

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique
Thème

**Etude et conception d'un Robot Manipulateur De Type
PUMA 600**

Présenté Par :

- 1) Mr Saidi Bilal
- 2) Mr Bouazza Belaid

Devant le jury composé de :

Mr. Mecirdi noredine	M A A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Mendaz kheira	M A B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Lakhdari lahcen	M A B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nos remerciements à Dieu Tout-Puissant qui nous a donné La force et la patience.

Nous remercions notre famille en général et nos parents en particulier.

Il est temps pour nous d'exprimer toute notre gratitude et d'adresser nos sincères remerciements et notre plein respect à la personne qui nous a guidés et prodigués des conseils tout au long de la période de recherche, Monsieur le Docteur.

« LAHCEN LAKHDARI »



Dédicaces

*A nos chères mamans et
papas*

*Aucune dédicace n'exprimera
notre respect, notre amour et
notre appréciation durables pour
les sacrifices qu'ils ont faits pour
notre éducation et notre bien-
être. Nous les remercions pour
tout le soutien, l'amour et la
fatigue qui ont été et sont
encore jusqu'à maintenant.*



Résumé :

La robotique est un domaine relativement nouveau de la technologie moderne qui va au-delà de l'ingénierie traditionnelle.

Afin de contrôler les systèmes mécatroniques tels que les robots, une recherche appliquée est nécessaire. Le but de ce travail est de modéliser et de contrôler un manipulateur de 3 bras (3ddl), utilisant le régulateur PD classique. Nous avons pris le robot PUMA 600 pour notre application.

Nous présentons d'abord une étude détaillée des modèles utilisés pour piloter le robot, à savoir le modèle géométrique, cinématique directe et inverse ainsi que le modèle dynamique direct. En supposant des variables mesurables pour les positions des articulations, nous avons étudié et contrôlé le système à l'aide du logiciel MATLAB. Pour simuler les positions choisies par le robot, pour différentes trajectoires de référence.

Mots clés : robot manipulateur, 3ddl, modélisation, contrôle PD, trajectoire, vitesse.

Abstract :

Robotics is a relatively new field of modern technology that goes beyond traditional engineering.

In order to control mechatronic systems such as robots, applied research is necessary. The purpose of this work is to model and control a 3-arm manipulator (3 ddl) ,using the classic PD regulator. We took the PUMA 600 robot for our application.

We first present a detailed study of the models used to drive the robot, namely the geometric model, direct and inverse kinematics as well as the direct dynamic model. In assuming measurable variables for joint positions, we studied and controlled the system using MATLAB software. To simulate the positions chosen by the robot, to different reference trajectories.

Keywords: manipulator robot, 3ddl, modeling, PD control, trajectory, speed.

الملخص :

الروبوتات هي مجال جديد نسبيًا من التكنولوجيا الحديثة التي تتجاوز ذلك الهندسة التقليدية.

من أجل التحكم في أنظمة الميكاترونك مثل الروبوتات ، فإن البحث التطبيقي هو ضروري. الغرض من هذا العمل هو نمذجة مناوّر ثلاثي الأذرع والتحكم في (3 د ح) ، باستخدام منظم PD الكلاسيكي. أخذنا الروبوت PUMA 600 لتطبيقنا.

نقدم أولاً دراسة مفصلة للنماذج المستخدمة لقيادة الروبوت ، وهي النموذج الهندسي ، الحركية المباشرة والمعكوسة وكذلك النموذج الديناميكي المباشر. في بافتراض متغيرات قابلة للقياس للوظائف المشتركة ، قمنا بدراسة والتحكم فيها النظام باستخدام برنامج MATLAB. لمحاكاة المواقع التي اختارها الروبوت ، إلى مسارات مرجعية مختلفة.

الكلمات الرئيسية: روبوت مناوّر ، 3 د ح ، النمذجة ، التحكم PD ، المسار ، السرعة..

Les Liste :

- *Sommaires.*
- *Figures.*
- *Tableaux*
- *Nomenclature.*

Sommaire

Remercîment

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction Générale1

Chapitre 01 : Généralité sur les robots

1-1 Introduction.....3

1-2 Définition de robotique.....3

1-3 Définition de robot.....3.

1-4 Robots industriels.....4

1-5 Histoire de la robotique5

1-6Types des robot.....8

1-7 Composition d'un robot.....11

1-8 Classification de robots.....17

1-9 Domaines d'application21

1-10 Conclusion22

Chapitre 02 : Modalisation des Robots Manipulateur

2-1 Introduction24

2-2 Repères et retenties.....24

2-3 Coordonnées cartésiennes.....24

2-4 Coordonnées cylindriques.....25

2-5 Coordonnées sphériques.....26

2-6 Modélisation géométrique26

2-7 Modèle cinématique	36
2-8 Modélisation dynamique.....	37
2-9 Conclusion	38

Chapitre 03 : Application sur un Robot Puma 600

3-1 Introduction.....	40
3-2 Description géométrique et dynamique du robot PUMA 600 :.....	40
3-3 Caractéristique du système le robot Puma :.....	40
3-4 Paramètres mesures du robot PUMA 600	41
3-5 Modèle géométrique direct du robot PUMA 600	42
3-6 Modèle dynamique du robot PUMA 600	45
3-7 La matrice des forces Centrifuges et de Coriolis	46
3-8 Le vecteur de gravité	49
3-9 Le vecteur de frottement.....	50
3-10 Conclusion	50

Chapitre 04 : Commande et simulation du Bras Manipulateur

4-1 Introduction	52
4-2 Présentation du SolidWords.....	52
4-3 présentation du Simulink / Matlab.....	52
4-4 Simulation du bras manipulateur avec la commande PD.....	53
4-5 Commande dynamique de robot manipulateur.....	54
4-6 Simulation de bras manipulateur en temps réel.....	56
4-7 Conclusion.....	59
Conclusion Générale	61

Bibliographique

Liste des Figures :

Chapitre 01 : Généralité Sur Les Robots

Figure 1: Schéma du système robotique.....	5
Figure 2: es robots au service des entreprises.....	5
Figure 3 : robot unimate.....	7
Figure 4: le premier bras de robot en 1969.....	7
Figure 5: KUKA FAMULUS.....	8
Figure 6: les modelés du robot bras industriel.....	8
Figure 7: Robots mobiles autonomes	9
Figure 8: Robot articulé 6 axes.....	10
Figure 9 : robots humanoïdes	10
Figure 10: Robots hybrides.....	11
Figure 11: Articulation rotoïde et prismatique.....	13
Figure 12: Robot à structure ouverte simple	14
Figure 13: Structure a chaine arborescents.....	15
Figure 14: : Structure a chaine complexe.....	15
Figure 15: Structure cartésienne	18
Figure 16: Structure cylindrique	19
Figure 17: Structure sphérique	19
Figure 18: Structure dite SCARA.....	20
Figure 19: Structure anthropomorphe	20

Chapitre 02 : Modalisation des Robots Manipulateur

Figure 1: les système de coordonné cartésiennes.....	25
Figure 2: le système de Coordonnées cylindriques.....	25
Figure 3: le système de Coordonnées sphériques.....	26
Figure 4: transformation du repère.....	28
Figure 5: Paramètres de Denavit-Hartenberg.....	30

Figure 6: Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier.....	32
Figure 7: Cas d'articulation prismatique.....	34
Figure 8: Figure 9: Cas d'articulation rotoïde.....	34
Chapitre 03 : Application sur un Robot Puma 600	
Figure 1: Le robot PUMA 600.....	40
Figure 2 : schématique du robot Puma 600.....	42
Figure 3: Le placement des repérés du robot Puma 600.....	43
Chapitre 04 : Commande et simulation du Bras Manipulateur	
Figure 1: présente le profils de SolidWorks.....	52
Figure 2 : Schéma bloc de la commande PD.....	54
Figure 3 : position et erreurs des différents segments par la loi de commande PD.....	55
Figure 4 : schéma bloc de la commande PD et le model 3D de bras manipulateur.....	56
Figure 5 : position et erreurs des différents segments par la loi de commande PD en temps réel.....	57
Figure 6 : : position et erreurs des différents segments par la loi de commande PD en temps réel avec changement repère.....	58

Liste des Tableaux :

Chapitre 03 : Application sur un Robot Puma 600

Tableau 1 : les mesurée du robot Puma.....	42
Tableau 2 :les paramètre géométrique.....	43

Nomenclature

R_i : Un repère affine relié au corps C_i de la chaîne : $R_i(o_i, \bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$.

A_i : Indique la liaison.

σ_i : Variable binaire.

$J(q)$: Matrice jacobéenne.

[A] : Matrice d'inertie.

[B] : Matrice des termes de Coriolis.

[C] : Matrice des termes centrifuges.

G : Matrice uni colonne des forces généralisées de gravité.

Γ : Matrice uni colonne des forces généralisées non conservatives.

E_p : Représente l'énergie potentielle de système.

A_i : Désigne la quantité d'accélération généralisée.

F_i : Désigne les forces généralisées.

E_D : Fonction de dissipation.

[I_K] : Matrice des moments d'ordre deux de S_K en O_K dans le repère R_K .

[J_k] : Pseudo matrice d'inertie relative au corps S_k de la chaîne dans le repère R_k .

m_k : masse du solide S_k .

G_k : centre de masse de S_k .

g : Matrice unicolonne des composantes du champ de pesanteur exprimé dans le repère de base R_o .

\dot{q}_i : Vitesse généralisée relative au segment i .

\dot{q}_{mi} : Vitesse d'entrée du réducteur i .

q_{1i} : Variable relative à la génératrice tachymétrique i .

q_{2i} : Variable relative au moteur i .

q_{3i} : Variable relative au réducteur i .

q_{4i} : Variable relative au segment porteur i.

[Ia] : Matrice des inerties des actionneurs.

[K] : Matrice rigidité des jointes.

q_{2i-1} : Variable articulaire délivre par l'actionneur i.

q_{2i} : Variable articulaire prise par le segment i.

$q = (q_1, q_2 \dots q_n)^T$: Matrice unicolonne des variables articulaires.

$\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_n)^T$: Matrice unicolonne des vitesses généralisées.

$\ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \ddot{q}_3, \dots, \ddot{q}_n)^T$: Matrice uni colonne des accélérations généralisées.

q_i^1 : Variable articulaire délivrée par le moteur (après réducteur).

q_i^2 : Variable articulaire prise par le segment.



Introduction Générale :

Introduction Général :

La commande d'un robot manipulateur consiste à lui permettre d'atteindre un état désiré pour réaliser l'étude et contrôle d'un bras de robot ou autrement dit, de lui permettre de générer les trajectoires nécessaires pour réaliser ces tâches.

Aujourd'hui, il existe plusieurs types de robots conçus pour des tâches bien spécifiques. Les robots industriels actuellement en service sont des robots de type manipulateur. Ils sont bien implantés dans les procédés de fabrication modernes et sont employés pour augmenter le volume de production et améliorer la qualité du produit dans les chaînes de montage, ils remplacent les ouvriers dans les tâches pénibles. Selon le type de tâche et le secteur d'application, le robot aura une architecture mécanique et un système de commande-contrôle différent.

Les bras mécanisés des robots de chaînes de montages sont souvent munis de pinces. à trois doigts ou plus, à forte capacité de préhension (mobilité et force de pression accrues). Notre domaine de recherche est orienté vers les robots manipulateurs dont l'effecteur et une partie du bras. Plusieurs axes de recherche sont liés à l'étude de ce type de robots . Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude de la structure mécanique articulée permettant le balayage de l'espace de travail.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

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

Chapitre 2 - Modalisation des Robots Manipulateur : présente la modélisation du bras manipulateur étudié et traite la modélisation et de l'élaboration des modèles géométriques directs et inverse de bras étudié.

Chapitre 3 - Application sur un Robot Puma 600 : Consacrée à la description géométrique et dynamique du robot PUMA 600

Chapitre 4 - Commande et simulation du Bras Manipulateur : Dans ce chapitre, il a été montré les démarches que nous avons suivies pour la simulation de commande du bras manipulateurs. Et on présente les Tests et résultats obtenus.

Finalement une conclusion générale clôturer cette mémoire.



Chapitre 1 : Généralité sur les robots

1-Introduction :

La robotique est considérée comme un des grands axes de progrès scientifiques et techniques, elle consiste à l'automatisation de nombreux secteurs de l'activité humaine.

Depuis l'apparition des premiers robots industriels, leur essor a été considérable, et chaque année de nouveaux secteurs industriels s'ouvrent à la robotisation au fur et à mesure que les équipements se diversifient, deviennent plus adaptables. Les robots sont devenus tellement indispensables dans certains secteurs industriels, que leur emploi conditionne la survie économique des entreprises. Il devient donc important de maîtriser leur technologie.[1]

Le terme robot peut désigner une large variété de réalisations technologiques, allant du simple dispositif mécanique exécutant des mouvements répétés, aux machines analogues morphologiquement aux bras humains et possédant une certaine intelligence.[2]

2-Définition de robotique :

La robotique est une branche de l'ingénierie qui s'intéresse à la conception, à la fabrication, à la programmation, à l'exploitation et à l'étude des robots. Les robots sont des machines programmables et autonomes qui sont capables d'exécuter des tâches complexes de manière efficace et précise. Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans l'industrie, la médecine, l'exploration spatiale, la sécurité et bien d'autres.[3]

La robotique englobe plusieurs domaines de l'ingénierie, tels que la mécanique, l'électronique, l'informatique, la perception, la commande, la planification et l'intelligence artificielle.[4] Les robots peuvent être conçus pour effectuer des tâches simples, comme assembler des pièces ou trier des objets, ou des tâches complexes, comme naviguer dans un environnement inconnu ou assister des personnes âgées ou handicapées.

3-Définition de robot :

Un robot est un manipulateur commandé en position, et un agent physique automatique capable de manipuler des données et des matières physiques pour effectuer des tâches précises. Un robot utilise des capteurs pour percevoir son environnement et des actionneurs pour contrôler ses mouvements.[5] Il est équipé d'un système de contrôle, qui lui permet de prendre des décisions et de s'adapter à des situations changeantes. Les robots peuvent être conçus pour fonctionner de manière autonome ou pour être contrôlés à distance.

