



Bouira le : 21/06/2024

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné(e), l'enseignant (e) : ISSAOUNI Salmi

Encadreur des étudiants (es) :

- 1- DECHOUCHA Lemia
- 2- BOUKAMOUN Isma

Spécialité : M2-ESE

Les autorise à soutenir leur mémoire de Master.

Signature du rapporteur

ISSAOUNI S



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électronique

Spécialité : Systèmes embarqués

Réalisé par :

BOUKAMOUM ISMA

Et

DECHOUCHA RANIA

Thème

La commande d'un robot SCARA à 4 degrés de liberté

Soutenu le: **01/07/2024**

Devant la commission composée de :

Mr : S. Haroun	M C A.	Univ. Bouira	Président
Mr : S. ISSAOUNI	M.A. A	Univ. Bouira	Rapporteur
Mr : Z. Asradj	MA A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicace

À mes parents bien-aimés, dont le soutien infaillible a été la lumière guidant chaque étape de mon parcours académique,

À mes sœurs chéries, pour leur amour et leur encouragement constant,

À ma famille entière, dont les sacrifices et l'affection ont été ma source de motivation,

À tous les enseignants, pour leur sagesse et leur dévouement, et à mes camarades étudiants, pour leur camaraderie et leurs défis stimulants,

Je dédie ce mémoire à chacun d'entre vous.

Et enfin, à toutes les âmes bienveillantes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail : votre aide précieuse et votre inspiration sont gravées dans chaque page de ce mémoire.

Isma

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

A mes frères et sœurs.

A mes amis et camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

RANIA

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Département des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université de Bouira. Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre gratitude envers Dieu, qui nous a donné la force et la volonté de mener à bien ce modeste projet.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos encadrant, notamment **M. ISSAOUNI Salim**, Directeur de ce mémoire, pour son accompagnement et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté envers notre travail. Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous nos enseignants qui nous ont soutenus tout au long de notre cursus, en signe de respect et de gratitude.

Enfin, nous associons à ces remerciements tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des Matières

Liste des Figures	I
Liste des Tableaux	II

Introduction Générale **1**

Chapitre 01 : Généralité sur la robotique

1.1	Introduction :	2
1.2	Histoire des robots :	2
1.3	Définitions	3
1.3.1	Robot :	3
1.3.2	Robotique :	4
1.4	Constituant d'un robot :	4
1.5	Les types de robots :	5
1.5.1	Les robots mobiles :	5
1.5.2	Les robots domestique :	6
1.5.3	Les robots humanoïdes	6
	Les robots volants (drones) :	7
1.5.4	Les robots militaires :	7
1.5.5	Les robots industriels :	8
1.5.6	Les robots sous-marin :	8
1.5.7	Les robots médicaux :	9
1.6	Classification géométrique	10
1.6.1	Structure cartésienne (PPP) :	10
1.6.2	Structure cylindrique (RPP) ou (PRP) :	10
1.6.3	Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale :	11
1.6.4	Structure dite SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) :	11
1.6.5	La structure 3R (anthropomorphe) :	12
1.7	Conclusion	12

Chapitre 02 : Modélisation d'un robot

2.1	Introduction :	13
2.2	Définition :	13
2.2.1	Articulation :	13

2.2.2	Espace articulaire :	13
2.2.3	Espace opérationnel :	14
2.2.4	Degré de liberté (DDL) :	14
2.2.5	Redondant :	14
2.3	Les notations et les outils mathématiques mis en œuvre pour la modélisation des robots :	14
2.3.1	Représentation d'un point :	14
2.3.2	Représentation d'une direction	15
2.3.3	Représentation d'un plan.....	15
2.3.4	Transformation homogènes	16
2.3.5	Transformation des vecteurs :	16
2.3.6	Transformation des plans	17
2.3.7	Matrice de transformation de translation pure :	17
2.3.8	Matrice de transformation de rotation autour des axes principaux	18
2.3.8.1	Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe x	18
2.3.8.2	Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe y :	19
2.3.8.2	Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe z : ...	19
2.3.9	Propriétés des matrices de transformation homogène :	19
2.4	Description de la géométrie des robots à structure ouverte simple	20
2.5	Paramètres de Denavit-Hartenberg :	22
2.6	Modélisation géométrique en chaîne ouverte simple :	22
2.6.1	Modèle géométrique direct :	22
2.6.2	Le modèle géométrique inverse :	23
2.7	Le modèle cinématique robots à structures ouvertes simples :	24
2.7.1	Le modèle cinématique direct :	24
2.7.2	Modèle cinématique inverse :	25
2.8	Modèle dynamique du robot SCARA :	25
2.9	Modélisation du robot SCARA :	27
2.9.1	Calcul le Modèle géométrique direct :	28
2.9.2	Calcul le modèle géométrique inverse :	31
2.9.3	Calcul le modèle cinématique direct des robots à structures ouvertes simples : 32	
2.9.4	Calcul le Modèle cinématique inverse :	32
2.9.5	Modèle dynamique du robot SCARA :	34
2.10	Conclusion :	35

Chapitre 03 : Commande d'un robot

3.1	Introduction	36
3.2	Commande des mouvements	36
3.3	Régulation :	36
3.3.1	Définition :	36
3.3.2	L'objectif de la régulation :	37
3.4	Régulation PID :	38
3.4.1	Définition du régulateur PID :	38
3.4.2	Principe général :	38
3.4.3	Les types des régulateurs	39
3.4.3.1	Action proportionnelle	39
3.4.3.2	Action intégrale :	39
3.4.3.3	Action dérivée :	40
3.4.4	Structures des régulateurs PID électroniques :	41
3.4.5	Avantage et inconvénients	41
3.4.6	Commande classique par régulateur PID des robots manipulateurs	42
3.5	Génération de mouvement :	43
3.5.1	Génération de trajectoire dans l'espace articulaire :	44
3.5.2	Génération de trajectoire dans l'espace opérationnelle :	45
3.6	Méthode d'interpolation polynomiale :	45
3.6.1	Polynôme 3ème degré :	45
3.6.2	Polynôme de degré cinq :	47
3.7	Simulation :	48
3.8	Résultats de Simulation pour QREF	49
3.8.1	Résultats de Simulation (référence 2) :	49
3.8.2	Résultats de Simulation (référence 2) :	50
3.9	resultat de simulation pour (XREF)	51
3.9.1	Résultats de Simulation (référence 1)	51
3.9.2	Résultats de simulation (Référence 2) :	53
3.10	Conclusion :	56

Conclusion Générale62

Liste des figures

Figure1-1 : Engelberger et George Devol	2
Figure1-2 : Sophia La Pionnière de l'Ère des robots	3
Figure1-3 : 1 961 Unimate, le premier.....	3
Figure1-4:structure d'un bras manipulateur.....	4
Figure1-5 : Roombo	5
Figure 1-6:un robot de livraison	5
Figure 1-7Roomba j6+:	6
Figure 1-8 ; Robot ICUB	6
Figure 1-9:Robot ATLAS	6
Figure 1-10: un drone	7
Figure 1-11:la robotique militaire	7
Figure 1-12:les robots industriels séries	8
Figure 1-13:les robots industriels parallèles (DELTA)	8
Figure 1-14:Robot sous-marin	9
Figure 1-15:robot chirurgical	9
Figure 1-16: robot teleprésence	9
Figure 1-17:Robot de diagnostic.....	9
Figure 1-18:Structure cartésienne	10
Figure 1-19:structure d'un robot cylindrique.....	10
Figure 1-20:structure d'un robot sphérique	11
Figure 1-21: Robot SANKYO structure SCARA	11
Figure 1-22:structure d'un robot 3R.....	12
Figure 2-1:représentation d'un point	15
Figure 2-2 : Transformation des repères.....	16
Figure 2-3:Transformation d'un vecteur.....	17
Figure2-4:Transformation de translation pure.....	18
Figure 2-5:Transformation de rotation pure autour de	19
Figure 2-6:Robot à structure ouverte simple	20
Figure 2-7:Paramètres géométrique dans le cas d'une structure ouverte simple..	21
Figure 2-8: Robot manipulateur SCARA	27
Figure 2-9:Placement des repères.....	28
Figure 3-1:Schéma de principe de régulation automatique	37
Figure 3-2: Schéma de principe de régulateur PID.....	38
Figure 3-2 : les structures de correcteurs PID	41
Figure 3-4:Schéma classique de la commande PID d'un robot manipulateur	42
Figure 3-5:Génération de mouvement dans l'espace articulaire	44
Figure 3-6:Génération de mouvement dans l'espace opérationnelle	45

<i>Figure 3-7:loi Polynômiale de degré trois.</i>	46
<i>Figure 3-8:loi Polynômiale de degré cinq.</i>	47
<i>Figure 3-9:Poursuite de position des 4 articulations.....</i>	49
<i>Figure 3-10 : Poursuite de position des 4 articulations.....</i>	50
<i>Figure 3-11: Suivi de Trajectoire Cartésienne et Erreurs pour les position XE, YE, ZE.....</i>	51
<i>Figure 3-12:Trajectoire 3D des Positions Cartésiennes pour un Robot SCARA à 4 DDL (RRRP).....</i>	53
<i>Figure 3-13: Erreurs des Configurations Articulaires Désirées et Actuelles</i>	53
<i>Figure 3-14:Suivi de Trajectoire Cartésienne et Erreurs pour les position XE, YE, ZE</i>	54
<i>Figure 3-15:Trajectoire 3D des Positions Cartésiennes pour un Robot SCARA à 4 DDL (RRRP).....</i>	55
<i>Figure 3-16:erreurs des Configurations Articulaires Désirées et Actuelles.....</i>	55

Liste des tableaux

Chapitre02

<i>Tableau 1:Types d'équations rencontrés avec la méthode de Paul.....</i>	23
<i>Tableau 2:DH paramètres du robot SCARA.....</i>	28

Chapitre03

<i>Tableau 3:tableau récapitulatif sur les avantages et les inconvénients du PID</i>	42
<i>Tableau -4:Avantages et inconvénients de l'espace articulaire et opérationnel ...</i>	44

Résumé

Ce mémoire traite de la robotique, avec un focus particulier sur les robots industriels. Nous avons concentré notre étude sur le robot SCARA à 4 degrés de liberté (DDL), en abordant à la fois sa modélisation et sa commande.

Dans un premier temps, une revue générale des robots a été réalisée, couvrant leurs types, leurs applications et les principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons focalisé notre attention sur le robot SCARA, connu pour sa précision et sa rapidité dans les tâches de pick-and-place.

La modélisation du robot SCARA 4 DDL a été entreprise, comprenant la formulation des équations cinématiques et dynamiques. Ces modèles ont permis de simuler et d'analyser le comportement du robot dans divers scénarios opérationnels.

Pour contrôler le robot SCARA, nous avons implémenté un régulateur PID. Les paramètres du PID ont été ajustés pour optimiser la performance du robot, visant à minimiser les erreurs de positionnement et à améliorer la stabilité du système.

Les résultats expérimentaux montrent que la commande PID, bien que simple, est efficace pour le contrôle précis du robot SCARA. Nous avons observé une bonne réactivité et une stabilité satisfaisante dans les mouvements du robot, malgré certaines limitations inhérentes à la méthode PID, notamment dans des conditions de forte non-linéarité ou de perturbations importantes.

En conclusion, ce mémoire démontre la viabilité de l'utilisation des régulateurs PID pour la commande des robots SCARA, tout en soulignant la nécessité d'ajustements précis des paramètres pour des performances optimales. Des recommandations pour des travaux futurs incluent l'exploration de techniques de contrôle avancées pour surmonter les limitations identifiées.

ملخص

يتناول هذا البحث الروبوتات، مع تركيز خاص على الروبوتات الصناعية. لقد ركزنا دراستنا على روبوت SCARA ذو 4 درجات من الحرية (DDL)، متناولين كلاً من نمذجته والتحكم فيه. في البداية، تم إجراء مراجعة عامة للروبوتات، شملت أنواعها وتطبيقاتها ومبادئ عملها. ثم ركزنا اهتمامنا على روبوت SCARA، المعروف بدقته وسرعته في مهام الالتقاط والوضع. تمت نمذجة روبوت DDL 4 SCARA، متضمنة صياغة المعادلات الحركية والديناميكية. أتاحت هذه النماذج محاكاة وتحليل سلوك الروبوت في سيناريوهات تشغيلية متنوعة. للتحكم في روبوت SCARA، قمنا بتطبيق منظم PID. تم ضبط معايير PID لتحسين أداء الروبوت، بهدف تقليل أخطاء التوضع وتحسين استقرار النظام. تُظهر النتائج التجريبية أن التحكم بواسطة PID، رغم بساطته، فعال للتحكم الدقيق في روبوت SCARA. لاحظنا استجابة جيدة واستقراراً مرضياً في حركات الروبوت، رغم بعض القيود المتأصلة في طريقة PID، خاصة في ظروف غير خطية قوية أو اضطرابات كبيرة. في الختام، يثبت هذا البحث جدوى استخدام منظمات PID للتحكم في روبوتات SCARA، مع التأكيد على ضرورة الضبط الدقيق للمعايير لتحقيق أداء أمثل. تشمل التوصيات للأعمال المستقبلية استكشاف تقنيات تحكم متقدمة للتغلب على القيود المحددة.

Abstract

This thesis deals with robotics, with a particular focus on industrial robots. We have concentrated our study on the SCARA robot with 4 degrees of freedom (DOF), addressing both its modeling and control. Initially, a general review of robots was conducted, covering their types, applications, and operating principles. Subsequently, we focused our attention on the SCARA robot, known for its precision and speed in pick-and-place tasks. The modeling of the 4 DOF SCARA robot was undertaken, including the formulation of kinematic and dynamic equations.

These models allowed us to simulate and analyze the robot's behavior in various operational scenarios. To control the SCARA robot, we implemented a PID controller. The PID parameters were adjusted to optimize the robot's performance, aiming to minimize positioning errors and improve system stability. The experimental results show that the PID control, although simple, is effective for the precise control of the SCARA robot. We observed good responsiveness and satisfactory stability in the robot's movements, despite some limitations inherent to the PID method, particularly in conditions of high non-linearity or significant disturbances. In conclusion, this thesis demonstrates the viability of using PID controllers for SCARA robot control, while highlighting the necessity of precise parameter adjustments for optimal performance.

Recommendations for future work include exploring advanced control techniques to overcome the identified limitations.

Introduction générale

Introduction générale

Comment l'intégration des robots SCARA dans un environnement industriel moderne peut-elle améliorer l'efficacité et la productivité des lignes de production tout en surmontant les défis associés à la gestion et à la programmation de systèmes robotiques avancés ?

L'automatisation croissante dans l'industrie met en avant l'importance des robots SCARA, qui réalisent des tâches précises et rapides, améliorant ainsi la productivité. Néanmoins, leur intégration pose des défis tels que la gestion des systèmes robotiques, la complexité de la programmation, et la coordination avec d'autres processus industriels. [1]

Quelles techniques de contrôle permettent d'optimiser les performances des robots SCARA ?

La recherche en robotique se concentre sur la modélisation et le contrôle. La modélisation crée des modèles mathématiques pour comprendre et anticiper le comportement des robots, tandis que le contrôle, crucial pour les robots SCARA, gère les interactions complexes entre leurs axes. Les techniques de contrôle incluent les méthodes classiques (PID) et modernes (contrôle adaptatif et décentralisé), toutes basées sur des modèles mathématiques précis. [2]

Comment peut-on évaluer l'efficacité de ces techniques de contrôle appliquées aux robots SCARA ?

Ce travail se concentre sur la modélisation et le contrôle des robots SCARA, structuré en trois chapitres :

1. Vue d'ensemble de la robotique.
2. Modélisation du robot SCARA à 4 degrés de liberté
3. Évaluation la technique de contrôle appliquée aux robots SCARA.

L'étude conclut par une synthèse des résultats de la simulation et des recommandations pour des recherches futures visant à améliorer les performances des robots dans diverses applications industrielles.

Chapitre 01 : Généralité sur la robotique

Chapitre 01 : généralité sur la robotique

1.1 Introduction

La robotique occupe une place de choix dans le monde moderne de la technologie, étant un domaine multidisciplinaire englobant l'ingénierie mécanique, électrique, informatique et l'intelligence artificielle. Les robots sont des machines programmables utilisées pour effectuer une variété de tâches de manière automatique ou semi-automatique. Leur utilisation s'étend des industries aux services, voire même à un usage personnel, ce qui les rend populaires et suscite un intérêt croissant. L'objectif de ce chapitre est d'explorer le concept de la robotique, y compris son histoire, ses principes de fonctionnement et ses applications actuelles, afin de mieux comprendre ce domaine qui représente l'une des avancées technologiques les plus récentes et les plus importantes de notre époque.

1.2 Histoire des robots

1920 : Karel Čapek, l'un des écrivains tchèques les plus influents du 20^e siècle, a introduit le mot "robot" pour la première fois dans sa pièce de théâtre de science-fiction "R. U. R." en 1920. Ce terme a été créé par son frère Josef en utilisant le mot tchèque "robota", qui se réfère au "travail" ou au "servage".

