviennent dans les boucles de régulation afin de permettre à l'unité de commande de décrire correctement ou de modifier la trajectoire en cours afin qu'elle soit conforme à celle exigée par la tâche.

Les informations proprioceptives les plus couramment analysées sont celles qui définissent les grandeurs associées à la mécanique en mouvement :

- Position relative d'une articulation par rapport à la précédente.
- Vitesse relative

- Accélération
- Couple.

-L'environnement dans lequel évolue le robot : capteur extéroceptif

Par opposition aux capteurs proprioceptifs, il existe aussi une autre catégorie de capteurs dits extéroceptifs. Un robot n'évoluant jamais seul dans son espace de travail, il est donc nécessaire que lors de la conception on puisse prendre en considération toutes les contraintes imposées par l'environnement extérieur, on parle alors de robot adaptatif.

S'agissant des capteurs utilisés, on peut citer les capteurs tactiles, ultrasons, les capteurs à infrarouge... et la aussi l'information peut être délivrée sous différentes formes.

Signalons à cet effet, qu'au delà de leur important rôle qu'ils jouent pour permettre au robot de fonctionner dans des conditions optimales, les capteurs aujourd'hui sont de plus en plus surs et précis.

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

-La génération directe : les dispositifs à génération directe ou capteurs actifs effectuent la traduction d'un phénomène physique directement en un signal électrique exploitable.

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

La forme de l'information définit la méthode de représentation de la forme de la grandeur désirée. Trois formes sont dénombrées :

-L'information logique ou seuls deux états sont possibles.

-L'information numérique qui est établie par un ensemble d'informations logique ordonnées.

-L'information analogique qui met en évidence toute variation de la grandeur mesurée [2].

I.6.5. Système de commande :

Il consiste à activer les actionneurs de chaque articulation de manière à faire évoluer le système mécanique vers un point de l'espace. Elle peut être une commande en position, en vitesse ou dynamique [2].

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur les robots et la structure robotique et comment chaque élément de cette structure est relié à un autre. Et pour toute structure robotique il ya une structure géométrique qui la représente.

Dans le chapitre suivant nous allons donner les différentes structures géométriques des robots et étudier le modèle géométrique direct et inverse du robot qu'on va réaliser afin de pouvoir le commander.

II.1. Introduction :

Quelque soit l'objectif qu'on se fixe, concevoir, simuler ou commander un système mécanique, il est nécessaire, entre autres, de disposer de modèles du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles, qui dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée :

- Les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Parmi ces modèles, on distingue :
- Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement,
- Les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement,
- Les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Dans ce chapitre nous allons donc donner la structure géométrique des robots et étudier le modèle géométrique direct et inverse du bras qui sera réalisé en particulier du poignet et la pince qu'on va concevoir.

II.2. Structure géométrique d'un robot rigide :**a. Degré de liberté :**

On appelle d.d.l (degré de liberté) de la liaison le nombre de paramètres indépendants permettant de définir la localisation (position et orientation) d'un solide par rapport à l'autre dans tout déplacement (compatible avec la liaison).

Le nombre de degré de liberté représente le nombre de mouvements élémentaires (rotation ou translation) appliqués à un solide indéformable lié à l'extrémité de la structure mécanique. Par exemple un mécanisme qui comporte trois articulations autour de même axe de référence possède deux degré de liberté.

b. Liaison :

Une liaison entre 2 solides indéformables (en théorie) limite le d.d.l. d'un solide par rapport à l'autre.

c. Articulation :

Si les segments peuvent avoir des formes variés, les articulations quant à elles, se sont des liaisons bilatérales ont des caractéristiques bien précises ; on peut ainsi distinguer deux groupes d'articulations :

- Les articulations simples : elles sont caractérisées par une mobilité unique, c'est-à-dire que la liaison entre les deux segments adjacents permet un seul mouvement relatif. Il s'agit :

- Des articulations rotoïde : ou pivot, notée R, ayant un degré de liberté en rotation autour d'un axe commun aux deux segments adjacents. Cette articulation est donnée dans la figure II.1.

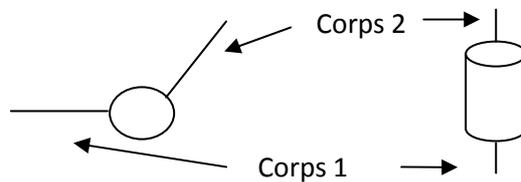


Figure II.1 : Présentation d'une liaison rotoïde [2].

- Des articulations prismatiques: ou glissière, notée P, qui permet une seule mobilité en translation le long d'un axe commun aux deux segments adjacents. Cette articulation est donnée dans la figure II.2.

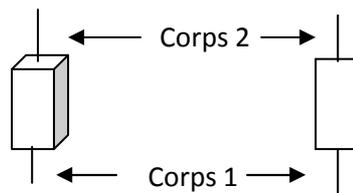


Figure II.2: Présentation d'une liaison prismatique [2].

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

d. Mécanisme :

On appelle mécanisme un ensemble de solides reliés 2 à 2 par des liaisons comme il est illustré dans la figure II.3.

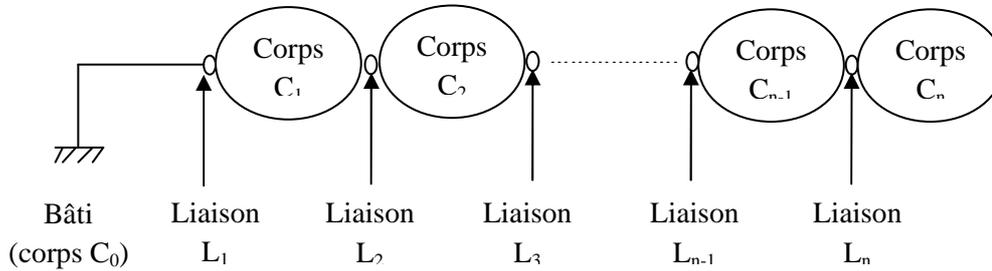


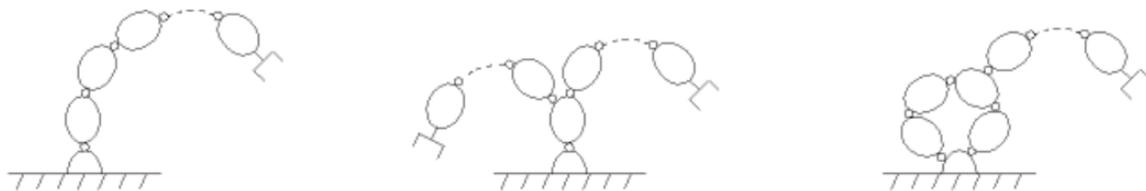
Figure II.3: La chaîne cinématique

On distingue 2 types de mécanismes:

- Les mécanismes en chaîne simple ouverte(ou en série). Lorsque l'on parcourt le mécanisme, on ne repasse jamais 2 fois sur la même liaison, ou sur le même solide. Ce type de système est le plus répandu.

- Les mécanismes en chaîne complexe, tout ce qui n'est pas en série (au moins un solide avec plus de 2 liaisons). De tels systèmes se subdivisent en 2 groupes : les chaînes structurées en arbre, et les chaînes fermées(dont l'avantage est d'être a priori plus rigide, plus précis, capable de manipuler de lourdes charges).

Ces différents mécanismes sont illustrés dans la figure II.4.



a. Chaîne simple ouverte

b. Chaîne structurée en arbre

c. Chaîne fermée

Figure II.4 : Mécanisme d'un bras manipulateur [5].

e. Morphologie du porteur :

Il se compose des trois premiers degrés de liberté. Deux types sont principalement utilisés en robotique: prismatique et rotoïde.

Les différentes configurations sont résumées sur la figure II.5 qui suit :

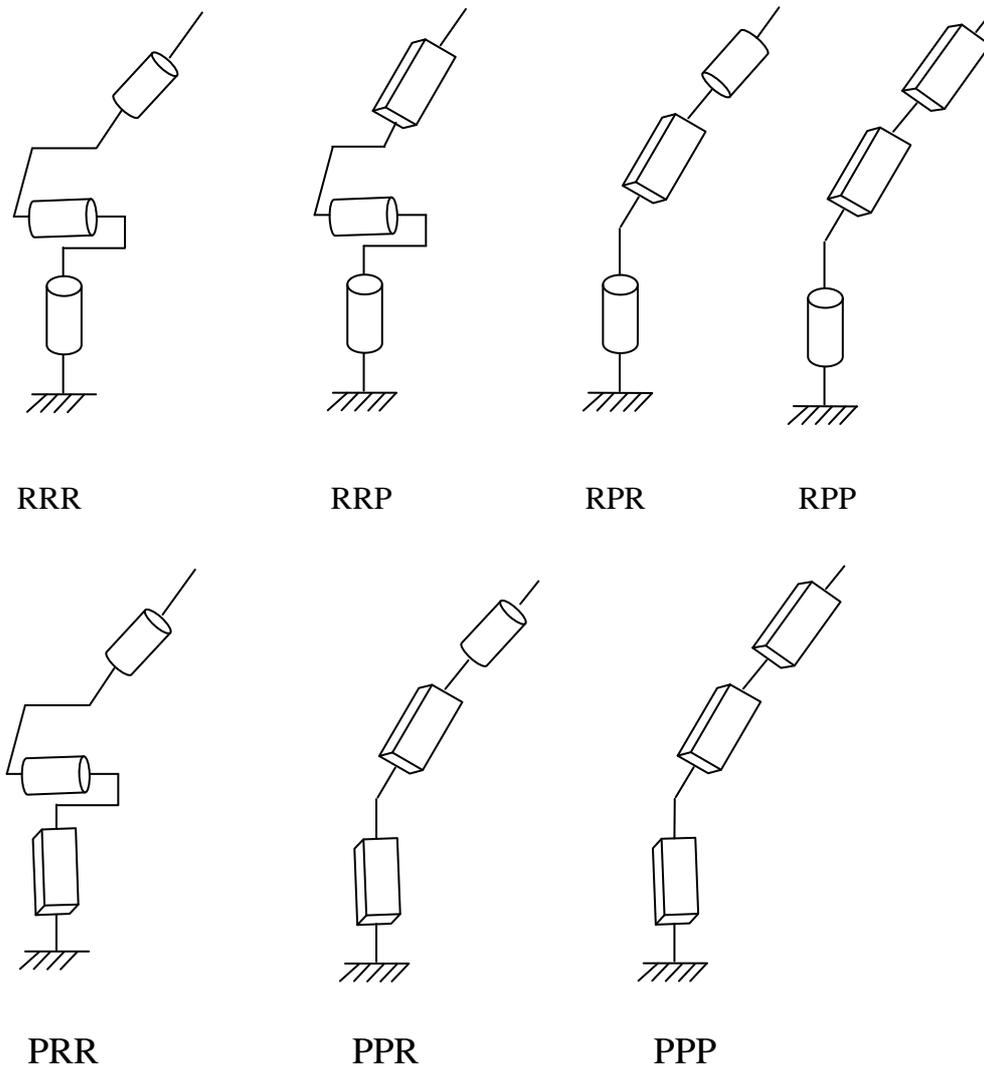


Figure II.5 : Principales architectures du porteur.

Avec :

R : Rotoïde (rotation).

P : Prismatique (déplacement).

f. Morphologie du poignet :

Trois degrés de liberté en rotation autour de trois axes concourant sont nécessaires pour atteindre toutes les orientations possibles. Toutes les structures mécaniques ne possèdent pas un poignet à trois degrés de liberté, ce qui réduit leurs potentialités [2].

La figure II.6 montre quelques exemples de poignets les plus répandus en robotique :

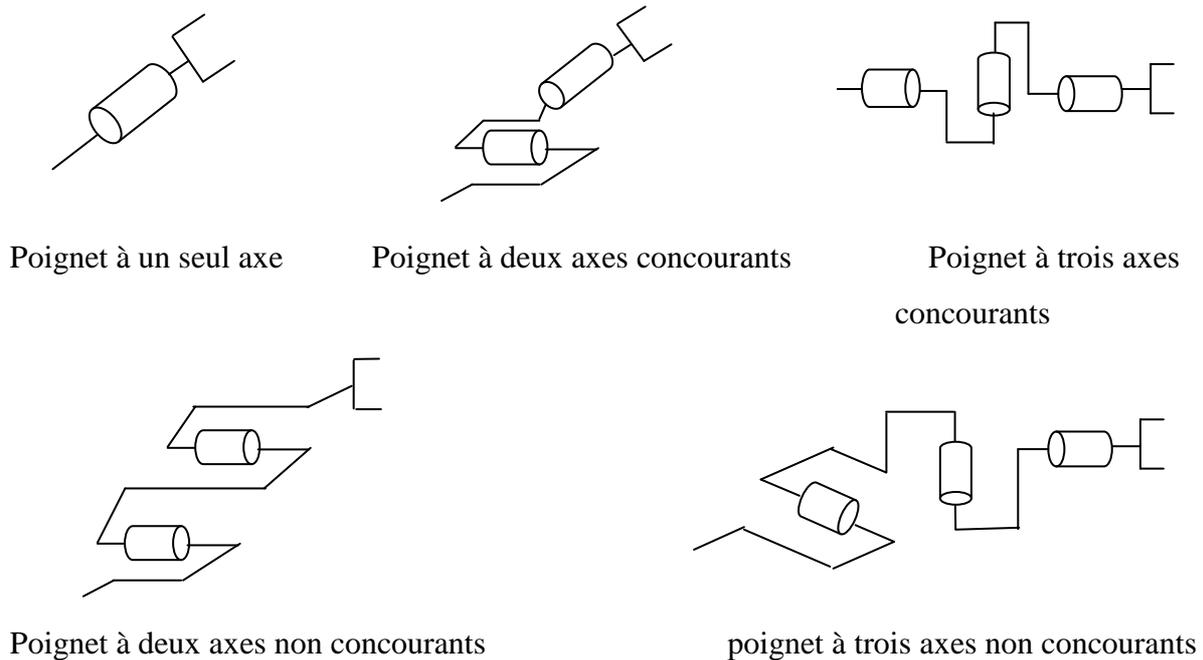


Figure II.6: Les différentes structures du poignet [5].

g. Espace de travail :

L'espace de travail d'un robot est défini comme étant l'ensemble des positions et orientations accessibles par son organe terminal. La géométrie de cet espace dépend de la morphologie du robot [2].

II.3.Modélisation géométrique du bras manipulateur :

La commande en position et en orientation du bras nécessite le calcul du modèle géométrique direct(MGD) ainsi que le modèle géométrique inverse (MGI).

Le modèle géométrique direct décrit les situations de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du bras manipulateur et inversement, le calcul du modèle géométrique inverse revient à exprimer les coordonnées articulaires du bras en fonction des coordonnées opérationnelles.

Pour définir la situation l'organe terminal du robot dans l'espace, il faut préciser sa position et son orientation.

Pour définir la position de l'organe terminal dans l'espace, trois représentations sont couramment utilisées:

- Coordonnées cartésiennes ;
- Coordonnées cylindriques ;
- Coordonnées sphériques.

Nous utilisons la représentation en coordonnées cartésiennes pour sa simplicité.

Pour définir l'orientation de l'organe terminal dans l'espace, plusieurs représentations sont présentées. Par exemple :

- Angles de Bryant ;
- Angles d'Euler ;
- Matrice de rotation ou cosinus directeurs ;
- Quaternion ;
- Angle plus vecteur.

La plus courante des représentations est les angles d'Euler.