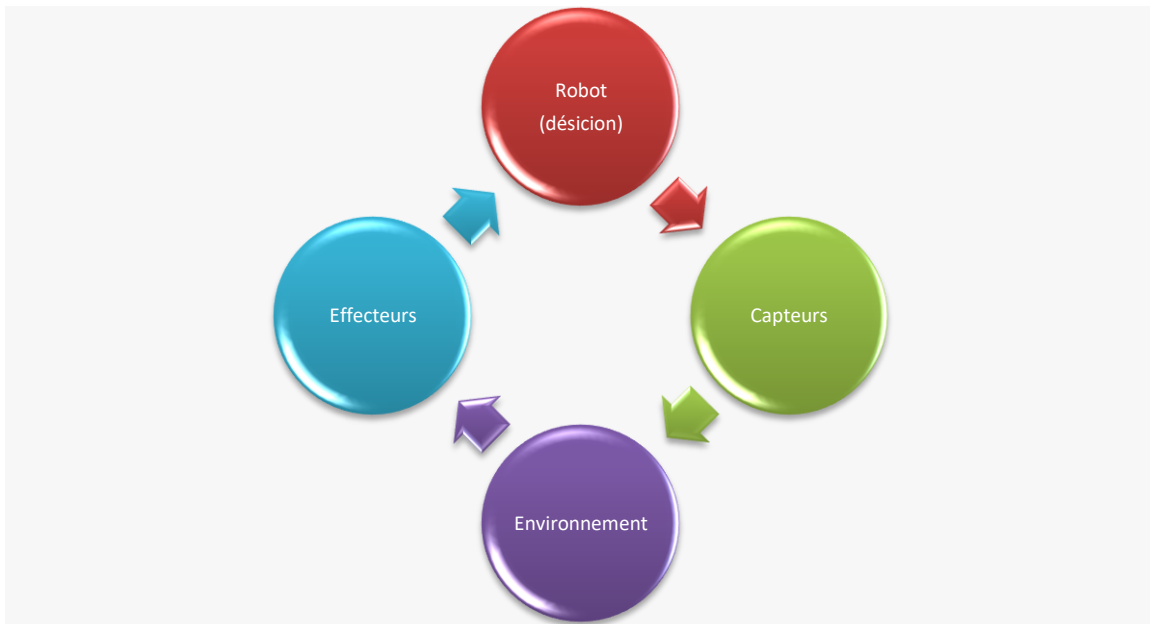


Figure 1: Schéma du système robotique

4-Robots industriels :

La définition actuelle d'un robot industriel varie quelque peu des pays:[6]

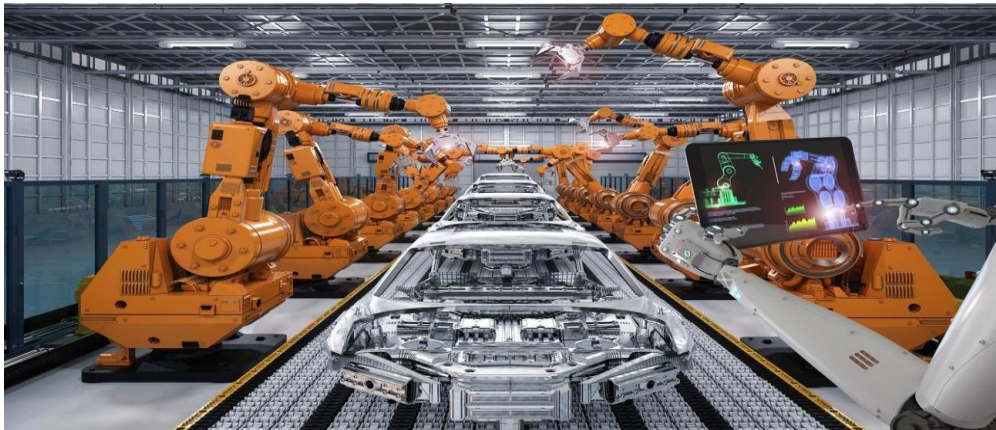


Figure 2: es robots au service des entreprises

4-1 Institut américain de robotique

Le robot est un manipulateur reprogrammable aux multiples fonctions. Il est prévu déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des outils spéciaux selon les instructions trajectoires variables programmées pour plusieurs missions

4-2 Association japonaise de robotique industrielle :

Tout mécanisme qui exécute tout ou partie d'une tâche normalement fabriqué par l'homme.

4-3 Fédération Française de Robotique Industrielle :

Un robot industriel est une machine qui se compose de divers mécanismes qui ont des degrés de liberté, qui ressemblent souvent à un ou plusieurs bras se terminant par un poignet où un outil, une pièce ou une commande peut être tenu. Spécialement son contrôleur doit avoir un système de stockage, il peut contenir un système à l'extérieur, il peut parfois utiliser des accessoires sensibles et adaptatifs qui retiennent tenir compte de l'environnement et des circonstances. Ces machines ont un rôle à jouer multidisciplinaires, ils sont généralement conçus pour remplir des fonctions répétitives mais sont adaptables à d'autres fonctions .

4-4 Organisation internationale de normalisation :

Une machine constituée d'un mécanisme à plusieurs degrés de liberté qui a souvent une ou plusieurs mains se terminant par un poignet de préhension outils, pièces ou dispositif de commande .

4-5 Main manipulatrice :

C'est un système de positionnement robotique où les forces agissent sur un plan les articulations sont produites par des actionneurs. Ils peuvent être électroniques, hydraulique ou pneumatique.

5-Histoire de la robotique :

Etymologiquement, le mot « robot » tire sa racine du bulgare robu qui signifie «< serviteur >>, au russe rabota qui signifie « travail >> et au tchèque robota qui se traduit par «< travail forcé >>

C'est justement l'écrivain tchèque Karel Capek qui a popularisé le terme vers 1920, au travers d'une pièce de théâtre intitulée «< Rossum's Universal Robots >> qui a connu un certain succès, en particulier en France: elle met en scène des petits êtres artificiels qui répondent au doigt et à l'œil aux ordres de leur maître.

L'histoire moderne de la manipulation robotique date de la fin des années 1940. Pour

protéger les techniciens manipulant des matières radioactives, le premier moteur électrique asservitéléopérateur a été développé en 1947 [7]. Les scientifiques ont lancé la recherche sur une fraiseuse à commande numérique presque en même temps. Ces deux importants technologies ont jeté des bases solides pour le développement des robots industriels. Sur la base du rapport de la Fédération Internationale de Robotique (IFR).



Figure 3 : robot unimate

a créé la première société de robots connue sous le nom d'Unimation en 1956 et a développé le premier robot industriel au monde Unimate en 1959. Deux ans plus tard, le robot motorisé Unimate a d'abord été installé dans une automobile General Motors (GM) usine dans le New Jersey pour extraire les moulages sous pression . En 1962, le premier robot cylindrique Versatran est introduit à l'usine Ford (Canton, USA) par American Machine et Fonderie (AMF). Stanford Arm inventé par Victor Scheinman en 1969 était le premier bras de robot à six axes, alimenté électriquement et contrôlé par ordinateur, qui est devenu un standard dans la conception de robots industriels. [8]



Figure 4: le premier bras de robot en 1969

En 1973, la société allemande KUKA développe son propre robot Famulus, le premier robot industriel avec six axes entraînés électro mécaniquement.

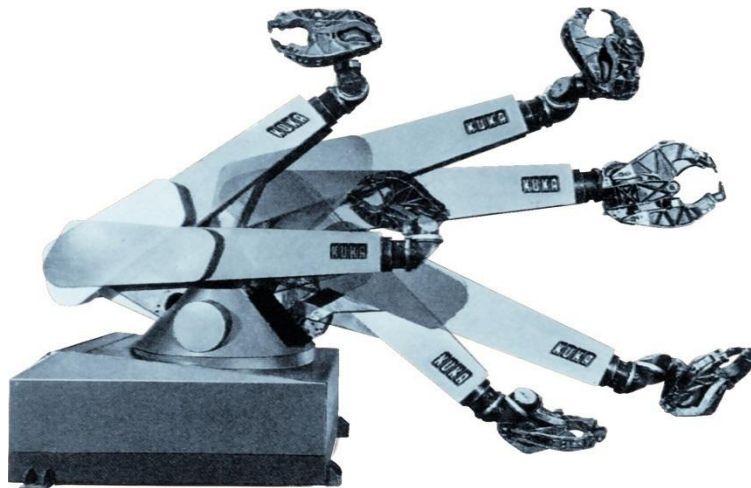


Figure 5: KUKA FAMULUS

Selon l'étude de la Fédération Internationale de Robotique (IFR) en 2012, il y a au moins 1153000 robots industriels opérationnels fin 2011 dans le monde. [9] Grâce aux avancées des technologies, la robotisation des fabrications industrielles s'est élargie ces dernières années. Toujours d'après (IFR, 2012), il y a une augmentation de 38% des robots Industriels vendus en 2011 (soit 166K unités), dont 43 % en Europe.



Figure 6: les modelés du robot bras industriel

6-Types des robots :

Les fabricants de robots continuent d'innover en matière de capacités, de prix et de format, et les solutions robotiques sont mises en œuvre dans un nombre toujours plus grand d'industries et d'applications.[10] Les progrès en matière de puissance de traitement et de capacités d'IA signifient que nous pouvons désormais utiliser des robots pour remplir des fonctions essentielles de multiples façons. Il existe six types de robots les plus couramment utilisés : les robots mobiles autonomes (AMR), les véhicules guidés automatisés (AGV), les robots articulés, les robots articulés et les robots hybrides.

6-1 Robots mobiles autonomes :

Les AMR se déplacent dans le monde entier et prennent des décisions en temps quasi réel au fur et à mesure de leurs déplacements. Des technologies telles que des capteurs et des caméras les aident à ingérer des informations sur leur environnement.



Figure 7: Robots mobiles autonomes

6-2 Véhicules à guidage automatique :

Alors que les AMR traversent les environnements librement, les AGV s'appuient sur des pistes ou des chemins prédéfinis et nécessitent souvent la surveillance d'un opérateur.

6-3 Robots articulés :

Les robots articulés (également appelés bras robotiques) sont censés reproduire les fonctions d'un bras humain. En général, ils peuvent comporter de deux à dix articulations rotatives.



Figure 8: Robot articulé 6 axes

6-4 Robots humanoïdes :

Bien que de nombreux robots humanoïdes mobiles puissent techniquement relever du domaine de l'AMR, ce terme est utilisé pour identifier les robots qui remplissent des fonctions centrées sur l'homme et prennent souvent des formes semblables à celles de l'homme.



Figure 9 : robots humanoïdes

6-5 Robots cobots :

Les cobots sont conçus pour fonctionner aux côtés des humains ou directement avec eux. Alors que la plupart des autres types de robots effectuent leurs tâches de manière [11] indépendante ou dans des zones de travail strictement isolées, les cobots peuvent partager des espaces avec les travailleurs pour les aider à accomplir davantage.

6-6 Robots hybrides :

Les différents types de robots sont souvent combinés pour créer des solutions hybrides capables de réaliser des tâches plus complexes. Par exemple, un AMR peut être associé à un bras robotique pour créer un robot destiné à la manutention des colis dans un entrepôt.

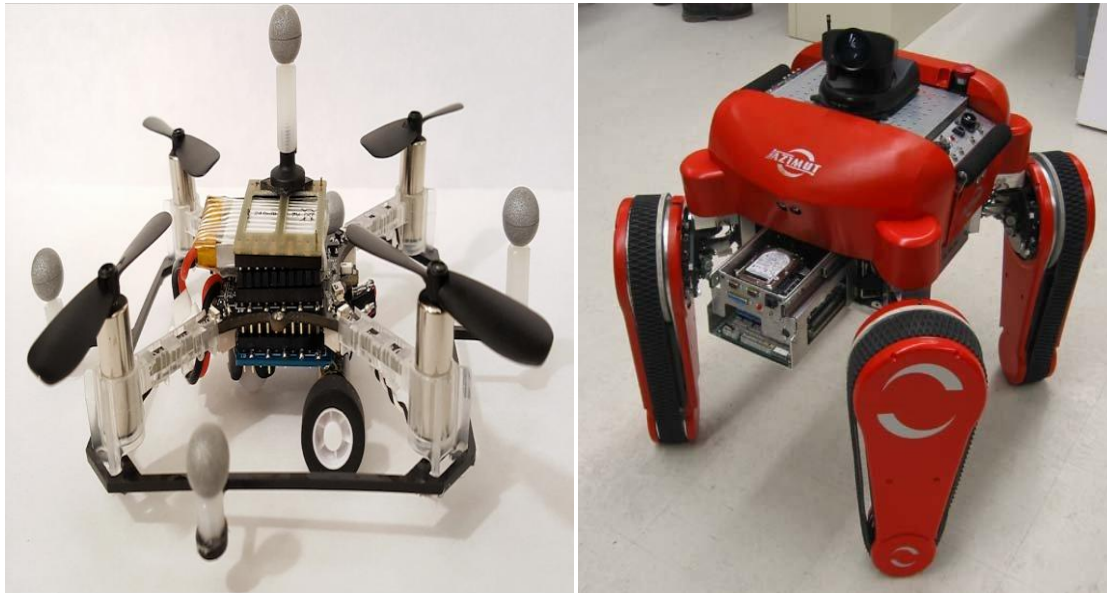


Figure 10: Robots hybrides

7-Composition d'un robot :

est un assemblage de pièces mécaniques et de pièces électroniques, le tout piloté par un microprocesseur. Lorsque les robots sont autonomes (mobiles), ils possèdent également une source d'énergie embarquée : généralement une batterie d'accumulateurs électriques.[12]

Les pièces mécaniques : permettent de bâtir une ossature du robot qui sera pilotée par le microprocesseur et les composants électronique qui agiront comme des capteurs ou des actionneurs pour faire agir voire réagir le robot.

Les pièces électroniques : permettent à des éléments mobiles de bouger suivant un ou plusieurs degrés de liberté. Les capteurs ultra son permettent de détecter les obstacles et le plus souvent de les éviter

L'autonomie du robot : C'est ce plus ou moins grand degré d'autonomie (permis par une intelligence artificielle).[13]

7-1 Concepts de base :

C'est la partie la plus importante dans la fabrication d'un robot en termes de poids et de mouvement et diffère la base de données du tableau de bord pour chaque produit et chaque entreprise

7-2 Bras articuler de robot :

Un bras manipulateur est le bras d'un robot généralement programmable, avec des fonctions similaires à un bras humain. Les liens de ce manipulateur sont reliés par des axes permettant, soit de mouvement de rotation (comme dans un robot articulé) et/ou de translation (linéaire) de déplacement.[14]

Dans le cas d'une imitation complète d'un bras humain, un bras manipulateur a donc 3 mouvements de rotation et 3 mouvements de translation sur son élément terminal.

Il peut être autonome ou contrôlé manuellement et peut être utilisé pour effectuer une variété de tâches avec une grande précision.

7-3 Artuculation :

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. [15] il existe 2 type sont :

7-3-1 Articulation rotoïde :

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

7-3-2 Articulation prismatique :

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun.

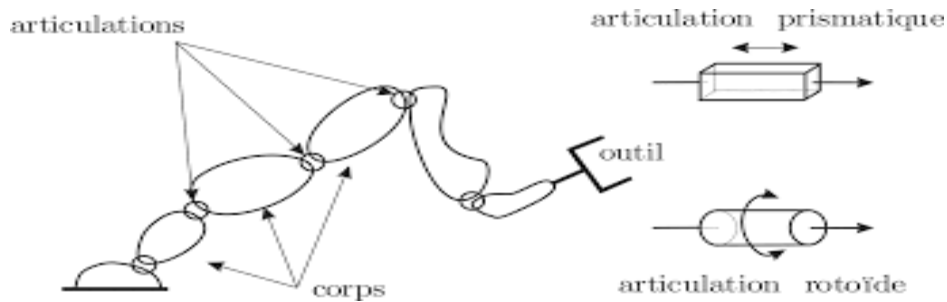


Figure 11: Articulation rotoïde et prismatique

7-4 Organe terminal :

Organe spécialisé que l'on fixe à l'extrémité de la structure mécanique et qui est conçu pour exécuter une tâche spécifique en réponse aux signaux que lui envoie le système de commande ou sous l'impulsion des mouvements du robot. [15]

7-5 Les actionneurs :

Est un dispositif capable de produire une action physique à partir de l'énergie qu'il reçoit. Les actionneurs transforment les informations reçues du programme du système informatique embarqué

7-6 Les capteurs :

Est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, un courant électrique ou la déviation d'une aiguille.

7-7 Le système de commande :

Est un système de contrôle d'un procédé industriel doté d'une interface homme-machine pour la supervision et d'un réseau de communication numérique.[16]

L'avantage de ces systèmes est leur modularité, qui permet de les installer et de les modifier facilement

7-8 La carte Arduino :

est une petite (5,33 x 6,85 cm) carte électronique équipée d'un micro-contrôleur. Le micro-contrôleur permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs

7-9 Le boîtier de batterie :

est une batterie anti-déversement capable de fournir brièvement lorsqu'elle est complètement chargée. L'assemblage de la Batterie de Robot inclut la batterie, les câbles avec contacts, et un connecteur. Les équipes sont encouragées à se procurer plusieurs Batteries de Robot.

7-10 Les Règles de Robot dans le Manuel du scellé :

prémontré d'un manufacturier qui répond à des critères spécifiques et fournit des exemples des numéros de pièce légaux de plusieurs manufacturiers.