1942 : Dans les œuvres de science-fiction d'Isaac Asimov, les Trois Lois de la Robotique sont établies comme des principes fondamentaux auxquels tous les robots positroniques doivent se conformer.

1961 : robot **Unimate** est le premier robot industriel. Il est vendu à partir de **1961** par la société américaine **Unimation** créé par **George Devol** et **Joseph Engelberger**.



Figure 1-1 : Engelberger et George Devol[3].

1996 :Sojourner, premier rover martien, lancé en **1996** dans le cadre du programme Discovery de la **NASA**, avait pour mission de collecter des données scientifiques tout en testant une nouvelle procédure d'atterrissage pour les futures missions sur **Mars**.

Années 2000 : ASIMO, un robot humanoïde développé par **Honda Motor**, a été introduit au Robot **Hall of Fame** de Pittsburgh en **2000**. Il est célèbre pour être le premier robot humanoïde capable de marcher de manière dynamique.

nnées 2010 : EcoBot-III, premier robot à être réellement autonome, a été développé dans le cadre d'un projet européen financé par le **FP-6**.

Années 2020 : Continuation des progrès dans la robotique, avec un accent particulier sur l'interaction homme-machine, la collaboration entre robots et humains, et le développement de robots dotés de capacités de perception avancées. [4].

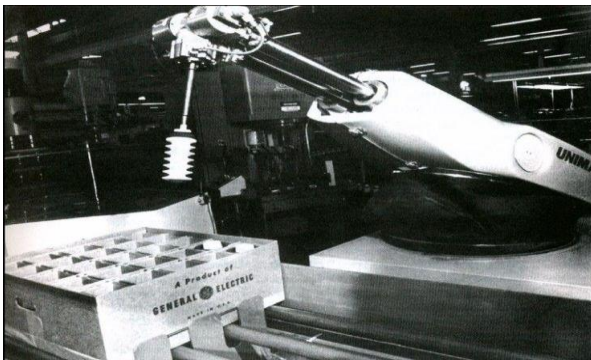


Figure1-3:1961 Unimate, le premier. [5].



Figure1-2: Sophia La Pionnière de l'Ère des robots [6].

1.3 Définitions

1.3.1 Robot

Un robot, alimenté par diverses formes d'énergie, fonctionne dans différents environnements, statiques ou dynamiques. Il est équipé d'un microcontrôleur ou d'un automate, ainsi que de capteurs et d'actionneurs tels que des moteurs ou des vérins. Programmable et automatisé, il répond à la norme ISO 8373 comme un manipulateur multi-application reprogrammable, contrôlé automatiquement sur trois axes ou plus. Cette norme définit un manipulateur comme une machine conçue pour saisir et déplacer des objets avec une grande flexibilité. L'extrémité du manipulateur, portant l'outil, est appelée l'effecteur du robot. [7]

1.3.2 Robotique

La robotique englobe l'étude, la conception et la fabrication de robots ou de machines automatisées, nécessitant des compétences en informatique, électronique et mécanique. [8]

1.4 Constituant d'un robot

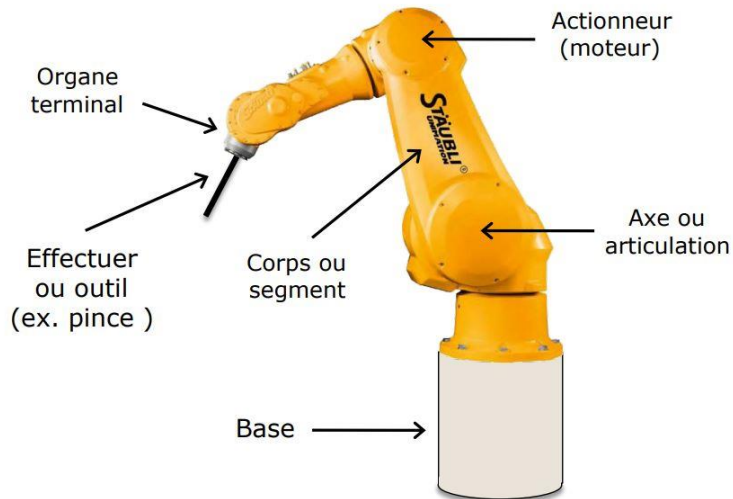


Figure 1-4 : La structure d'un bras manipulateur [9].

Robot manipulateur typique se compose de quatre parties principales :

- ✓ L'organe terminal, situé à l'extrémité mobile de sa structure mécanique. Cet élément est chargé de manipuler ou de transformer des objets à l'aide de divers dispositifs tels que des dispositifs de serrage, des aimants, des outils de soudage ou des pistolets de peinture.
- ✓ L'organe terminal d'un robot peut être polyvalent, pouvant accomplir plusieurs tâches avec différents dispositifs, ou spécialisé dans une seule fonction mais interchangeable. De plus, un robot peut être équipé de plusieurs bras, chacun portant un organe terminal distinct. Les termes "préhenseur", "outil" ou "effecteur" sont utilisés de manière interchangeable pour désigner ce dispositif d'interaction.
- ✓ Le système mécanique articulé (S.M.A) est un mécanisme similaire au bras humain, conçu pour remplacer ou étendre l'action humaine. Son rôle est de positionner l'organe terminal avec précision, en respectant des caractéristiques de vitesse et d'accélération. Il est composé d'une chaîne cinématique de corps rigides reliés par des articulations, et est motorisé par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques.
- ✓ Les actionneurs sont des composants essentiels du S.M.A., généralement composés de moteurs et de transmissions. Ils font souvent appel à des moteurs électriques, tels que les

moteurs à aimant permanent, les moteurs à courant continu ou les moteurs à commande par l'induit.

- ✓ Les capteurs jouent un rôle crucial dans la gestion des interactions entre le robot et son environnement. Ils se divisent en capteurs proprioceptifs, qui mesurent les états internes du robot tels que les positions et les vitesses des articulations, et en capteurs extéroceptifs, qui collectent des informations sur l'environnement extérieur.
- ✓ La partie commande synthétise les consignes des asservissements pour piloter les actionneurs, en se basant sur les données perçues par les capteurs ainsi que sur les instructions de l'utilisateur. Cette partie comprend également l'interface homme-machine, à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches à exécuter par le robot.

1.5 Les types de robots [10].

1.5.1 Les robots mobiles

Un robot mobile est autonome dans ses déplacements, nécessitant une capacité de navigation adaptée à sa taille et à sa fonction. Actuellement, divers types de robots mobiles sont en production, tels que les robots domestiques, allant des aspirateurs aux compagnons canins. À l'avenir, ces robots pourraient être employés dans des domaines variés tels que la médecine, l'agriculture et la sécurité frontalière.



Figure1-5:Roomba[11].



Figure 1-6:Un robot de livraison[12].

1.5.2 Les robots domestique

Les robots domestiques sont des aides précieuses pour les tâches ménagères comme le nettoyage et la tonte de pelouse. Ils sont directement intégrés à notre quotidien et sont facilement accessibles grâce à des interactions directes avec les occupants de la maison, sans besoin de services externes pour les contrôler. En somme, ces robots simplifient nos vies en prenant en charge les tâches domestiques, ce qui nous libère du temps et de l'énergie.



Figure 1-7 : Roomba j6+: [13].

1.5.3 Les robots humanoïdes

Un robot humanoïde est caractérisé par sa similitude avec la forme humaine, comprenant typiquement une tête, un tronc muni de deux bras et des jambes. Certains modèles se limitent à la partie supérieure, mais sont dotés d'une base mobile. Cette conception vise à favoriser l'interaction avec les humains en offrant une apparence familière et en permettant une plus grande variété de mouvements et de comportements.



Figure 1-8 : Robot ATLAS [14].

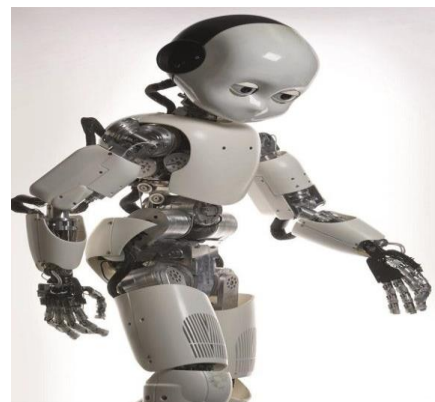


Figure 1-9 : Robot ICUB [15].

1.5.4 Les robots volants (drones)

Un drone est défini comme un engin non habité, autonome ou télécommandé, qui peut être commandé à distance ou programmé pour se déplacer de manière autonome. L'usage des drones est étendu dans le domaine militaire ainsi que dans le domaine civil, pour des missions de surveillance, de prise de vue, de contrôle du trafic, mais aussi dans le secteur agricole, notamment pour des missions de surveillance des cultures, de bétails, d'analyse de surface ou de relevés topographiques.



Figure 1-10 : Un drone [16].

1.5.5 Les robots militaires

La robotique militaire a émergé pendant la Seconde Guerre mondiale avec l'objectif de réduire les risques pour les soldats et de simplifier les opérations militaires. Les grandes puissances ont cherché à développer des robots pour diverses applications telles que la surveillance, l'espionnage, le soutien aux combats, l'aide aux soldats et le déminage. [10].



Figure 1-11 La robotique militaire [17].

1.5.6 Les robots industriels

L'ISO (International Organization for Standardization.) définit un robot industriel comme un dispositif polyvalent, reprogrammable et automatisé sur trois axes ou plus. L'industrie a été précurseur dans l'adoption de la robotique, automatisant les lignes de production pour améliorer la flexibilité, la précision et la rentabilité. Les types de robots industriels seront examinés plus en détail par la suite. [10].



Figure 1-12 : Les robots industriels séries



Figure 1-13 : Les robots industriels parallèles (DELTA)

1.5.7 Les robots sous-marin

Un robot sous-marin autonome est un dispositif qui se déplace de manière indépendante dans l'eau, contrairement à un ROV (Remote Operated Vehicle), qui est un véhicule sous-marin télécommandé. [10].

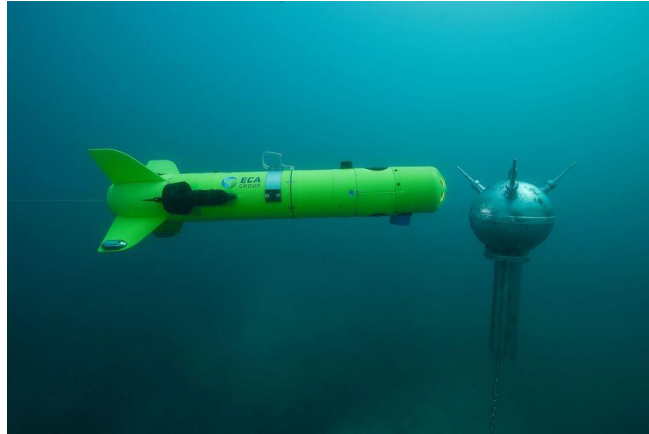


Figure 1-14 : Robot sous-marin [18].

1.5.8 Les robots médicaux

Un robot médical est un dispositif robotique utilisé dans des contextes thérapeutiques comme la chirurgie ou la rééducation neurologique. En raison des impératifs de sécurité importants, Ces robots sont généralement conçus avec un niveau d'autonomie limité.



Figure 1-15 : Robot chirurgical [19].



Figure 1-16 : Robot téléprésence [20].

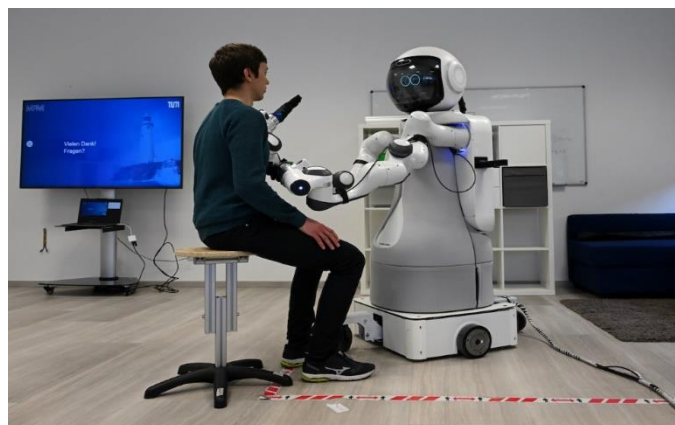


Figure 1-17 : Robot de diagnostic [21].

1.6 Classification géométrique

Les robots peuvent également être classés en fonction de leur configuration géométrique, c'est-à-dire la structure physique sur laquelle ils reposent [22].

1.6.1 Structure cartésienne (PPP) : Historiquement, la configuration à trois liaisons prismatiques est l'une des plus anciennes. Elle trouve son origine dans la conception traditionnelle des machines-outils à trois axes, telles que les rectifieuses ou les fraiseuses. Cette structure est peu courante, sauf dans des applications spécifiques telles que les robots pratiques ou les robots de magasinage.



Figure 1-18: Structure cartésienne

1.6.2 Structure cylindrique (RPP) ou (PRP): Elle intègre à la fois une rotation et deux translations. Toutefois, elle se caractérise par un volume de travail limité par rapport à son encombrement global, ce qui explique pourquoi elle est devenue rarement utilisée.

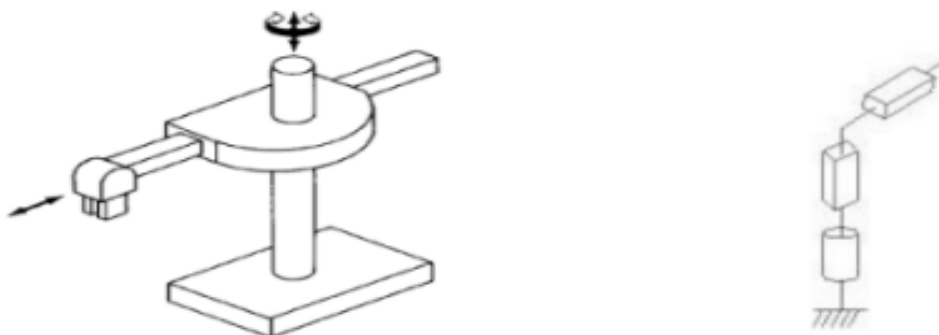


Figure 1-19 : Structure d'un robot cylindrique

1.6.3 **Structure sphérique ou polaire à axe de rotation orthogonale :** Cette configuration est presque délaissée en raison de motifs similaires à ceux qui ont conduit à l'abandon de la structure cylindrique.

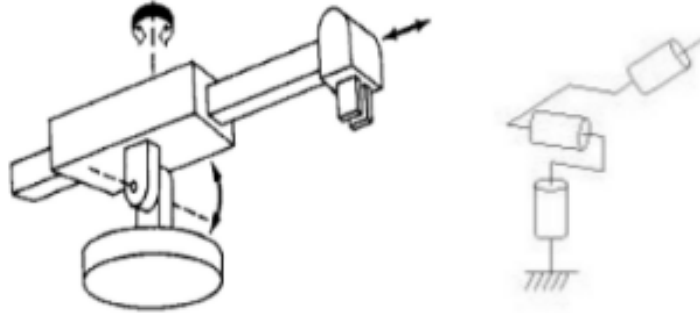


Figure 1-20: structure d'un robot sphérique

1.6.4 Structure dite SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) :

La configuration des axes de rotation parallèles est largement privilégiée dans l'industrie, surtout pour les tâches fréquentes de manutention et d'assemblage. Ce succès découle de son rapport optimal entre espace occupé et capacité de travail, et de l'adaptabilité de la structure **SCARA** à ces tâches spécifiques. En somme, cette configuration offre une efficacité remarquable dans des espaces restreints, ce qui en fait un choix commercial incontournable. [22].



Figure1-21 : Robot SANKYO structure SCARA

1.6.5 La structure 3R (anthropomorphe)

Cette configuration permet de déplacer un objet vers n'importe quel point de l'espace en utilisant trois rotations, généralement une autour d'un axe vertical et deux autour d'axes horizontaux et parallèles. Elle est considérée comme le choix polyvalent par excellence, facile à programmer pour diverses tâches et offrant une grande capacité de travail. Cette conception domine 67 % du marché.

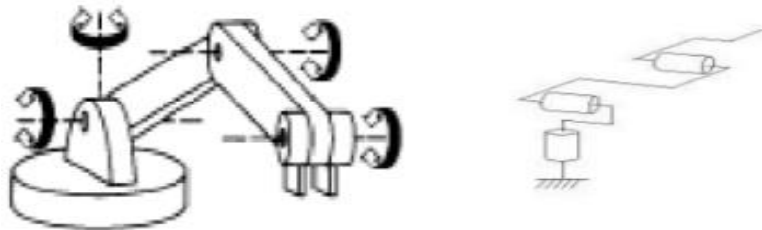


Figure 1-21 : Structure d'un robot 3R

1.7 Conclusion

En conclusion de ce premier chapitre consacré aux généralités sur la robotique, nous avons exploré une histoire fascinante et diversifiée des robots, depuis leurs origines dans la littérature de science-fiction jusqu'aux développements technologiques contemporains. Nous avons examiné différents types de robots, de leurs applications industrielles à leurs utilisations domestiques et spécialisées comme les robots médicaux et sous-marins.