II.3.1. Transformation homogènes :

II.3.1.1. Définition :

Les transformations homogènes sont des outils mathématiques qui nous permettent de décrire d'une façon homogène les différents systèmes de coordonnées.

II.3.1.2. Généralités :

a. Coordonnées homogènes d'un point :

Soit le point P de coordonnées cartésiennes p_x p_y p_z . Les coordonnées homogènes du point P sont représentées dans le repère R_0 par le vecteur suivant [5] :

$$P = \begin{bmatrix} w \cdot p_x \\ w \cdot p_y \\ w \cdot p_z \\ w \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Avec w un entier dit facteur d'échelle.

En robotique $w=1$ donc :

$$P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La représentation des coordonnées homogène d'un point est donnée dans la figure II.7.

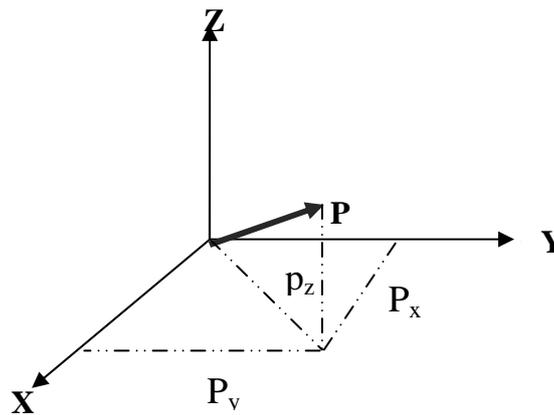


Figure II.7: Représentation d'un point [5].

b. Coordonnées homogène d'une direction (vecteur libre) :

Les coordonnées homogènes d'un vecteur V sont données par quatre composantes V_x , V_y , V_z (coordonnées cartésiennes du vecteur V), la quatrième est nulle [5].

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

c. Coordonnées homogènes d'un plan :

Soit le plan $\Phi = \alpha .x + \beta .y + \gamma .z + \delta = 0$. (II.5)

Les coordonnées homogènes de Φ sont donnés par le vecteur ligne Q avec :

$Q = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta]$ α, β, γ et δ sont des réels.

Pour tout point du plan Φ le produit matriciel $Q * P$ est nul [5].

$$Q * P = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta] * \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (II.6)$$

d. Transformation des repères :

Pour transformer (translation ou rotation) un repère R_i et l'amener dans un autre repère R_j on fait appel à une matrice de transformation homogène ou bien matrice de passage homogène notée ${}^i T_j$. Soit le repère R_j défini par trois vecteurs unitaires a_j, b_j, c_j et son origine p_j .

Les coordonnées des vecteurs unitaires et de l'origine du repère R_j dans le repère de base R_i sont respectivement données comme suit:

$${}^i\mathbf{a}_j = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7}), \quad {}^i\mathbf{b}_j = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8}), \quad {}^i\mathbf{c}_j = \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9}), \quad {}^i\mathbf{p}_j = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La matrice de transformation homogène est donnée comme suit [5]:

$${}^i\mathbf{T}_j = [{}^i\mathbf{a}_j, {}^i\mathbf{b}_j, {}^i\mathbf{c}_j, {}^i\mathbf{p}_j] = \begin{bmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La figure II.8 représente la transformation de repère.

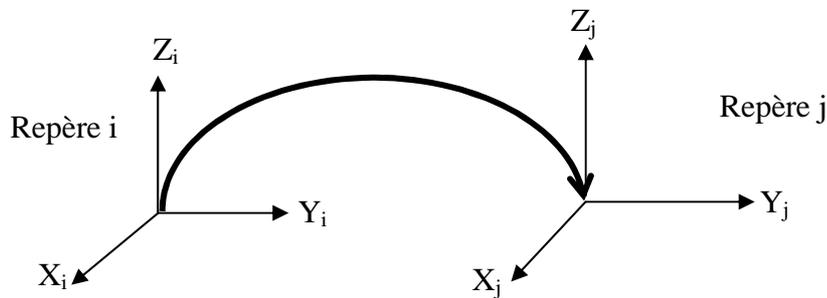


Figure II.8: Transformation de repère [5].

e. Transformation des vecteurs :

Soit le vecteur V dans le repère R_j de coordonnées homogènes données comme suit :

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Le vecteur V défini par son origine O de coordonnées homogènes dans le repère R_j :

$$P = [p_x \ p_y \ p_z \ 1]^T.$$

Exprimons le vecteur V défini dans R_j dans un autre repère R_i

$${}^i\mathbf{V}_j = {}^i\mathbf{a}_j \cdot p_x + {}^i\mathbf{b}_j \cdot p_y + {}^i\mathbf{c}_j \cdot p_z + {}^i\mathbf{O}_j = {}^i\mathbf{T}_j * P \quad (\text{II.13})$$

La matrice ${}^i\mathbf{T}_j$ nous permet d'exprimer dans le repère R_i les coordonnées de tout point appartenant au repère R_j [5].

La figure II.9 illustre la transformation de vecteur.

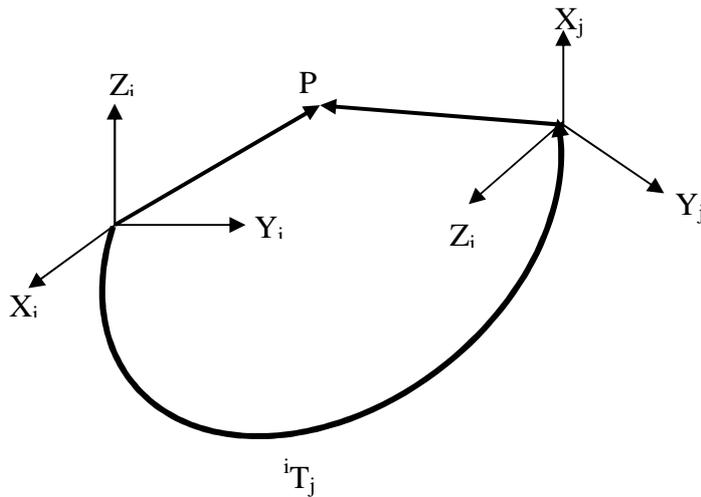


Figure II.9: Transformation de vecteurs [5].

f. Transformations de plans :

Soit un plan Φ défini dans le repère R_i décrit par le vecteur ligne ${}^iQ = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta]$.

La matrice de transformation homogène iQ nous permet d'exprimer un plan dans un autre repère est : ${}^jQ = {}^iQ \ {}^iT_j$

II.2.1.3. Application de la matrice de transformation homogène :

a. Matrice de transformation de translation :

Faisons subir au repère R_i une translation donnée par $d = [a \ b \ c]^T$ avec d coordonné de l'origine du nouveau repère R_j .

La figure II.10 montre la transformation de translation.

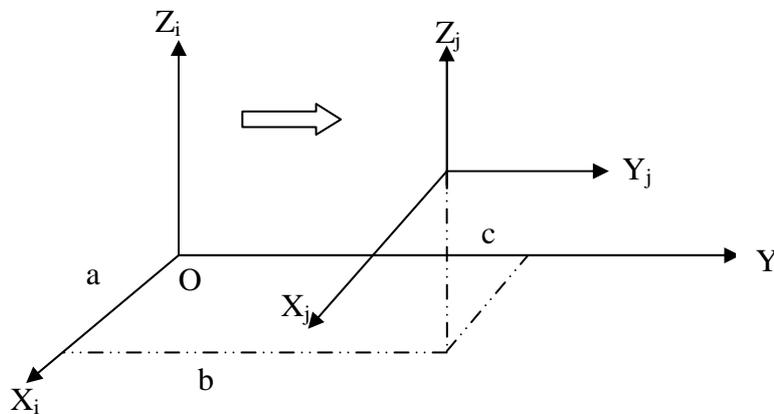


Figure II.10: Translation d'un repère [5].

La translation notée **Trans(x, y, z)** est donnée par :

$$\mathbf{Trans}(x, y, z) = {}^i T_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

b. Matrice de transformation de rotation :

b.1. Rotation autour de l'axe X :

Faisons subir au repère R_i une rotation θ autour de l'axe X.

$$\begin{cases} \vec{a}_j = \vec{a}_i & (\text{II.15}) \\ \vec{b}_j = \cos(\theta) \cdot \vec{b}_i + \sin(\theta) \cdot \vec{c}_i & (\text{II.16}) \\ \vec{c}_j = \cos(\theta) \cdot \vec{c}_i - \sin(\theta) \cdot \vec{b}_i & (\text{II.17}) \end{cases}$$

Le schéma de transformation de rotation autour de l'axe notée **Rot(x, θ)** est donnée dans la figure II.11:

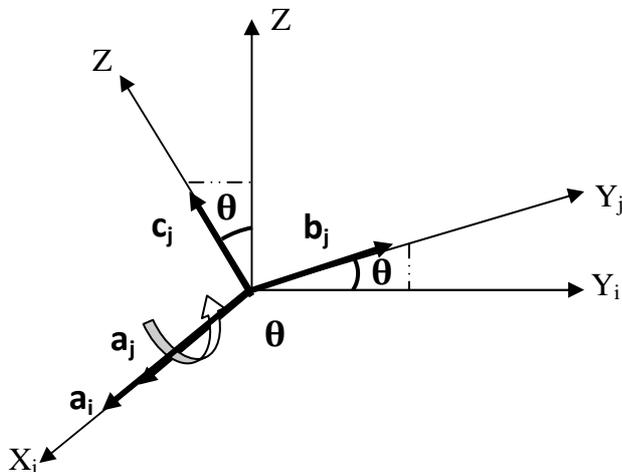


Figure II.11: transformation de rotation autour de l'axe X [5].

Pour simplifier les écritures matricielles

Notons : $\cos(\theta) = c(\theta)$.

$\sin(\theta) = s(\theta)$.

$$\mathbf{Rot}(\mathbf{x}, \theta) = {}^i\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(\theta) & -s(\theta) & 0 \\ 0 & s(\theta) & c(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

b.2. Rotation autour de l'axe Y :

Faisons subir au repère R_i une rotation ω autour de l'axe Y.

$$\begin{cases} \vec{a}_j = c(\omega) \cdot \vec{a}_i + s(\omega) \cdot c_i & (\text{II.19}) \\ \vec{b}_j = \vec{b}_i & (\text{II.20}) \\ \vec{c}_j = s(\omega) \cdot \vec{a}_i + c(\omega) \cdot c_i & (\text{II.21}) \end{cases}$$

Cette rotation est donné dans la figure II.12.

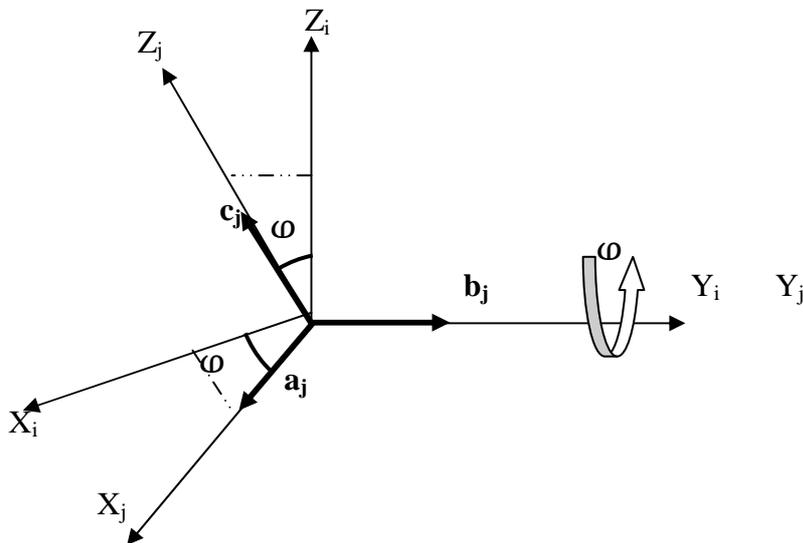


Figure II.12: Transformation de rotation atour de l'axe Y [5].

$$\mathbf{Rot}(\mathbf{y}, \omega) = {}^i\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} c(\omega) & 0 & s(\omega) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s(\omega) & 0 & c(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

b.3. Rotation autour de l'axe Z :

Faisons subir au repère R_i une rotation Ψ autour de l'axe Z.

$$\begin{cases} \vec{a}_j = c(\Psi) \cdot \vec{a}_i - s(\Psi) \cdot \vec{b}_i & \text{(II.23)} \\ \vec{b}_j = s(\Psi) \cdot \vec{a}_i + c(\Psi) \cdot \vec{b}_i & \text{(II.24)} \\ \vec{c}_j = \vec{c}_i & \text{(II.25)} \end{cases}$$

La figure II.13 illustre la rotation autour de Z.

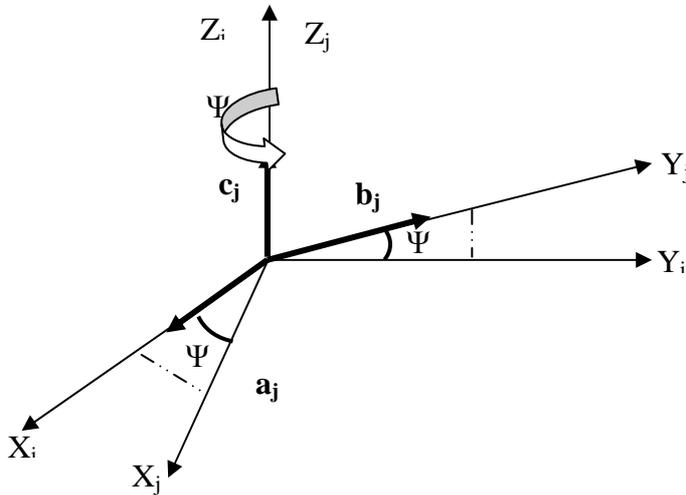


Figure II.13: Transformation de rotation autour de l'axe Z [5].

$$\text{Rot}(z, \Psi) = {}^i T_j = \begin{bmatrix} c(\Psi) & -s(\Psi) & 0 & 0 \\ s(\Psi) & c(\Psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.26)}$$

II.2.1.4. Propriété de la matrice de transformation homogène:

a. La matrice de transformation homogène peut s'écrire comme suit:

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.27)}$$

Avec **A**: la matrice de rotation.

P: la matrice de translation.

b. L'inverse de la matrice **A** est sa transposée $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^T$ c'est-à-dire que la matrice **A** est orthogonale.

c. L'inverse de la matrice ${}^i T_j$ est la matrice homogène ${}^j T_i : {}^i T_j^{-1} = {}^j T_i$

d. Rotation successives, autour du même axe :

$$\text{Rot}(\mathbf{x}, \theta_1) * \text{Rot}(\mathbf{x}, \theta_2) = \text{Rot}(\mathbf{x}, \theta_1 + \theta_2) . \quad (\text{II.28})$$

e. Soit le repère R_0 , faisons lui subir k transformations pour l'amener au repère R_k , chaque transformation est définie par rapport au repère R_{k-1}

La matrice de transformation homogène qui réalise cette opération est définie par :

$${}^0T_k = {}^0T_1, {}^1T_2, \dots, {}^{k-1}T_k \quad (\text{II.29})$$

f. Soit les repères R_i et R_j , R_j est défini dans R_i par la transformation ${}^i T_j$.

Faisons subir au repère R_j une transformation donnée par T par rapport au repère R_i , notons le repère résultant par R_j' .

La matrice de transformation homogène qui réalise cette opération est définie comme suit :

$${}^i T_{j'} = T . {}^i T_j \quad (\text{II.30})$$

- La multiplication à gauche est utilisée lorsque la transformation se fait par rapport au repère courant R_j .