7-11 Structure mécanique de robots :

Articulée qui sert amener l'organe terminal dans une position et orientation désirée [17]. Les robots peuvent être de :

7-11-1 Structure a chaine simple ouverts :

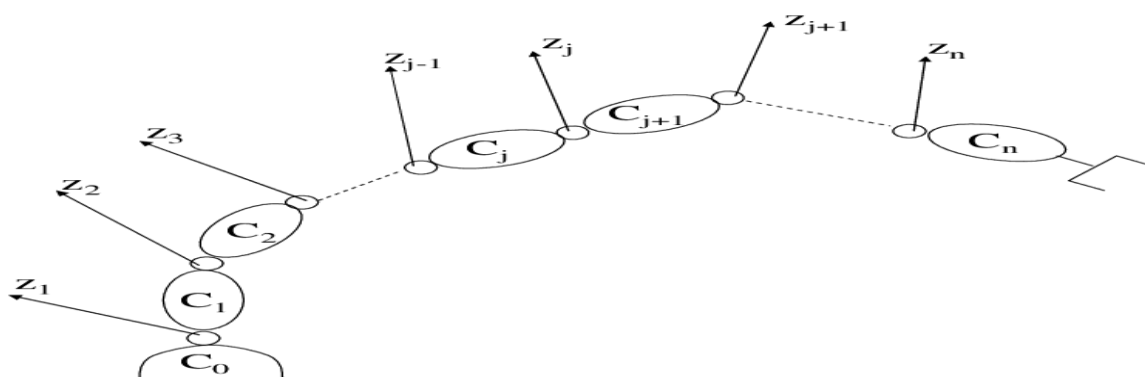


Figure 12: Robot à structure ouverte simple

7-11-2 Structure a chaine arborescents :

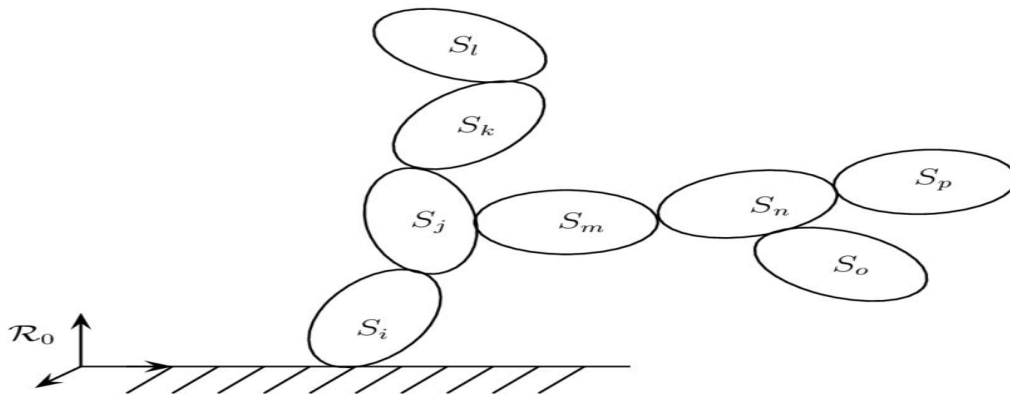


Figure 13: Structure a chaine arborescents

7-11-3 Structure a chaine complexe

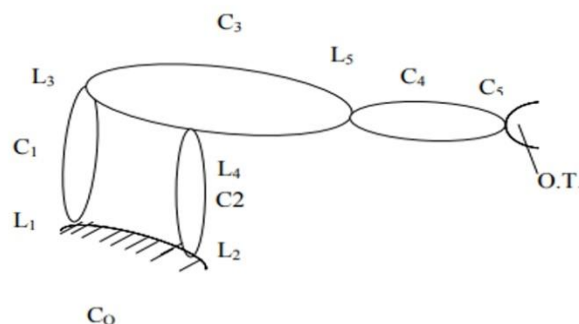


Figure 14: : Structure a chaine complexe

7-12 Liaison :

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

7-13 Les tâches à réaliser :

On peut les définir de manière générale comme la différence entre deux états de l'environnement: l'état de départ d'exécution de la tâche, et l'état final lorsque cette dernière est terminée. La difficulté essentielle est de définir et de modéliser l'environnement.

Les tâches sont décrites au robot dans un langage approprié. Cette description peut revêtir diverses formes, et certains paramètres nécessaires à l'exécution peuvent être acquis en cours d'exécution.

7-14 Le contrôleur ou calculateur :

C'est l'organe qui génère les commandes (signaux de puissance des actionneurs), qui vont induire les déplacements recherchés des différentes articulations du manipulateur, ou les forces appliquées sur les objets; et ce à partir d'informations à priori (connaissance de la tâche à exécuter) et à posteriori (connaissance actuelle et passée du manipulateur et de l'environnement).

Le contrôle du robot inclut les fonctions qui lui permettent "d'apprendre" et d'être programmé pour une tâche spécifique, puis d'exécuter cette tâche. La séquence de mouvements, le type de mouvement entre deux points, et l'interaction avec les équipements externes sont toutes des parties de la fonction de contrôle.

7-15 L'environnement :

C'est l'univers dans lequel est immergée la machine. Pour les robots à poste fixe, il se réduit à ce que l'on rencontre dans l'espace atteignable du manipulateur, défini comme l'ensemble des points atteints par l'effecteur lorsque le manipulateur passe par toutes les configurations géométriques possibles.

Dans cet environnement, le manipulateur va rencontrer des obstacles qu'il doit éviter et des objets d'intérêt, c'est à dire sur lesquels il doit agir.[18] Par conséquent il existe une interaction entre le SMA et l'environnement.

Des informations sur l'état de l'environnement peuvent être obtenues grâce à des capteurs qu'on appelle "extéroceptifs", c'est à dire permettant de situer ce qui est à l'extérieur du manipulateur. On utilise des caméras, des détecteurs et capteurs de proximité, des capteurs tactiles etc...

8-Classification des robots :

L'AFRI (Association Française de Robotique Industrielle): distingue quatre classes de robots.[19]

8-1 Les Télémanimateurs ou manipulateurs à commande manuelle :

Ils sont commandés à distance et "en temps réel" par un opérateur humain. Cette télécommande se fait à plus ou moins longue distance par signaux mécaniques, hydrauliques, ou le plus souvent électriques. Ces manipulateurs sont employés en forge, fonderie, meulage-ébarbage, milieux "hostiles", etc.. mais nécessitent toujours la présence et l'intervention constante d'un opérateur.

8-2 Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés :

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

8-3 Les robots programmables :

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

8-4 Les robots dits "Intelligents" :

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

Robot Association), les robots sont divisés en plusieurs classes :

Classe 01 : Dispositif à plusieurs degrés de liberté

Classe 02 : Robot à séquence fixe, dispositif manipulateur exécute les étapes d'une tâche d'une manière successive suivant une méthode prédéterminée et inchangée (difficile à modifier).

Classe 03 : Robot à séquence variable, le même dispositif manipulateur mais les phases d'exécution de la tâche peuvent être modifiées facilement.

Classe 04 : Playback robot (robot audiovisuel), l'opérateur exécute la tâche manuellement par le contrôle de robot qui enregistre les trajectoires. Cette information s'exécute lorsqu'elle est nécessaire. Le robot peut accomplir sa tâche automatiquement.

Classe 05 : Robots de contrôle numérique.

Classe 06 : Robots intelligents.

8-5 Classification géométrique :

Il existe différentes architectures du porteur[20] : la structure cartésienne (PPP), la structure cylindrique (RPP ou PRP), la structure sphérique ou polaire (RRP), la structure dite SCARA (RRP) et enfin la structure anthropomorphe (RRR).

8-5-1 Structure cartésienne :

sont trois axes deux à deux en série avec trois degrés de liberté, une très bonne précision et une grande lenteur.

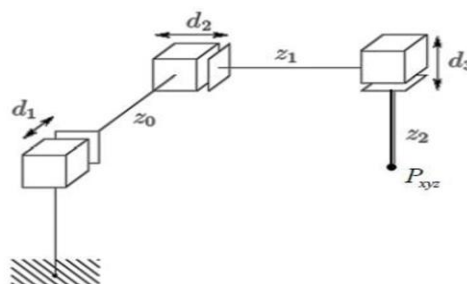


Figure 15: Structure cartésienne

8-5-2 Structure cylindrique :

sont trois axes non perpendiculaires en série avec trois degrés de liberté et une grande rapidité.

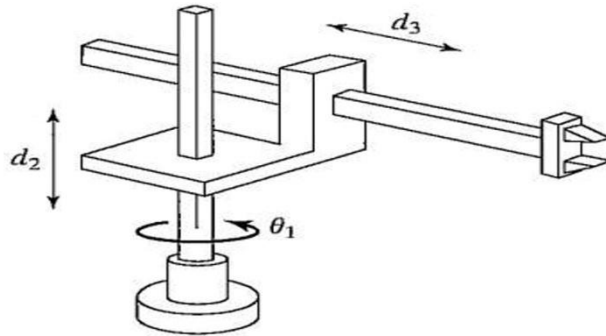


Figure 16: Structure cylindrique

8-5-3 Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale :

les rayons intérieur et extérieur sont fixés soit par la disposition de la liaison prismatique et la translation

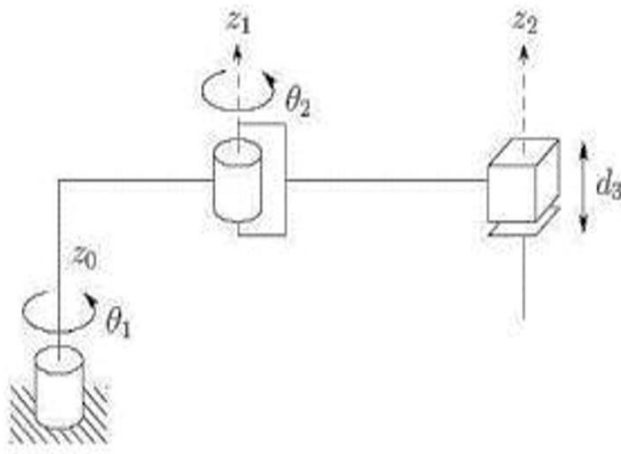


Figure 17: Structure sphérique

8-5-4 Structure dite SCARA :

sont 3 axes en série cylindrique (RRP) ayant trois degrés de liberté.

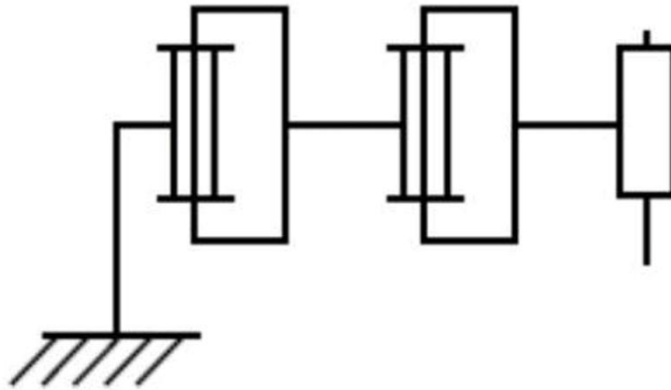


Figure 18: Structure dite SCARA

8-5-5 Structure anthropomorphe :

Son enveloppe de travail à une cinématique et dynamique complexe, mais sa configuration est plus flexible.

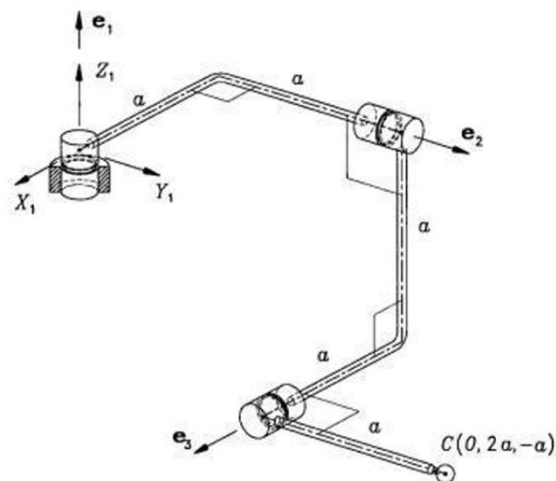


Figure 19: Structure anthropomorphe

9-Domains d'application :

Les robots industriels peuvent être utilisés dans plusieurs domaines et peuvent accomplir différentes tâches , [21]Les critères sont suivant :

9-1Application dans les énergies alternatives :

Gestion des composants par vision. Manipulation de produits dangereux. ;Inspection et test qualité des pièces ;Transfert précis de pièces. Conditionnement et « karting ».

9-2Applications dans l'automobile :

Assemblage des composantes et sous-ensembles ;Opérations de vissage et de serrage. Manipulation et transfert de pièces. ;Poste d'inspection et de test des ensembles. Dépose de colle et de joints adhésifs.

9-3Applications médicales :

Automatisation des procédés en laboratoire (fluides et manipulation de pièces). Dépose précise de matériaux divers ;Changement de machines de tests. Positionnement précis de pièces ;Conditionnement et « karting ».

9-4Application agroalimentaires :

Prise de produits en suivi de convoyeur ;Manipulation de produit (encaissage, équilibrage, tri, assemblage).En capsulage ;Emballage (primaire et/ou secondaire).

9-5 Applications industrielle :

Chargement et déchargement d'outils .Encaissage, changement et déchargement de plateaux. Assemblage et conditionnement de pièces et kits.

9-6Application dans l'électronique :

Assemblage des composants et sous-ensembles. Tri, gerbage, parachèvement. Opérations de vissage et serrage ;Poste d'inspection et de test des ensembles.

10-Conclusion :

Au terme de ce chapitre, nous pouvons dire que le monde des robots est vaste et profond, et que des évolutions et évolutions mécaniques et mathématiques se sont produites depuis leur apparition.

Il est devenu partie intégrante de cette réalité technologique et de la vie pratique

Chapitre 2 : Modalisation des Robots Manipulateur

1-Introduction :

Le modélisation de robot , qui est un système mécanique articulé, actionné et contrôlé, consiste à créer un modèle mathématique. En plus de la fonction d'aide à la conception générale, il a de multiples utilisations pour la prédiction de mouvement, le conditionnement des opérateurs, la planification des tâches, la création de lois de commande, l'intégration de robots dans les ordinateurs de simulation, etc. Dans le langage courant, la modélisation précède la simulation sans distinction nette entre ces deux activités.[22]

Étant donné que les données des fabricants sont supposées connues, la modélisation en robotique relève généralement du vaste domaine des mathématiques appliquées. De plus, de nouveaux besoins et de nouvelles possibilités technologiques stimulent les activités de recherche en informatique, automatisation,[23] méthodes mathématiques, biomécanique, mécatronique et autres technologies connexes.

2-Repères et référentiel :

A un instant donné, on repère la position du point M par le vecteur $\vec{\Gamma} = \overrightarrow{OM}$ appelé vecteur position. Ce dernier est représenté par les valeurs algébriques des projections sur une base orthonormée.

3-Coordonnées cartésiennes :

On considère un repère constitué de trois axes rattachés à un point origine caractéristique du solide de référence (R).

A ce repère on associe une base orthonormée directe $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}, \vec{u}, \vec{v}, \vec{z})$, ces les vecteurs sont alors les vecteurs unitaires des axes \overrightarrow{OX} , \overrightarrow{OY} et \overrightarrow{OZ} respectivement. Les coordonnées cartésiennes sont les plus utilisées en robotique, car elles sont les plus simples pour la mesure des distances.

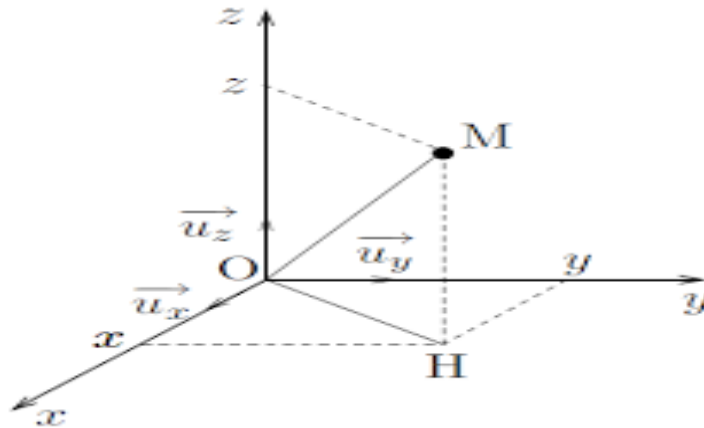


Figure 1: les système de coordonné cartésiennes

4-Coordonnées cylindriques :

La position du point M est définie dans un repère $(\vec{o}, \vec{u}, \vec{p}, \vec{\theta}, \vec{u}, \vec{z})$. On introduit la base $(\vec{u}, \vec{p}, \vec{u}, \vec{\theta}, \vec{u}, \vec{z})$ orthonormée directe, associée aux coordonnées cylindriques $(\vec{\rho}, \vec{\theta}, \vec{z})$

Les relations entre les coordonnées cylindriques et cartésiennes sont les suivantes.