La classification géométrique des robots, notamment la structure SCARA et d'autres configurations telles que cartésiennes, cylindriques et anthropomorphes, a été détaillée pour illustrer la diversité des conceptions robotiques adaptées à différents environnements et tâches.

En parcourant ce chapitre, nous avons également abordé les définitions essentielles de la robotique et les composants constitutifs d'un robot, soulignant l'importance des systèmes mécaniques articulés, des actionneurs et des capteurs dans le fonctionnement et la performance des robots modernes.

Cependant, malgré les progrès impressionnants, la robotique doit relever des défis significatifs, notamment ceux liés à l'éthique, à la sécurité et à l'impact socio-économique. Il est crucial de continuer à explorer ces questions de manière réfléchie afin de maximiser les avantages de la robotique tout en minimisant ses risques potentiels pour la société.

Chapitre 02 : Modélisation du robot SCARA

Chapitre 02 : modélisation du robot SCARA

2.1. Introduction

En robotique, chaque élément du poste de travail peut être associé à un ou plusieurs repères. Ces repères sont liés à des directions et des points clés, tels que la direction d'insertion ou le centre de gravité, qui sont importants pour l'exécution des tâches. La transformation de repère est essentielle pour exprimer la position des différents corps du robot les uns par rapport aux autres, ainsi que les situations et vitesses nécessaires pour accomplir une tâche spécifique.

Dans ce chapitre, nous exposons une notation qui permet de décrire de manière cohérente les divers systèmes de coordonnées.

2.2. Définition

Un robot manipulateur est constitué par deux sous-ensembles distincts, un (ou plusieurs) organes terminaux et une structure mécanique articulée

Les robots manipulateurs peuvent être classés en deux catégories : ceux qui ont une structure de chaîne cinématique ouverte et ceux qui ont une structure de chaîne cinématique fermée.

Le rôle de la structure mécanique articulée est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps généralement rigides, assemblés par des liaisons appelées articulations [23].

2.2.1. Articulation

Une articulation permet d'interconnecter deux corps successifs en limitant le nombre de niveaux de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de niveaux de liberté qui découlent, également connu sous le nom de mobilité de l'articulation. La mobilité se situe entre 0 et 6 [23].

En robotique, quand $m=1$, ce qui est le cas le plus courant, l'articulation peut être soit rotoïde, soit prismatique [23] [24].

2.2.2. Espace articulaire

Où "espace de configuration" fait référence à l'espace où le vecteur des variables articulaires est spécifié. $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ On a $q_i = \theta_i$ si l'articulation est rotoïde et $q_i = d_i$ si l'articulation est prismatique. Le nombre de variables articulaires indépendantes correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique, étant donné sa dimension N [26].

2.2.3. Espace opérationnel

L'espace cartésien se réfère à l'espace physique du robot, où les coordonnées x et y du robot sont définies. Les positions du robot sont ensuite transformées en coordonnées articulaires en utilisant le modèle géométrique inverse. Les trajectoires sont généralement définies dans l'espace cartésien et ensuite transformées en espace articulaire pour le contrôle. [23][24]

2.2.4. Degré de liberté (DDL)

Les paramètres indépendants requis pour décrire la position de l'organe terminal dans l'espace cartésien.

Dans le cas d'un robot industriel à chaîne ouverte, chaque articulation est définie par un seul paramètre, ce qui signifie que le nombre d'articulations est toujours égal au NDL [24].

2.2.5. Redondant

Quand le nombre de d.d.l. du mécanisme est inférieur au nombre d'articulations indépendantes (motorisées), un robot est considéré comme redondant. Le (ou les) d.d.l. supplémentaire(s) permet de maintenir les capacités de déplacement de l'organe terminal en cas d'obstacles, ce qui permet de les contourner. [24]

2.3. Les notations et les outils mathématiques mis en œuvre pour la modélisation des robots

En robotique, on associe à tout élément du poste de travail un ou plusieurs repères. Ces repères sont généralement définis de telle sorte que leurs axes et leurs origines correspondent respectivement à des directions et à des points privilégiés ayant un rôle fonctionnel lors de l'exécution de la tâche. [27].

2.3.1. Représentation d'un point

Soit P un point de l'espace muni de coordonnées cartésiennes (p_x, p_y, p_z) .

On appelle **coordonnées homogènes** du point P le triplet (w, p_x, w, p_y, w, p_z) , où w est un **facteur d'échelle**. En robotique, ce facteur est généralement égal à 1.

Les coordonnées homogènes d'un point sont donc représentées par un vecteur :

$$P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

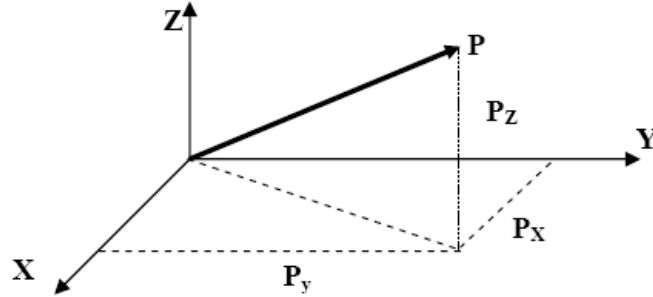


Figure 2-1:représentation d'un point [28].

2.3.2. Représentation d'une direction

Une direction (vecteur libre) est également représentée par quatre composantes, dont la quatrième est nulle. Représentant un point à l'infini. En enregistrant les coordonnées cartésiennes d'un vecteur unitaire u , on note u_x, u_y, u_z , en coordonnées homogènes on écrit :

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

2.3.3. Représentation d'un plan

Un vecteur ligne Q représente le plan :

$$Q = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \delta] \quad (2.3)$$

Le produit matriciel $Q P$ est nul pour tout point P du plan Q :

$$Q P = [\alpha \beta \gamma \delta] \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.4)$$

2.3.4. Transformation homogènes

Effectuons une manipulation quelconque, que ce soit de translation ou de rotation, sur le repère R_i , ce qui le conduit vers le repère R_j . La matrice ${}^i T_j$ définit cette transformation. Aussi connue sous le nom de matrice de transformation homogène de dimension (4×4) .

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i p_j \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

L'expression ${}^i s_j$, ${}^i n_j$, et ${}^i a_j$ correspond aux vecteurs unitaires suivant les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j exprimé dans le repère R_i , tandis que ${}^i p_j$ est le vecteur qui exprime l'origine du repère R_j dans le repère R_i .

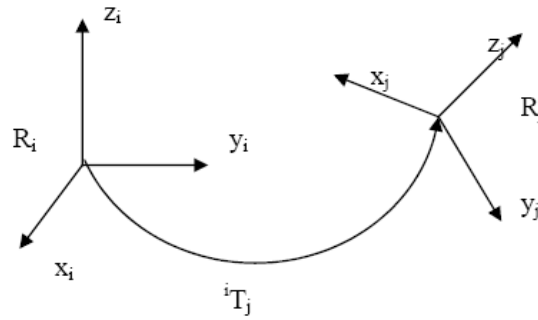


Figure 2-2 : Transformation des repères[29].

En utilisant un abus de notation, on peut exprimer la matrice de transformation homogène de la façon suivante :

$${}^i T_j = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i s_j & {}^i n_j & {}^i a_j & {}^i p_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3.5. Transformation des vecteurs

Par exemple, on considère un vecteur ${}^j P_i$ qui représente le point P_i dans le repère R_j (Figure 2.3). Étant donné que les coordonnées homogènes sont définies, les coordonnées du point P_i dans le repère R_i sont calculées selon l'équation suivante :

$${}^iP_l = {}^i(O_iP_l) = {}^is_jp_{lx} + {}^in_rj p_{ly} + {}^ia_ij p_{lz} + {}^ip_j = {}^iT_j \quad {}^jp_l \quad (2.7)$$

L'utilisation de la matrice iT_j permet ainsi d'exprimer les coordonnées d'un point spécifique donné dans le repère R_j dans le repère R_i .

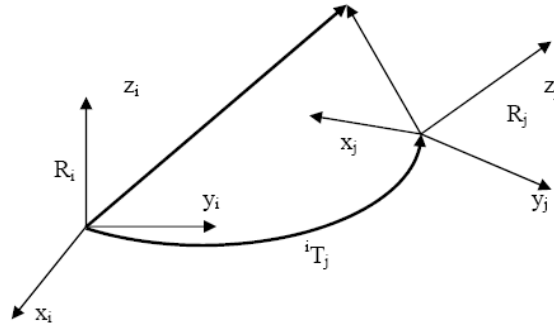


Figure 2-3: Transformation d'un vecteur [30].

2.3.6. Transformation des plans

Les transformations appliquées à l'ensemble (point, plan) ne peuvent pas influencer la position relative d'un point par rapport à un plan.

Ainsi :

$${}^jQ \quad {}^jp = {}^iQ \quad {}^ip = {}^iQ \quad {}^iT_j \quad {}^jp \quad (2.8)$$

Il s'ensuit que :

$${}^jQ = {}^iQ \quad {}^iT_j \quad (2.9)$$

2.3.7. Matrice de transformation de translation pure

Cette transformation est appelée **Trans (a, b, c)** ou **a, b, c** sont les éléments de la translation le long des axes **x, y** et **z** respectivement.

$${}^iT_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

L'orientation étant conservée dans cette transformation, Trans (a,b,c) a pour expression (figure 2.4) :

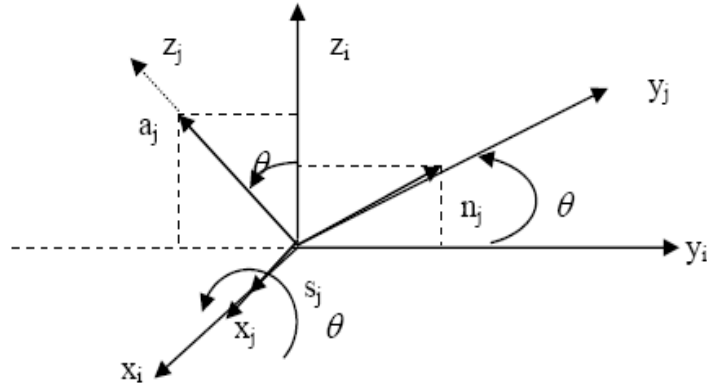


Figure 2-4 : Transformation de translation pure. [31].

2.3.8. Matrice de transformation de rotation autour des axes principaux

2.3.8.1. Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe x

Cette rotation est appelée **Rot (x, θ)**. Les composantes des vecteurs unitaires $^i s_j$, $^i n_j$ et $^i a_j$, qui sont portés respectivement par les axes x_j , y_j et z_j du repère R_j , sont déduites de la figure et exprimées dans R_i . Si on note les sinus et les cosinus de $S\theta$ et $C\theta$, et la transposition est représentée par l'exposant T.

On obtient ainsi :

$$^i T_j = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta & 0 \\ 0 & S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{rot}(x, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La matrice d'orientation de dimension (3x3) est appelée **Rot (x, θ)**.

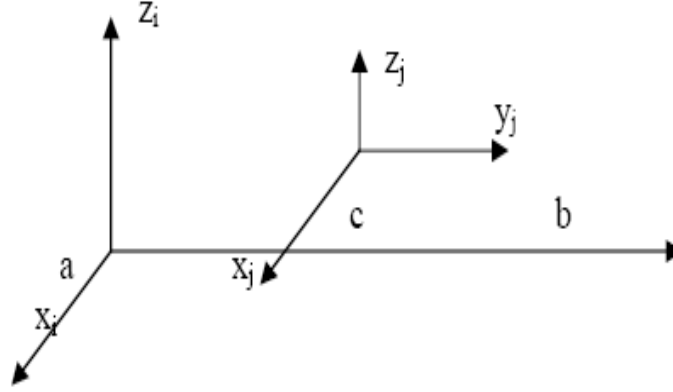


Figure 2-5 : Transformation de rotation pure autour de l'axe x [32].

2.3.8.2. Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe y

En utilisant un raisonnement similaire, on obtient :

$${}^i T_j = \text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{rot}(y, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3.8.2. Matrice de transformation correspondant à une rotation θ autour de l'axe z

Il est vérifié que : ${}^i T_j = \text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{rot}(z, \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$

2.3.9. Propriétés des matrices de transformation homogène

On vérifie aisément que :

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

$$\text{Trans}^{-1}(u, d) = \text{Trans}(-u, d) = \text{Trans}(u, -d)$$

La transformation d'un repère R_0 peut être déduite de la composition des multiplications à droite de ces transformations si chaque transformation i , ($i=1, \dots, k$), est définie par rapport au

repère courant R_{i-1} : ${}^0 T_k = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots {}^{k-1} T_k$

2.4. Description de la géométrie des robots à structure ouverte simple

Une structure ouverte simple est composée de $n+1$ corps notés C_0, \dots, C_n et de n articulations. Le corps C_0 désigne la base du robot et le corps C_n le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation j connecte le corps C_j au corps C_{j-1} [35][34]

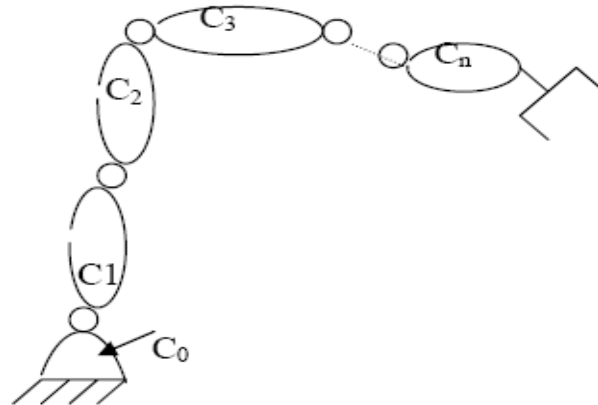


Figure 2-6: Robot à structure ouverte simple [33].

La description repose sur les règles et conventions suivantes :

- On suppose que les corps sont parfaitement rigides. Ils sont reliés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique pas d'élasticité), que ce soit des rotoïdes ou des prismatiques.

- ✚ Le corps C_j est fixé au repère R_i
- ✚ On note q_i la variable de l'articulation j .

Le repère R_j , fixé au corps C_j de manière à ce que :

- l'axe z_j soit porté par l'axe de l'articulation j
- l'axe x_j soit porté par la perpendiculaire commune aux axes z_j et z_{j+1} .

Si les axes z_j et z_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, le choix de x_j ne se limite pas à une seule option ; des éléments de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.

Les quatre paramètres géométriques suivants sont utilisés pour représenter le passage du repère R_{j-1} , au repère R_j , (figure 2.7) :

- α_j : représente l'angle entre les axes z_{j-1} et z_j , qui correspond à une rotation de x_{j-1} ;
- d_j : représente la distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1} ;
- θ_j : est l'angle entre les axes x_{j-1} et x_j , qui correspond à une rotation autour de z_j ;
- r_j : est la distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_j .

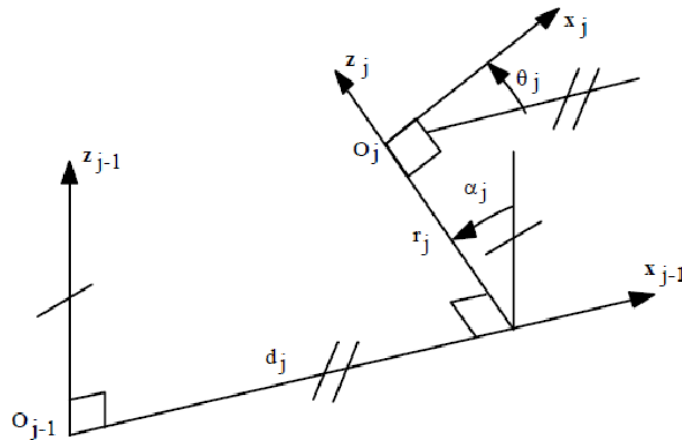


Figure 2-7: Paramètres géométrique dans le cas d'une structure ouverte simple.[27]

la variable articulaire q_j associée à la $j^{\text{ième}}$ articulation est soit θ_j , soit r_j , ce qui se traduit par la relation suivante :

$$q_j = \sigma_j \theta_j + \sigma_{j+1} r_j \quad (2.14)$$

Avec :

- $\sigma_j = 0$ Si l'articulation j est rotoïde
- $\sigma_j = 1$ Si l'articulation j est prismatique.

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

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(x, \alpha_j) \text{Trans}(x, d_j) \text{Rot}(z, \theta_j) \text{Trans}(z, r_j) = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Avec : $C\theta_j = \cos \theta_j ; S\theta_j = \sin \theta_j ; C\alpha_j = \cos \alpha_j ; S\alpha_j = \sin \alpha_j$ (2.16)

La matrice ${}^{j-1}T_j$ est dite : La matrice de transformation Denavit-Hartenberg .