- La multiplication à droite est utilisée lorsque la transformation se fait par rapport au repère de référence R_i [5].

II.2.2. Représentation de l'orientation d'un solide dans l'espace :

Pour décrire l'orientation d'un solide, plusieurs méthodes sont disponibles. Généralement, on utilise la méthode des angles d'Euler (Les angles roulis, tangage et lacet).

Ces angles sont très utilisés en robotique industrielle, ils portent les noms de roll, pitch et yaw en anglais. Il s'agit en fait d'angles d'Euler non classiques, les rotations s'effectuent autour d'axes fixe.

Les angles $\alpha, \beta,$ et γ sont respectivement désignés sous les noms d'angles de roulis, tangage et lacet. Chaque nouvelle rotation étant effectuée par rapport à un axe du repère fixe R .

La figure II.14 représente les angles d'Euler.

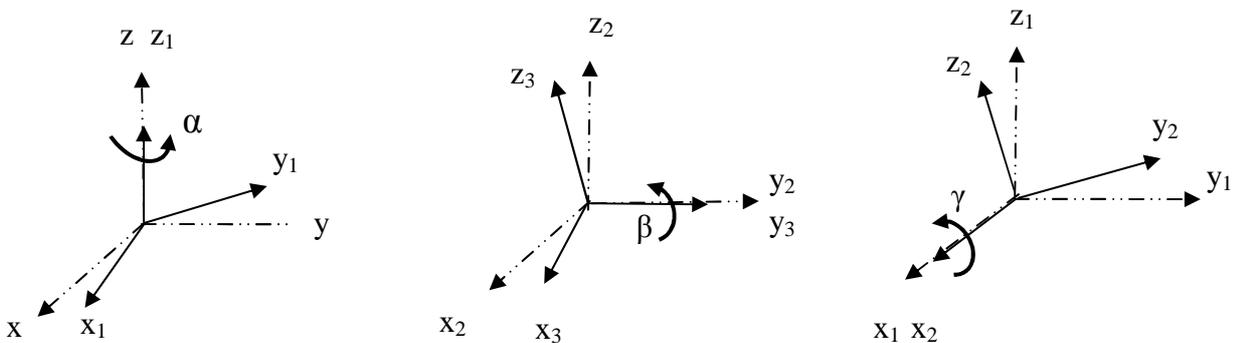


Figure II.14 : Les angles de roulis, tangage et lacet

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(z, \alpha) \cdot \mathbf{R}(y, \beta) \cdot \mathbf{R}(x, \gamma) \quad (\text{II.31})$$

La matrice d'orientation s'écrit :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

La transformation inverse permet d'établir les angles de roulis, tangage et lacet à partir des cosinus directeurs :

- Si $\beta \neq \pi/2$:

$$\alpha = \text{atan2}(a_y, a_x) \quad (\text{II.32})$$

$$\beta = \text{atan2}(-a_z, \sqrt{a_x^2 + a_y^2}) \quad (\text{II.33})$$

$$\gamma = \text{atan2}(b_z, c_z) \quad (\text{II.34})$$

- Si $\beta = \pi/2$:

$$\alpha = \text{signe}(\beta) \quad (\text{II.35})$$

$$\gamma = \text{atan2}(c_y, c_x) \quad (\text{II.36})$$

Donc γ et α sont indéterminées.

II.4. Modèle géométrique direct du robot rigide :

II.4.1. Définition :

Le modèle géométrique directe (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal.

Le **MGD** exprime la position et l'orientation du repère de référence R lié à l'outil, relativement à un repère fixe celui de la base R_0 en fonction des variables articulaires motorisée du mécanisme.

L'élément fondamental qui décrit la position et l'orientation d'un repère R_i , d'origine O_i , dans un repère R_j peut se mettre sous une forme matricielle.

Obtenir le modèle géométrique direct consiste à déterminer les relations de la forme suivante :

$$\mathbf{X} = f(\boldsymbol{\theta}) \quad \theta \text{ est de dimension } n$$

$$\mathbf{X} \text{ est de dimension } m$$

Permettant de calculer \mathbf{X} , le vecteur des coordonnées choisies pour représenter la position de l'organe terminal, par rapport au repère R_0 , à partir de la connaissance de $\boldsymbol{\theta}$, et le vecteur des coordonnées articulaires [8].

II.4.2. Configuration et situation d'un bras manipulateur :

De manière classique, la configuration d'un système mécanique est connue quand la position de tous ses points dans R_0 est connue. Pour un bras manipulateur, elle est définie par un vecteur θ de n coordonnées indépendante appelées coordonnées généralisées et elle est égale au nombre d'articulations motorisées.

La configuration est alors définie sur un espace N dont la dimension n est appelée indice de mobilité. N est appelé espace de configuration. Les coordonnées généralisées correspondent aux grandeurs caractéristiques des différentes articulations :

$$\text{On note } \boldsymbol{\theta} = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$$

La situation de X de l'organe terminal est alors définie par m coordonnées indépendantes dites coordonnées opérationnelles, qui donnent la position et l'orientation de l'organe terminal dans R_0 . On définira généralement la situation en fonction de la tâche à accomplir : par exemple on pourra considérer que la position de l'organe terminal et non plus son orientation dans tous les cas, la situation de l'organe terminal est définie sur un espace M , de dimension $m \leq 6$, appelé espace opérationnel.

$$\text{On note : } \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$$

Le choix le plus commun pour les paramètres de position est celui des coordonnées cartésiennes. L'expression de l'orientation de l'organe terminal dépend du choix des paramètres angulaires [6].

Pour la modélisation des robots il faut une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes ont été proposées: [Renaud 75], [Khalil 76], [Borrel 79], la méthode la plus répandue est Denavit-Hartenberg [Denavit 55], cette méthode est développée pour des structures ouvertes simples, et dans notre cas c'est cette méthode qu'on va utiliser.

II.4.3. Paramètres de Denavit-Hartenberg :

Denavit et Hartenberg ont développé en 1955 une méthode systématique basée sur la matrice de transformation homogène. Elle permet le passage entre articulations adjacentes d'un système robotique. Elle concerne les chaînes cinématiques ouvertes où l'articulation possède uniquement un degré de liberté, et les surfaces adjacentes restent en contact.

Pour déterminer les paramètres géométriques du robot, on utilise la méthode de Denavit et Hartenberg qui impose les conventions suivantes :

- Le robot est composé de six corps noté : $c_0 \dots c_5$ avec c_0 désigne la base du robot et c_5 désigne le corps porteur de l'organe terminal.
- L'articulation i connecte le corps c_{i-1} au corps c_i .
- Les corps sont rigides (les articulations du robot sont supposées idéales).
- La variable de l'articulation est notée θ_i .
- On associe au corps c_i le repère R_i qui est défini comme suit :
 - L'axe Z_i est confondu avec l'axe de l'articulation i .
 - L'axe X_{i-1} est porté par la perpendiculaire commune aux axes Z_{i-1} et Z_i .
 - Si les axes Z_{i-1} et Z_i sont parallèles ou colinéaires le choix de l'axe X_i se fait de telle manière à simplifier notre système rendre d_i nul.
 - Si Z_{i-1} et Z_i ne se coupent pas et on choisit X_i de manière à être la parallèle avec l'axe perpendiculaire à Z_{i-1} et Z_i .
- On place les axes Z_i portés par les axes des articulations puis les axes X_i .
- Le passage d'un repère R_{i-1} au repère R_i est défini par quatre paramètres :
 - α_i angle entre Z_{i-1} et Z_i (rotation autour de X_i).
 - a_i distance entre Z_{i-1} et Z_i le long de X_i .
 - θ_i angle entre X_{i-1} et X_i (rotation autour de Z_i).
 - d_i distance entre X_{i-1} et X_i le long de Z_i . [6]

La figure II.15 présente les paramètres de Denavit et Hartenberg.

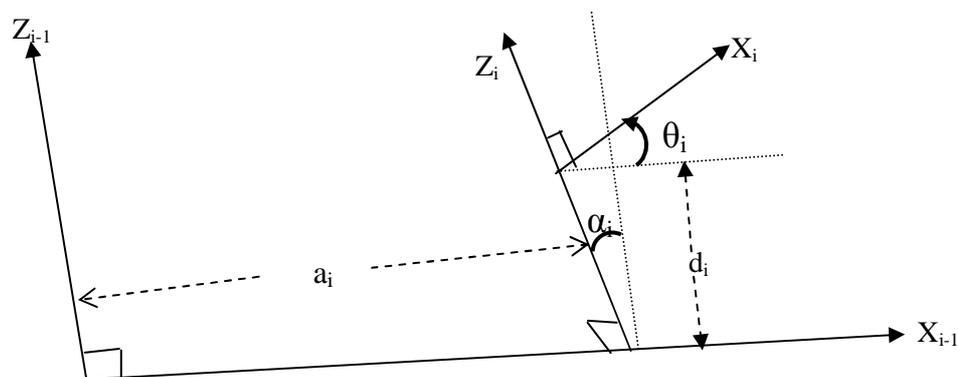


Figure II.15: Paramètres de Denavit et Hartenberg.

La matrice de transformation homogène s'écrit donc :

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(Z_{i-1}, \theta_i) \cdot \text{Trans}(Z_{i-1}, d_i) \cdot \text{Trans}(X_i, a_i) \cdot \text{Rot}(X_i, \alpha_i) \quad (\text{II.37})$$

${}^{i-1}T_i =$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

La matrice de transformation homogène s'écrit donc :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

La figure II.16 montre les paramètres intervenant dans la transformation :

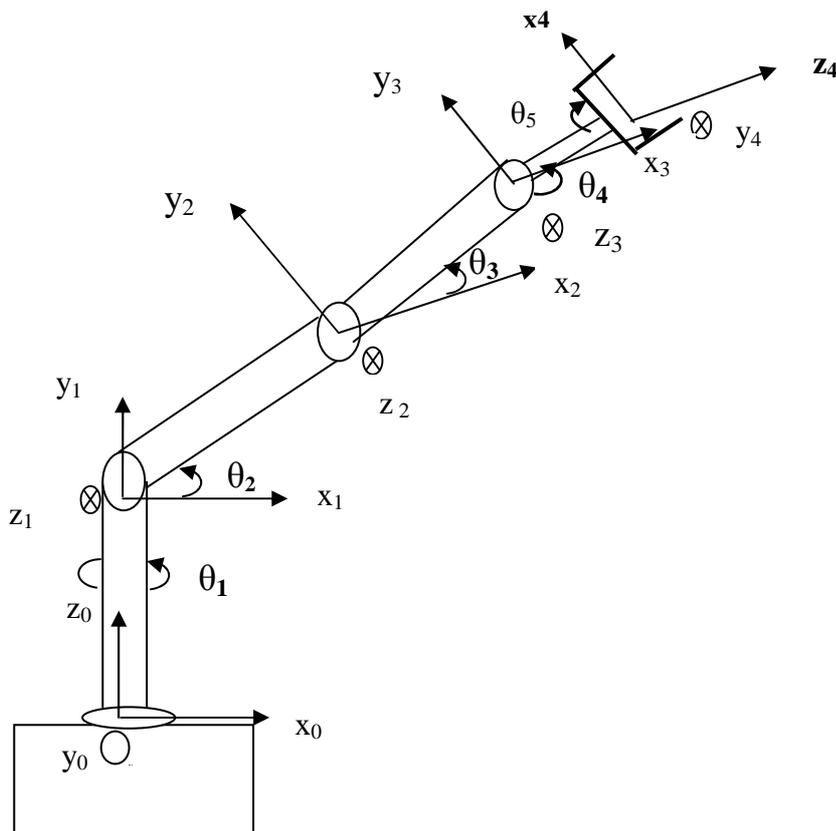


Figure II.16: L'application des paramètres de Denavit sur un robot rigide.

Le tableau II.1 donne les valeurs de chaque paramètre de Denavit pour chaque corps :

	θ_i	a_i	d_i	α_i
Segment n°1	θ_1	0	L_1	$\pi/2$
Segment n°2	θ_2	L_2	0	0
Segment n°3	θ_3	L_3	0	0
Segment n°4	θ_4	0	0	$\pi/2$
Segment n°5	θ_5	0	L_4	0

Tableau II.1 : Les paramètres Denavit-Hartenberg.

II.5. Calcul du modèle géométrique direct :

II.5.1. Calcul de matrice de position :

$${}^0T_1 = \text{Rot}(Z_0, \theta_1) \cdot \text{Trans}(Z_0, d_1) \cdot \text{Trans}(X_1, a_1) \cdot \text{Rot}(X_1, \alpha_1) \quad (\text{II.40})$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

$${}^1T_2 = \text{Rot}(Z_1, \theta_2) \cdot \text{Trans}(Z_1, d_2) \cdot \text{Trans}(X_2, a_2) \cdot \text{Rot}(X_2, \alpha_2) \quad (\text{II.41})$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

$${}^2T_3 = \text{Rot}(Z_2, \theta_3) \cdot \text{Trans}(Z_2, d_3) \cdot \text{Trans}(X_3, a_3) \cdot \text{Rot}(X_3, \alpha_3) \quad (\text{II.43})$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & L_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

$${}^0T_3 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \quad (\text{II.45})$$

$${}^0\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos (\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 \sin (\theta_2 + \theta_3) & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 + \theta_3)) \\ \sin \theta_1 \cos (\theta_2 + \theta_3) & -\sin \theta_1 \sin (\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_1 & \sin \theta_1 (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 + \theta_3)) \\ \sin (\theta_2 + \theta_3) & \cos (\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin (\theta_2 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(II.46)

Le vecteur de position est :

$$\text{Tr} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 + \theta_3)) \\ \sin \theta_1 (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos (\theta_2 + \theta_3)) \\ L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin (\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

II.5.2. Calcul de matrice de rotation :

$${}^3\mathbf{T}_4 = \text{Rot} (Z_3, \theta_4). \text{Trans} (Z_3, d_4). \text{Trans} (X_4, a_4). \text{Rot} (X_4, \alpha_4) \quad (\text{II.48})$$

$${}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

$${}^4\mathbf{T}_5 = \text{Rot} (Z_4, \theta_5). \text{Trans} (Z_4, d_5). \text{Trans} (X_5, a_5). \text{Rot} (X_5, \alpha_5) \quad (\text{II.50})$$

$${}^4\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

$${}^3\mathbf{T}_5 = {}^3\mathbf{T}_4 \cdot {}^4\mathbf{T}_5 \quad (\text{II.52})$$

$${}^3\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 & -\cos \theta_4 \sin \theta_5 & \sin \theta_4 & L_4 \sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 & -\sin \theta_4 \sin \theta_5 & -\cos \theta_4 & -L_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

La matrice de rotation est donc :

$$R=^3T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 & -\cos \theta_4 \sin \theta_5 & \sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 & -\sin \theta_4 \sin \theta_5 & -\cos \theta_4 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Par identification avec la matrice de rotation des angles de tangage roulis et lacet qui est donné par :

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

On obtient alors :

$$\cos \theta_4 \cos \theta_5 = \cos \alpha \cos \beta = a_x \quad (\text{II.57})$$

$$\sin \theta_4 \cos \theta_5 = \sin \alpha \cos \beta = a_y \quad (\text{II.58})$$

$$\sin \theta_5 = -\sin \beta = a_z \quad (\text{II.59})$$

$$\cos \theta_5 = \sin \gamma \cos \beta = b_z \quad (\text{II.60})$$

$$\cos \beta \cos \gamma = 0 = c_z \quad (\text{II.61})$$

On a: $\beta \neq \pi/2$:

Donc :

$$\alpha = \text{atan2}(a_y, a_x) \quad \text{d'où } \alpha = \theta_4 \quad (\text{II.62})$$

$$\beta = \text{atan2}(-a_z, \sqrt{a_x^2 + a_y^2}) \quad \text{d'où } \beta = \theta_5 \quad (\text{II.63})$$

$$\gamma = \text{atan2}(b_z, c_z) \quad \text{d'où } \gamma = \pi/2 \quad (\text{II.64})$$

II.6. Modèle géométrique inverse du robot rigide :

II.6.1. Définition :

Le problème consiste à calculer les coordonnées articulaires du robot rigide à partir des coordonnées opérationnelles.