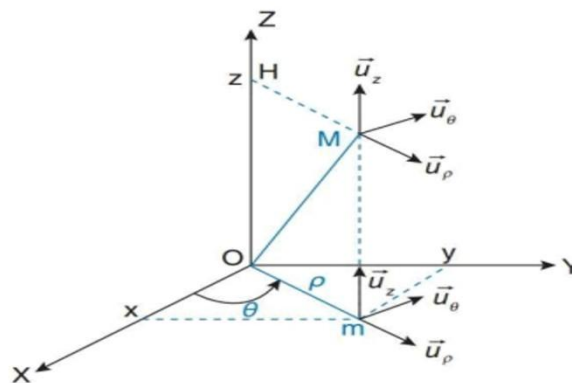


Figure 2: le système de Coordonnées cylindriques

5-Coordonnées sphériques :

La position du point M est définie dans un repère $(\vec{o}, \vec{u}, \vec{p}, \vec{u}, \vec{\theta}, \vec{u}, \vec{\varphi})$. On introduit la base $(\vec{u}, \vec{p}, \vec{u}, \vec{\theta}, \vec{u}, \vec{\varphi})$ orthonormée directe, associée aux coordonnées sphériques (ρ, θ, φ) .

Les relations entre les coordonnées sphériques et cartésiennes sont les suivantes :

$$x = \rho \sin(\theta) \cos(\varphi)$$

$$y = \rho \sin(\theta) \sin(\varphi)$$

$$z = \rho \cos(\theta)$$

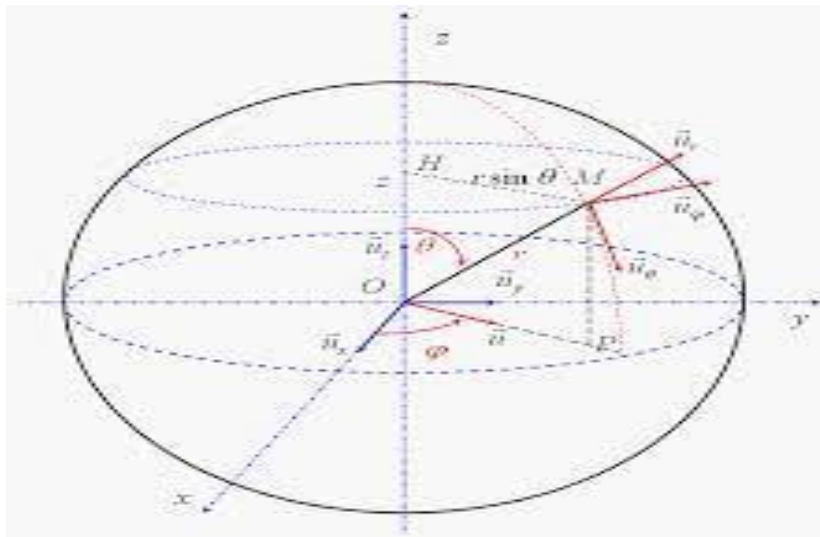


Figure 3: le système de Coordonnées sphériques

6-Modélisation géométrique :

La conception et la commande d un robot exige le calcul de certains modèles mathématiques comme :

Les modèles de transformation entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel. Ces modèles de transformation sont très importants puisque les robots sont commandes dans l'espace

articulaire. tandis que les taches sont définies dans l'espace opérationnel.

Deux classes des modèles sont considérées :

Les modèles géométriques directs et inverses, qui donnent l'endroit de l'effecteur en fonction des variables articulaires du mécanisme et vice versa.

Les modèles cinématiques directs et inverses, qui donnent la vitesse de l'effecteur en fonction des vitesses d'articulation et vice versa.

Les modèles dynamiques donnant les relations entre les couples d'entrée ou les forces des actionneurs et les positions, les vitesses et les accélérations des articulations.

6-1 Transformations homogènes :

Soit $({}^iP_x, {}^iP_y, {}^iP_z)$ les coordonnées cartésiennes d'un point P arbitraire. mesure dans le repère Les coordonnées homogène du point P ou w est le facteur d'échelle . dans la robotique $w = 1$. Les coordonnées homogènes du point P sont représentées par le vecteur colonne :

$${}^iP = \begin{bmatrix} {}^iP_x \\ {}^iP_y \\ {}^iP_z \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Les coordonnées homogènes d'un plan Q de L'équation :

$${}^i\alpha_x + {}^i\beta_y + {}^i\gamma_z + {}^i\delta = 0 \quad (2)$$

exprime selon le repère R_i sont données par le vecteur ligne :

$${}^iQ = [{}^i\alpha \ {}^i\beta \ {}^i\gamma \ {}^i\delta] \quad (3)$$

Si un point P appartient a un plan Q. le produit matriciel ${}^iQ, {}^iP$ est nul.

$${}^iQ \cdot {}^iP = 0 \quad (4)$$

transformation (translation et/ou rotation) d'un repere R_i an repere R_j est representee par la matrice de transformation homogène iT_j de dimension (4 X 4) on :

$${}^iT_j = [{}^iS_j \ {}^iN_j \ {}^iA_j \ {}^iP_j] = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

On peut dire que la matrice ${}^i T_j$ définit le repère R_j dans le repère R_i . La matrice de transformation s'écrit aussi sous la forme :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i P_j \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Finalement, la matrice de transformation ${}^i T_j$:

- ✓ Est considéré comme la représentation du repère R_j dans le repère R_i
- ✓ Permet le passage du repère R_i au repère R_j .

Soit **Trans** (a, b, c) la transformation d'une translation pure où a, b, et c sont les translations le long des axes x, y et z respectivement. Quand l'orientation est conservée, la matrice de transformation de cette translation a la forme suivante :

$${}^i T_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

La notation **Trans** (u, d) indique la translation d'une valeur d le long de l'axe **u**. Ainsi la matrice **Trans**(a, b, c) peut être décomposée en produit de trois matrices : **Trans**(x, a) **Trans**(y, b) **Trans**(z, c) par n'importe quel ordre de multiplication.

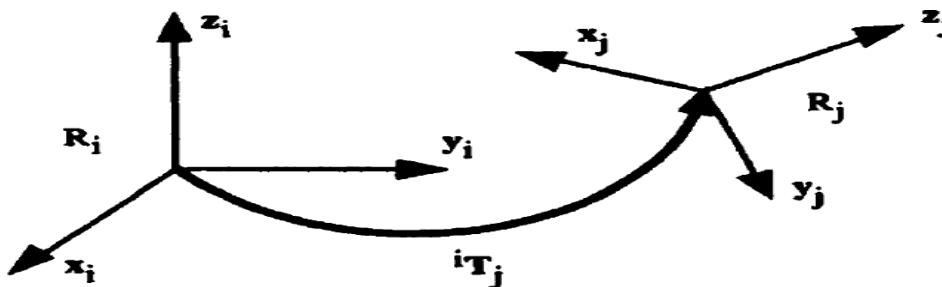


Figure 4: transformation du repère

Soit $\mathbf{Rot}(x, \theta)$ la transformation correspondante a une rotation pure d'angle θ autour de l'axe x. la matrice de transformation de cette rotation s'ecrit :

$${}^i T_j = \mathbf{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{rot}(x, \theta) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ou, $\mathbf{Rot}(x, \theta)$ designant la matrice d'orientation de dimension (3 X 3).

De la même façon on définit les matrice de transformation des rotations autour des axes y et z

$${}^i T_j = \mathbf{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{rot}(y, \theta) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^i T_j = \mathbf{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{rot}(z, \theta) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

6-2 Modelés géométrique direct :

Afin de calculer l'équation géométrique directs d Im bras manipulateur a chaine tombers simple, une méthode systématique et général doit être appliques pour définir la position et rorieiitation relative de deux craps consécutifs.

La variable $q_i = \bar{\sigma}_i \theta_i + \sigma_i r_i$ de l'articulation i, définissant l'orientation ou la position relative entre les articulations $i - 1$ et est i soit θ_i soit r_i , selon le type d'articulation est rotoide ou prismatique respectivement. Ceci est defini par la relation . avec :

$\sigma_i = 0$ si Farticulation i est rotoide.

$\sigma_i = 1$ si Farticulation i est prismatique.

$$\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i \quad (11)$$

De la même façon on définit la variable q_i :

$$\bar{q}_i = \sigma_i \theta_i + \bar{\sigma}_i r_i \quad (12)$$

La matrice de transformation définissant R_i dans R_{i-1} est donnée par :

$${}^{i-1}T_i = \mathbf{Rot}(x, \alpha_i) \mathbf{Trans}(x, d_i) \mathbf{Rot}(z, \theta_i) \mathbf{Trans}(z, r_i)$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & d_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i & -r_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

6-3 Paramètres de Denavit-Hartenberg :

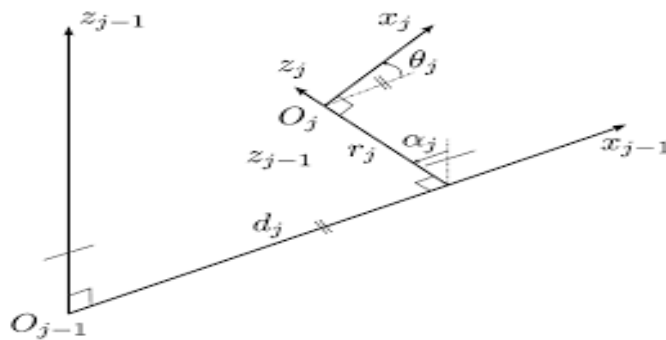


Figure 5: Paramètres de Denavit-Hartenberg

La matrice de transformation du repère R_{i-1} au repère R_i s'exprime en fonction des paramètres (de Denavit-Hartenberg) suivants :

α_i : L'angle de rotation entre l'axe z_{i-1} et l'axe z_i autour de x_{i-1} .

d_i : La distance entre l'axe z_{i-1} et l'axe z_i le long de l'axe x_{i-1} .

θ_i : L'angle de rotation entre les axes x_{i-1} et x_i autour de z_i .

r_i : la distance entre les axes x_{i-1} et x_i le long de l'axe z_i .

$${}^{i-1}T_j = \begin{bmatrix} & & d_i \\ & {}^{i-1}A_i & -r_i \sin \alpha_i \\ & & r_i \cos \alpha_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Où la matrice de rotation ${}^{i-1}A_i = \mathbf{Rot}(x, \alpha_i) \mathbf{Rot}(z, \theta_i)$.

La matrice de transformation définissant R_{i-1} dans R_i est donné par :

$${}^i T_{i-1} = \begin{bmatrix} & {}^{i-1} A_i^T & -d_i \cos \theta_i \\ & & d_i \sin \theta_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -r_i \\ & & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations permettent de définir la position de l'organe terminal du robot en fonction de ses coordonnées articulaires. Pour un robot a chaine ouverte simple le MGD est définie par la matrice de transformation ${}^0 T_n$:

$${}^0 T_n = {}^0 T_{1(q_1)} {}^1 T_{2(q_2)} {}^2 T_{3(q_3)} \dots \dots \dots {}^{n-1} T_{n(q_n)} \quad (16)$$

Le MGD peut aussi etre représenté par la relation :

$$X = f(q) \quad (17)$$

Ou q est le vecteur des variables articulaires tels que :

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \dots \dots \dots q_n]^T \quad (18)$$

6-4 Modèle géométrique inverse :

Le modèle géométrique direct fournit l'emplacement de l'organe terminal en fonction des coordonnées articulaires. Le modèle géométrique inverse .consiste a déterminer les variables articulaires correspondant a line situation spécifique de l'organe terminal. Lorsqu'elles existent. Trois méthodes de calcul sont :

- ✓ La méthode de Paul, qui convient pour la plupart des robots industriels.
- ✓ La méthode de Pieper, qui perinet de résoudre le probleme pour les robots a six degres de liberte avec trois articulations roto'ide on trois articulation prismatiques.
- ✓ La methode de raghavan et Roth, donnant la solution générale des robots a six articulations a partir d'un polynome de degre au plus egale 16.

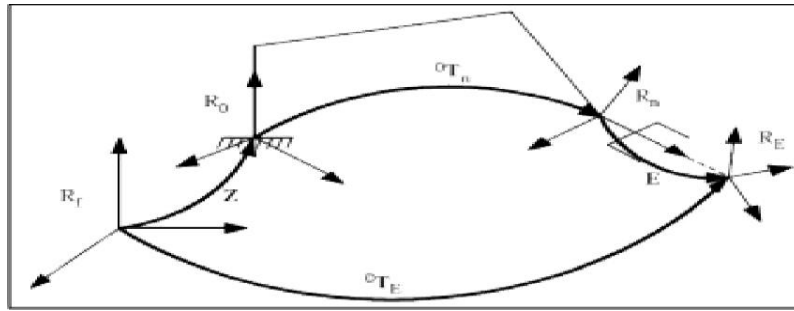


Figure 6: Transformations entre l'organe terminal et le repère atelier

Quand le modèle géométrique inverse ne peut pas être obtenu, des techniques numériques peuvent être employées. Ces techniques emploient la méthode de Newton-Raphson ou des méthodes fondées sur la transposée de la matrice Jacobienne.

Soit ${}^{i-1}T_E^d$ la matrice de transformation homogène représente la position désirée du repère outil R_E par rapport au repère atelier R_f . En général on peut exprimer ${}^{i-1}T_E^d$ sous la forme :

$${}^f T_E^d = Z {}^0 T_n(q) E \tag{19}$$

Tels que :

- ✓ Z est la matrice de transformation définissant le repère de base du robot dans le repère atelier R_f .
- ✓ ${}^0 T_n$ est la matrice de transformation du repère terminal dans le repère R_0 .
- ✓ E est la matrice de transformation du repère outil R_E dans le repère terminal R_n .

Mettant tous les termes connus dans le membre gauche, on obtient :

$$U_0 = {}^0 T_n(q) \tag{20}$$

$$\text{Avec : } U_0 = Z^{-1} {}^f T_E^d E^{-1} \tag{21}$$

$$\text{Le MGI donnant } X = f(q), q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T, X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T \tag{22}$$

ou n est le nombre de coordonnées opérationnelles et m le nombre de coordonnées articulaires, le problème au-dessus (24) s'agit de résoudre un système de m équations à n inconnues, ce système étant non linéaire. Le nombre de solutions dépend de l'architecture du robot manipulateur et de l'amplitude des articulations.

Trois cas se présentent pour calculer le MGI:

Solutions en nombre fini.

Absence de solution, lorsque la position de l'organe terminal désirée est en de hors de la zone accessible du robot.

Infinité de solutions lorsque :

Le robot est redondant vis-a-vis la tache.

Le robot se trouve dans certaines configurations singulières.

Lorsque il est possible de calculer toutes les configurations permettant d'atteindre une situation donnée d'un robot manipulateur ce dernier est dit résoluble.

6-5 La méthode de Paul :

Soit la matrice de transformation homogène d'un robot manipulateur

$${}^0T_n = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) \dots \dots \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (23)$$

Soit U_0 situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

On cherche à résoudre le système d'équation suivant :

$$U_0 = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) {}^2T_3(q_3) \dots \dots \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (25)$$

Pour résoudre ce système , Paul a proposé une méthode de Paul qui consiste à pré-multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices ${}^i T_{i-1}$ pour i de 1 à $n - 1$.

Ces opérations permettent d'isoler les variables d'articulations l'une après l'autres.

$$U_0 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots \dots \dots {}^{n-1}T_n \quad (26)$$

combien obtenue (sans calcul de la dérivée du MGD) relie les vecteurs des vitesses de translation et de rotation V_n et ω_n les vitesses articulaires :

$$\begin{bmatrix} V_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = J_n \dot{q} \quad (27)$$

Où , V_n et ω_n sont les vitesses lineaire et angulaire du repere R_n respectivement.