2.5. Paramètres de Denavit-Hartenberg

Denavit et Hartenberg ont suggéré une approche basée sur l'identification d'un seul repère pour chaque lien. Cette convention constitue une approche méthodique. Elle facilite la circulation entre les articulations voisines d'un système robotique. Les chaînes cinématiques ouvertes sont celles où l'articulation n'a qu'un degré de liberté, les surfaces adjacentes restent en contact. En choisissant les repères appropriés dans les liaisons, il est plus facile de calculer les matrices homogènes de Denavit-Hartenberg et d'exprimer rapidement des informations de l'élément terminal dans la base et vice versa. [34][35]

2.6. Modélisation géométrique en chaîne ouverte simple [34]

2.6.1. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) regroupe toutes les relations qui permettent d'exprimer la position de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires. On peut le visualiser à l'aide de la matrice de passage 0T_n :

$${}^0T_n = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (2.17)$$

On peut également représenter le modèle géométrique direct du robot en utilisant la relation suivante :

$$X = f(q) \quad (2.18)$$

Avec q comme vecteur des variables articulaires telles que :

$$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n] \quad (2.19)$$

On définit les coordonnées opérationnelles par :

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T \quad (2.20)$$

2.6.2. Le modèle géométrique inverse

Le problème inverse réside dans le fait de calculer les coordonnées articulaires qui permettent à l'organe terminal d'atteindre une situation souhaitée, spécifiée par ses coordonnées fonctionnelles. On désigne fréquemment cette opération sous le nom de transformation de coordonnées (ou de changement de coordonnées). [34]

Quand il y a une forme explicite qui fournit toutes les solutions possibles au problème inverse, on parle de modèle géométrique inverse (MGI). Il existe de nombreuses méthodes, telle que la méthode de Paul qui aborde individuellement chaque situation spécifique et est adaptée à la plupart des robots industriels et la méthode de Pieper qui offre une solution pour les robots à six degrés de liberté qui ont trois articulations rotoides d'axes concourant ou trois articulations prismatiques ...etc

Type 1	$X_{ri}=Y$
Type 2	$XS\theta_i + YC\theta_i = Z$
Type 3	$X_1 S\theta_i + Y_1 C\theta_i = Z_1$ $X_2 S\theta_i + Y_2 C\theta_i = Z_2$
Type 4	$X_1 r_j S\theta_i = Y_1$ $X_2 r_j C\theta_i = Y_2$
Type 5	$X_1 S\theta_i = Y_1 + Z_1 r_j$ $X_2 C\theta_i = Y_2 + Z_2 r_j$
Type 6	$W S\theta_j = X C\theta_i + Y S\theta_i + Z_1$ $W C\theta_j = X S\theta_i - Y C\theta_i + Z_2$
Type 7	$W_1 C\theta_j + W_2 S\theta_j = X C\theta_i + Y S\theta_i + Z_1$ $W_1 S\theta_j - W_2 C\theta_j = X S\theta_i - Y C\theta_i + Z_2$
Type 8	$X C\theta_i + Y C(\theta_i + \theta_j) = Z_1$ $X S\theta_i + Y S(\theta_i + \theta_j) = Z_2$

Tableau 1: Types d'équations rencontrés avec la méthode de Paul[34]

2.7. Le modèle cinématique robots à structures ouvertes simples

Le modèle cinématique est essentiellement un modèle de vitesse qui décrit comment les vitesses des articulations d'un robot sont liées aux vitesses de déplacement d'un point spécifique de la machine, généralement l'extrémité du bras. Il peut être utilisé pour ajouter des informations sur les vitesses au modèle géométrique existant ou même pour le remplacer. En utilisant des étapes successives, il permet de planifier des déplacements d'un point à un autre. Une caractéristique importante du modèle cinématique est sa différence par rapport au modèle géométrique, car il simplifie les équations non linéaires du modèle géométrique en équations linéaires, ce qui facilite l'obtention de transformations inverses. [34]

2.7.1. Le modèle cinématique direct

Les vitesses (les coordonnées opérationnelles) d'un robot manipulateur sont décrites dans le modèle cinématique direct en fonction des vitesses articulaires. On note :

$$\dot{X} = J\dot{q} \quad (2.21)$$

La matrice jacobienne de dimension $(m \times n)$ du mécanisme, appelée $J(q)$, est définie en fonction de la configuration articulaire q [35]. Le calcul du modèle différentiel direct utilise la même matrice jacobienne, qui fournit les variations élémentaires dX des coordonnées opérationnelles en fonction des variations élémentaires des coordonnées articulaires dq , c'est-à-dire :

$$dX = J(q)dq \quad (2.22)$$

La matrice jacobienne présente de nombreux avantages :

- Elle est à l'origine du modèle différentiel inverse, qui permet de calculer une solution locale des variables articulaires q avec les coordonnées opérationnelles X ;
- En statique, on utilise le jacobien pour établir la relation entre les efforts exercés par l'organe terminal sur l'environnement et les forces et couples des actionneurs ;
- Elle simplifie le calcul des singularités et de la taille de l'espace opérationnel accessible du robot.

2.7.2. Modèle cinématique inverse

Le but du modèle cinématique inverse est de déterminer les vitesses articulaires \dot{q} qui garantissent au repère terminal une vitesse opérationnelle \dot{X} spécifique, en se basant sur une configuration q spécifique. Le modèle différentiel inverse est similaire à cette définition : il permet de calculer la différentielle articulaire dq correspondant à une différentielle des coordonnées opérationnelles dX spécifiée. Afin d'obtenir le modèle cinématique inverse, on résout un système d'équations linéaires en inversant le modèle cinématique direct. [34] [36]

On peut écrire le modèle cinématique inverse sous la forme :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X} \quad (2.23)$$

2.8. Modèle dynamique du robot SCARA

Il est approprié de le nommer modèle dynamique inverse, ou simplement modèle dynamique. [37]

Le modèle dynamique directe représente les accélérations des articulations en fonction de leur position, de leur vitesse et de leur couple, et est représenté par la relation suivante :

$$q = q(\ddot{q}, \dot{q}, f_e)$$

Parmi les utilisations du modèle dynamique, on peut mentionner :

- La simulation utilisant le modèle dynamique directe
- Le dimensionnement des actionneurs.
- Le dimensionnement des actionneurs.
- La détermination des paramètres inertiels et des paramètres de frottement du robot
- L'utilisation du modèle dynamique inverse pour la commande.

Le système robotique utilisé dans la méthodologie de ce travail est un manipulateur rigide de type SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) à 4 degrés de liberté, le bras est composé de 3 articulations rotatives θ_1 , θ_2 et θ_3 , ainsi que d'une articulation translationnelle, notée d_4 . [38]

Il est possible de comprendre la dynamique du mouvement dans l'espace d'articulation de ce manipulateur en utilisant son modèle mathématique, obtenu par la méthode Euler-

Lagrange. On a supposé que les positions angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 seront respectivement les coordonnées généralisées q_1 , q_2 et q_3 , et que le déplacement vertical d_4 de l'effecteur final sera la coordonnée généralisée q_4 . De cette manière, le modèle dynamique du robot, dans sa forme matricielle, est représenté par :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g = \tau \quad (2.24)$$

Là où $M(q) \in \mathbb{R}^n$ est la matrice d'inertie, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{(n \times n)}$ est la matricielle de Coriolis et les forces centrifuges, $B = 0$ est une matrice diagonale des coefficients de friction visqueux de chaque joint et elle est négligeable, $g \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des forces gravitationnelles, $\tau \in \mathbb{R}^n$, donc :

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ m_4 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

Où :

$$m_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + m_1 \times l_{c1}^2 + m_2 \times l_1^2 + m_2 \times (l_{c2}^2 + 2 \times l_1 \times l_{c2} \times \cos(q(2))) + (m_3 + m_4) \times (l_1^2 + l_2^2 + 2 \times l_1 \times l_2 \times \cos(q(2)));$$

$$m_{12} = I_2 + I_3 + I_4 + m_2 \times (l_{c2}^2 + l_1 \times l_{c2} \times \cos(q(2))) + (m_3 + m_4) \times (l_2^2 + l_1 \times l_2 \times \cos(q(2)));$$

$$m_{13} = I_3 + I_4;$$

$$m_{14} = m_{24} = m_{34} = 0;$$

$$m_{21} = m_{12};$$

$$m_{22} = I_2 + I_3 + I_4 + m_2 \times l_{c2}^2 + (m_3 + m_4) \times l_2^2;$$

$$m_{23} = m_{13};$$

$$m_{31} = m_{13};$$

$$m_{32} = m_{23};$$

$$m_{33} = m_{13};$$

$$m_{41} = m_{14};$$

$$m_{42} = m_{24};$$

$$m_{43} = m_{34};$$

$$m_{44} = m_4;$$

$$c_{11} = -m_2 \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(2) - (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(2);$$

$$c_{12} = -m_2 \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times (dq(1) + dq(2)) - (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times (dq(1) + dq(2));$$

$$c_{21} = m_2 \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(1) + (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(1);$$

$$c_{13} = c_{14} = c_{22} = c_{23} = c_{24} = c_{31} = c_{32} = c_{33} = c_{34} = c_{41} = c_{42} = c_{43} = c_{44} = 0$$

2.9. Modélisation du robot SCARA

Le robot SCARA est un type commun de robot industriel, avec la plupart des configurations à quatre axes, offrant une zone de mouvement plus petite qu'un robot à six axes. Ces robots peuvent se déplacer le long des plans X, Y et Z, et offrent une rotation de 360 degrés autour de l'axe Z, créant une enveloppe de travail du cylindre. La configuration SCARA est plus petite et plus rapide, avec moins de joints à contrôler et à déplacer, ce qui permet des vitesses plus élevées. Ils sont utilisés dans diverses industries pour les processus d'assemblage, la maintenance des matériaux, l'impression 3D, les inspections, la palettisation et la dispensation. Le terme "*Selective Compliance Articulated Robot Arm*" fait référence à la flexibilité du robot.[39]

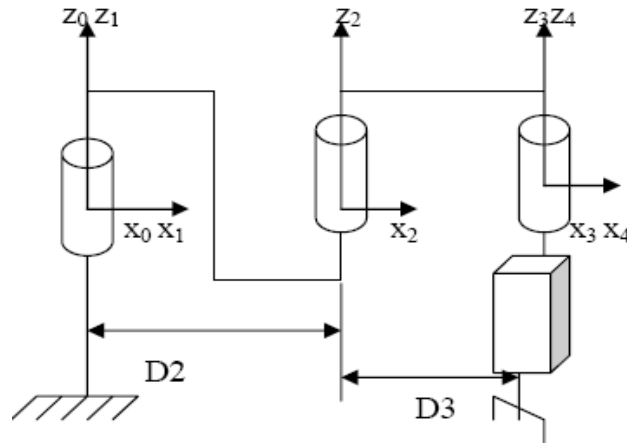


Figure 2-8 : Robot manipulateur SCARA[37]

Le robot SCARA est un robot avec quatre degrés de liberté, dont trois sont rotoïdes et le quatrième prismatique (figure 2.8). Il fait partie de la catégorie des robots à structure ouverte simple.

En utilisant la méthode mentionnée ci-dessus, les repères sont disposés de la manière indiquée sur la figure 2.9.

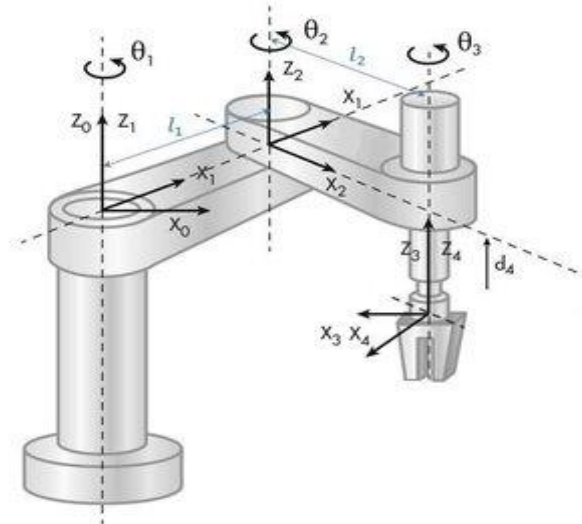


Figure 2-9 : Placement des repères [37]

2.9.1. Calcul le Modèle géométrique direct

Ce modèle permet de savoir la position exacte de l'organe terminal à partir de les angles θ

Dans notre cas notre robot RRRP en exprime la position P en fonction de θ_1 θ_2 et θ_3

On retrouve les caractéristiques géométriques du robot SCARA dans le tableau 2

j	a_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	0	D2	θ_2	0
3	0	0	D3	θ_3	0
4	1	0	0	0	r_4

Tableau 2:DH paramètres du robot SCARA

Pour la calcul de MGD de SCARA on calcule la matrice de transformation entre 0T_4 . En utilisant la convention (D-H), et tableau 1.1 et de la relation (2.11) Pour que on réalise les calculs successifs suivants : ${}^0T_E = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$

$${}^0T_1 = A1 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2 = A2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & D2 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = A3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D3 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3T_4 = A4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Notations :

\Rightarrow Ci et Si sont les termes de cosinus et de sinus de la variable θ_i

$\Rightarrow \sin(\theta_i) = si ; \cos(\theta_i) = ci$

$${}^2T_4 = {}^2T_3 \times {}^3T_4 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D3 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad {}^2T_4 = {}^2T_3 \times {}^3T_4 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D3 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_4 = {}^1T_2 \times {}^2T_4 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & D2 \\ S2 & C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D3 \\ S3 & C3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$${}^1T_4 = {}^1T_2 \times {}^2T_4 = \begin{bmatrix} C2C3 - S2S3 & -C2S3 - S2C3 & 0 & C2D3 + D2 \\ S2C3 + C2S3 & -S2S3 + C2C3 & 0 & S2D3 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Après multiplication et utilisation des matrices d'addition, on obtient la matrice de transformation totale :

$${}^0T_4 = {}^0T_1 \times {}^1T_4 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C2C3 - S2S3 & -C2S3 - S2C3 & 0 & C2D3 + D2 \\ S2C3 + C2S3 & -S2S3 + C2C3 & 0 & S2D3 \\ 0 & 0 & 1 & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & D3C12 + C1D2 \\ sy & ny & ay & D3S12 + S1D2 \\ sz & nz & az & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$${}^0T_4 = {}^0T_E$$

Pour l'organe terminale (E) la matrice de transformation par rapport au repère quatre est donnée par :

$${}^4T_E = I_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad L4 \text{ est La longueur de quatrième bras ; } L4 = 0.$$

Considérons U_0 tels que : $U_0 = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & px \\ sy & ny & ay & py \\ sz & nz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; U_0 elle correspond à la situation

désirée de l'organe terminal dans le repère R_0 , $U_0 = {}^0T_4$

$$U_0 = {}^0T_4 = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & D3C12 + C1D2 - S12D3 \\ sy & ny & ay & D3S1C2 + S1D2 + D3C1S2 \\ sz & nz & az & r4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

On s'intéresse toujours à la dernière colonne de la matrice, qui contient à chaque étape les équations découplées qui permettent de résoudre le problème du modèle géométrique inverse.

$$\begin{cases} Px = D3C12 + C1D2 - S12D3 = D3(C12 - S12) + C1D2 & (2.26.a) \\ Py = D3S1C2 + S1D2 + D3C1S2 = D3(S1C2 + C1S2) + S1D2 & (2.26.b) \\ Pz = r4 & (2.26.c) \end{cases}$$

Les formules mathématiques Les équations (2.26.a) et (2.26.b) précédemment mentionnées peuvent être écrites comme suit utilisant :

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin(\theta_1) * \cos(\theta_2) + \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) \quad (2.27)$$

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) - \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) \quad (2.28)$$

$$px = D3(C12) + C1D2 \quad (2.29)$$

$$py = D3(S12) + S1D2 \quad (2.30)$$

$$pz = r4 \quad (2.31)$$

2.9.2. Calcul le modèle géométrique inverse

Pour l'obtention de MGI on suit la méthode de Paul la suivante :

$$\begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Une structure découplable, ce qui permet de résoudre huit types d'équations. Les équations de type (2.26.a) ,(2.26.b) et (2.26.c) sont identiques à celles déjà évoquées par la méthode de Paul (tableau 2.2)

En élevant au carré et en additionnant les expressions (2.26a) et (2.26.b),

Nous Obtenons :

$$\begin{aligned} px^2 + py^2 &= [D3(C12) + C1D2]^2 + [D3(S12) + S1D2]^2 \\ &= D3^2 S12^2 + D2^2 C2^2 + 2D3D2C12C1 + D3^2 S12^2 + D2^2 S1^2 + 2D3D2S12S1 \\ &= D3^2 (C12^2 + S12^2) + D2^2 (C2^2 + S1^2) + 2D3D2(C12C1 + S12S1) \end{aligned}$$

$$P_x^2 + P_y^2 = D3^2 + D2^2 + 2D2D3C2$$

$$\text{ce qui donne : } C2 = \frac{(px^2 + py^2 - D3^2 - D2^2)}{(2D2D3)}, \text{ car : } C1C12 + S1S12 = C2$$

$$\text{d'où : } \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{S1}{C2} \right); \text{ de plus : } 1 + \tan^2 \theta_2 = 1/C1^2$$

$$\theta_2 = \arctg[\pm(\sqrt{1 - C2^2}/C2)] \quad (2.32)$$

$$\theta_1 = \arctg(S1, C2) \quad (2.33)$$

$$\text{Avec : } C2 = \frac{(px^2 + py^2 - D3^2 - D2^2)}{(2D2D3)}$$

$$S1 = \frac{B1 Py - B2 Px}{B1^2 + B2^2}; \quad C1 = \frac{B1 Px + B2 Py}{B1^2 + B2^2}$$

$$B1 = D2 + D3 C2 \quad ; \quad B2 = D3 S2$$

Connaissant θ_1 et θ_2 , on trouve enfin pour θ_3 :

$$\theta_3 = \text{ATAN2}(sx, sy) - \theta_2 - \theta_1 \quad (2.34)$$

2.9.3. Calcul le modèle cinématique direct des robots à structures ouvertes simples

En dérivant le MGD, $X = f(q)$, on peut calculer la matrice jacobienne en utilisant la relation suivante : $J = \frac{dX}{dq}$

$$\left\{ \begin{array}{l} px = D3(c12) + c1D2 \\ py = D3(s12) + s1D2 \\ pz = r^4 \\ \alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{array} \right. \rightarrow J = \begin{bmatrix} \frac{dpx}{dq1} & \frac{dpx}{dq2} & \frac{dpx}{dq3} & \frac{dpx}{dq4} \\ \frac{dpy}{dq1} & \frac{dpy}{dq2} & \frac{dpy}{dq3} & \frac{dpy}{dq4} \\ \frac{dpz}{dq1} & \frac{dpz}{dq2} & \frac{dpz}{dq3} & \frac{dpz}{dq4} \\ \frac{d\alpha}{dq1} & \frac{d\alpha}{dq2} & \frac{d\alpha}{dq3} & \frac{d\alpha}{dq4} \end{bmatrix}$$

La matrice jacobienne est directement déduite, ce qui donne :

$$\rightarrow J = \begin{bmatrix} -D2S1 - D3S12 & -D3S12 & 0 & 0 \\ D2C1 + D3C12 & D3C12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Consultez [1], pour une analyse plus approfondie de l'espace de travail du robot .