II.6.2. Solubilité du MGI :

La solubilité du MGI, n'est autre que l'existence d'un nombre fini de solutions fondamental en matière de conception. Supposons que la situation x d'un bras manipulateur à n liaisons est exprimée par un nombre m minimal de paramètres. Supposons par ailleurs que x est une situation accessible avec le bras manipulateur, c'est-à-dire que la situation appartient à l'espace de travail. Alors :

- Si $n < m$, il n'existe pas de solution pour le MGI.
- Si $n = m$, il existe un nombre fini de solutions en dehors de certaines configurations, appelées singulières.
- Si $n > m$, il existe une infinité de solutions.

Pour calculer le MGI, on a le choix entre plusieurs méthodes, on cite, la méthode de Paul, la méthode de Pieper et la méthode générale de Raghavan et Roth. En ce qui nous concerne nous avons choisi de séparer la position du bras de celle de l'organe terminal.

II.7. Calcul du modèle géométrique inverse :

Le calcul du modèle inverse en position est fait par un autre binôme.

Calcul de la matrice en orientation (de l'organe terminal) :

$${}^3T_5 = {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \quad (II.65)$$

$${}^3T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 & -\cos \theta_4 \sin \theta_5 & \sin \theta_4 & L_4 \sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 & -\sin \theta_4 \sin \theta_5 & -\cos \theta_4 & -L_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.66)$$

La matrice de rotation est donc :

$$R = {}^3T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 & -\cos \theta_4 \sin \theta_5 & \sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 \cos \theta_5 & -\sin \theta_4 \sin \theta_5 & -\cos \theta_4 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.67)$$

Par identification avec la matrice de rotation des angles de tangage roulis et lacet qui est donné par :

$$R =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \gamma \cos \beta & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (II.68)$$

On obtient alors :

$$\cos \theta_4 \cos \theta_5 = \cos \alpha \cos \beta = a_x \quad (II.69)$$

$$\sin \theta_4 \cos \theta_5 = \sin \alpha \cos \beta = a_y \quad (II.70)$$

$$\sin \theta_5 = -\sin \beta = a_z \quad (\text{II.71})$$

$$\cos \theta_5 = \sin \gamma \cos \beta = b_z \quad (\text{II.72})$$

$$\cos \beta \cos \gamma = 0 = c_z \quad (\text{II.73})$$

On a: $\beta \neq \pi/2$.

Donc :

$$\alpha = \text{atan2}(a_y, a_x) \quad \text{d'où } \alpha = \theta_4 \quad (\text{II.74})$$

$$\beta = \text{atan2}(-a_z, \sqrt{a_x^2 + a_y^2}) \quad \text{d'où } \beta = \theta_5 \quad (\text{II.75})$$

$$\gamma = \text{atan2}(b_z, c_z) \quad \text{d'où } \gamma = \pi/2 \quad (\text{II.76})$$

II.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle géométrique direct et inverse d'un bras manipulateur et nous avons calculé le modèle géométrique du bras qui va être réalisé en particulier de la pince et ceux par la méthode de Denavit-Hartenberg.

Cette méthode se décompose en deux étapes : la première étant d'élaborer une représentation géométrique du robot puis faire un placement de repères selon des règles bien déterminées, la seconde consiste à calculer le modèle géométrique à l'aide des outils mathématique dits transformations homogènes.

Le modèle géométrique direct est unique et est sous forme d'équation explicite, pour le modèle inverse, il n'est pas possible de trouver une forme explicite, on peut calculer une solution particulière par des procédures numériques. Le choix de ces solutions est laissé à l'utilisateur de robot. Il est dicté par la tâche à réaliser.

Dans le chapitre suivant nous allons concevoir notre modèle de pince, nous allons voir le matériel utilisé et le système de commande utilisé.

III.1. Introduction :

On a vu précédemment qu'il existe plusieurs types de pinces. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la fermeture et l'ouverture d'une pince parallèle à deux doigts et à deux degrés de liberté de type RR qu'on va concevoir. Nous allons donc présenter les différents constituants nécessaires comme le capteur de force au niveau du doigt, ainsi que la carte de programmation à utiliser pour la commander. A la fin, nous allons donner les résultats de la visualisation de la PWM des servomoteurs.

III.2. Le schéma synoptique de la pince :

La figure III.1 représente le schéma global de la pince à concevoir et à réaliser, avec ce schéma on va pouvoir choisir les composants à utiliser.

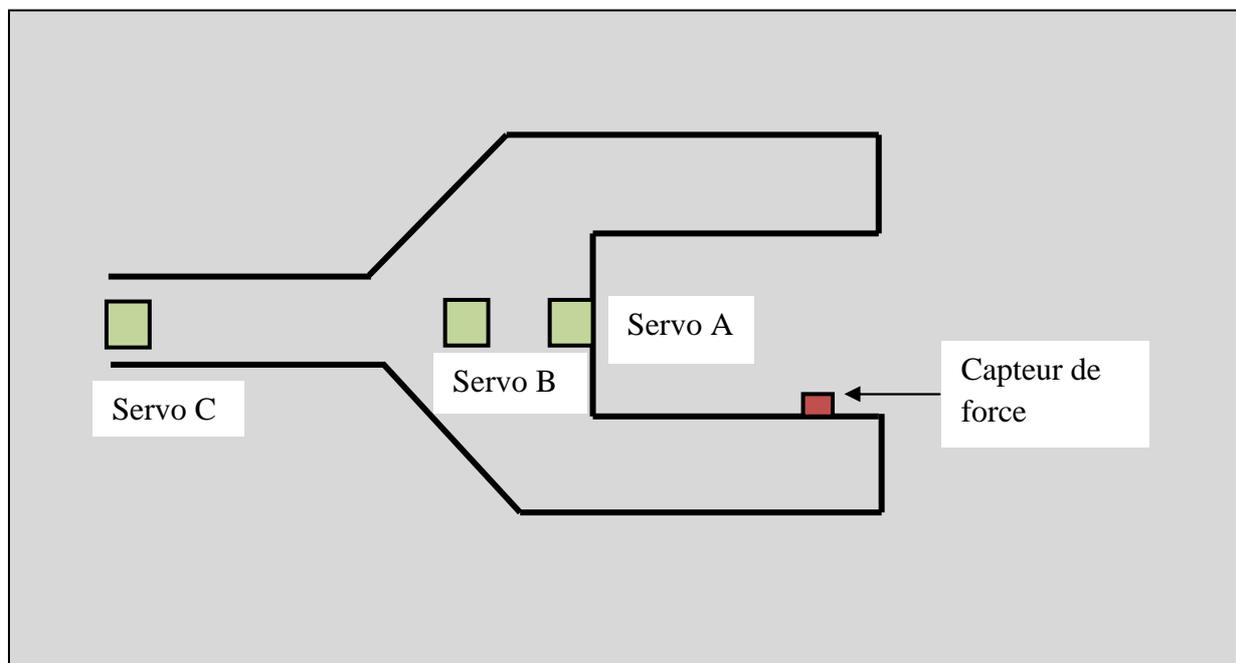


Figure III.1 : Schéma synoptique de la pince.

III.3. Etude mécanique de la pince :

Avant de concevoir il faut d'abord étudier les caractéristiques de la pince, la charge à soulever et le couple nécessaire pour la structure mécanique et son fonctionnement.

III.3.1. Les caractéristiques de la pince à concevoir:

Il est préférable d'utiliser un matériau léger. Parmi ces matériaux : le plastique qui a une masse volumique de 920 Kg/m³ à 1410 Kg/m³ selon la matière, l'aluminium qui a une densité de 2700 Kg/m³.

III.3.2. Calcul du couple :

Les équations utilisées pour calculer le couple nécessaire sont :

$$C = F * L$$

$$F = m * g$$

Tel que :

C est le Couple défini comme une « force » de rotation ou de translation.

F est la force qui agit sur une longueur (**L**) depuis un point de pivot. Dans un plan vertical, la force qui agit sur un objet (provoquant sa chute) est l'accélération due à la gravité (**g** = 9,81 m/s²) multipliée par sa masse.

Avec :

$$1[\text{N}] [\text{m}] = 10.20 [\text{Kg}] [\text{cm}].$$

Exemple :

On se fixe la masse à soulever à 200g et la pince à concevoir doit être légère, dont le poids ne dépasse pas 200g.

Le couple du servo A qui fait mouvoir les doigts avec leur poids qui doit faire moins de 220 g et pour L= 8Cm

$$F = 0.22 * 9.81 = 2.158 \text{ N} \quad (\text{III.1})$$

$$C = 2.158 * 0.08 = 0.172 \text{ N.m} = 1.76 \text{ Kg.cm} \quad (\text{III.2})$$

Pour le couple du servo qui fait la rotation de la pince (servo B) : avec un poids de m= 280g et pour L= 6 Cm

$$F = 0.28 * 9.81 = 2.746 \text{ N} \quad (\text{III.3})$$

$$C = 2.746 * 0.06 = 0.1648 \text{ N.m} = 1.681 \text{ Kg. Cm} \quad (\text{III.4})$$

Le couple du servo C :

Pour m=400g le poids de tout le corps.

$$F = 0.4 * 9.81 = 3.92 \text{ N} \quad (\text{III.5})$$

$$C=3.92*0.12=0.470 \text{ N.m}= 4.79 \text{ Kg.cm}$$

(III.6)

III.4.La partie motrice :

Le choix des servomoteurs se fait avec les calculs obtenu pour le couple, donc on va choisir le servomoteur à utiliser, le capteur et la carte de commande.

III.4.1.Le servomoteur :

Il est capable d'atteindre des positions déterminées, puis de les maintenir. Il est conçu pour produire le mouvement précis d'un élément mécanique selon une commande externe.

Le démarrage et la conservation de la position déterminée sont commandés par un dispositif de réglage. La figure III.2 illustre les éléments de base constituant le servo qui sont :

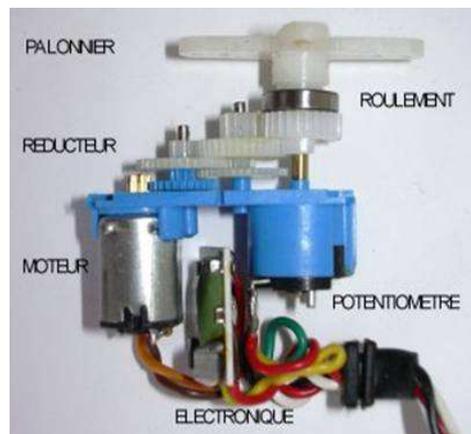


Figure III.2 : constituants d'un servomoteur.

-Un moteur à courant continu.

-Un système réducteur de vitesse à roues dentées qui a deux vocations : la première est de réduire la vitesse de rotation de l'axe de sortie pour permettre un positionnement du servo plus précis et pour que le mouvement lors de son exécution n'endommage pas le système par sa vitesse puisque les moteurs à courant continu tournent à des vitesses trop élevées.

La deuxième vocation est d'augmenter le couple (puissance mécanique de la rotation).

À un instant t si l'on diminue la vitesse tout en voulant garder la même puissance mécanique, cela va augmenter le couple, ainsi déplacer une charge plus lourde.

Cette caractéristique a pour unité le kg.cm (kilogramme-centimètre) qui est donnée par la formule suivante : $C=F \times r$

Avec :

F : la force exercée sur le bras du servomoteur (en kilos).

r: la distance (en m) à laquelle s'exerce cette force par rapport à l'axe de rotation du servomoteur.

-Un potentiomètre : qui sert à l'asservissement de la position. L'axe du potentiomètre est solidaire de l'axe de sortie. Donc le potentiomètre tourne à la même vitesse que l'axe de sortie. En outre la résistance aux bornes du potentiomètre varie en fonction de la position de l'axe, et elle est en rapport avec la durée du signal. Ainsi pour varier la position d'un servomoteur on change la durée de l'impulsion.

-Un circuit électronique pour commander le moteur électrique qui entraîne le palonnier par l'intermédiaire du réducteur.[12]

Pour faire bouger l'axe de sortie il faut lui envoyer un signal sur le fil. Le signal est une impulsion. C'est la largeur de cette impulsion qui détermine l'angle de rotation de l'axe de sortie.

Afin de maintenir la position constante au cours du temps, il va falloir répéter ce signal à chaque durée de temps trop courte. Cela se fera grâce à une carte électronique, dont le principe de fonctionnement est donné dans la figure III.3.

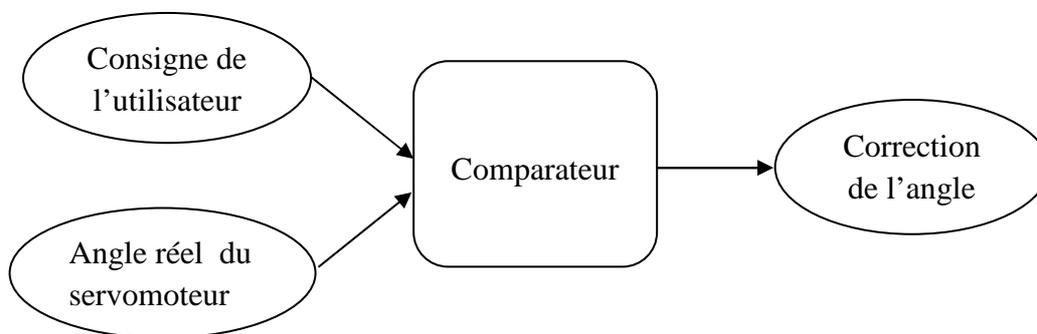


Figure III.3: Principe de fonctionnement de l'électronique de commande d'un servomoteur.

La consigne donnée par l'utilisateur est comparée à la position réelle de l'axe du moteur. Ainsi, s'il y a une différence d'angle entre la consigne et l'angle mesuré par le capteur (le potentiomètre qui est fixé sur l'axe du servomoteur), le comparateur va commander le moteur en le faisant tourner jusqu'à ce que cette différence s'annule.

On a opté pour les servomoteurs du fait qu'ils sont :

- Facile à commander : on peut commander l'arrêt, la marche, et le sens de rotation de ces derniers à l'aide d'un seul fils.

-Puissant : ils nous offrent un couple important dans un volume réduit.

-Précis en position : capable de maintenir cette position.

Il existe plusieurs modèles de servomoteurs et on les choisit selon leurs couples et la disponibilité. Pour notre cas on a choisi d'utiliser trois servo **Futaba S3010** qui ont un couple de 5.18 Kg.cm chacun. Ce servo est représenté dans la figure III.4.



Futaba S3010

Figure III.4: le servomoteur utilisé.

III.4.2. Le capteur de force:

Un capteur de force est un dispositif utilisé pour convertir une force appliquée sur un objet en signal électrique. Deux technologies de capteurs prédominent dans le domaine de la mesure des forces : les capteurs piézoélectriques et les capteurs à jauges de contrainte.