La vitesse \dot{q}_k de l'articulation \mathcal{K} produit une vitesse linéaire ($V_{k,n}$) et une vitesse angulaire ($\omega_{k,n}$) sur le repère terminal R_n . Deux cas se présentent :

✓ Si l'articulation \mathcal{K} est prismatique $\sigma_k = 1$:

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \\ \omega_{k,n} = 0 \end{cases} \quad (28)$$

ou a_k est le vecteur unitaire porté par l'axe z_k de l'articulation κ .

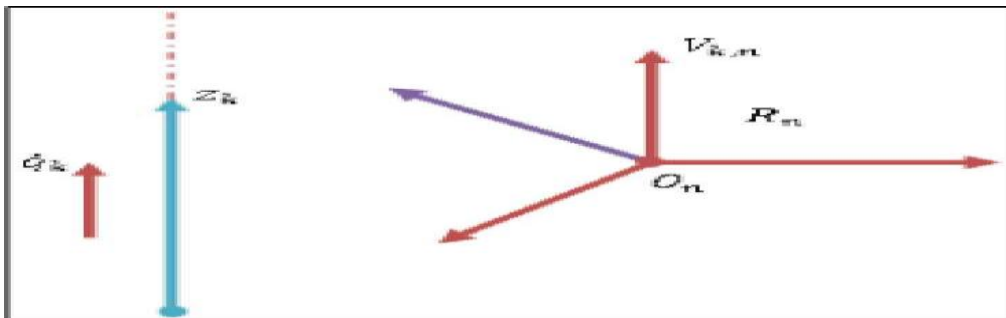


Figure 7: Cas d'articulation prismatique

Si l'articulation k est rotoïde ($\sigma_k = 0$):

$$\begin{cases} V_{k,n} = a_k \dot{q}_k \times L_{k,n} = (a_k \times L_{k,n}) \dot{q}_k \\ \omega_{k,n} = a_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (29)$$

Le terme $L_{k,n}$ désigne le vecteur $\overrightarrow{O_k O_n}$

De façon générale, les vecteurs $V_{k,n}$ $\omega_{k,n}$ s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} V_{k,n} = [a_k \dot{q}_k + L_{k,n} (a_k \times L_{k,n})] \dot{q}_k \\ \omega_{k,n} = \bar{\sigma}_k a_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (30)$$

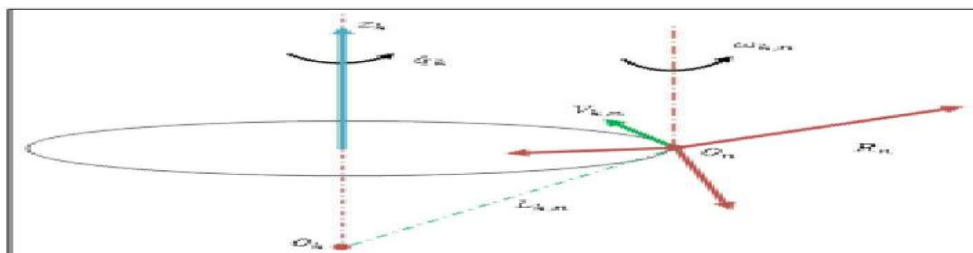


Figure 7: Figure 9: Cas d'articulation rotoïde

Les vitesses linéaires et angulaires de l'organe terminal peuvent être écrites comme :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_n = \sum_{k=1}^n \mathbf{V}_{k,n} = \sum_{k=1}^n [\sigma_k \bar{\sigma}_k + \bar{\sigma}_k (\mathbf{a}_k \times \mathbf{L}_{k,n})] \dot{q}_k \\ \boldsymbol{\omega}_n = \sum_{k=1}^n \boldsymbol{\omega}_{k,n} = \sum_{k=1}^n \bar{\sigma}_k \mathbf{a}_k \dot{q}_k \end{cases} \quad (31)$$

L'écriture de l'équation(33) sous forme d'une matrice en utilisant l'équation (30),

donne :

$${}^i J_n = \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{a}_1 + \bar{\sigma}_1 (\mathbf{a}_1 \mathbf{L}_{1,n}) & \dots & \dots & \dots & \sigma_n \mathbf{a}_n + \bar{\sigma}_n (\mathbf{a}_n \mathbf{L}_{n,n}) \\ \bar{\sigma}_1 \mathbf{a}_1 & \dots & \dots & \dots & \bar{\sigma}_n \mathbf{a}_n \end{bmatrix} \quad (32)$$

Se référant les vecteurs de J_n par rapport au repère R_i on obtient la matrice jacobienne ${}^i J_n$,

telle que :

$${}^i \begin{bmatrix} \mathbf{V}_n \\ \boldsymbol{\omega}_n \end{bmatrix} = {}^i J_n \dot{q} \quad (33)$$

En général, on calcul V_n et ω_n dans R_n et R_0 , la matrice jacobienne correspondante est ${}^i J_n$

Ou ${}^0 J_n$ respectivement. ces matrices peuvent être aussi calculées en utilisant une matrice

${}^i J_n$

$J = 0, \dots, n$, grace à l'expression suivante :

$${}^8 J_n = \begin{bmatrix} {}^8 A_i & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & {}^8 A_i \end{bmatrix} {}^i J_n \quad (34)$$

ou ${}^8 A_i$ est la matrice d'orientation du repère R_i dans R_8 . En général on obtient la matrice simple

${}^i J_n$ lorsqu'on prend $i = \text{entier } (n/2)^1$. On note que les matrices ${}^i J_n$ ayant les mêmes positions singulières.

Calcul de la matrice ${}^i J_n$:

Le produit $\mathbf{a}_k \times \mathbf{L}_{k,n}$ peut être calculé par $\hat{\mathbf{a}}_k \mathbf{L}_{k,n}$, la k^{ime} colonne de la matrice ${}^i J_n$ notée par ${}^i J_{n:k}$ devienne

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i \mathbf{a}_k + \bar{\sigma}_k {}^i A_k {}^k \hat{\mathbf{a}}_k {}^k L_{k,n} \\ \bar{\sigma}_k {}^i \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (35)$$

On pose ${}^k \mathbf{a}_k = [0 \ 0 \ 1]^T$ et ${}^k L_{k,n} = {}^k P_n$ donc on obtient :

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i \mathbf{a}_k + \bar{\sigma}_k (-{}^k P_{ny} {}^i \mathbf{s}_k + {}^k P_{nz} {}^i \mathbf{n}_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^i \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (36)$$

Ou ${}^k P_{ny}$ et ${}^k P_{nz}$ sont les composants du vecteur ${}^k J_n$. a partir de cette expression, la k^{ème} colonne de la matrice ${}^i J_n$ est

$${}^i J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^i \mathbf{a}_k + \bar{\sigma}_k {}^0 \hat{\mathbf{a}}_k ({}^i P_n - {}^i P_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^0 \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (37)$$

Qui donne pour $i = 0$:

$${}^0 J_{n:k} = \begin{bmatrix} \sigma_k {}^0 \mathbf{a}_k + \bar{\sigma}_k {}^0 \hat{\mathbf{a}}_k ({}^0 P_n - {}^0 P_k) \\ \bar{\sigma}_k {}^0 \mathbf{a}_k \end{bmatrix} \quad (38)$$

dans ce cas on est besoin de calculer les matrices ${}^0 T_k$ pour $k = 1, \dots, n$.

7-Modélisation cinématique :

Le modèle cinématique inverse (MCI) donne les vitesses articulaires \dot{q} correspondants à une vitesse désire \dot{X} de l'organe terminal. le modèle cinématique inverse s'obtient par la solution d'un système d'équations linéaires soit analytiquement, soit numériquement. Les solutions analytiques diminuent le nombre d'opérations de façon remarquable par rapport au solutions numériques, mais il faut traiter les cas singuliers séparément. Les solutions numériques sont plus générales et traitent tous les cas de la même façon.

Soit $X = [X_p^T - X_r^T]^T$ une représentation de la situation du repère R_n dans le repère R_0

Ou X_p^T et X_r^T désignent respectivement la position et l'orientation opérationnelles.

Les relations entre les vitesses \dot{X}_p et \dot{X}_r et les vecteur ${}^0 V_n$ et ${}^0 \omega_n$ sont :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_p \\ \dot{X}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_p & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \Omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0V_n \\ {}^0\omega_n \end{bmatrix} = \Omega \begin{bmatrix} {}^0V_n \\ {}^0\omega_n \end{bmatrix} \quad (39)$$

Lorsque la matrice J a la forme : $J = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B & C \end{bmatrix}$ les matrices A et C étant carrées inversibles, il est facile de montrer que l'inverse de cette matrice s'écrit :

$$J^i = \begin{bmatrix} A^{-1} & \mathbf{0} \\ -C^{-1} & BA^{-1}C^{-1} \end{bmatrix} \quad (40)$$

La résolution du problème se ramène donc à l'inversion de la matrice J.

8-Modélisation dynamique :

Le modèle dynamique est la relation entre les couples(et/ou forces) appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires . Il est représenté e par la relation :

$$\Gamma = q, \dot{q}, \ddot{q}, fe \quad (41)$$

Γ :vecteur des couples des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique.

q :vecteur des positions articulaires.

\dot{q} : vecteurs des vitesses articulaires.

\ddot{q} : vecteurs des accélérations articulaires.

fe :vecteurs représentant l'effort extérieur qu'exerce le robot sur l'environnement.

La relation (1.41) est appelée modèle dynamique inverse(ou modèle dynamique) parce qu'elle définit le système d'entrée en fonction des variables sorties.

Le modèle dynamique direct décrit les accélérations articulaires en fonction des positions,vitesses et couples. Il est représenté e par la relation suivante :

$$\ddot{q} = g(q, \dot{q}, \Gamma, fe) \quad (42)$$

Le modèle dynamique joue un rôle important dans la conception et le fonctionnement des robots. Pour la conception, le modèle dynamique inverse peut être utilisé pour choisir les actionneurs, alors que le modèle dynamique direct est utilisé pour effectuer des simulations, afin de tester les performances du robot. En ce qui concerne les fonctionnalités du robot, le

modèle dynamique inverse est utilisée pour calculer les couples actionneurs, qui sont nécessaires pour réaliser un mouvement souhaité. Il est également utilisé pour identifier les paramètres dynamiques qui sont nécessaires à la fois pour le contrôle et la simulation. Plusieurs approches sont proposées pour obtenir le modèle dynamique des robots. Les plus souvent utilisées dans la robotique sont le formalisme de Lagrange, et le formalisme de Newton-Euler.

9-Conclusion :

Ce chapitre est consacré pour la modélisation des robots manipulateurs, à partir de trois modèles utilisés d'une manière individuelle ou combinée pour réaliser ces modélisations qui sont :

Le modèle géométrique ,le modèle différentiel ou cinématique ,Le modèle dynamique .
Chaque type est en direct et inverse.



Chapitre 3 : Application sur un Robot Puma 600

1-Introduction :

Afin d'appliquer les différentes notions et techniques de modélisation présentées dans ce chapitre, on présente dans cette section une application de calcul géométrique et modèle dynamique, du robot manipulateur PUMA 600.

Ces modèles seront utilisés pour valider la commande présentée dans le chapitre suivant.

L'application sera faite pour les trois premières articulations (robot à 3 ddl), [24]

.

2-Description géométrique et dynamique du robot PUMA 600 :

Le robot PUMA est conçu pour être une machine programmable universelle pour l'assemblage. Le robot PUMA 600 dispose de six d' axes et articulations révolutionnaires connectées en série et d'un embrayage monté au poignet.

Le robot PUMA 600 est un appareil autonome à positionnement contrôlé avec des gains de contrôle PID prédéfinis au niveau matériel.

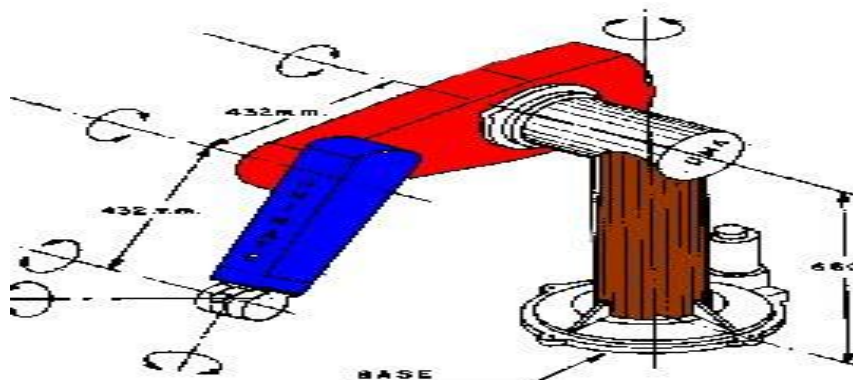


Figure 1: Le robot PUMA 600

3-Caractéristique du système le robot Puma :

est conçu pour être une machine universelle programmable pour l'assemblage. Le robot PUMA 600 dispose de six articulations tournantes connectées en série et d'une pince montée

au poignet. Il ne peut gérer une charge utile que jusqu'à cinq livres. Les paramètres cinématiques du robot PUMA 600 sont illustrés .

Le robot PUMA 600 est un dispositif à commande de position d'articulation indépendante avec des gains de contrôle PID prédéfinis au niveau matériel. Il n'est normalement pas rétro-pilotable. L'actionneur de chaque articulation intègre une paire de capteurs de position, un potentiomètre et un codeur incrémental optique 16 bits. Les potentiomètres à résolution grossière sont utilisés pour calibrer les positions des articulations de mise sous tension du robot.

Des encodeurs incrémentaux à résolution fine sont utilisés avec les servos pour contrôler avec précision les articulations. La précision et la respectabilité du robot PUMA 600 sont toutes deux revendiquées par le fabricant comme étant inférieures à 0,1 mm .La raison d'utiliser deux systèmes de mesure de position est simplement que le prix des potentiomètres et des codeurs incrémentaux est moins cher que celui des codeurs absolus de même résolution.

Étant donné que les potentiomètres sont des dispositifs absolus, lorsque l'alimentation est activée et qu'une tension leur est appliquée, les tensions de sortie peuvent être mesurées à partir de leurs essuie-glaces pour indiquer les angles d'articulation du robot. Des potentiomètres sont connectés aux convertisseurs analogique-numérique 8 bits fournissant des angles d'articulation approximatifs (de l'ordre de 2 à 3 degrés). Les codeurs incrémentaux 16 bits mesurent plus précisément les angles des articulations (de l'ordre de 0,05 degré). Chaque fois que l'alimentation est coupée, le système de robot perd la trace de la mesure des angles d'articulation en raison de l'utilisation des codeurs incrémentaux. Il est nécessaire de régler les références de mesure des encodeurs à l'aide de potentiomètres pour que le robot PUMA soit contrôlé avec précision. Les routines d'initialisation et d'étalonnage du robot PUMA 600 sont décrites dans Shieh [25] ainsi que les paramètres système utilisés par le système d'exploitation VAL

4-Paramètres mesures du robot PUMA 600 :

Dans ce tableau, nous fournirons les poids et les longueurs du robot Puma que nous mettrons :

	Masse d'Axe (kg)		Langueurs (m)	
1 ^{er}	m_1	10.521	$l_1 = r_2$	0.149
2 ^{eme}	m_2	10.236	$l_2 = d_3$	0.432
3 ^{eme}	m_3	8.767	$l_3 = a$	0.431

Tableau 1 : les mesurée du robot Puma

5-Modèle géométrique direct du robot PUMA 600 :

Les robots séquentiels sont de bons exemples pour étudier les systèmes de coordonnées relatives. Chaque lien du robot a généralement des coordonnées relatives. Considéré comme ayant un système de coordonnées local attaché. Des encodeurs sont attachés à chaque articulation. Les angles d'articulation peuvent être trouvés à partir de la lecture de l'encodeur. Application des angles d'articulation dans l'analyse du déplacement vers l'avant, la position et la direction de l'effecteur terminal du robot peuvent être déterminées. L'essence de l'analyse du déplacement vers l'avant est de convertir les coordonnées de l'effecteur terminal associé au système de coordonnées local dans le système de coordonnées sous-jacent.