2.9.4. Calcul le Modèle cinématique inverse

Pour obtenir le modèle cinématique inverse, on inverse le modèle cinématique direct en résolvant un système d'équations linéaires.

On peut écrire le modèle cinématique inverse sous la forme :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X}$$

Quand la matrice J présente la forme suivante :

$$J = \begin{bmatrix} A & 0 \\ B & C \end{bmatrix} \text{ avec : } A = \begin{bmatrix} -D2S1 - D3S12 & -D3S12 \\ D2C1 + D3C12 & D3C12 \end{bmatrix} ;$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} ;$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} A^{-1} & 0 \\ -C^{-1}BA^{-1} & C^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{-1} & 0 \\ -C^{-1}BA^{-1} & C^{-1} \end{bmatrix} ;$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(-D2S1 - D3S12) + D3S12(D2C1 + D3C12)} & \frac{1}{-D3C12(D2S1 + D3S12) + (D2C1 + D3C12)} \\ \frac{-1}{-D3C12(D2S1 + D3S12) + D3S12} & \frac{-1}{-D3C12 + D3S12(D2C1 + D3C12)} \end{bmatrix}$$

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Si on considère que $A^{-1} = \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ a3 & a4 \end{bmatrix}$;

On obtient J^{-1} :

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} a1 & a2 & 0 & 0 \\ a3 & a4 & 0 & 0 \\ a1 + a3 & a2 + a4 & 0 & 1 \\ a1 + a3 & a2 + a4 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} a1 = \frac{1}{(-D2S1 - D3S12) + D3S12(D2C1 + D3C12)} \\ a2 = \frac{1}{-D3C12(D2S1 + D3S12) + (D2C1 + D3C12)} \\ a3 = \frac{-1}{-D3C12(D2S1 + D3S12) + D3S12} \\ a4 = \frac{-1}{-D3C12 + D3S12(D2C1 + D3C12)} \end{array} \right.$$

2.9.5. Modèle dynamique du robot SCARA

Le système robotique utilisé dans la méthodologie de ce travail est un manipulateur rigide de type SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) à 4 degrés de liberté. Comme indiqué à la Fig. 1, le bras est composé de 3 articulations rotatives θ_1 , θ_2 et θ_3 , ainsi que d'une articulation translationnelle, notée d4. [24]

Il est possible de comprendre la dynamique du mouvement dans l'espace d'articulation de ce manipulateur en utilisant son modèle mathématique, obtenu par la méthode Euler-Lagrange. On a supposé que les positions angulaires θ_1 , θ_2 et θ_3 seront respectivement les coordonnées généralisées q_1 , q_2 et q_3 , et que le déplacement vertical d4 de l'effecteur final sera la coordonnée généralisée q_4 . De cette manière, le modèle dynamique du robot, dans sa forme matricielle, est représenté par :

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau} \quad (2.36)$$

Là où $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^n$ est la matrice d'inertie, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbf{R}^{(n \times n)}$ est la matricielle de Coriolis et les forces centrifuges, \mathbf{B} est une matrice diagonale des coefficients de friction visqueux de chaque joint, $\mathbf{g} \in \mathbf{R}^n$ est le vecteur des forces gravitationnelles, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^n$, donc :

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ m_4 g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

Où :

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_{11} &= I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + m_1 \times l_{c1}^2 + m_2 \times l_1^2 + m_2 \times (l_{c2}^2 + 2 \times l_1 \times l_2 \times \cos(q(2))) + (m_3 + m_4) \times (l_1^2 + l_2^2 + 2 \times l_1 \times l_2 \times \cos(q(2))); \\ \mathbf{m}_{12} &= I_2 + I_3 + I_4 + m_2 \times (l_{c2}^2 + l_1 \times l_{c2} \times \cos(q(2))) + (m_3 + m_4) \times (l_2^2 + l_1 \times l_2 \times \cos(q(2))); \\ \mathbf{m}_{13} &= I_3 + I_4; \\ \mathbf{m}_{14} &= m_{24} = m_{34} = 0; \end{aligned}$$

$$m_{21} = m_{12};$$

$$m_{22} = I_2 + I_3 + I_4 + m_2 \times lc_2^2 + (m_3 + m_4) \times l_2^2$$

$$m_{23} = m_{13};$$

$$m_{31} = m_{13};$$

$$m_{32} = m_{23};$$

$$m_{33} = m_{13};$$

$$m_{41} = m_{14};$$

$$m_{42} = m_{24};$$

$$m_{43} = m_{34};$$

$$m_{44} = m_4;$$

$$c_{11} = -m_2 \times l_1 \times lc_2 \times \sin(q(2)) \times dq(2) - (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(2);$$

$$c_{12} = -m_2 \times l_1 \times lc_2 \times \sin(q(2)) \times (dq(1) + dq(2)) - (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times (dq(1) + dq(2));$$

$$c_{21} = m_2 \times l_1 \times lc_2 \times \sin(q(2)) \times dq(1) + (m_3 + m_4) \times l_1 \times l_2 \times \sin(q(2)) \times dq(1);$$

$$c_{13} = c_{14} = c_{22} = c_{23} = c_{24} = c_{31} = c_{32} = c_{33} = c_{34} = c_{41} = c_{42} = c_{43} = c_{44} = 0$$

2.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les aspects géométriques, cinématiques et dynamiques. Nous avons utilisé la convention de Denavit-Hartenberg avec des modifications de Khalil et Kleinfinger. Le calcul du MGD repose sur la transformation homogène qui nous permet d'obtenir la position du repère terminal par rapport à un repère de référence. Pour la commande, nous utilisons la méthode de Paul pour déterminer le MGI. Cette méthode est utilisée pour la plupart des robots industriels.

Chapitre 03 : La commande du robot SCARA

Chapitre 03 : commande d'un robot

3.1.Introduction

Dans ce chapitre dédié au robot SCARA à 4 degrés de liberté (RRRP), nous abordons deux aspects clés de son contrôle et de sa planification de mouvement : la commande PID pour assurer la précision et la stabilité, et l'utilisation de l'interpolation polynomiale, en particulier avec des polynômes de 3ème degré, pour générer des trajectoires fluides. À travers des simulations sur MATLAB, nous évaluons la performance du système en termes de précision de suivi, de temps de réponse et d'efficacité énergétique, offrant ainsi des perspectives essentielles pour optimiser les stratégies de contrôle et de planification des mouvements du robot SCARA.

3.2.Commande des mouvements

La commande des robots-manipulateurs a suscité de nombreuses recherches. Les principales méthodes employées sont les suivantes :

- la commande classique du type PID ;
 - la commande par découplage non linéaire ;
 - la commande passive ;
 - la commande fondé sur une fonction de Lyapunov ;
 - la commande adaptative ;
 - la commande robuste à structure variable (modes glissants) ;

Dans le cadre de ce chapitre, il n'est pas envisageable de prendre en compte en détail toutes ces approches, on insistera sur la commande classique de type PID (commande proportionnelle, intégral et dérivée), qui est considérée comme la solution théorique parfaite pour la commande des robots manipulateurs [27].

3.3.Régulation :

3.3.1. Définition :

La régulation offre la possibilité de contrôler diverses actions nécessaires au bon fonctionnement du système. L'ajustement d'un système consiste à rectifier un certain dysfonctionnement lié à la conception ou à la mise en œuvre de ces circuits.

L'organe intelligent crée un signal de commande en fonction de l'écart entre l'entrée et la mesure, Une régulation possède une référence constante, connue sous le nom de "consigne", qui exprime l'objectif souhaité du procédé [41].

$$Erreur = \text{entrée} - \text{mesure}$$

3.3.2. L'objectif de la régulation

La régulation consiste à ajuster automatiquement une grandeur de manière à ce qu'elle conserve toujours sa valeur ou reste proche de la valeur souhaitée, peu importe les perturbations qui peuvent arriver, Un régulateur est présent dans tout système à régler, qu'il soit analogique ou numérique. En premier lieu, ces régulateurs ont pour mission de comparer une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. Le régulateur intervient ensuite sur la grandeur de commande afin de rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne.

La régulation ou l'asservissement ont pour but de garantir :

- Le bon déroulement d'un processus
- La stabilité du système
- Une meilleure précision
- L'amélioration de la qualité du produit [26][41]

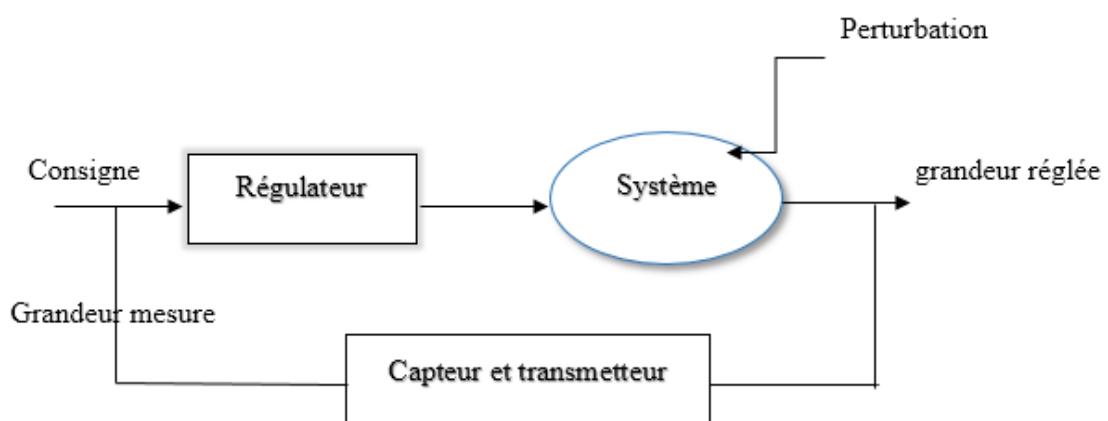


Figure 3-1:Schéma de principe de régulation automatique [42]

3.4. Régulation PID

Dans ce projet, nous avons utilisé une régulation (proportionnelle, intégrale et dérivée).

3.4.1. Définition du régulateur PID

Le régulateur PID, également connu sous le nom de correcteur PID (proportionnel, integrator, derivator), est sans aucun doute la méthode la plus répandue et la plus utilisée dans l'industrie. Cet asservissement est un système de contrôle qui permet d'améliorer les performances d'un système ou d'un procédé en boucle fermée. Il s'agit du régulateur le plus couramment employé dans le secteur industriel, où ses capacités de correction sont appliquées à de nombreuses dimensions physiques. [40][41]

3.4.2. Principe général

Il s'agit d'un régulateur PID qui possède les trois actions P, I et D. Il s'agit du régulateur le plus couramment employé dans l'industrie, et il offre la possibilité de régler de nombreuses grandeurs physiques. Il est intéressant de combiner les effets bénéfiques des trois correcteurs fondamentaux. Il permet d'annuler l'erreur statique grâce au terme I tout en permettant à l'action D d'obtenir des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur

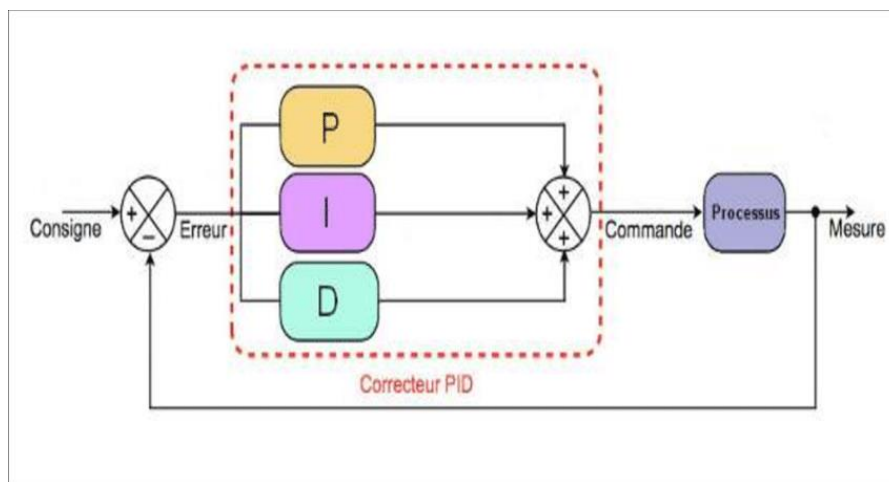


Figure 3-2: Schéma de principe de régulateur PID[43]

➤ Loi de commande du régulateur PID :

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.1)$$

➤ Sa fonction de transfert :

$$R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \quad (3.2)$$

3.4.3. Les types des régulateurs [41][44]

3.4.3.1. Action proportionnelle

L'action du régulateur proportionnel (P) est simple et naturelle, car il crée une commande $U(t)$ proportionnelle à l'erreur $\varepsilon(t)$. Son rôle est de minimiser l'écart entre la consigne et la mesure, améliorant ainsi le gain du système asservi pour optimiser la vitesse, la précision et la stabilité. En augmentant le gain K_c , on réduit l'erreur statique et accélère la réponse du système, ce qui diminue le temps de montée et le temps de réponse. Toutefois, des gains trop élevés peuvent entraîner une instabilité accrue et des oscillations, limitant ainsi la valeur maximale du gain pour maintenir la stabilité de la boucle fermée.

La description temporelle du régulateur proportionnel est alors la suivante :

$$u(t) = K_c \times e(t) \quad (3.3)$$

K_c : est le gain de correcteur

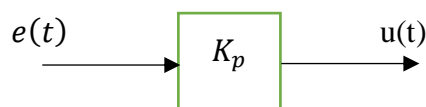


Schéma fonctionnel du régulateur P

3.4.3.2. Action intégrale

Même avec un régulateur P, certains systèmes peuvent présenter une erreur permanente, connue sous le nom d'erreur statique, lorsque les signaux d'entrée sont constants. Pour remédier à ce problème, l'action intégrale est utilisée. L'action intégrale agit en proportion de la surface de l'écart entre la consigne et la mesure, visant à annuler l'erreur statique en poursuivant son action jusqu'à ce que cet écart soit nul. Cette action intégrale est définie par le temps d'intégrale T_i qui conditionne sa performance en termes de précision statique.

Le terme intégral ajouté permet d'améliorer la précision, mais en revanche, il crée malheureusement un déphasage de $(-\pi / 2)$ qui risque de rendre le système instable en raison de la réduction de la marge de phase.

Afin de résoudre ce problème, il est possible d'intégrer l'erreur.

La description temporelle du régulateur proportionnel est alors la suivante :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

Fonction de transfert du régulateur I :

$$R(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (3.5)$$

Où T_i est appelée la constante de temps d'intégration.