- **Les capteurs piézoélectriques :** ils se composent d'une électrode disposée entre deux disques de cristal. Une fois la charge appliquée sur le capteur, une charge électrique se produit et peut être mesurée à l'aide d'un amplificateur de charge. La charge électrique est proportionnelle à la force appliquée.

- **Les jauges de contraintes :** les capteurs construits sur le principe des jauges de contrainte sont toujours constitués d'un corps d'épreuve agissant comme un ressort sur lequel la force est appliquée. Cette force génère une faible déformation du corps d'épreuve. Les jauges de contrainte sont installées dans les zones propices à la déformation. Cependant, sous l'action de la charge, elles subissent un allongement et enregistrent alors une variation de résistance.

En pratique, les mesures de déformation impliquent rarement des quantités supérieures à quelques microdéformations. Par conséquent, le fait de mesurer une déformation nécessite la mesure précise de très petites variations de la résistance. Pour mesurer des variations si petites de la résistance, les jauges de contrainte sont presque toujours utilisées dans une configuration

en pont avec une source d'excitation de tension, et le pont qui est utilisé est le pont de Wheatstone.

Le pont de Wheatstone se compose de quatre branches résistives avec une tension d'excitation, E , appliquée sur le pont, comme le montre la figure III.5 :

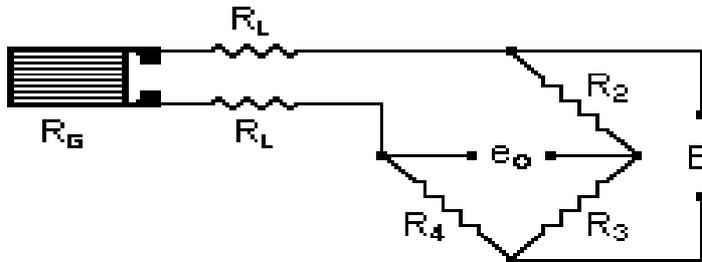


Figure III.5 : branchement du la jauge de contrainte avec le pont de Wheatstone.

Le pont de mesure est alimenté sous une tension et la tension de sortie résultante est proportionnelle à la force appliquée.

Et pour la pince on va utiliser le capteur FSR, qui est un modèle de jauges de contraintes parce qu'il est plus précis, très sensible, il peut capter des touches très léger. Par ailleurs on n'a pas besoin d'un pont pour l'utiliser car il délivre un signal adéquat sans l'amplifier.

Le capteur FSR: Force Sensing Résistances (FSR) est un film polymère épais (PTF) ; dispositif qui présente une diminution de la résistance avec une augmentation de la force appliquée à la surface active.

Il existe plusieurs types de capteur FSR, pour notre cas on a choisi d'utiliser le capteur FSR 402 en raison de sa disponibilité ainsi que pour son faible coût.

Ce capteur est représenté dans la figure III.6.



Figure III.6 : capteur FSR 402.

Avant de placer ce capteur on a effectué un test pour vérifier comment il fonctionne. Pour cela on a connecté les deux broches du senseur à un multimètre positionné sur "Mesure de résistance". Cela permet de vérifier comment la résistance varie. Etant donné que la résistance peut varier vraiment fort. La figure III.7 montre comment tester un FSR avec un multimètre. Lorsque l'on presse le FSR, la résistance du senseur FSR diminue.

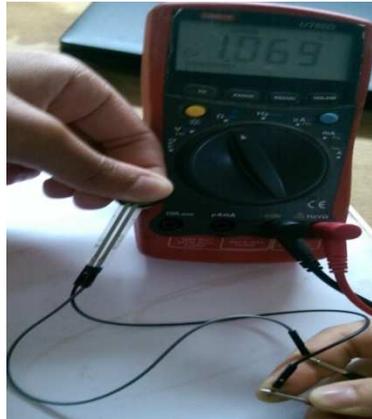


Figure III.7: Tester un FSR.

Le capteur FSR 402 est toujours utilisé avec une résistance notée R_M , appelé résistance de mesure. Elle sert à augmenter la plage de sensibilité de la force souhaitée et limiter le courant. Leurs branchements à la carte arduino est indiqué dans la figure III.8.



Figure III.8: Branchement d'un FSR.

La tension est proportionnelle à l'inverse de la résistance FSR. Plus la résistance diminue plus la tension augmente.

Contrairement aux jauges de contraintes ordinaires qui répondent dès qu'il y a présence de contrainte dans l'environnement du capteur, le capteur FSR ne répond que si la contrainte est appliquée sur le capteur.

Pour commander la pince des signaux de type PWM lui seront envoyé par la carte de commande (Arduino).

III.4.3. La carte de commande :

Cette carte va nous permettre de commander les trois servomoteurs de notre pince, en fonction des orientations désirées et de l'information envoyée à partir du capteur de force. La carte qu'on a utilisée est la carte arduino de type UNO en raison de sa simplicité en commande.

III.4.3.1. Description de la carte arduino UNO:

L'Arduino Uno est une carte microcontrôleur basé sur l'Atmega328. Cette carte dispose :

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)),
- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset) [11].

La figure III.9 représente la carte arduino :

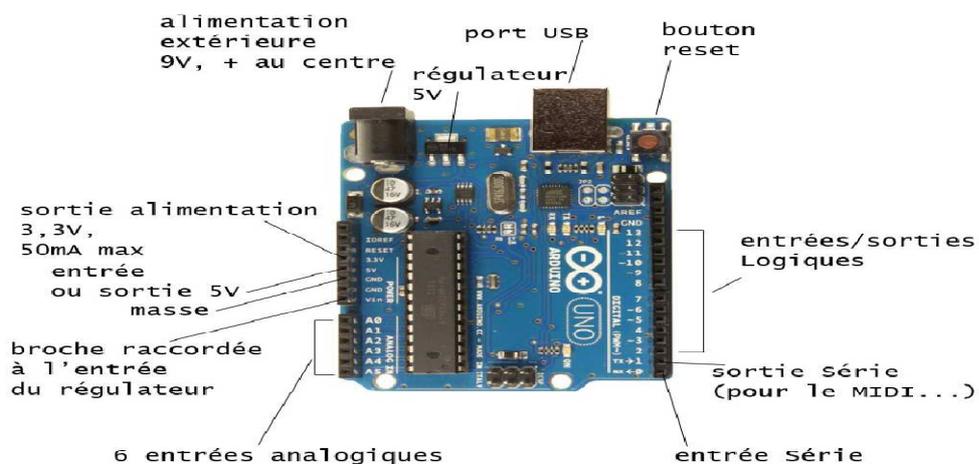


Figure III.9 : Carte arduino UNO

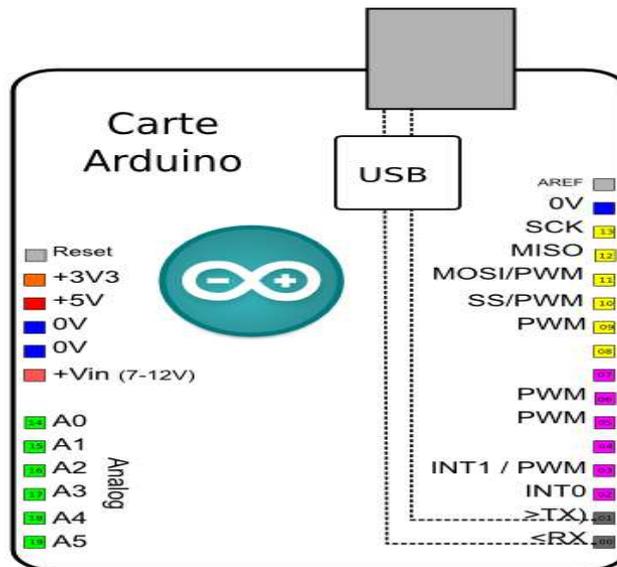


Figure III.10: Brochage de la carte Arduino.

•Le microcontrôleur ATmega 328 :

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO est un microcontrôleur **ATmega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits.

Ses principales caractéristiques sont :

- FLASH = mémoire programme de 32Ko. Elle conserve son contenu indéfiniment même lorsque la carte n'est pas alimentée.
- SRAM = données (volatiles) 2Ko. Elle est utilisée pour stocker les variables de programmes et les résultats temporaires lors de calcul. Elle peut être utilisée en lecture ou en écriture à tout instant une fois qu'il est alimenté.
- EEPROM = données (non volatiles) 1Ko. La lecture l'écriture sont à chaque instant.
- Digital I/O (entrées-sorties Tout Ou Rien) qui est de 3 ports Port B, Port C, Port D

(Soit 23 broches en tout I/O)

- Timers/Counters : Timer0 et Timer2 (comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16bits)

Chaque timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM. (6 broches)

Plusieurs broches multifonctions : certaines broches peuvent avoir plusieurs fonctions différentes choisies par programmation.

- Analog to Digital Converter (resolution 10bits) = 6 entrees multiplexes
- Bus I2C (TWI Two Wire Interface) = le bus est exploité via les broches

SDA (analog5)/SCL (analog4).

- Port série (USART) = émission/réception série via les broches TXD(pin 0 rx) /RXD (pin 1 tx).
- Comparateur Analogique = broches (pin 6) et (pin 7)

La figure III.11 représente le brochage de ce microcontrôleur.

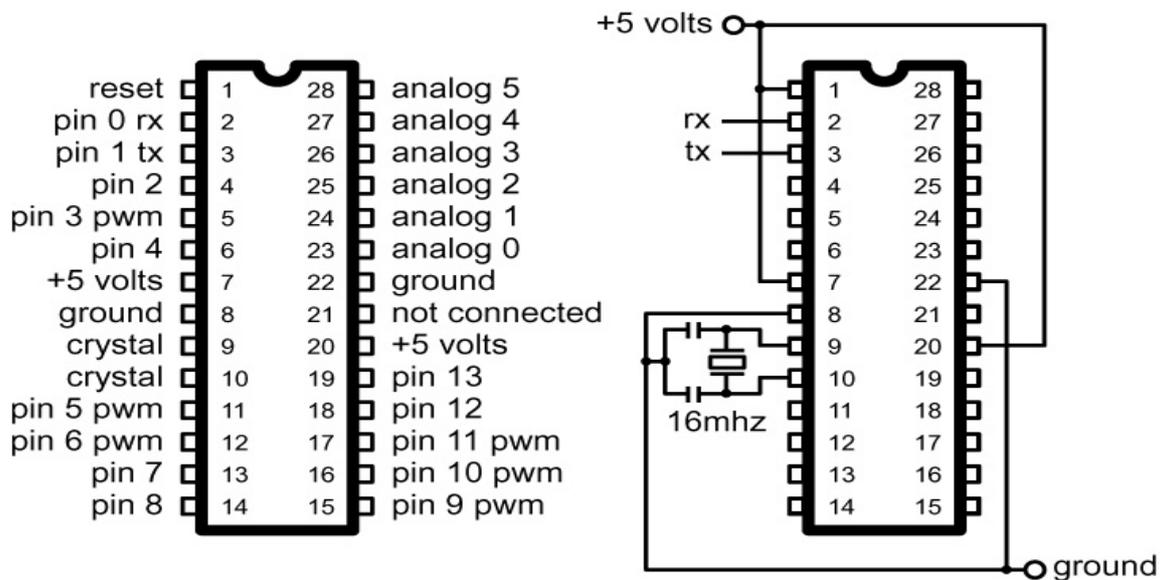


Figure III.11: Schéma du microcontrôleur ATmega328.

III.4.3.2. Le logiciel arduino:

Le logiciel de programmation EDI (Espace de développement intégrée) de l'Arduino qui est basé sur les langages C et C++ est un éditeur de texte qui permet :

- L'écriture est la modification d'un programme. la fenêtre de l'interface du logiciel arduino et les différentes parties du programme sont données dans la figure III.12.

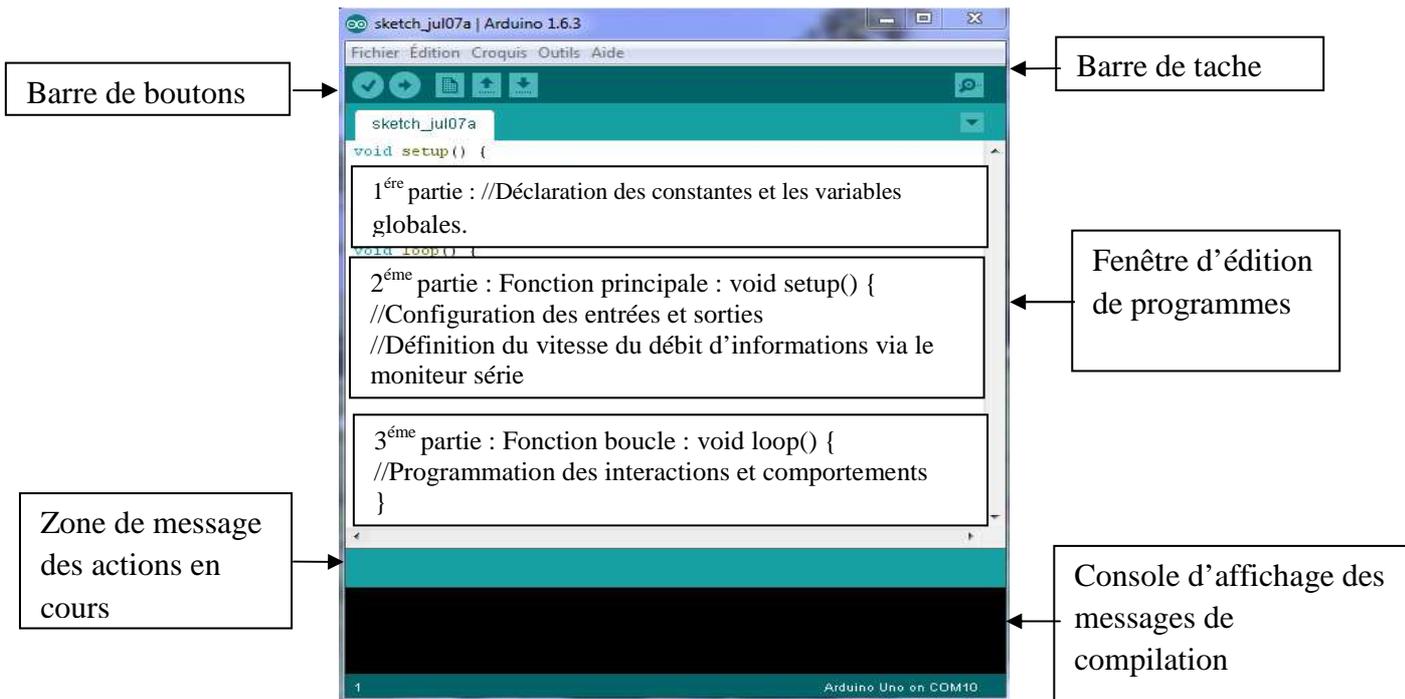


Figure III.12: Logiciel arduino.

b- La communication avec la carte grâce au "terminal série" (faire apparaître des informations de la carte sur l'écran de l'ordinateur), comme le montre la figure III.13 :



Figure III.13: Le terminal série

Cette fenêtre, permet d'envoyer des messages sur la voie série de l'ordinateur, recevoir les messages que l'Arduino nous envoie, Du côté du programme : On utilise l'objet Serial Arduino intégrée pour communiquer avec le port série ce dernier gère l'envoi et la réception des informations.