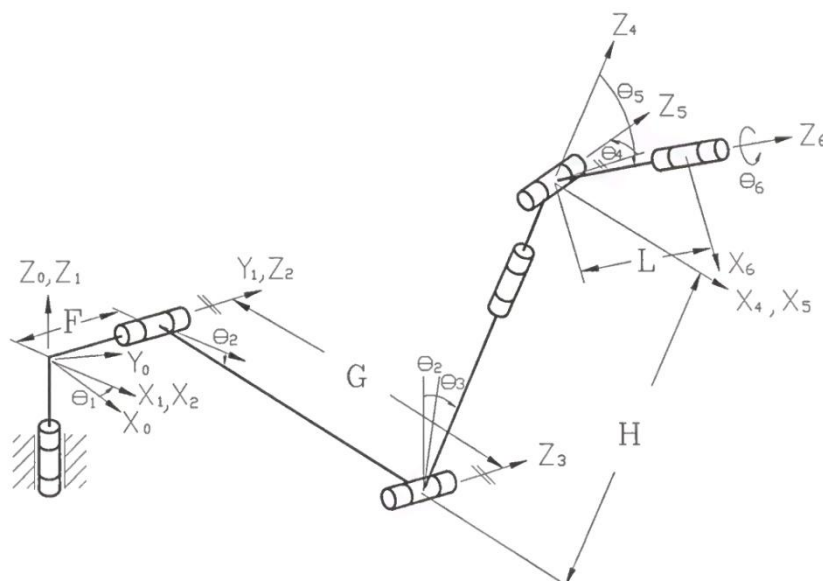


Figure 2 : schématique du robot Puma 600

le placement des repères du robot manipulateur en utilisant la notation de Denavit-Hartenberg des trois premiers degrés de libertés.

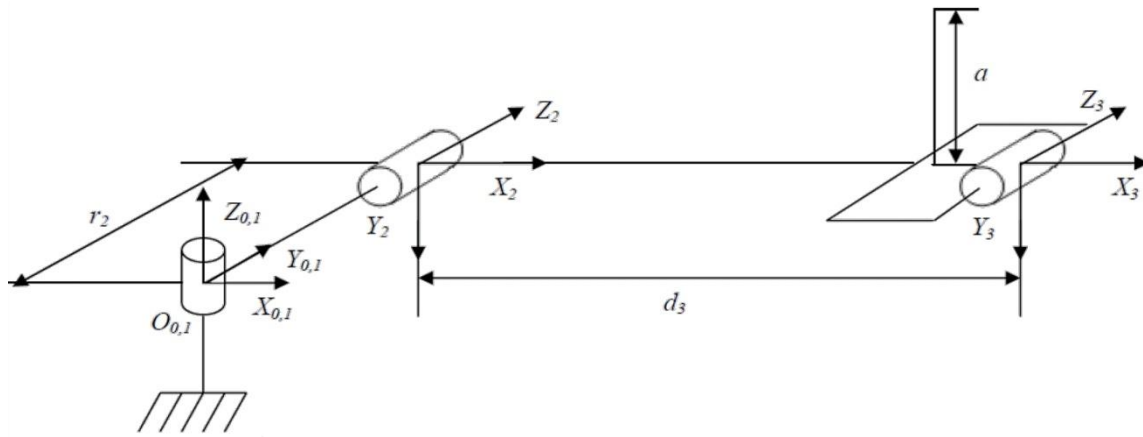


Figure 3: Le placement des repérés du robot Puma 600

En utilisant l'équation de méthode de Paul on obtient les matrices de transformations suivantes :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 & d_i \\ \cos \alpha_i \cdot \sin \vartheta_i & \cos \alpha_i \cdot \cos \vartheta_i & -\sin \alpha_i & -r \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cdot \sin \vartheta_i & \sin \alpha_i \cdot \cos \vartheta_i & \cos \alpha_i & r_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ce tableau présent les paramètres géométrique du robot Puma 600 :

i	σ_i	α_i	d_i	r_i	θ_i
1	0	0	0	0	q_1
2	0	$-\pi/2$	0	r_2	q_2
3	0	0	d_3	0	q_3

Tableau 2 les paramètre géométrique

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -r_2 \\ -\sin q_2 & -\cos q_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & d_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pour obtenir le MGD, il faut déterminer la matrice de passage du robot : soit 0T_3 dans le cas présent. Pour l'obtenir, on multiplie les matrices ${}^{i-1}T_i$ en partant de la dernière afin de définir des matrices intermédiaires U_i utiles pour l'élaboration du modèle géométrique inverse (MGI).

on a :

$$U_i = {}^i T_{i+1} \cdot U_{i+1} \quad (5)$$

Appliquer à notre cas, on définit successivement :

$$U_3 = I_3 \quad (6)$$

$$U_2 = {}^2T_3 \cdot U_3 = {}^2T_3 \cdot I_3 = {}^2T_3 \quad (7)$$

$$U_1 = {}^1T_2 \cdot U_2 = {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 = {}^1T_3 \quad (8)$$

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot U_1 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 = {}^0T_3 \quad (9)$$

Les expressions des matrices U_i peuvent être présentes sous la forme :

$$U_i = \begin{bmatrix} s_{xi} & n_{xi} & a_{xi} & p_{xi} \\ s_{yi} & n_{yi} & a_{yi} & p_{yi} \\ s_{zi} & n_{zi} & a_{zi} & p_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$U_2 = {}^2T_3 \cdot U_3 \quad (11)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & d_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & d_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$U_1 = {}^1T_2 \cdot U_2 \quad (14)$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -r_2 \\ -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & d_3 \\ \sin q_3 & \cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$U_1 = \begin{bmatrix} \cos^2 q_2 - \sin q_2 \cdot \cos q_3 & -\cos q_2 \cdot \sin q_3 - \cos q_3 \cdot \sin q_2 & 0 & d_3 \cos q_2 \\ 0 & 0 & 1 & -r_2 \\ -\sin q_2 \cdot \cos q_2 - \cos q_2 \cdot \sin q_3 & \sin q_2 \cdot \sin q_3 - \cos q_2 \cdot \cos q_3 & 0 & -d_3 \cdot \sin q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$U_0 = {}^0T_1 \cdot U_1 \quad (17)$$

$$U_0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + U_1 \quad (18)$$

$$= \begin{bmatrix} -\cos q_1 \cdot (\sin q_2 \sin q_3 - \cos^2 q_2) & -\cos q_1 \cdot (\cos q_2 \cdot \sin q_3 + \cos q_3 \cdot \sin q_2) & -\sin q_1 & r_2 \sin q_1 + d_3 \cdot \cos q_1 \cos q_2 \\ -\sin q_1 \cdot (\sin q_2 \sin q_3 - \cos^2 q_2) & -\sin q_1 (\cos q_2 \cdot \sin q_3 + \cos q_3 \sin q_2) & \cos q_1 & d_3 \cdot \cos q_2 \cdot \sin q_1 - r_2 \cdot \cos q_1 \\ -\cos q_1 \cdot \sin q_3 - \cos q_2 \cdot \sin q_3 & \sin q_2 \cdot \sin q_3 - \cos q_2 \cdot \cos q_3 & 0 & -d_3 \cdot \sin q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

6-Modèle dynamique du robot PUMA 600 :

6-1 La matrice d'inertie : Les matrices de pseudo-inertie des trois premiers corps sont :

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} m_1 r^2 & 0 & \frac{1}{2} m_1 r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} m_1 r & 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_2 d^2 & 0 & 0 & \frac{1}{2} m_2 d \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} m_1 r \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} m_2 d & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_3 a^2 & 0 & 0 & \frac{1}{2} m_3 a \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} m_3 a & 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Les éléments de la matrice d'inertie sont :

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11}(q) & m_{12}(q) & m_{13}(q) & m_{14}(q) \\ m_{21}(q) & m_{22}(q) & m_{23}(q) & m_{24}(q) \\ m_{31}(q) & m_{32}(q) & m_{33}(q) & m_{34}(q) \\ m_{41}(q) & m_{42}(q) & m_{43}(q) & m_{44}(q) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{m}_{11}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_1}{\partial q_1} I_1 \frac{\partial^0 T_1^T}{\partial q_1} \dot{q}_1 \dot{q}_1 + \frac{\partial^0 T_2}{\partial q_1} I_2 \frac{\partial^0 T_2^T}{\partial q_1} \dot{q}_1 \dot{q}_1 + \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_1} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_1} \dot{q}_1 \dot{q}_1 \right\} \quad (24)$$

$$= \frac{1}{6} m_3 r^2 + \frac{1}{6} d^2 (3m_3 + m_2) \cos(2q_2) + \frac{1}{6} m_3 a^2 \cos(2q_3 + 2q_2) + \frac{1}{2} m_3 d^2 + \frac{1}{6} m_2 d^2 + \frac{1}{3} m_3 r^2 + \frac{1}{6} m_3 a^2 + \frac{1}{2} m_3 a d \cos(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} m_3 a d \cos(q_3) + r^2 m_2$$

$$\mathbf{m}_{21}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_2}{\partial q_1} I_2 \frac{\partial^0 T_2^T}{\partial q_2} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_1} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_1} \dot{q}_1 \dot{q}_2 \right\} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{2} m_3 a r \sin(q_3 + q_2) - \frac{1}{2} d r (m_2 + 2m_3) (q_2)$$

$$\mathbf{m}_{31}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_1} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_3} \dot{q}_1 \dot{q}_3 \right\} \quad (26)$$

$$= -\frac{1}{2} m_3 a r \sin(q_3 + q_2)$$

$$\mathbf{m}_{22}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_2}{\partial q_2} I_2 \frac{\partial^0 T_2^T}{\partial q_2} \dot{q}_2 \dot{q}_2 + \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_2} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_2} \dot{q}_2 \dot{q}_2 \right\} \quad (27)$$

$$= \frac{1}{3} m_2 d^2 + m_3 d^2 + \frac{1}{3} m_3 a^2 + m_3 d \cos(q_3)$$

$$\mathbf{m}_{32}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_2} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_3} \dot{q}_2 \dot{q}_3 \right\} \quad (28)$$

$$= -\frac{1}{3} m_3 a^2 + -\frac{1}{2} m_3 a d \cos(q_3)$$

$$\mathbf{m}_{33}(\mathbf{q}) = \text{trace} \left\{ \frac{\partial^0 T_3}{\partial q_3} I_3 \frac{\partial^0 T_3^T}{\partial q_3} \dot{q}_3 \dot{q}_3 \right\} \quad (29)$$

$$= -\frac{1}{3} m_3 a^2$$

Donc :

$$\mathbf{m}_{11} = 3.24 + 1.77 \cos(2q_2) + 0.814 \cos(2q_3 + 2q_2) + 1.63(2q_2 + q_3) + 1.63(q_3) \quad (30)$$

$$\mathbf{m}_{12} = \mathbf{m}_{21} = -1.22 \sin(q_2) - 0.563 \sin(q_3 + q_2) \quad (31)$$

$$\mathbf{m}_{22} = 5017 + 3.26 \cos(q_3) \quad (32)$$

$$\mathbf{m}_{13} = \mathbf{m}_{31} = -0.563 \sin(q_3 + q_2) \quad (33)$$

$$\mathbf{m}_{32} = \mathbf{m}_{23} = 1.63 + 1.63 \cos(q_3) \quad (34)$$

$$\mathbf{m}_{33} = 1.63 \quad (35)$$

7-La matrice des forces Centrifuges et de Coriolis :

Les éléments de la matrice des forces Centrifuges et de Coriolis sont (Annexe A) :

$$c(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11}(q, \dot{q}) & c_{12}(q, \dot{q}) & c_{13}(q, \dot{q}) \\ c_{21}(q, \dot{q}) & c_{22}(q, \dot{q}) & c_{23}(q, \dot{q}) \\ c_{31}(q, \dot{q}) & c_{32}(q, \dot{q}) & c_{33}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$c_{11}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{11}(q)}{\partial q} \quad (37)$$

$$= -\frac{1}{4} m_3 a d (2\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(2q_2 + q_3) + \frac{1}{6} m_3 a^2 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3 \sin(3q_3 + 2q_2)) - \frac{1}{2} d^2 (m_3 + \frac{1}{3} m_3) \dot{q}_2 \sin(2q_2) - \frac{1}{4} m_3 a d \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$c_{11}(q, \dot{q}) = 1.63 (\dot{q}_2 + 0.5\dot{q}_3) \sin(2q_2 + q_3) - 0.814 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(2q_3 + 2q_2) - 1.77 q_2 \sin(2q_2) - 0.816 \sin(q_3) q_3 \quad (38)$$

$$c_{12}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{12}(q)}{\partial q} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial m_{11}}{\partial q_2} - \frac{\partial m_{12}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial m_{12}(q)}{\partial q_2} - \frac{\partial m_{22}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{12}(q)}{\partial q_2} - \frac{\partial m_{32}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_3 \quad (39)$$

$$= -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} m_3 a^2 \sin(2q_3 + q_2) \right) \frac{1}{3} m_3 a d \sin(2q_2 + q_3) + \frac{1}{2} m_3 a d \sin(q_3) \dot{q}_1 - \frac{1}{4} m_3 a r \cos(q_3 + q_2) \dot{q}_2$$

$$c_{21}(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{21}(q)}{\partial q} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial m_{21}(q)}{\partial q_1} - \frac{\partial m_{11}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial m_{22}(q)}{\partial q_1} - \frac{\partial m_{21}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{23}(q)}{\partial q_2} - \frac{\partial m_{31}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_3 \quad (40)$$

$$= -\frac{1}{2} m_3 a d \sin(q_3) \dot{q}_3$$

$$c_{22}(q, \dot{q}) = -\frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{22}(q)}{\partial q} \quad (41)$$

$$\mathbf{c}_{23}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{23}(q)}{\partial q} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial m_{21}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{13}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial m_{22}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{23}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{23}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{33}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_3 \quad (42)$$

$$= -\frac{1}{2} m_3 ad(q_2 + \dot{q}_3) \sin(q_3) - \frac{1}{4} m_3 ar \cos(q_3 + q_2) \dot{q} \quad (43)$$

$$\mathbf{c}_{31}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{31}(q)}{\partial q} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial m_{11}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{13}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_1 + \left(\frac{\partial m_{12}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{23}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{13}(q)}{\partial q_3} - \frac{\partial m_{33}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_3 \quad (44)$$

$$\mathbf{c}_{33}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial m_{33}(q)}{\partial q} \quad (45)$$

Donc, il y'a :

$$\mathbf{c}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -1.22 \dot{q}_2 \cos(q_2) - 0.563(\dot{q}_2 + 0.5 \dot{q}_3) \cos(q_3 + q_2) - 1.77 \dot{q}_1 \sin(2q_2) - 0.5(1.63 \sin(2q_2 + 2q_3) + 3.26 \sin(2q_2 + q_3)) \dot{q}_1 \quad (46)$$

$$\mathbf{c}_{13}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -0.5(-1.63 \sin(2q_2 + 2q_3) - 1.63 \sin(2q_2 + q_3) - 1.63 \sin(q_3)) \dot{q}_1 - 0.282 \cos(q_2 + q_3) \dot{q}_2 \quad (47)$$

$$\mathbf{c}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = -1.63 \sin(q_3) \dot{q}_3 \quad (48)$$

$$\mathbf{c}_{31}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0.5(1.63 \sin(2q_2 + 2q_3) + 1.63 \sin(2q_2 + q_3) + 1.63 \sin(q_3)) \dot{q}_1 + 0.282 \cos(q_2 + q_3) \dot{q}_2 \quad (49)$$

$$\mathbf{c}_{32}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 1.63 \sin(q_3) \dot{q}_2 + 0.282 \cos(q_2 + q_3) \dot{q}_1 \quad (50)$$

$$\mathbf{c}_{33}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0 \quad (51)$$

8-Le vecteur de gravité :