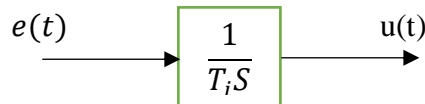


Schéma fonctionnel du régulateur I

3.4.3.3. Action dérivée

Il s'agit d'une action qui prend en considération la vitesse de variation de l'écart entre la consigne et la mesure et qui a également un effet stabilisateur, contrairement à l'action intégrale. Effectivement, elle produit une sortie qui varie en fonction de la variation de l'écart. De cette manière, l'action dérivée ne se concentrera que sur la variation de l'erreur, ce qui accroît la vitesse du système (réduction des temps de réponse). La phase $(+\pi / 2)$ augmente également la stabilité du système grâce à l'action dérivée, ce qui augmente la marge de phase. Il est donc essentiel de ne jamais utiliser cette action en régime statique en tant que seule : l'action dérivée n'est qu'un complément à l'action proportionnelle.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Fonction de transfert du régulateur D :

$$R(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d \cdot s \quad (3.7)$$

Où T_d est le temps de dérivation :

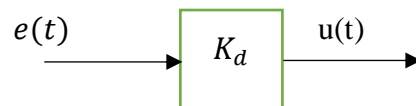


Schéma fonctionnel du régulateur D

3.4.4. Structures des régulateurs PID électroniques [45]

Différentes architectures peuvent être utilisées afin de combiner les trois effets du régulateur PID. L'apparition de ces architectures a été due à l'utilisation des amplificateurs opérationnels. Les régulateurs PID peuvent être classés en trois structures : série, parallèle ou mixte.

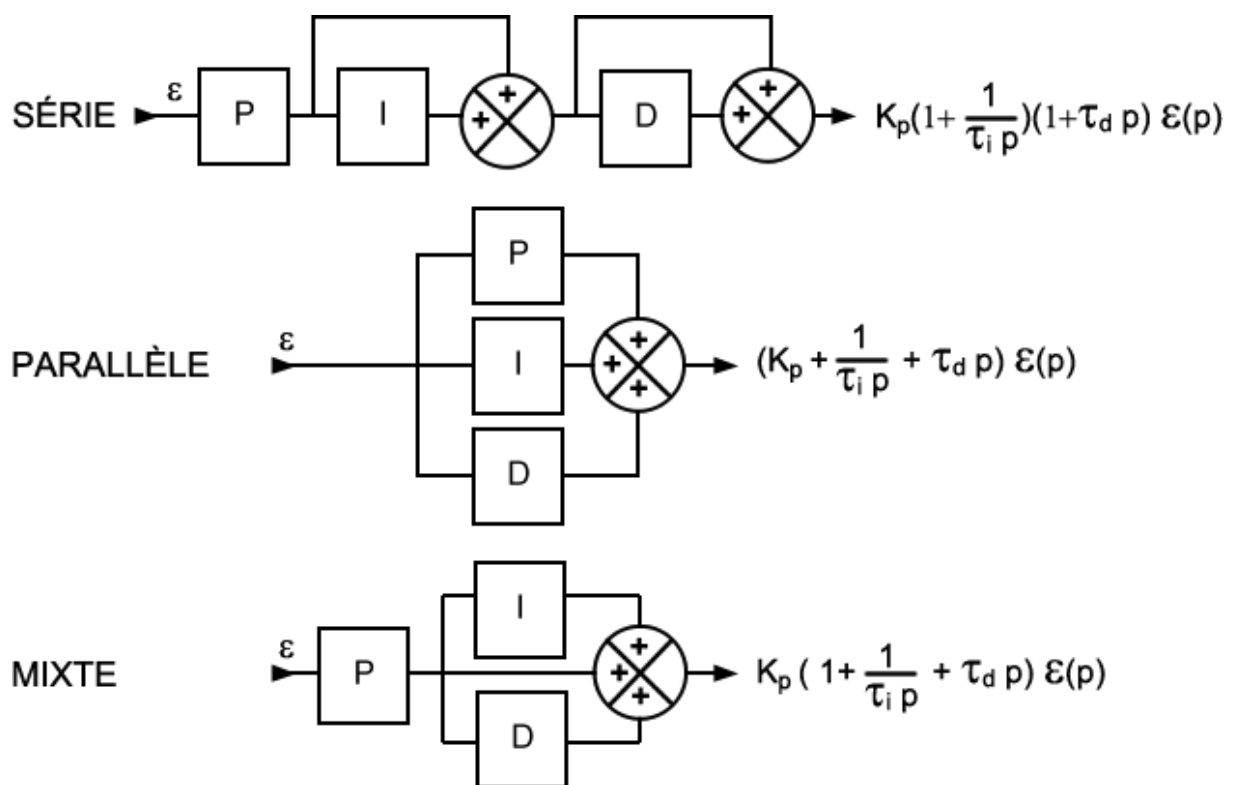


Figure 3-3 : Les structures de correcteurs PID : Série, Parallèle et Mixte [43]

3.4.5. Avantage et inconvénients

En résumant les avantages et les limites des actions de base du régulateur PID, on présente un tableau récapitulatif. [46] [47]

Action	Points forts	Les points faibles
P	Action rapide et instantanée Simple Meilleurs précision	Ne peut pas éliminer l'erreur statique mais il peut la réduire Risque d'instabilité si $K \gg 1$
I	Corrige l'erreur statique : Plus K_i est élevé, plus l'erreur statique est corrigée Améliore stabilité et rapidité	Réponse lente
D	L'erreur est dérivée par rapport au temps Action rapide et stabilité du système	Sensible au bruit
PID	Très utilisé en industrie Action PI+PD	Réglage des paramètres plus difficile

Tableau 3:tableau récapitulatif sur les avantages et les inconvénients du PID

3.4.6. Commande classique par régulateur PID des robots manipulateurs

Commande classique d'une commande par PID d'un robot manipulateur est représenté sur la figure ci- dessous. [22] [39]

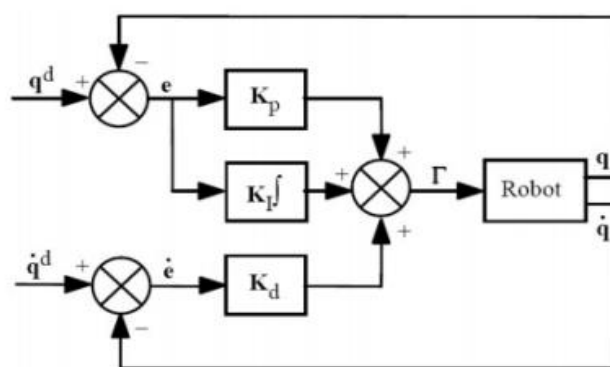


Figure 3-4:Schéma classique de la commande PID d'un robot manipulateur[37]

- La loi de commande est donnée par :

$$\tau = K_{pj} (q_{dj} - q_j) + K_{ij} \int_0^t (q_{dj} - q_j) + K_{dj} (\dot{q}_{dj} - \dot{q}_j) \quad (3.8)$$

Où :

- τ Est le couple ou force appliqué par l'actionneur
- q_{dj}, \dot{q}_{dj} Sont, respectivement, la position et vitesse désirées de l'articulation j
- q_j, \dot{q}_j Sont, respectivement, la position et vitesse réelles de l'articulation j
- K_p, K_i, K_d sont, respectivement, les gains proportionnel, intégral et dérivé du régulateur

3.5.Génération de mouvement

La création de mouvement implique le calcul de la position, de la vitesse et de l'accélération, qui varient au fil du temps, afin de garantir le passage du robot selon la trajectoire souhaitée, déterminée par les situations terminales des organes ou les configurations articulaires [27].

Les classes de mouvement suivantes peuvent être identifiées :

- Mouvement avec trajectoire libre entre deux points.
- Mouvement via des points intermédiaires avec trajectoire libre.
- Mouvement avec trajectoire contrainte entre deux points.
- Mouvement via des points intermédiaires avec trajectoire contrainte.

En créant une trajectoire, il y a deux espaces :

- ***L'espace articulaire*** : correspond à l'espace où le repère correspond à chaque articulation motorisée du robot. On nomme coordonnées articulaires les coordonnées associées.
- ***L'espace opérationnel*** correspond à l'espace où le repère correspond à l'organe terminal du robot. Les informations liées sont connues sous le nom de coordonnées opérationnelles.

Il est possible de générer des mouvements dans l'espace articulaire (mouvements 1 et 2) ou dans l'espace opérationnel (mouvements 3 et 4), selon les cas. La génération de mouvement repose sur la détermination d'une ou plusieurs fonctions d'interpolation qui élaborent l'équation du mouvement en prenant en compte des contraintes spatiales et temporelles

Génération de mouvement dans l'espace Articulaire	Génération de mouvement dans l'espace Opérationnel
<ul style="list-style-type: none"> - Moins de calculs en ligne. - Indépendant des configurations singulières. - Contraintes de vitesses et de couples directement liées aux limites des actionneurs - la géométrie de la trajectoire dans l'espace Opérationnel ne peut être imposée - le mouvement est minimal sur chaque articulation - Trajectoire de l'organe terminal imprévisible, risquant des collisions dans un environnement encombré. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle précis de la trajectoire. - Transformation nécessaire en coordonnées articulaires pour chaque point. - Possible échec si la trajectoire passe par une position singulière ou hors du volume accessible. - Limites de performance moyennes imposées, réduisant les capacités réelles du robot.

Tableau -4:Avantages et inconvénients de l'espace articulaire et opérationnel

3.5.1. Génération de trajectoire dans l'espace articulaire

La boucle d'asservissement de la Figure 1.13 illustre le principe général de génération du mouvement dans l'espace articulaire. Deux matrices de transformations homogènes, T_d et T_f , sont associées respectivement à la configuration initiale (ou de départ) et finale de l'organe terminal. Grâce au MGD du robot, on calcule les vecteurs des coordonnées articulaires

correspondant aux configurations initiales q^i et finales q^f . [7]

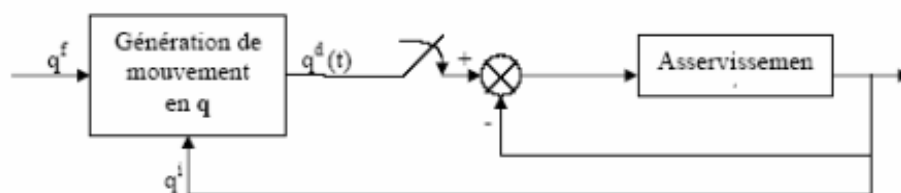


Figure 3-5: Génération de mouvement dans l'espace articulaire

La méthode d'interpolation polynomial est utilisée pour effectuer le passage par q^i à $t = 0$ et q^f à $t = t_f$.

3.5.2. Génération de trajectoire dans l'espace opérationnelle

Les trajectoires sont générées dans l'espace opérationnel en fonction de la position souhaitée et en utilisant le MGI qui calcule les Θ souhaités de chaque articulation du robot, ce qui donne une trajectoire.

En utilisant le Θ pour mesurer et en utilisant le MGD pour calculer la position mesurée, le robot doit attendre la position finale. [27]

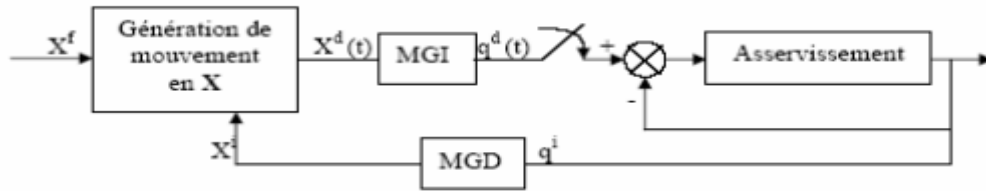


Figure 3-6: Génération de mouvement dans l'espace opérationnelle

Il existe plusieurs méthodes pour passer par q^i à $t=0$ et par q^f à $t=t_f$. Notamment l'interpolation polynomiale, la loi bang-bang, et la loi bang-bang avec palier de vitesse (loi de trapèze). Cependant, nous nous concentrons ici spécifiquement sur la méthode de l'interpolation polynomiale et particulièrement Polynôme 3ème degré [33]

3.6. Méthode d'interpolation polynomiale [7]

3.6.1. Polynôme 3ème degré

Si les points de départ et d'arrivée sont à vitesse nulle, deux contraintes de position sont ajoutées. Le polynôme minimal qui répond à ces quatre contraintes est de degré trois et a la forme générale suivante :

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (3.9)$$

Afin de répondre aux conditions aux limites, les coefficients sont exprimés de la manière suivante :

$$\begin{cases} a_0 = q^i \\ a_1 = 0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2} D \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3} D \end{cases} \quad (3.10)$$

On peut encore écrire l'expression sous les formes suivantes :

$$r(t) = 3\left(\frac{t}{t_f}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 \quad (3.11)$$

La figure 3.9 illustre l'évolution des positions, de la vitesse et de l'accélération pour l'axe j. Cette loi de mouvement garantit la continuité des vitesses, mais ne garantit pas celle des accélérations correspondantes. Dans la réalité, les robots industriels sont assez rigides pour que cette rupture soit écartée par la mécanique. Dans la plupart des applications, l'emploi d'un polynôme de degré trois est donc courant.

La vitesse est maximale pour une articulation quelconque j lorsque. Ce qu'elle a de valeur :

$$|\dot{q}_{j\max}| = \frac{3|D_j|}{2t_f} \quad \text{avec} \quad |D_j| = |q_j^f - q_j^i| \quad (3.12)$$

La vitesse atteint son maximum à $t=0$ et à $t=t_f$. Elle est de valeur :

$$|\ddot{q}_{j\max}| = \frac{6|D_j|}{t_f^2} \quad (3.13)$$

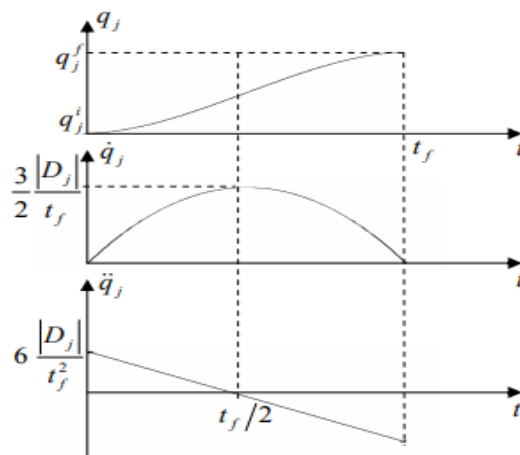


Figure 3-7 : Loi Polynômiale de degré trois. [48].

3.6.2. Polynôme de degré cinq

La continuité des accélérations est essentielle pour les robots à grande vitesse ou qui transportent des charges importantes, afin d'éviter d'exciter la mécanique. Le mouvement est alors qualifié de classe C2. Six contraintes doivent être remplies et le polynôme d'interpolation doit être de niveau cinq. Avec les restrictions additionnelles :

$$\begin{cases} \ddot{q}(0) = 0 \\ \ddot{q}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

La fonction de position peut être exprimée de la manière suivante :

$$r(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \quad (3.15)$$

La figure 3.10 illustre les changements dans les positions, la vitesse et l'accélération de l'articulation j. Les valeurs de vitesse et d'accélération maximales se traduisent par :

$$|\dot{q}_{j\max}| = \frac{15|D_j|}{8t_f} \quad (3.16)$$

$$|\ddot{q}_{j\max}| = \frac{10|D_j|}{\sqrt{3}t_f^2} \quad (3.17)$$

3

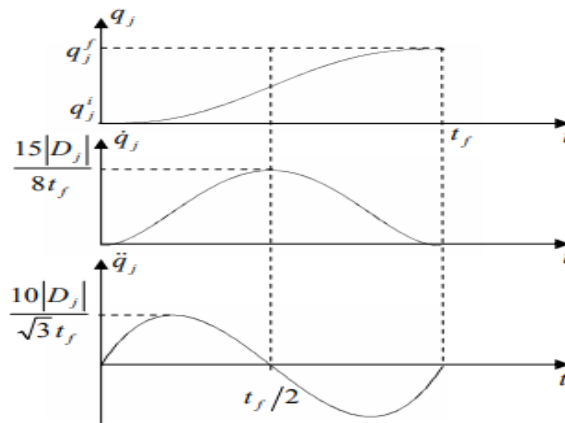


Figure 3-8 : Loi Polynômiale de degré cinq. [49].

3.7.Simulation

Cette section présente les résultats des simulations du robot SCARA avec un régulateur PID pour chaque articulation rotative. Les paramètres PID ont été ajustés pour optimiser la réponse du système et minimiser les erreurs de suivi. Les performances du robot ont été évaluées en utilisant deux types de référence pour les variables de commande et analysées en termes de trajectoires souhaitées et d'erreurs associées

Pour la simulation, nous avons défini deux types de références pour les variables de commande q_1 , q_2 , q_3 et q_4 :

1. Référence 1

- Pour les temps $t < 1.5$ secondes, les valeurs de q_1 , q_2 , q_3 et q_4 sont toutes nulles.
- Pour les temps $t \geq 1.5$ secondes, les valeurs de q_1 , q_2 , q_3 et q_4 sont toutes égales à 2.