Les étapes d'implémentation de cet objet dans notre programme :

1. Création de l'objet Serial (établissement d'une nouvelle communication série)
Avec la fonction : **Serial.begin ()**
2. Il faut alors régler le débit de communication sur la même valeur que nous allons programmer la carte Arduino et celle utilisée par le programme.
3. envoie les chaînes sur la voie série

L'objet Serial est muni d'un panel de fonctions qui lui sont propres. Cet objet est capable de réaliser ces fonctions selon ce que le programme lui ordonne de faire, comme ces deux fonctions :

Print () : cette fonction permet d'envoyer des données sur la voie série. On peut par exemple envoyer un caractère, une chaîne de caractère ou d'autres données.

Println () : c'est la même fonction que la précédente, elle permet simplement un retour à la ligne à la fin du message envoyé.

III.4.3.3. Le signal de commande PWM :

a. Définition :

La PWM est un signal numérique, dont la tension peut prendre deux valeurs seulement. Le signal est carré. Le niveau bas correspond généralement à 0 Volt. La période est notée **T** ; la durée de l'impulsion pour laquelle la tension est celle de l'état haut est appelée **t_h** qui est représenté dans la figure III.14.

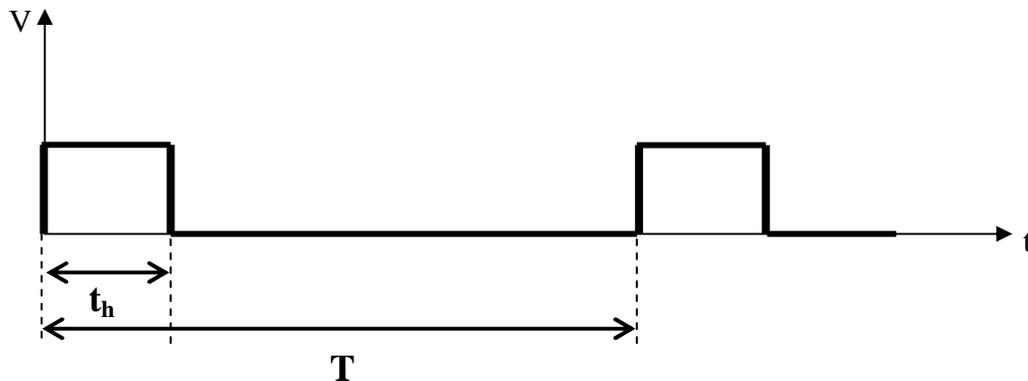


Figure III.14: signal du PWM.

L'intérêt de la PWM est que la tension appliquée au moteur pendant t_h est V_{cc} . Celle-ci est suffisante pour vaincre les frottements et faire tourner le moteur. La tension moyenne appliquée au moteur est proportionnelle au rapport cyclique.

La fréquence d'un signal périodique correspond au nombre de fois que la période se répète en une seconde comme elle est représentée dans la figure III.15.

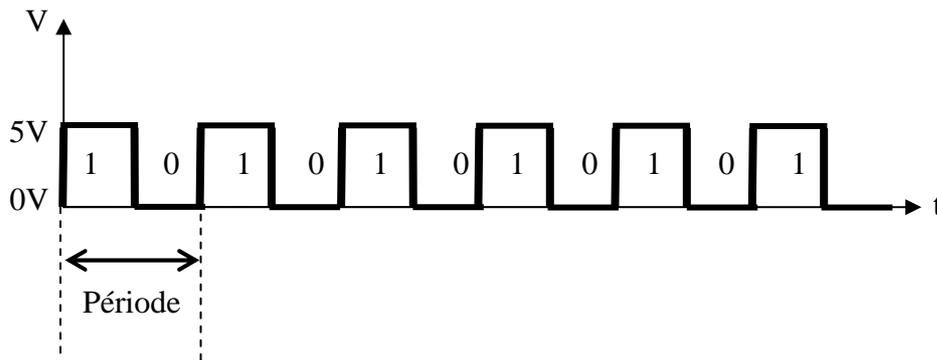


Figure III.15: Fréquence du PWM.

Le rapport cyclique, désigne le fait que le niveau logique 1 peut ne pas durer le même temps que le niveau logique 0. C'est-à-dire que la PWM est un signal de fréquence fixe qui a un rapport cyclique qui varie avec le temps. Le rapport cyclique est mesuré en pour cent (%).

Plus le pourcentage est élevé, plus le niveau logique 1 est présent dans la période et moins le niveau logique 0 l'est. Et inversement.

Le rapport cyclique est donné par :

$$\alpha = 100 * \frac{t_h}{T} \quad (\text{III.7})$$

-Si $t_h = 0$ alors $a = 0\%$ et la tension moyenne de sortie est nulle.

-Si $t_h = T$ alors $a = 100\%$ et la tension moyenne de sortie est égale à V_{cc} .

b. La PWM de l'Arduino :

Sur la carte Arduino ; 6 broches sont compatibles avec la génération d'une PWM. Elles sont repérées par le symbole tilde ~. Ces broches sont : 3, 5, 6, 9, 10 et 11.

La fréquence de ce signal est fixe, elle ne varie pas au cours du temps. Pour Arduino elle est d'environ 490Hz.

Arduino intègre une fonction pour utiliser la PWM. La fonction permettant de réaliser ce signal : `analogWrite()`. Elle prend deux arguments :

- Le premier est le numéro de la broche où l'on veut générer la PWM
- Le second argument représente la valeur du rapport cyclique à appliquer.

On n'exprime pas cette valeur en pourcentage, mais avec un nombre entier compris entre 0 et 255.

Le rapport cyclique s'exprime de 0 à 100 % en temps normal. Cependant, dans cette fonction il s'exprimera de 0 à 255 (sur 8 bits). Ainsi, pour un rapport cyclique de 0% on enverra la valeur 0, pour un rapport de 50% on enverra 127 et pour 100% ce sera 255.

Les autres valeurs sont considérées de manière proportionnelle entre les deux. Le schéma de ces différentes valeurs est donné dans la figure III.16.

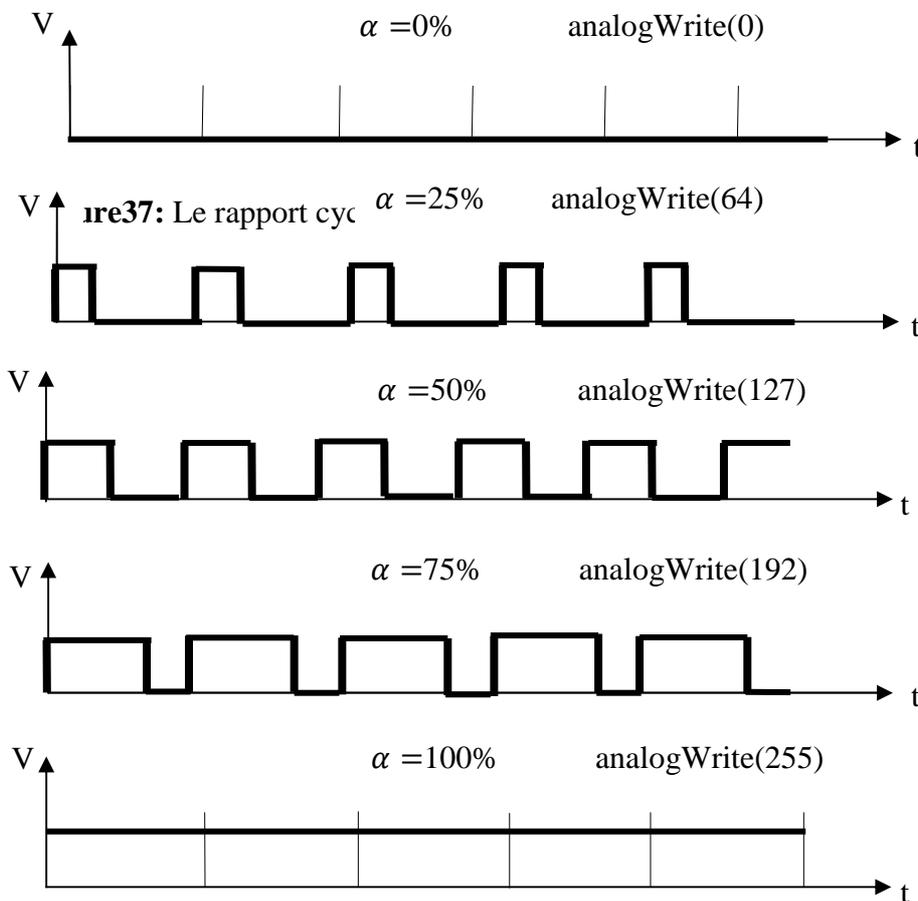


Figure III.16: Le rapport cyclique.

c. PWM et servomoteur :

Le servomoteur intègre un système électronique qui convertit un signal numérique en un angle qui sera reproduit sur le palonnier grâce au moteur électrique à courant continu présent dans le servomoteur.

Ce signal de commande n'est rien d'autre qu'un signal logique périodique. C'est la PWM, qui est facile à générer à partir d'un microcontrôleur.

Le servo est alimenté avec 3 fils: une entrée 5V (ou plus), une masse et une entrée d'impulsion (la commande du servo). C'est à partir de cette entrée d'impulsion qu'est envoyé le signal numérique modulé en impulsions, comme le montre la figure III.17 :

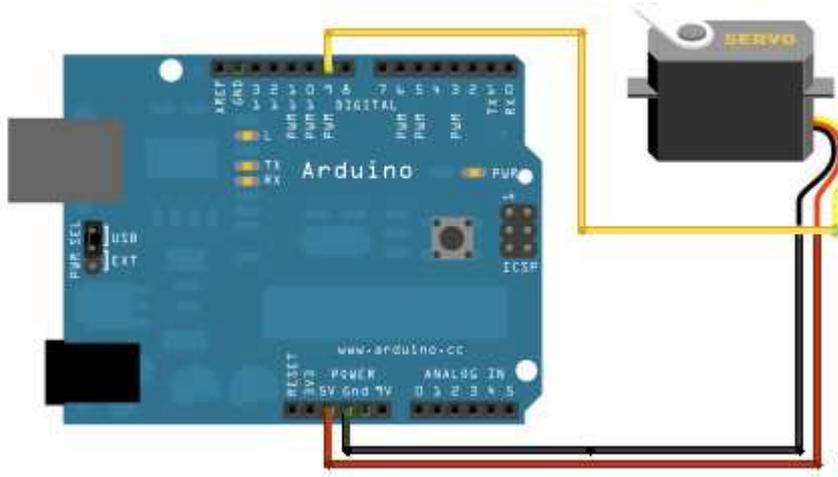


Figure III.17 : Exemple de connexion d'un servomoteur sur un Arduino

La largeur des créneaux va commander l'angle de l'arbre du servomoteur. La durée du créneau doit être comprise entre 1 et 2ms. Une durée de 1ms correspond à l'angle 0° et 2ms correspond à l'angle 180° . La période entre deux créneaux doit être de 20ms maximum.

Le fonctionnement est donné par la figure III.18:

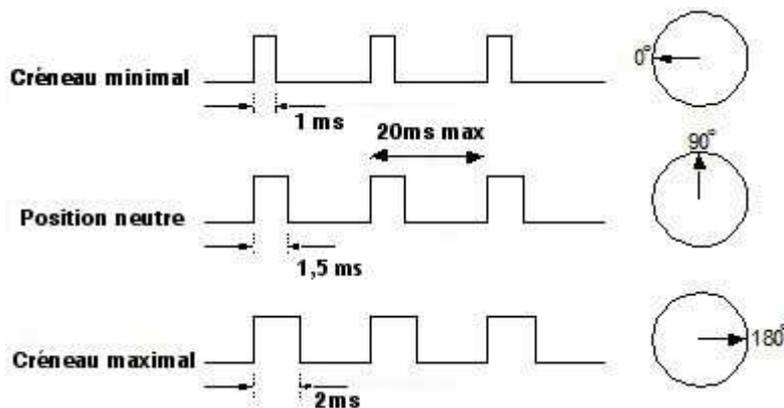


Figure III.18: Fonctionnement du servomoteur avec le PWM.

III.5. L'alimentation :

Les servomoteurs qu'on va utiliser nécessite une tension de 4.8 V dans ce cas on va utiliser la tension délivré par la carte arduino, qui est du port USB.

III.6. Logiciel :

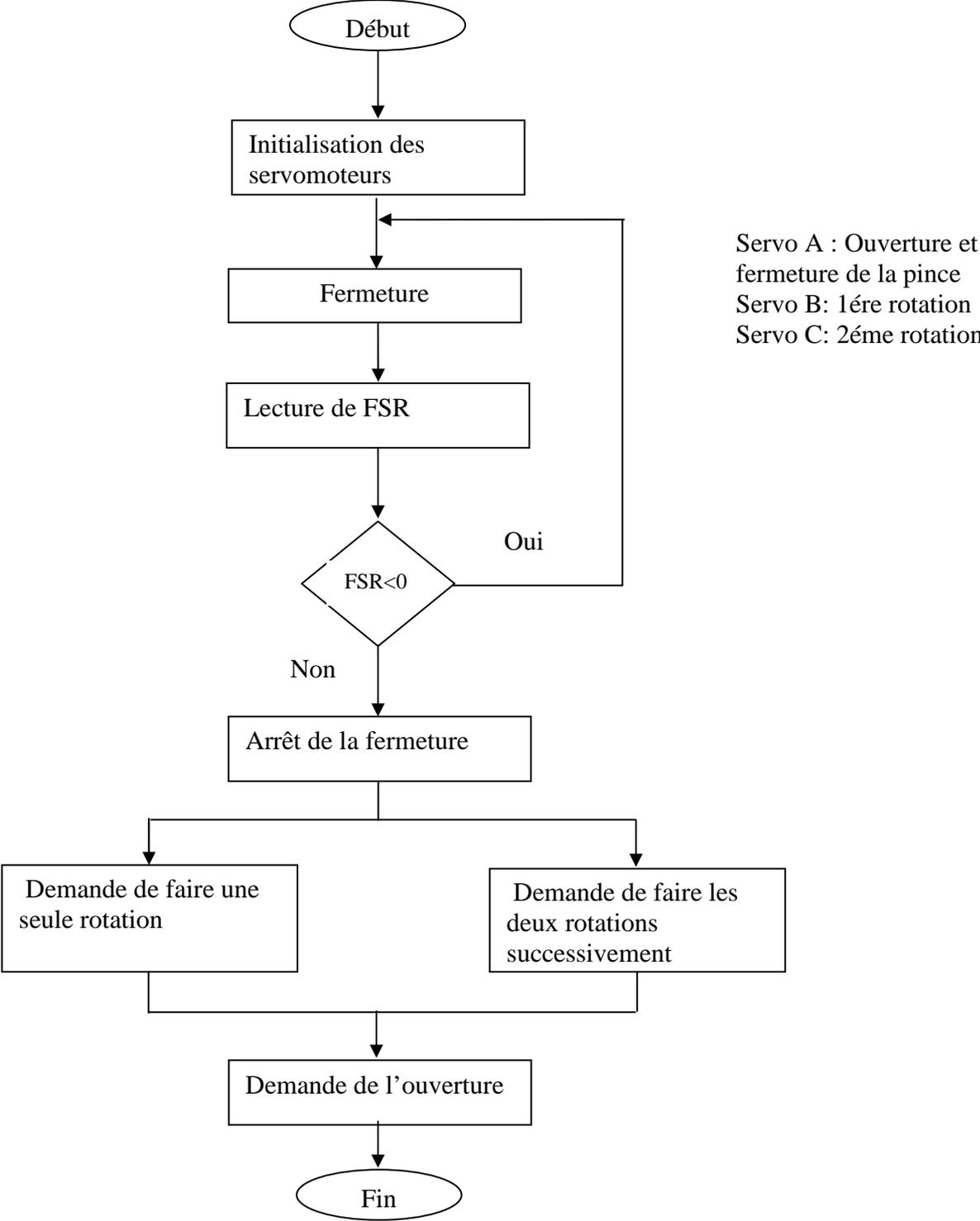


Figure III.19 : L'organigramme de fonctionnement.