Pour calculer le vecteur de gravité, nous devons déterminer l'énergie potentielle du robot, comme :

Nous trouvons par cet l'équation :

$$\mathbf{P}_1 = -m_1 {}^0g^T {}^0T_1 \mathbf{1}_{\bar{r}} = 0 \quad (52)$$

$$\mathbf{P}_2 = -m_2 {}^0g^T {}^0T_2 \mathbf{2}_{\bar{r}} = -\frac{1}{2} m_2 g d \sin(q_2) \quad (53)$$

$$\mathbf{P}_3 = -m_3 {}^0g^T {}^0T_3 \mathbf{3}_{\bar{r}} = -m_2 g \left\{ \frac{1}{2} a \sin(q_2 + q_3) + d \sin(q_2) \right\} \quad (54)$$

Ou ou comme ça :

$${}^0g^T = [0 \quad 0 \quad -g \quad 0] \quad (55)$$

$$\mathbf{1}_{\bar{r}} = \left[0 \quad \frac{1}{2} r \quad 0 \quad 1 \right] \quad (56)$$

$$\mathbf{2}_{\bar{r}} = \left[\frac{1}{2} d \quad 0 \quad 0 \quad 1 \right] \quad (57)$$

$$\mathbf{3}_{\bar{r}} = \left[\frac{1}{2} a \quad 0 \quad 0 \quad 1 \right] \quad (58)$$

Alors :

$$\mathbf{P}(\mathbf{q}) = -\frac{1}{2} m_2 g d \sin(q_2) - m_2 g \left\{ \frac{1}{2} a \sin(q_2 + q_3) + d \sin(q_2) \right\} \quad (59)$$

En utilisant cette expression de l'énergie potentielle totale, on peut calculer les éléments du vecteur de gravité comme suit :

$$\mathbf{g}_1(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial q_1} = 0 \quad (60)$$

Le vecteur de gravité est :

$$\mathbf{g}_2(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial q_2} = -\frac{1}{2} g d (m_2 + 2m_3) \cos(q_2) - \frac{1}{2} m_3 g a \cos(q_2 + q_3) \quad (61)$$

$$\mathbf{g}_3(\mathbf{q}) = \frac{\partial P(\mathbf{q})}{\partial q_3} = -\frac{1}{2} m_3 g a \cos(q_2 + q_3) \quad (62)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -80.5 \cos(q_2) - 37.1(q_1 + q_2) \\ -37.1 \cos(q_3 + q_2) \end{bmatrix} \quad (63)$$

9-Le vecteur de frottement

S'écrire comme suit :

$$f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} f_1 \dot{q}_1 + f_4 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ f_2 \dot{q}_2 + f_5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \\ f_3 \dot{q}_3 + f_6 \operatorname{sgn}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (64)$$

Donc est :

$$f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 2.52 \dot{q}_1 + 3.6 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ 7 \dot{q}_2 + 10 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \\ 1.75 \dot{q}_3 + 2.5 \operatorname{sgn}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (65)$$

10-Conclusion :

Ce chapitre est présenté une application de calcul des différents modèles du robot manipulateur PUMA 600 .

Avec la calcul de modèle géométrique et modèle dynamique , ces modelés seront utilisés pour valider les commandes.



Commande et simulation du Bras Manipulateur

Commande et simulation du Bras Manipulateur

1-Introduction :

Dans ce chapitre en utilisé deux logiciels « SolidWorks » et « Matlab / Smulink » . La conception du Bras Manipulateur ,est une étape cruciale dans le processus de développement de nombreux systèmes d'automatisation et d'ingénierie.

2-SolidWorks :

un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) très répandu, offre des fonctionnalités avancées pour la modélisation et la conception de vannes de manière efficace et précise. pour créer des modèles 3D .

il est essentiel de prendre en compte différents aspects tels que la forme, la taille, les matériaux, les connexions, les mécanismes d'actionnement, ainsi que les contraintes opérationnelles et environnementales.

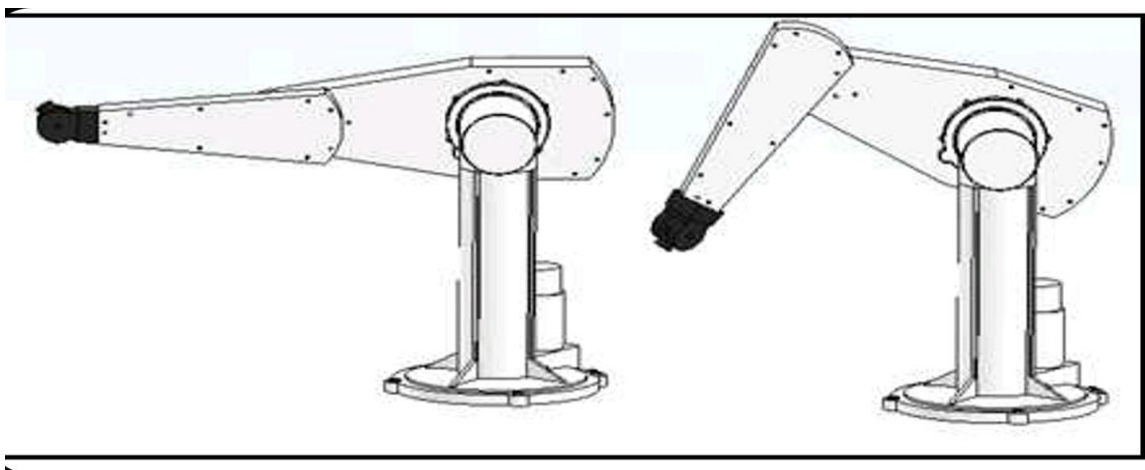


Figure 1: présente modèle **3D** du Bras Manipulateur

3-Simulink / Matlab :

est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB.

4- Simulation du bras manipulateur avec la commande PD :

Toutes les commandes exposées et implémentées pratiquement sont réalisées en boucle ouverte. La commande en boucle fermée, plus utile en présence des perturbations, constitue une extension intéressante de ce travail. Néanmoins, on a abordé le sujet dans ce mémoire, par une étude théorique et une simulation sous (MATLAB SIMULINK). Avec simulation en **3D**.

Une fois le modèle dynamique du robot établi le plus intéressant reste la commande du bras manipulateur. Cette matière a fait l' **PD** nombreuses études. L'objet principal de notre travail, on a opté pour un régulateur **PI**

4-1 Le régulateur PD :

Le régulateur PD (Proportionnel. Dérivé) est un régulateur en boucle fermée. qui a pour rôle de diminuer l'erreur entre la consigne et la mesure et d'atteindre la valeur souhaitée pour l'une des variables du système (vitesse, position...) .

La régulation sert à maintenir des grandeurs constantes, en minimisant rapidement l'effet des perturbations en le compensant. La poursuite sert, quant à elle, à s'adapter rapidement aux nouvelles consignes. C'est ce qu'on appelle l'asservissement.

5- Commandes Dynamiques De Robot Manipulateur :

Dans cette section on présente le résultat de simulation effectuée, afin d'évaluer la loi de commande **PD**

Les positions Désirées Sont: $q_d = [0.5 \quad 1 \quad -0.5]$

Figure suivante montre le Schéma bloc de la commande PD

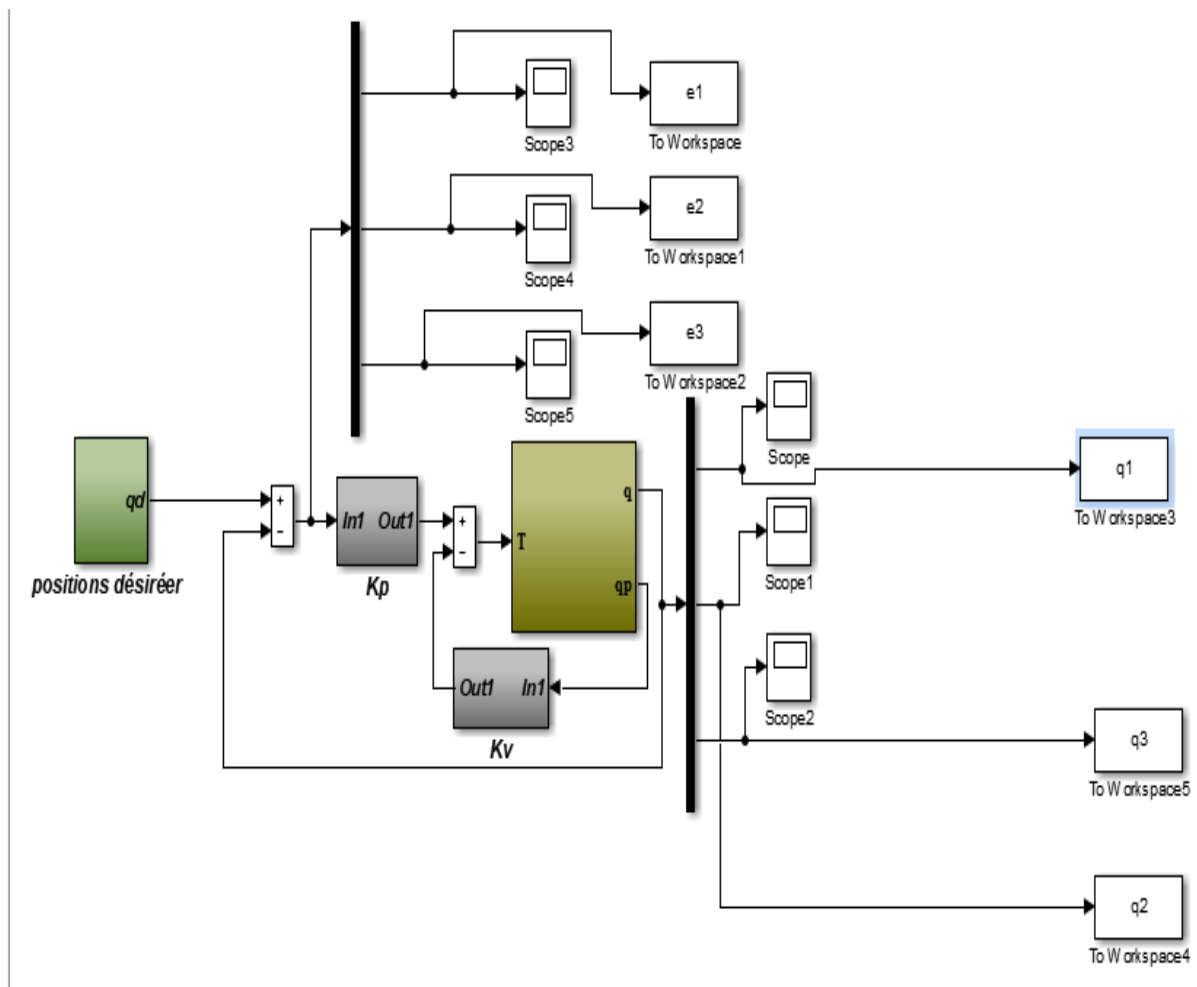


Figure 2: Schéma bloc de la commande **PD**

Les paramètres de simulation sont les matrices des gains K_p et K_v données par :

$$K_p = \begin{bmatrix} 3500 & 0 & 0 \\ 0 & 3500 & 0 \\ 0 & 0 & 3500 \end{bmatrix}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 250 & 0 & 0 \\ 0 & 350 & 0 \\ 0 & 0 & 190 \end{bmatrix}$$

Commande et simulation du Bras Manipulateur

La figure suivant montre les position et les erreurs des différents segment par loi de commande **PD**

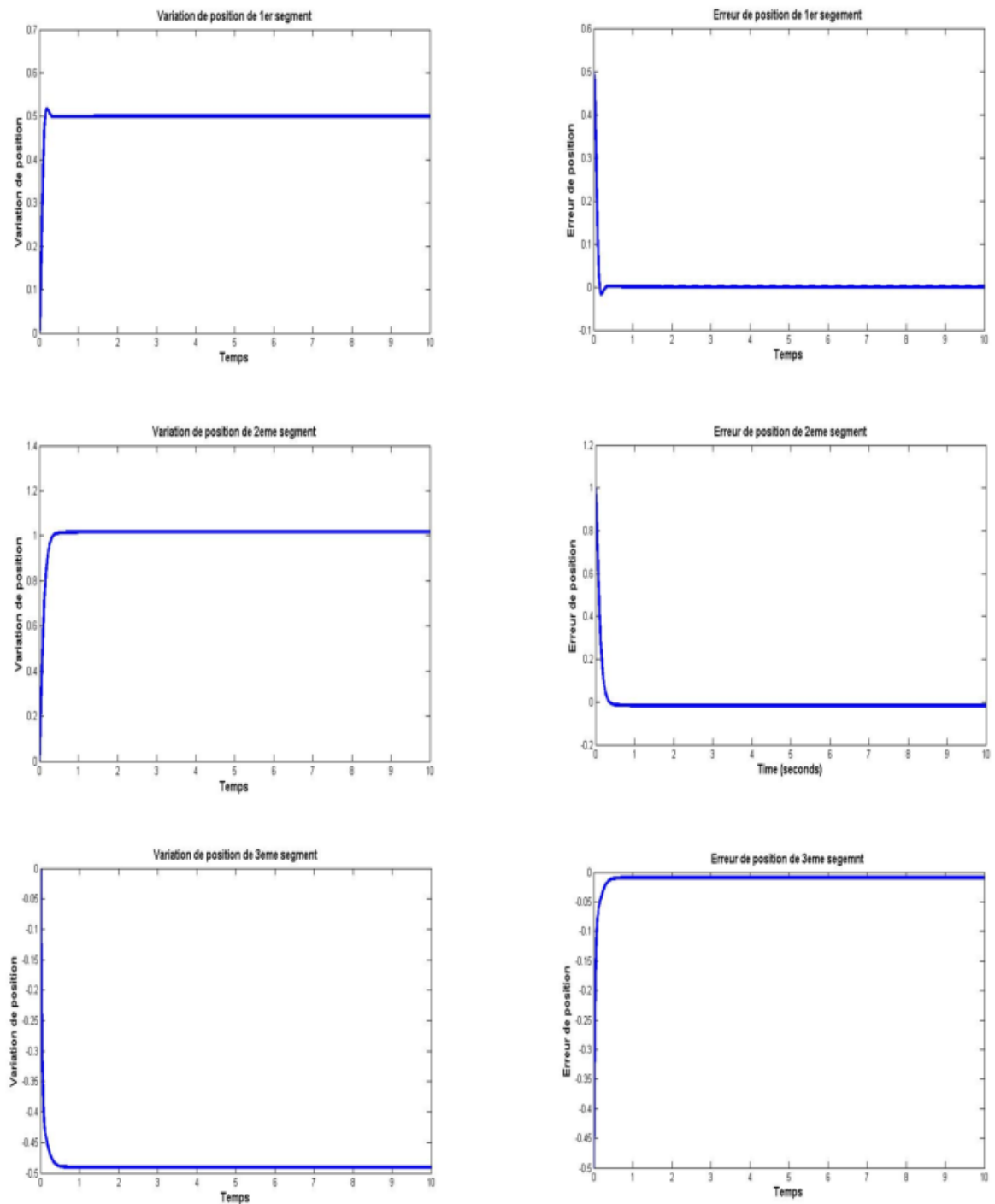


Figure 3: les position et les erreurs des différents segment par loi de commande **PD**

6- Simulation de bras manipulateur en temps réel :

Afin d'appliquer les différentes notions et techniques de modélisation présentées dans les chapitres précédente, on présente dans cette section une application de calcul de modèle géométrique et modèle dynamique Présenter comme outil complémentaire de la modélisation 3D par SolidWorks.