2. Référence 2

Les valeurs de q_1 , q_2 , q_3 et q_4 suivent une trajectoire polynomiale de degré 3 définie par une expression (1.48) mentionnée précédemment

Et nous avons utilisé deux types de trajectoires de référence pour évaluer les performances du Robot

1. Référence 1

$$\begin{aligned}XE &= 0.1 \times \cos(t) + 0.2 ; \\YE &= 0.12 \times \sin(t) + 0.1 ; \\ZE &= 0.05 \times \cos(t) - 0.07;\end{aligned}$$

2. Référence 2

$$\begin{aligned}XE &= 0.2e^{0.02t} ; \\YE &= 0.22e^{0.02t}; \\ZE &= 0.15t ;\end{aligned}$$

3.8. Résultats de Simulation pour QREF

3.8.1. Résultats de Simulation (référence 2)

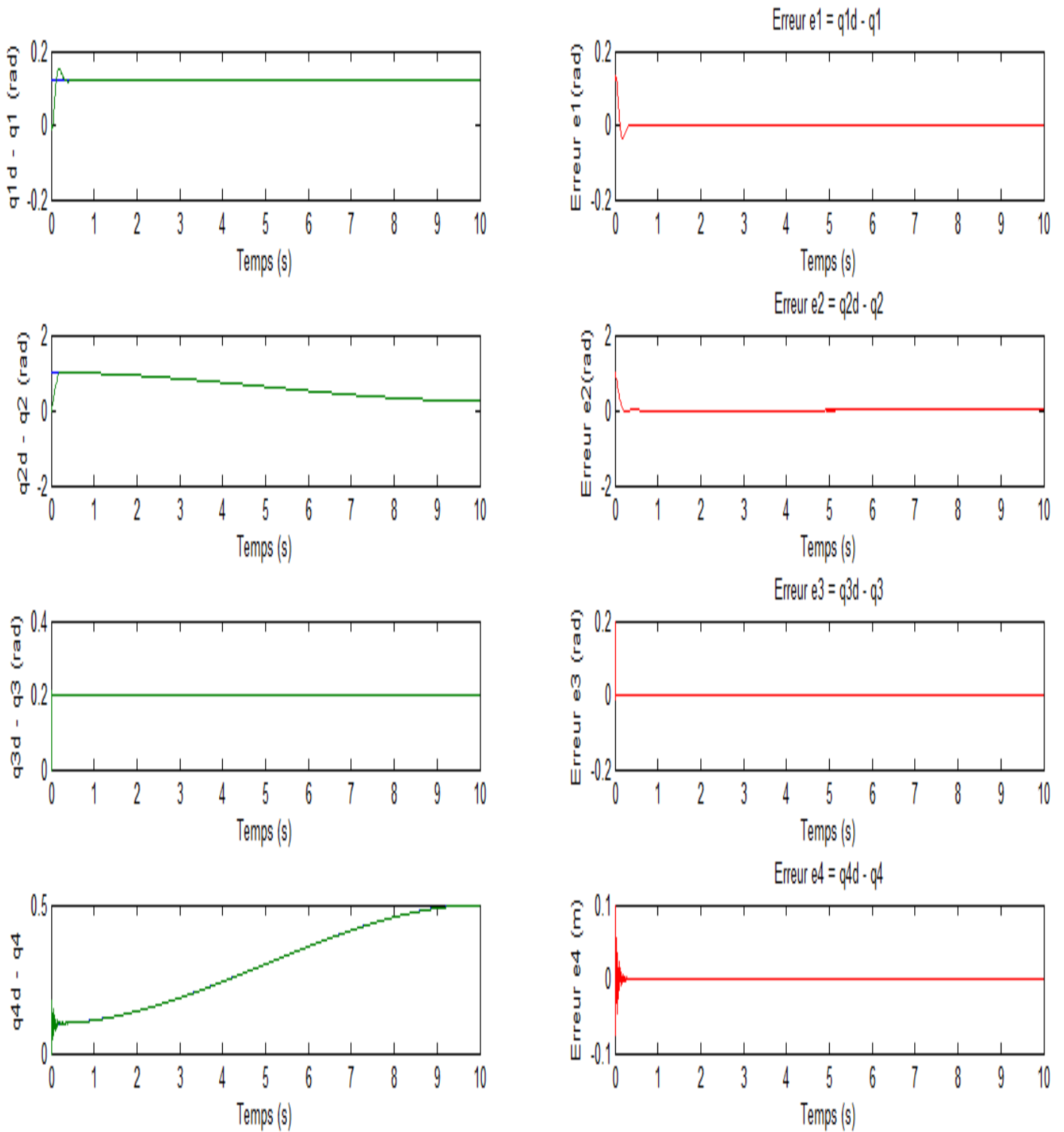


Figure 3-9 : Poursuite de position des 4 articulations

Les graphiques de la figure 3-9 montrent la performance de suivi de position des articulations du sur une période de 10 secondes.

La performance globale de suivi des articulations du robot SCARA est très bonne, avec des erreurs soutenues minimales.

3.8.2. Résultats de Simulation (référence 1) :

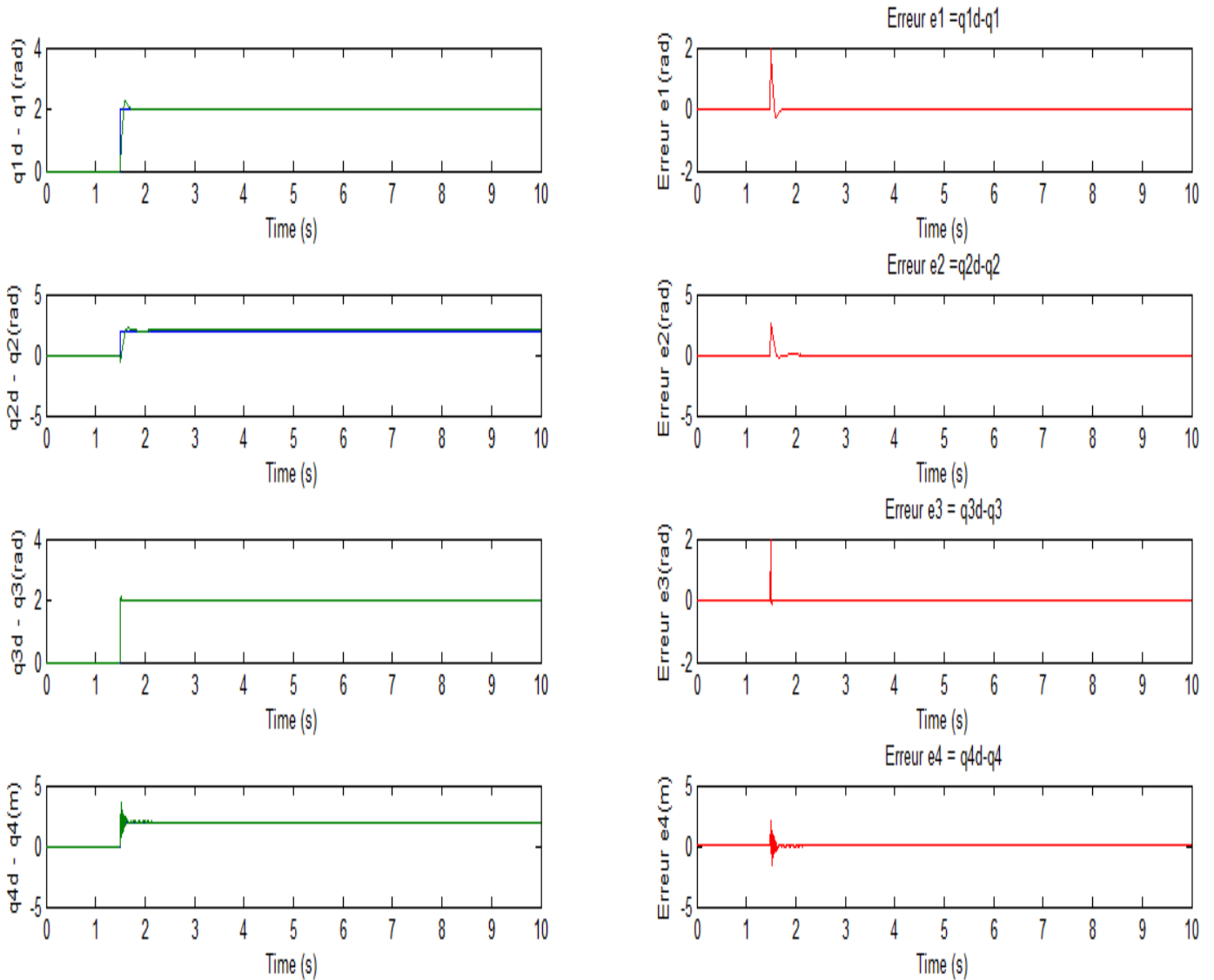


Figure 3-10 : Poursuite de position des 4 articulations

Les résultats de la figure 3-9 et la figure 3-10 démontrent une bonne capacité du système de contrôle à faire suivre aux articulations du robot SCARA les valeurs désirées (q_d). Les écarts observés entre q_d et q ($e1$, $e2$, $e3$, $e4$) montrent des oscillations limitées, indiquant une réponse efficace du régulateur (probablement un PID) pour maintenir les articulations proches des positions souhaitées.

3.9.resultat de simulation pour (XREF)

3.9.1. Résultats de Simulation (référence 1)

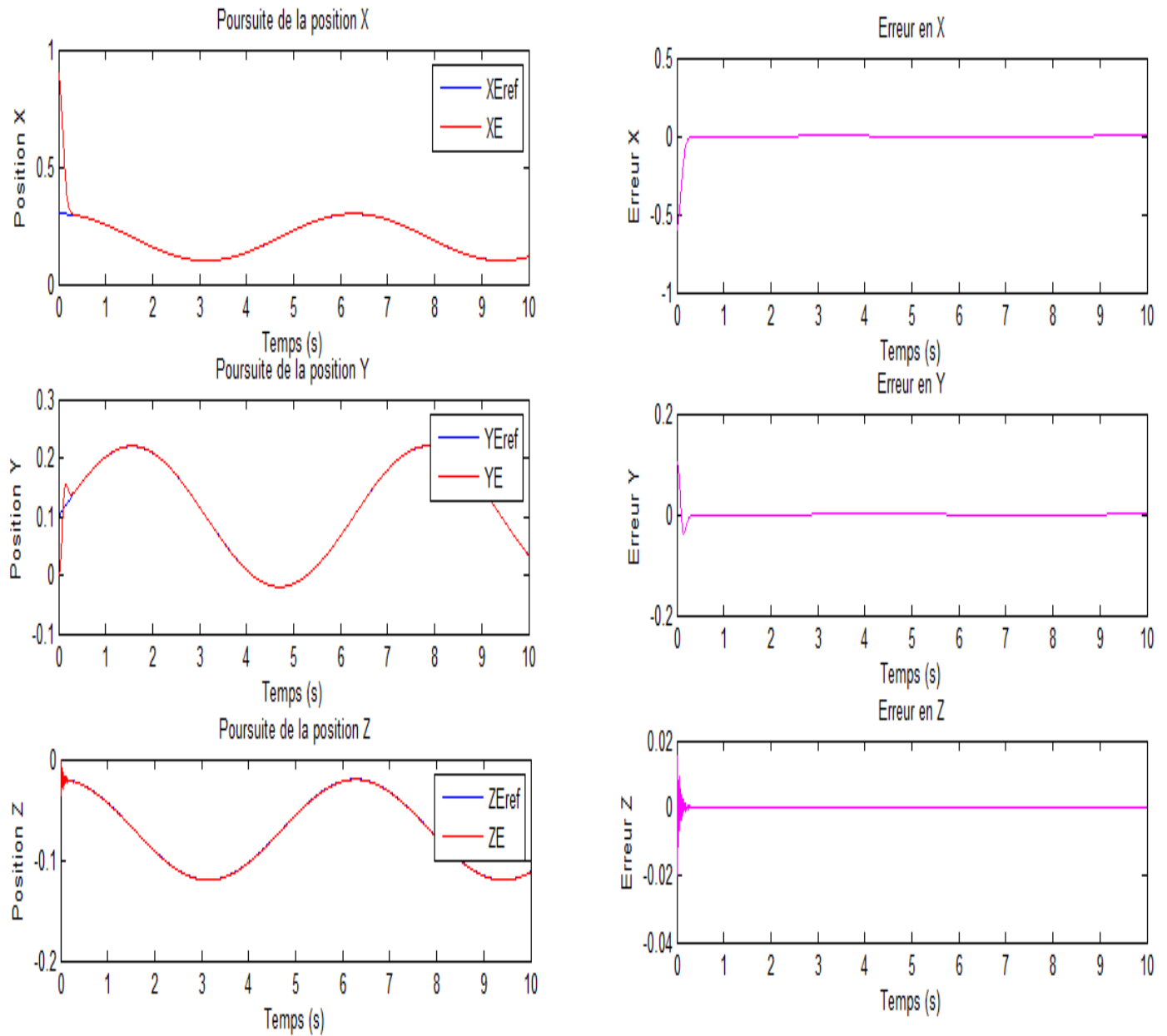


Figure 3-11: Suivi de Trajectoire Cartésienne et Erreurs pour les position X_E , Y_E , Z_E

La performance globale de suivi des positions du robot SCARA dans les axes X, Y et Z est excellente, avec des erreurs minimales. Le contrôleur PID corrige efficacement les déviations initiales, surtout dans les axes X et Y, tandis que les erreurs pour l'axe Z sont très faibles, indiquant un contrôle précis. Le contrôleur PID semble corriger efficacement les déviations initiales, particulièrement

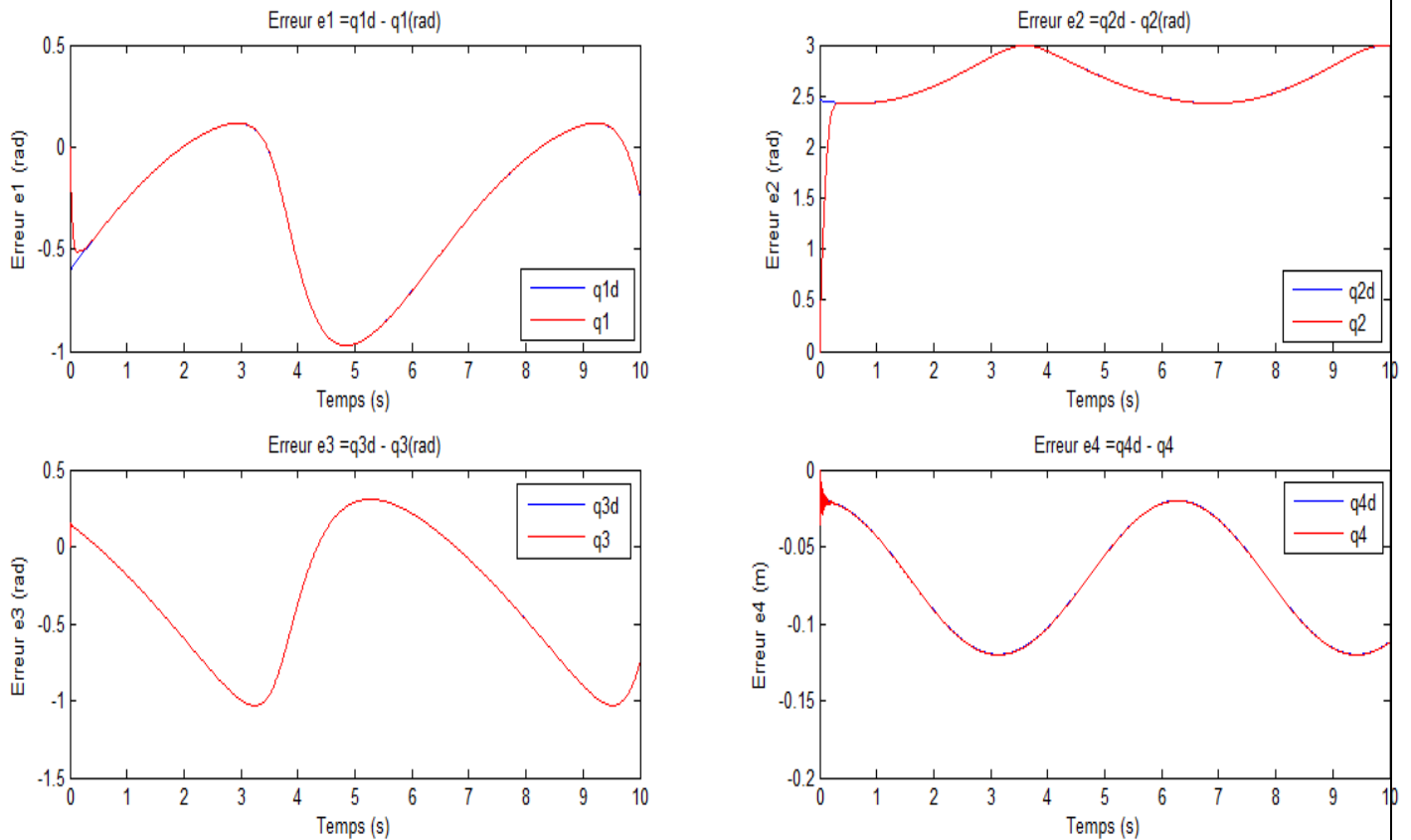


Figure 3-12: Erreurs des Configurations Articulaires Désirées et Actuelles

Les erreurs $e1$, $e2$ et $e3$ restent faibles et se stabilisent rapidement, montrant une bonne capacité du régulateur PID à corriger les écarts