III.7. Branchement des servomoteurs et du capteur avec la carte arduino :

Le branchement des composants électronique utilisé est donné dans la figure III.20 :

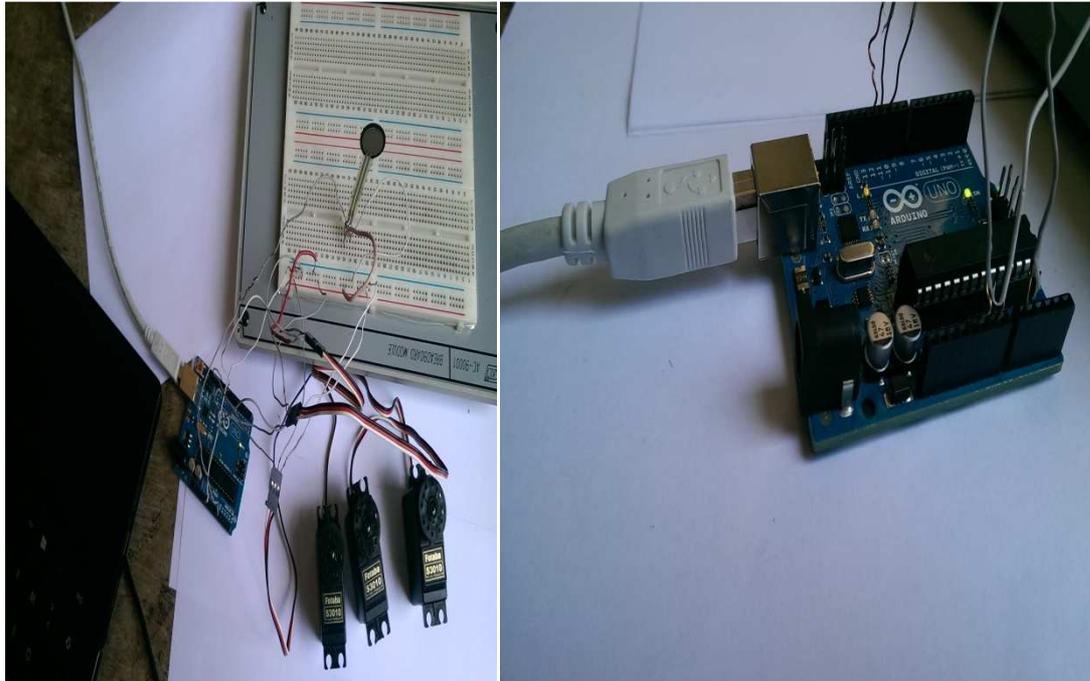


Figure III.20 : Branchement des composants avec la carte Arduino.

Une plaque d'expérimentation (breadbord en anglais) nous permet de câbler notre servo et le capteur de force sans faire de soudure, et garder un montage entièrement démontable. Cette plaque nous permet aussi de connecter les différents composants à la carte Arduino.

Sur cette plaque, les trous dans le sens Vertical de chaque bloc sont connectés entre eux par contre les trous dans le sens horizontal ne sont pas connectés entre eux.

Avec ce montage, l'Arduino reçoit le signal du capteur fsr402 pour arrêter le servo faisant la fermeture et piloter les rotations des deux autres servo directement.

III.8.schéma de la pince :

Ce schéma nous permet de voir comment les servomoteurs et le capteur de force vont être placés sur une pince à deux doigts parallèle.

Le schéma de la pince dont nous nous sommes inspirés est représentée dans la figure III.21 on ayant ajouté l'emplacement du capteur de force.

**a.** Vue de dessus**b.** Vue de dessous**Figure III.21 :** schéma de la pince à deux doigts.

III.9. Configuration des servomoteurs faisant les deux rotations:

Les servomoteurs des deux rotations sont mis initialement à 90° pour avoir un bon équilibre du poignet et de la pince.

Comme ces servo vont de 0° à son 180° en les mettant à 90° ça nous permettra d'avoir des rotations dans deux sens un sens de 90° à 0° et l'autre sens de 90° à 180° et qui donne la même configuration avec l'état initial 0° et qui donne un sens de 0 à -90° et l'autre sens de 0° à 90° .

Et donc après la configuration on obtient $\alpha = \theta_4 - \pi/2$ et $\beta = \theta_5 - \pi/2$.

III.10. Commande en position :

III.10. 1. Définition :

La commande des robots consiste à activer les actionneurs de chaque articulations de manière à faire évoluer le système mécanique vers un point de l'espace selon certaines caractéristiques :

- Soit le mouvement du robot dans l'espace est quelconque du point source au point but.
- Soit le mouvement est contraint de suivre une trajectoire définie à l'avance.
- Soit le temps parcouru et les caractéristiques dynamiques sont imposés [2].

Notre commande consiste à mener l'organe terminal décrit en termes de variables opérationnelles (θ_i) sources vers une configuration (θ_i) buts le long d'une trajectoire quelconque. Il s'agit de déterminer la fonction inverse de l'expression :

$$X = f(\theta - \theta_0) \quad (\text{III.8})$$

Où θ_0 est la configuration à l'origine sur les articulations.

La détermination des valeurs de θ est déduite de l'expression :

$$\theta = f^{-1}(X) + \theta_0 \quad (\text{III.9})$$

Notre commande est donné par :

$$X = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_4 \\ \theta_5 \\ \pi/2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \pi/2 \\ \pi/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Comme $\gamma = \pi/2$:

$$\begin{bmatrix} \theta_4 \\ \theta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi/2 \\ \pi/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.10.2. Le programme sur matlab :

Comme avec le logiciel arduino c'est difficile de programmer des fonctions nous avons utilisé Matlab pour calculer les angles du modèle géométrique inverse ensuite nous avons donné le résultat de ce modèle dans le programme fait avec arduino.

```
syms o4 o5 L4 alpha beta ;
gama=pi/2;
T4=[cos(o4) 0 sin(o4) 0;sin(o4) 0 -cos(o4) 0;0 1 0 0;0 0 0 1];
T5=[cos(o5) -sin(o5) 0 0;sin(o5) cos(o5) 0 0;0 0 1 L4;0 0 0 1];
u1=T4*T5;
u2=[cos(o4)*cos(o5) -cos(o4)*sin(o5) sin(o4); sin(o4)*cos(o5) -sin(o4)*sin(o5) -cos(o4); sin(o5) cos(o5) 0];
R=[cos(alpha)*cos(beta)-sin(alpha)*cos(gama)+sin(beta)*cos(alpha)*sin(gama)
sin(alpha)*sin(gama)+cos(alpha)*sin(beta)*sin(gama);sin(alpha)*cos(beta)
cos(alpha)*cos(gama)+sin(alpha)*sin(beta)*sin(gama) -cos(alpha)*sin(gama)+sin(beta)*sin(alpha)*cos(gama);
sin(beta) sin(gama)*cos(beta) cos(beta)*cos(gama)];
ay=sin(alpha)*cos(beta);
ax=cos(alpha)*cos(beta);
az=-sin(beta);
bz=cos(beta);
cz=0;
alpha=pi/6;
beta=pi/6;
o4=alpha+(pi/2)
o5=beta+(pi/2)
t1=o4*180/pi
t2=o5*180/pi
```

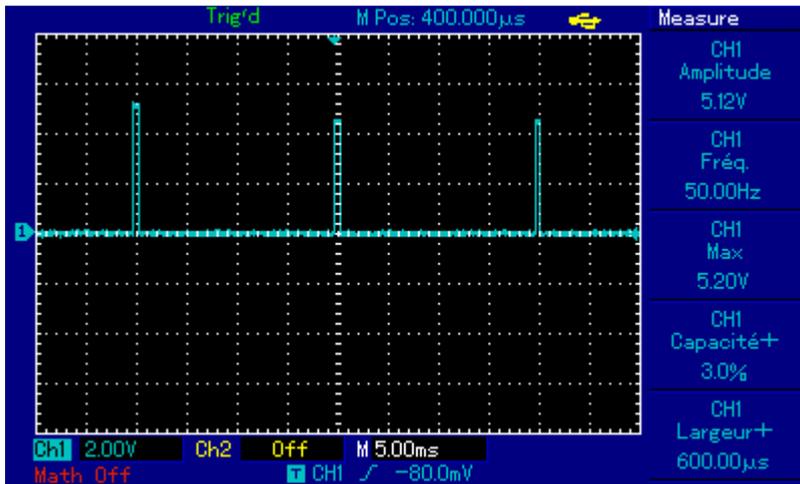
III.11. Test :

Le tableau ci-dessous (tableau III.1) représente quelques angles que nous avons donnés aux servomoteurs des deux rotations et le résultat obtenu à partir de Matlab :

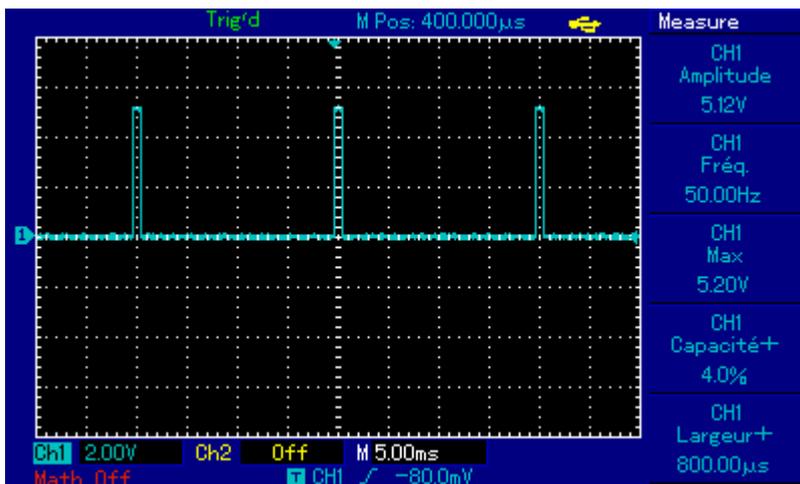
<i>alpha</i>	$-\pi/2$	$-\pi/3$	$-\pi/4$	$-\pi/6$	$-\pi/8$	0	$\pi/8$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
<i>beta</i>	$-\pi/2$	$-\pi/3$	$-\pi/4$	$-\pi/6$	$-\pi/8$	0	$\pi/8$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
θ_4	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$2\pi/3$	$3\pi/4$	$5\pi/6$	π
θ_5	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$3\pi/8$	$\pi/2$	$5\pi/8$	$2\pi/3$	$3\pi/4$	$5\pi/6$	π

Tableau III.1 : Résultats des tests.

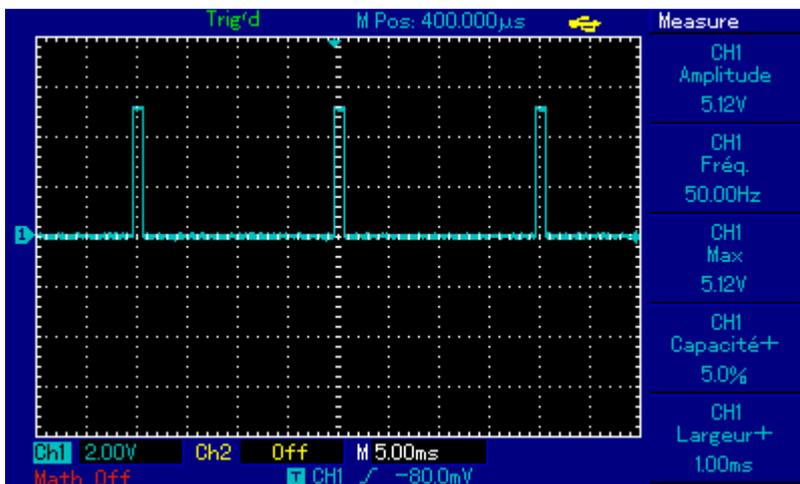
Pour chaque θ_4 le signal de la PWM a donné : avec $\theta_4 = \theta_5$
 Les résultats sont donnés dans la figure III.22.



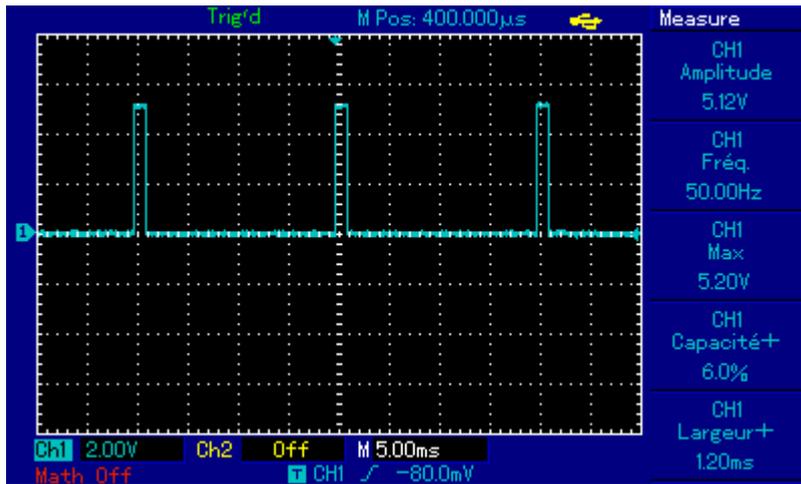
a. Le signal PWM Pour $\theta_4 = 0$.



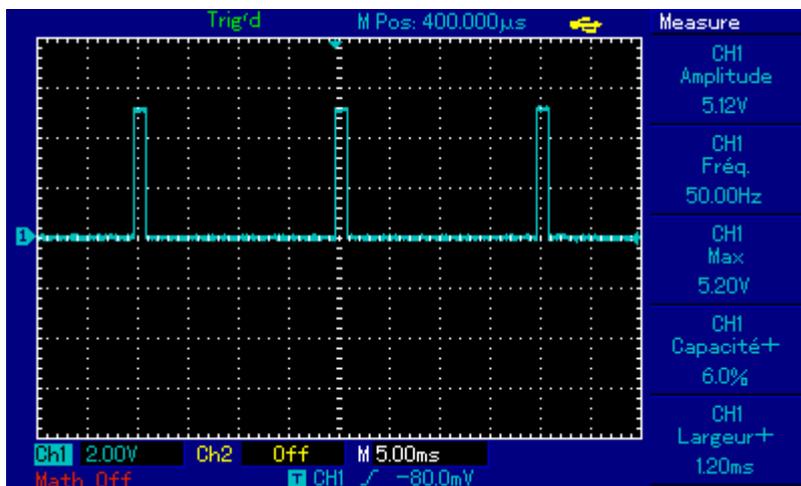
b. Le signal PWM pour $\theta_4 = \pi/6$.