Ces Modelés seront utilisés pour valider les commandes présentées dans ce chapitre. L'application sera faite pour les trois premières articulations (**robot a 3 ddl**)

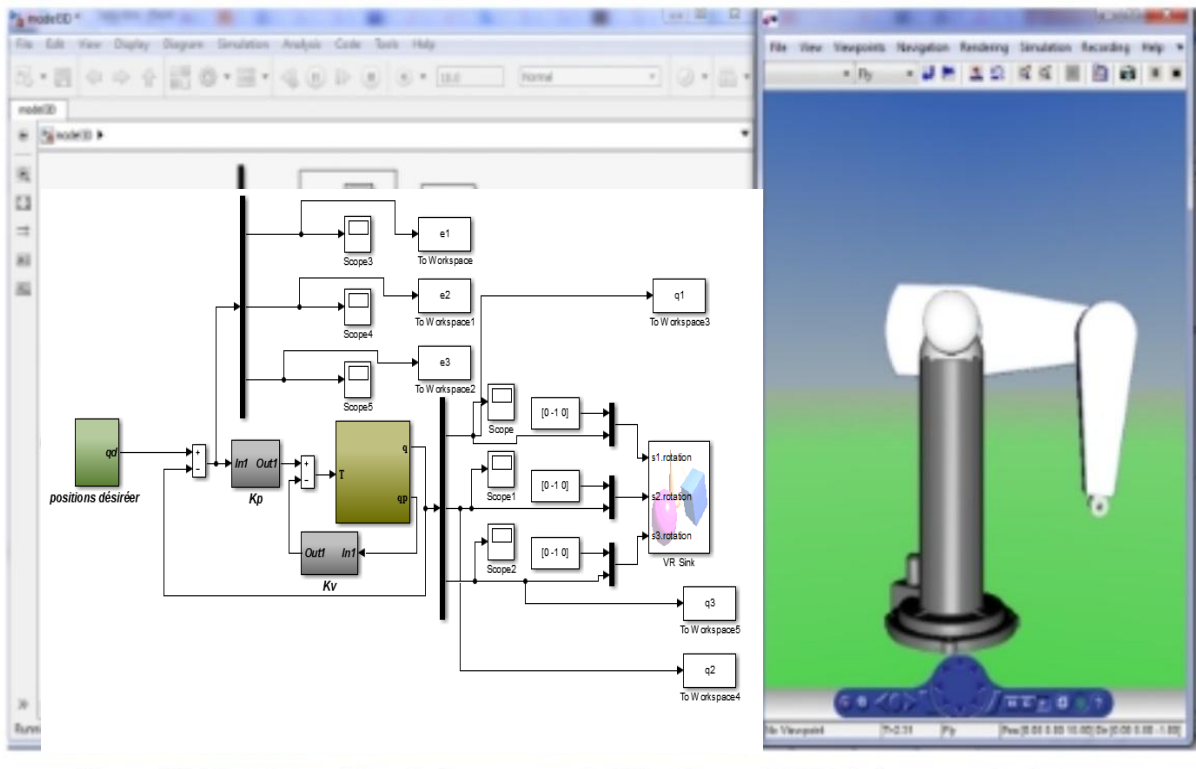


Figure 4: Schéma bloc de la commande **PD** et le model**3D** de bras manipulateur

Les paramètres de simulation sont les matrices des gains K_p et K_v données par :

$$K_p = \begin{bmatrix} 3500 & 0 & 0 \\ 0 & 3500 & 0 \\ 0 & 0 & 3500 \end{bmatrix}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 250 & 0 & 0 \\ 0 & 350 & 0 \\ 0 & 0 & 190 \end{bmatrix}$$

Commande et simulation du Bras Manipulateur

La figure suivante montre les position et les erreurs des différents segment par loi de commande **PD** en temps réel .

Les position désirées sont : $q_d = [0.5 \quad 1 \quad -0.5]$

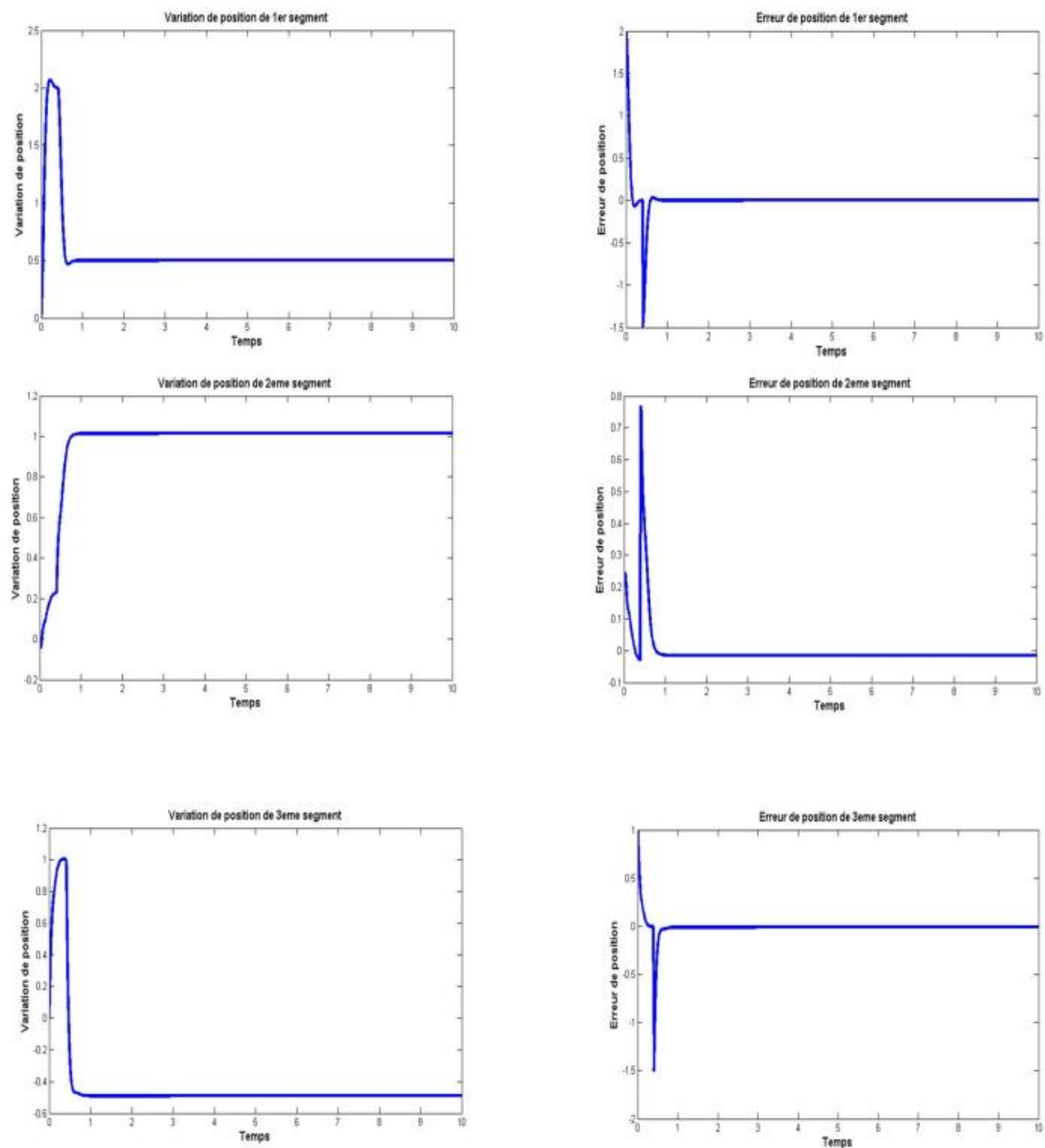


Figure 5: les position et les erreurs des différents segment par loi de commande **PD** en temps réel

Commande et simulation du Bras Manipulateur

La figure suivant montre les position et les erreurs des différents segment par loi de commande **PD** en temps réel avec changement de repère .

Les position désirées sont : $q_{d1} = [0.5 \ 0 \ -0.5]$ $q_{d2} = [1 \ 1.5 \ 0]$

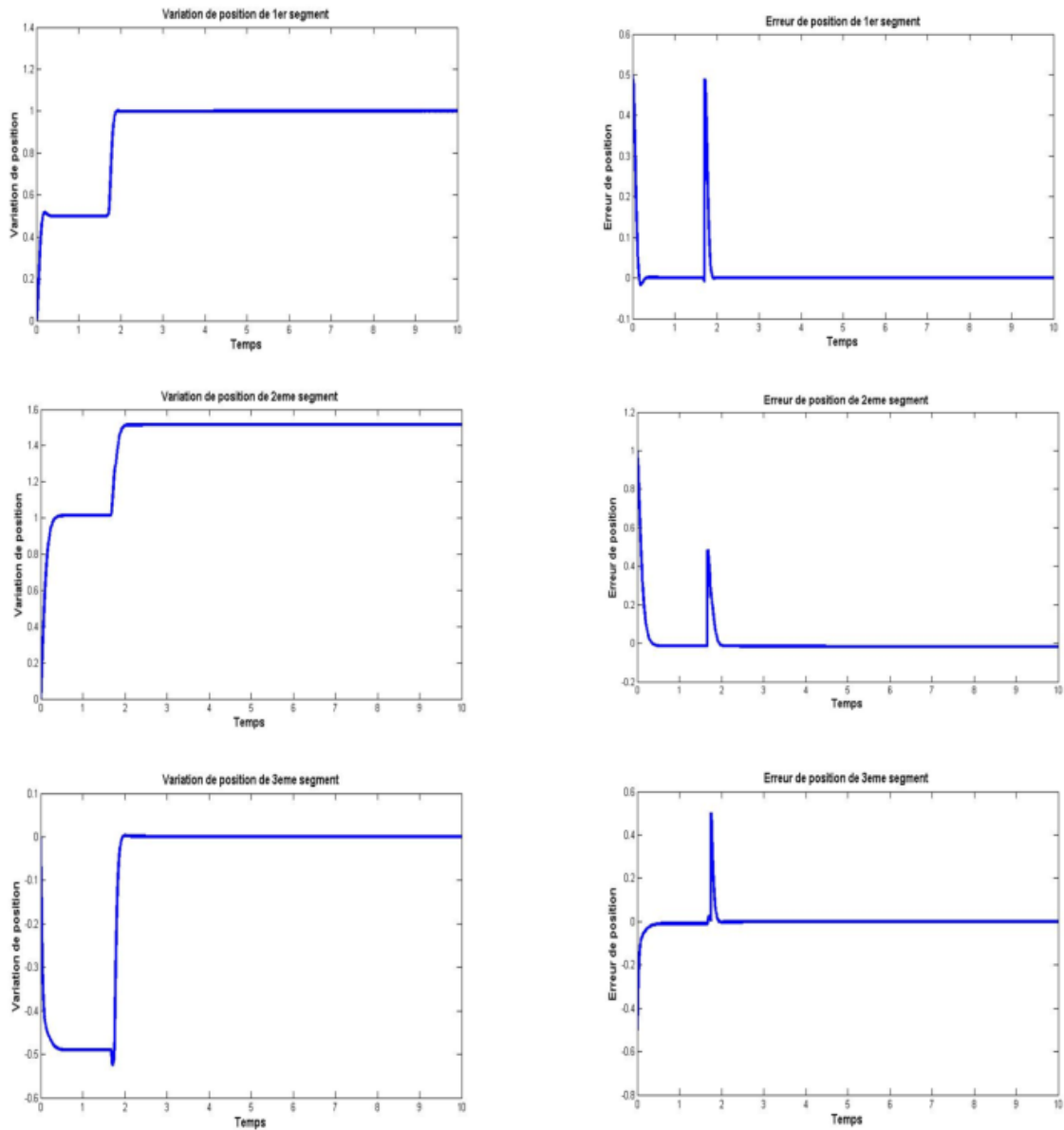


Figure 6: les position et les erreurs des différents segment par loi de commande PD en temps réel avec changement de repère

7- Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, on s'est intéressé à la carte de commande Arduino et à son fonctionnement en décrivant les types de programmes implémentés à notre bras manipulateur, puis on a exposé leurs tests et leurs résultats de simulation. Dans la seconde partie, on s'est penché sur la commande du bras manipulateur en boucle fermée par une simulation avec la commande **PD** sous matlab/simulink en temps réel



Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Durant notre travail, on a gagné beaucoup de connaissance sur le domaine de modélisation et commande des robots ; travaillons sur ce projet a aussi nos introduit aux plusieurs ressources de recherche disponible sur ce champ.

Cette étude nous a permis de découvrir quelques notions de base du domaine de la robotique, de comprendre la constitution et le fonctionnement du robot.

Le premier chapitre, et le second est consacré à la modélisation des robots manipulateurs, de modélisation géométrique, modélisation cinématique.

La troisième section présente une application de calcul des différences Modèles du robot **PUMA 600**.

Le dernier chapitre est consacré à la simulation avec logiciel de « Matlab » pour la Commande Traditionnelles **PD** de mouvement pour manipuler le robot **PUMA 600**.

Perspectives

Il est recommandé de suivre ce travail par des commandes intelligentes pour améliorer les résultats obtenus..



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Almusawi, Ahmed RJ, L. CananDülger, and SadettinKapucu. "Robotic arm dynamic and simulation with Virtual Reality Model (VRM)." 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, 2016.
- [2] Dictionnaire Reverso, 2010, Edition en ligne
- [3] Dictionnaire Larousse, 2008, Edition en ligne.
- [4] Eyraud, Charles-Henri. Horloges astronomiques au tournant du XVIIIe siècle: de l'à-peu-près à la précision. Diss. Lyon 2, 2004.
- [5] Official website IFR INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS.
- [6] Bostelman, Roger, Tsai Hong, and Jeremy Marvel. "Performance measurement of mobile manipulators." Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2015. Vol. 9498. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [7] ISO (International Standard Organization), 1947
- [8] LAURENT Guillaume, CHAILLET Nicolas « Robotique industrielle » Cours, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2017.
- [9] BOIMOND, Jean-Louis. « ROBOTIQUE » Court, ISTIA, Université Angers, 2017
- [10] BOUKLI HACENE Lotfi Fazil « Commande et supervision d'un ensemble de robots via internet », Mémoire en vue de l'obtention de Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie D'Oran, 26 avril 2012.
- [11] BAHLOUL Abdelkrim « Sur la commande des robots manipulateurs industriels en comanipulation robotique », Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 7 décembre 2018.
- [12] E BARS Fabrice « Analyse par intervalles pour la localisation et la cartographie simultanées ; Application à la robotique sous-marine », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE, 23 novembre 2011.
- [13] FATOUX Julien « Mise en œuvre d'un robot humanoïde et contribution à la génération de marches dynamiques optimales », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE POITIERS, 7 août 2006.
- [14] ASHIDIFAR, Mohammad Amin, RASHIDIFAR, Ali Amin, et AHMADI, Darvish. « Modeling and Control of 5DOF Robot Arm Using Fuzzy Logic Supervisory Control », Article, vol. 2, no 2, 2089-4856, Janvier 2013, International Journal of Robotics and Automation (IJRA).
- [15] CRAIG, John J. « Introduction to robotics: mechanics and control », Pearson Education International, Livre, 2009.
- [16] EL-HUSSIENY Haitham « Robotics Engineering », Cours, Benha University, 2017
- [17] GANGLOFF Jacques « Cours de Robotique », Cours, ENSPS 3A Master ISTI, 2018.

- [18] ANGELES Jorge « Fundamentals of robotic mechanical systems », Springer, Livre,2002.
- [19] Khalil W., Kleinfinger J.-F., "A new geometric notation for open and closed-loop robots", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, avril 1986, p. 1174-1180
- [20] D, Jacques; H, Richard Scheunemann . "Ukane notation cinématique des mécanismes basés sur des matrices inférieure paires". Trans ASME J. Appl. Mech 23: 215-221. (1955)
- [21] B.Abderrahime, cours de robotique,université kasdimerbeh, 2015
- [22] M.Murray Richard, Zexiang Li, S.Shankar Sastry, and S.Shankara Sastry. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994.
- [23] Wissama Khalil. Modeling, Identification and control of robots. 2004.
- [24] Kerraci Abdelkader. Synthèse des commandes robustes des robots manipulateurs rigides. Thèse de magistère, Université d'Oran, 2004.
- [25] DENAVIT, J & HARTENBERG.R.S ,Kinematic notation for lower –pair mechanisms based on matrices. Jour .Appl .Mech. , ASME, 22 , 1955, 215-221.
- [26] CHING-SHYONG SHIEH. A PUMA 600 ROBOT . University of Florida.