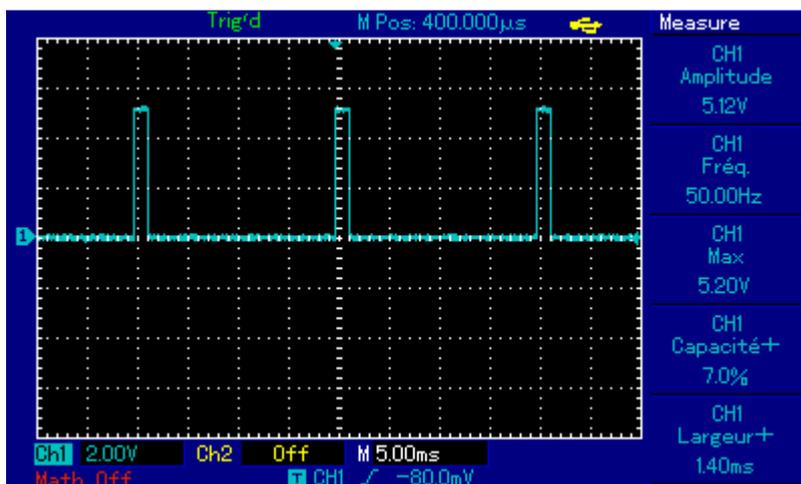
c. Le signal PWM pour $\theta_4 = \pi/4$.



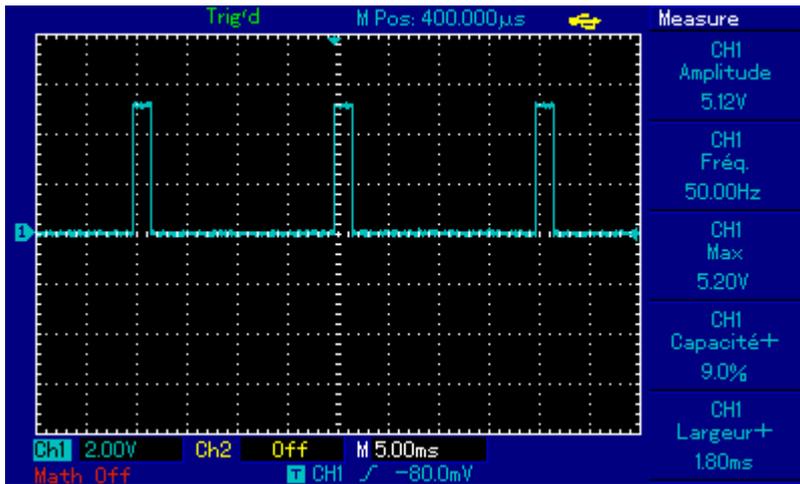
d. Le signal PWM pour $\theta_4 = \pi/3$.



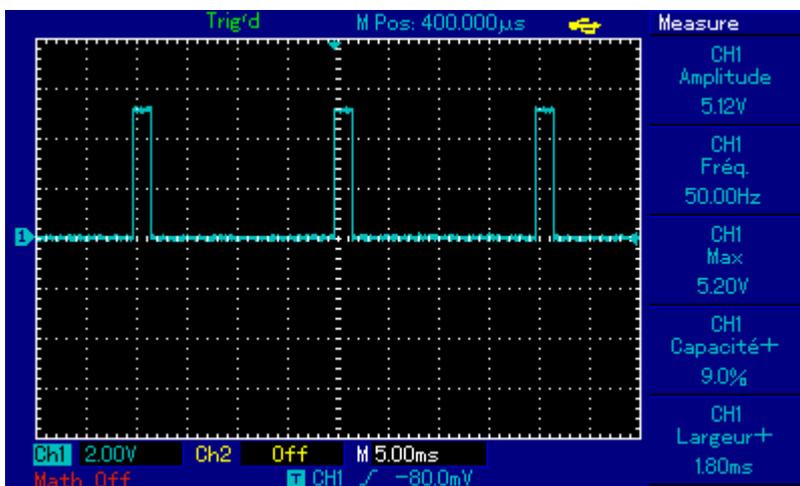
e. Le signal PWM pour $\theta_4 = 3\pi/8$.



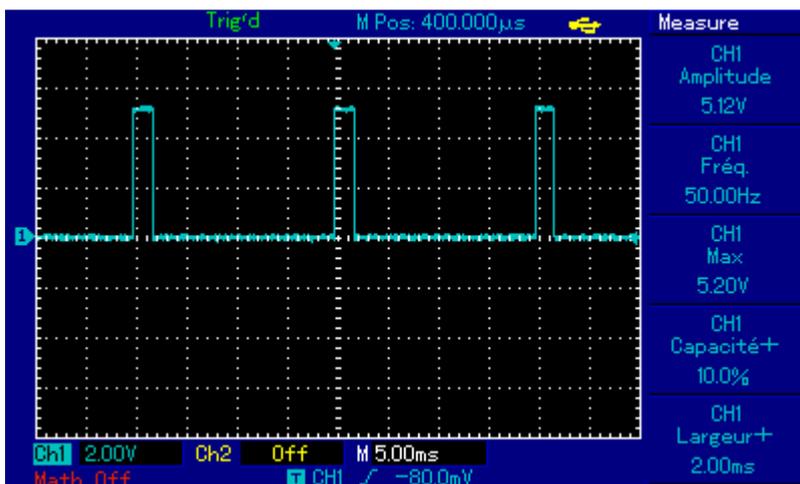
f. Le signal PWM pour $\theta_4 = \pi/2$.



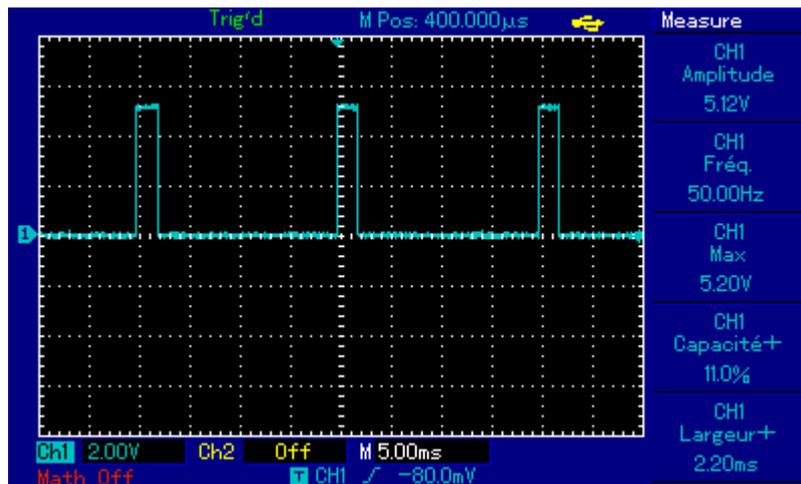
g. Le signal PWM pour $\theta_4 = 5\pi/8$



h. Le signal PWM pour $\theta_4 = 2\pi/3$.



i. Le signal PWM pour $\theta_4 = 3\pi/4$.



j. Le signal PWM pour $\theta_4 = 5\pi/6$.

Figure III.22: Les signaux PWM.

III.12 : Interprétation :

Vu que la pince n'a pas été réalisé, nous avons pensé à prendre le signal PWM de chaque angle donné afin de voir si réellement les deux servo faisant les deux rotation (servo B et C) atteintes la position voulu.

D'après ces tests et en négligeant les erreurs d'instrumentation on a obtenu les résultats prévu sur la PWM (figure III.8 page 50).

III.13. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le schéma mécanique de la pince. Nous avons décrit les servomoteurs utilisés ainsi que le capteur d'effort.

Nous avons aussi donné le schéma de la carte Arduino Uno et son logiciel qui nous permet de commander les servomoteurs en fonction de l'information délivrer par le capteur de force FSR pour manipuler un l'objet à prendre par la pince.

Le signal de commande utilisé qui est la PWM de la carte Arduino est géré par l'utilisateur afin d'atteindre les angles voulus pour les rotations du poignet et de la pince selon la tâche à réaliser.

Nous avons vu aussi l'organigramme de fonctionnement de la pince, nous avons configuré les servomoteurs de sorte à ce que la pince soit en équilibre, et cette configuration a été testée sur Matlab. Nous avons testé à la fin la PWM de la carte arduino sur les servomoteurs qui nous a donné des résultats aux quels on s'attendait.

Conclusion générale :

Ce mémoire est le résultat d'un travail de recherche dans le domaine de la robotique. Il est consacré à la commande des servomoteurs et de capteur de force par la carte arduino.

Nous avons exposé quelques généralités sur les robots tout en se basant sur les robots rigides et les différentes pinces qui existent et que nous avons commandés.

Comme pour commander un système mécanique il est nécessaire de donner un modèle du mécanisme, nous avons fait le modèle géométrique direct et inverse du bras en position et en orientation de la pince en utilisant la méthode de Hartenberg et les angles d'Euler.

A partir du modèle géométrique inverse obtenu nous avons commandé les servomoteurs par la carte arduino en lui envoyant des signaux PWM qui sont traduites en angles afin d'avoir l'orientation voulu, la fermeture et l'ouverture de la pince est contrôlée par le capteur de force FSR à partir de l'information qu'il envoie à la carte arduino et qui donne signal au servomoteur de tourner ou de s'arrêter ainsi l'objet qui sera pris ne sera pas déformer.

La commande que nous avons faite au capteur de force peut être utilisée pour n'importe quelle pince sans avoir à connaître les dimensions de l'objet à prendre.

- [1]. Micheline Cayer
« Vocabulaire de la robotique classification et système mécanique », Edition
EYROLLES, 1993.
- [2]. A-Pruski
« Robotique générale », Edition Ellipse, 1988.
- [3]. Jean-Louis Boimond
Cours robotique, ISTIA, université Angers.
- [4]. P-Lopez, J-Numafoule
« Introduction à la robotique et notions de base ». Edition Test, 1992.
- [5]. W-Khalil, Etienne Dombre
« Modélisation, identification et commande des robots ». 2^{ème} édition revue et
augmenté. Edition Hermes, 1999.
- [6]. W.KHALIL, E.DOMBRE, « *Modélisation, Identification et Commande de Robots* »,
Editions, 1988.
- [7]. « Commande des Systèmes Robotiques - 5AR01 » Modélisation. Université Pierre et
Marie Curie.
- [8]. Gorla et B. Gorla et M. Renaud
« Modèles des Robots Manipulateurs application à leur commande ». Cepadues
Editions. 1984.
- [9]. M. Xie
« Fundamentals of robotic LINKING PERCEPTION TO ACTION »
- [10]. W.KHALIL, E.DOMBRE,
« Bases de la modélisation et des robots de la commande robots-manipulateurs de type série »
Editions Fondation unit, 08 mai 2012
- [11]. www.arduino.cc
- [12]. www.mon-club-elect.fr

Description

Interlink Electronics FSR™ 400 series is part of the single zone Force Sensing Resistor™ family. Force Sensing Resistors, or FSRs, are robust polymer thick film (PTF) devices that exhibit a decrease in resistance with increase in force applied to the surface of the sensor. This force sensitivity is optimized for use in human touch control of electronic devices such as automotive electronics, medical systems, and in industrial and robotics applications.

The standard 402 sensor is a round sensor 18.28 mm in diameter. Custom sensors can be manufactured in sizes ranging from 5mm to over 600mm. Female connector and short tail versions can also be ordered.

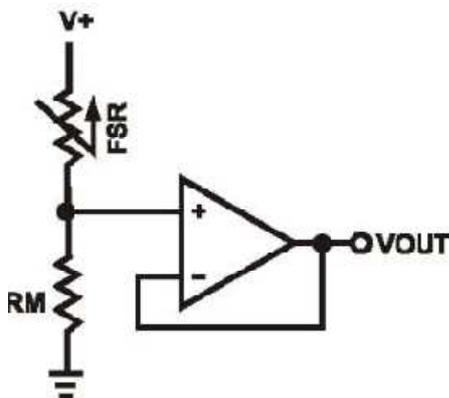


Figure 1 - Schematic

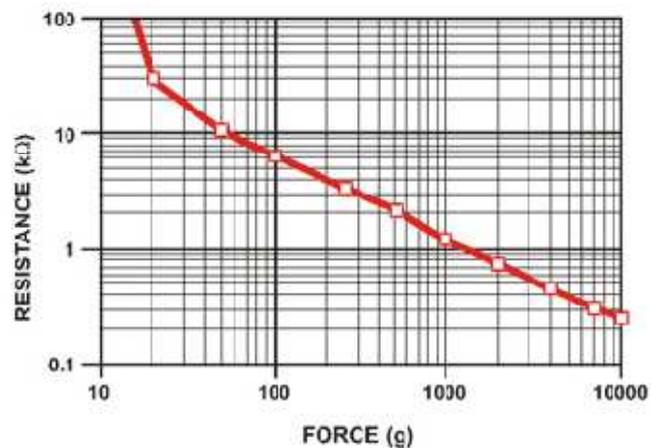


Figure 2 - Force Curve

Device Characteristics :

Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability ³	(Single part)	± 2%	
Force Resolution ³		continuous	
Force Repeatability ³	(Part to Part)	±6%	
Non-Actuated Resistance		10M W	
Size		18.28mm diameter	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis ³		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

Specifications are derived from measurements taken at 1000 grams, and are given as one standard deviation / mean, unless otherwise noted.

1. Max Actuation force can be modified in custom sensors.

2. Force Range can be increased in custom sensors. Interlink Electronics have designed and

manufactured sensors with operating force larger than 50Kg.

3. Force sensitivity dependent on mechanics, and resolution depends on measurement electronics.

Application Information :

FSRs are two-wire devices with a resistance that depends on applied force.

For specific application needs please contact Interlink Electronics support team. An integration guide is also available.

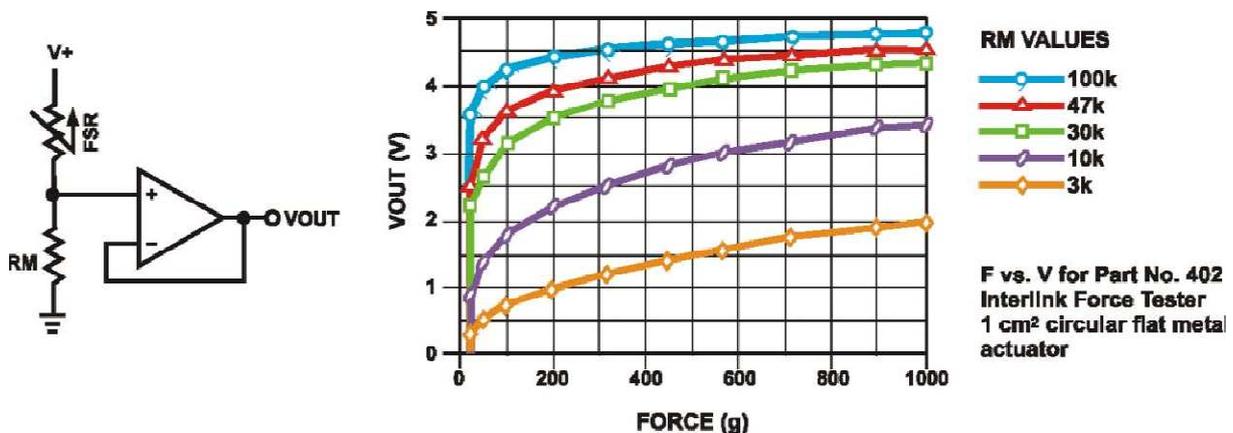
For a simple force-to-voltage conversion, the FSR device is tied to a measuring resistor in a voltage divider configuration (see Figure 3). The output is described by the equation:

$$V_{OUT} = \frac{R_M V_+}{(R_M + R_{FSR})}$$

In the shown configuration, the output voltage increases with increasing force. If R_{FSR} and R_M are swapped, the output swing will decrease with increasing force.

The measuring resistor, R_M , is chosen to maximize the desired force sensitivity range and to limit current. Depending on the impedance requirements of the measuring circuit, the voltage divider could be followed by an op-amp.

A family of force vs. V_{OUT} curves is shown on the graph below for a standard FSR in a voltage divider configuration with various R_M resistors. A (V_+) of +5V was used for these examples.



Mechanical Data :