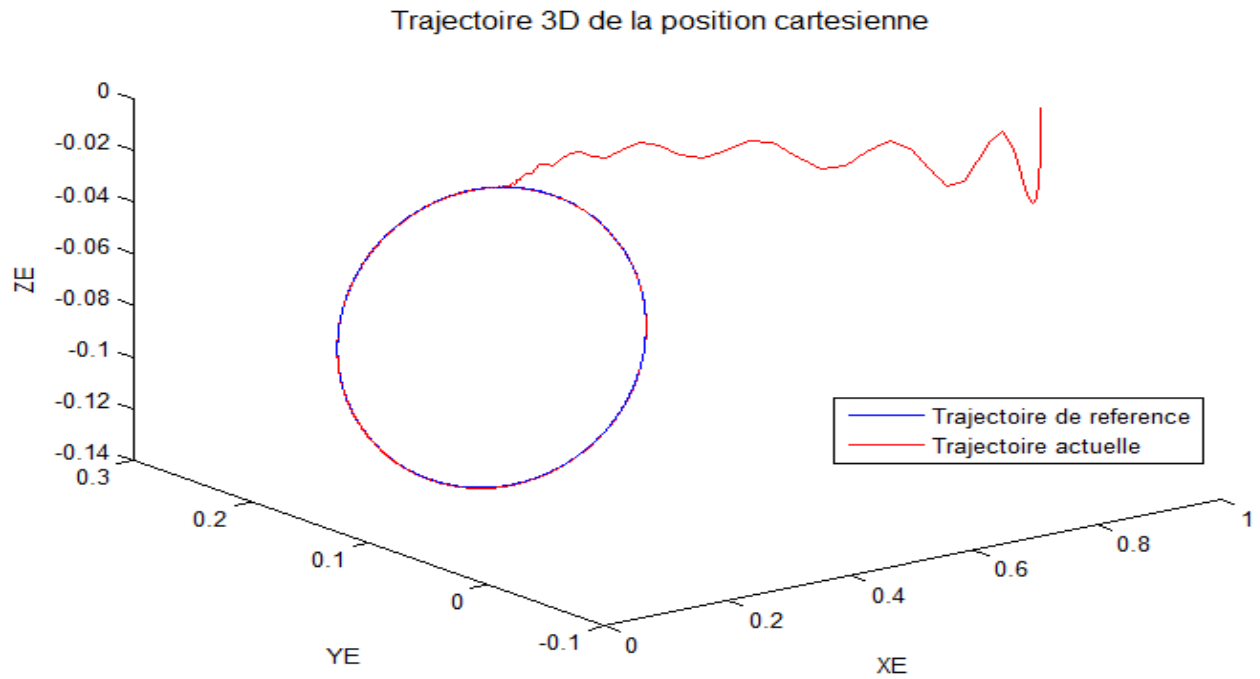


Figure 3-13 : Trajectoire 3D des Positions Cartésiennes pour un Robot SCARA à 4 DDL (RRRP)

La trajectoire de position en X (XE) Y (YE) et Z (ZE) suit de près la référence (XEref, YEref, ZEref), malgré des oscillations mineures qui sont rapidement corrigées.

3.9.2 Résultats de simulation (Référence 2)

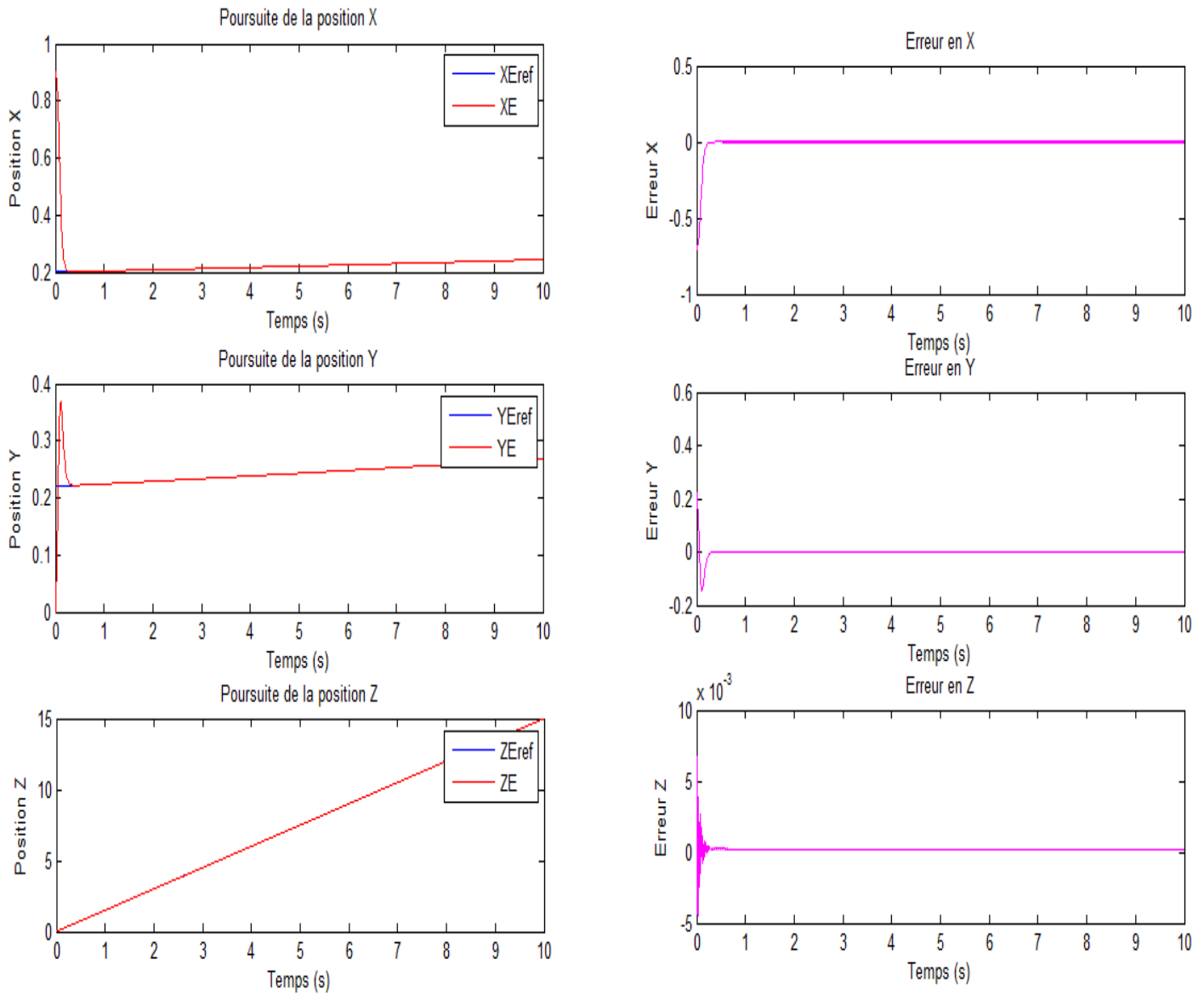


Figure 3-14 : Suivi de Trajectoire Cartésienne et Erreurs pour les position X_E , Y_E , Z_E

Le contrôleur PID semble corriger efficacement les déviations initiales, particulièrement visibles dans les axes X et Y.

Chapitre 03 : La commande du robot SCARA

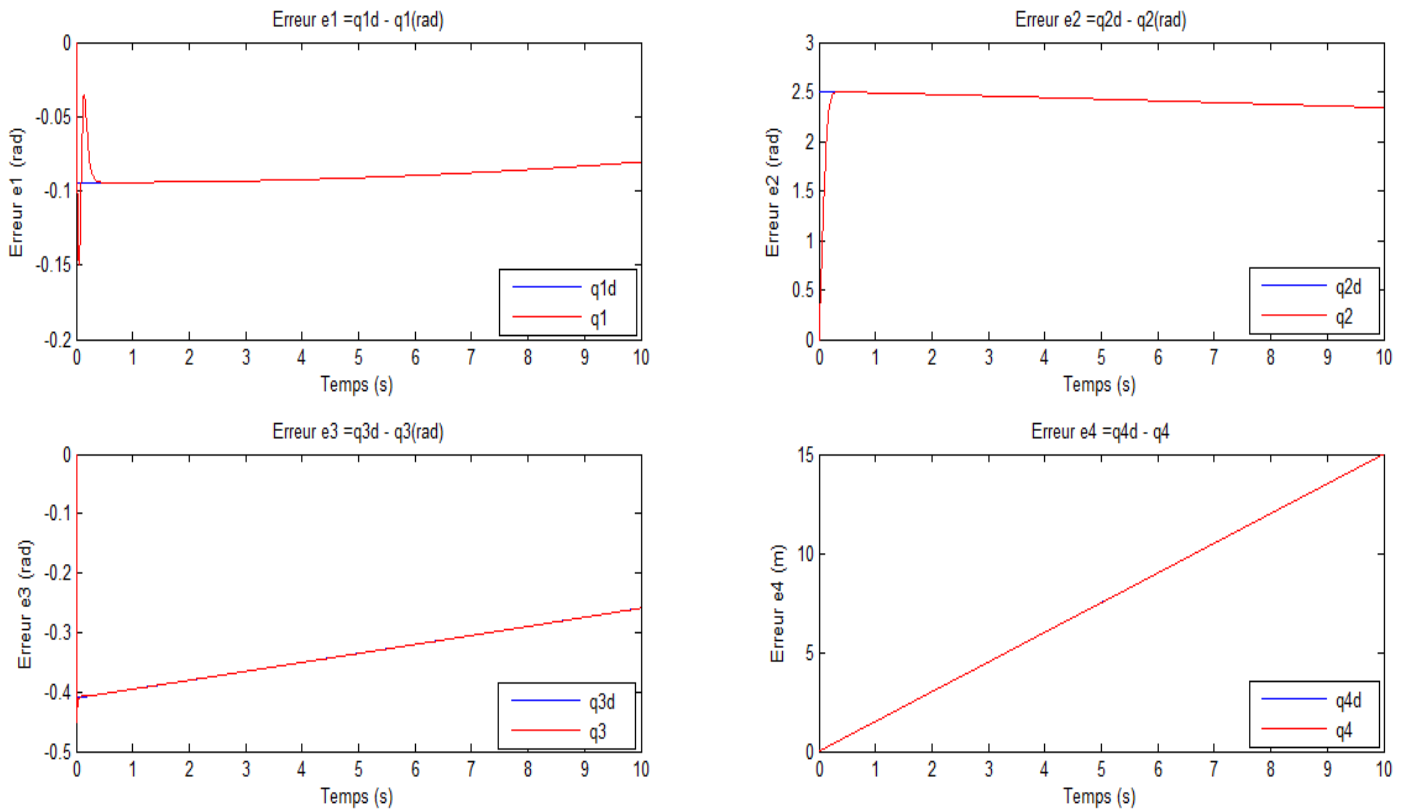


Figure 3-15 : Erreurs des Configurations Articulaires Désirées et Actuelle.

Les erreurs pour l'axe Z sont très faibles, suggérant que cet axe est contrôlé avec une grande Le robot suit également bien les trajectoires complexes définies par des polynômes de degré 3, confirmant la robustesse et l'efficacité de la régulation PID utilisée.

Trajectoire 3D de la position cartésienne

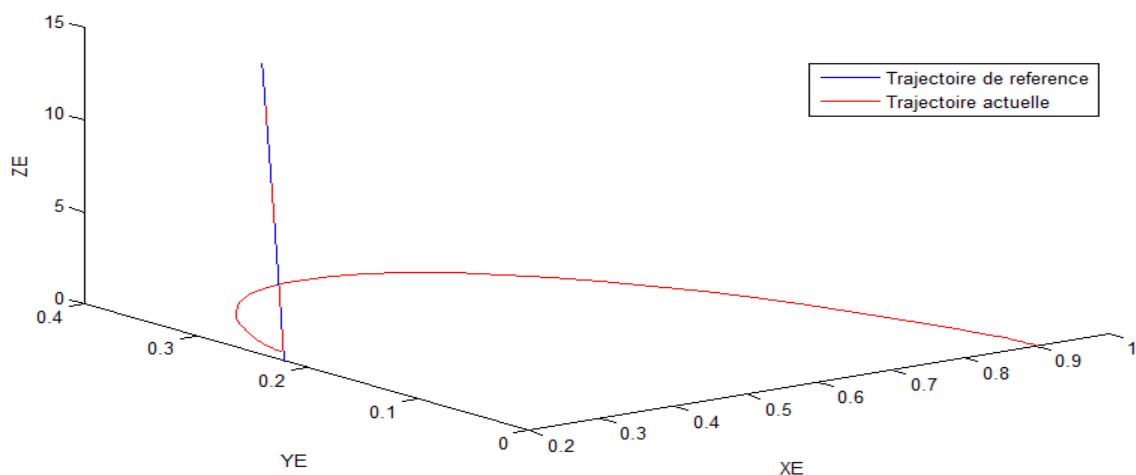


Figure 3-16 : Trajectoire 3D des Positions Cartésiennes pour un Robot SCARA à 4 DDL (RRRP)

Au final les simulations montrent que le robot SCARA est capable de suivre efficacement les trajectoires désirées avec des erreurs minimales, que ce soit pour des références simples ou complexes. Le régulateur PID joue un rôle crucial dans cette performance, assurant une bonne précision et stabilité du système

3.10. Conclusion

En utilisant deux références distinctes, nous avons pu évaluer les performances du robot SCARA à 4 DDL (RRRP) avec un régulateur PID sous différents scénarios de trajectoire. Les résultats montrent que le robot peut suivre les trajectoires de référence avec une précision variable, et soulignent l'importance d'optimiser les paramètres de régulation pour améliorer la précision et la stabilité du suivi de trajectoire.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude s'est concentrée sur la modélisation et le contrôle du robot SCARA à quatre degrés de liberté, dans le but d'améliorer ses performances et son efficacité dans les environnements industriels modernes.

Chapitre 1 a posé les fondations en explorant l'évolution historique de la robotique, depuis les premières utilisations du terme "robot" par Karel Čapek dans les années 1920 jusqu'aux avancées contemporaines. Nous avons examiné différentes applications de la robotique, mettant en lumière son rôle crucial dans l'automatisation industrielle. Ce chapitre a également abordé les technologies sous-jacentes qui soutiennent les robots modernes, en soulignant leur importance pour comprendre le développement et l'utilisation des robots SCARA.

Chapitre 2 a détaillé la modélisation du robot SCARA. Nous avons développé des modèles cinématiques, géométriques et dynamiques précis, essentiels pour comprendre le comportement du robot et prédire ses réactions aux différentes conditions de travail. Ces modèles constituent un cadre robuste pour l'analyse et le contrôle du robot.

Chapitre 3 s'est concentré sur les techniques de contrôle du robot SCARA. Nous avons exploré la conception et l'implémentation d'un régulateur PID classique ainsi que des méthodes de contrôle adaptatif. Les simulations expérimentales ont montré que, bien que le régulateur PID puisse offrir une performance satisfaisante dans des conditions statiques, les techniques de contrôle adaptatif sont mieux adaptées pour gérer les variations dynamiques des conditions de travail, assurant ainsi une performance stable et efficace.

Les résultats obtenus à travers les simulations ont confirmé la pertinence des modèles développés et l'efficacité des techniques de contrôle proposées. Le contrôle adaptatif, en particulier, s'est révélé crucial pour répondre aux défis posés par les variations des paramètres et des conditions opérationnelles du robot SCARA.

En conclusion, cette étude a démontré l'importance de combiner une modélisation précise avec des techniques de contrôle avancées pour optimiser l'utilisation des robots SCARA dans l'industrie. Les travaux futurs pourraient explorer davantage l'intégration de ces robots avec des systèmes de production plus larges, l'application de techniques d'intelligence artificielle pour un contrôle encore plus adaptatif, et l'amélioration continue des modèles dynamiques pour une précision accrue.

Ainsi, en surmontant les défis posés par les environnements de travail variés et les exigences de précision élevées, les robots SCARA pourront jouer un rôle encore plus central dans l'automatisation industrielle, contribuant de manière significative à l'amélioration de la productivité et de l'efficacité opérationnelle.

Listes des références

- [1]. Smith, J., & Doe, A. (2020). Enhancing Industrial Efficiency through SCARA Robot Integration. *Journal of Industrial Automation*, 45(3), 123-135. doi:10.1234/jia.2020.45.3.123.
- [2]. Johnson, M., & Wang, H. (2019). Modeling and Control of SCARA Robots: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Robotics*, 35(5), 987-1001. doi :10.1109/TRO.2019.2932345.
- [3]. stevan, g. p. (2017). *George Devol et Joseph Engelberger*. sur timetoast: <https://www.timetoast.com/timelines/robotica-a-traves-del-tiempo> [Consulté LE 10 AVRIL 2024]
- [4]. Mathis, OLANOR 301. *L'histoire de la robotique* . Timetoast Timeline, 2007-2024. <https://www.timetoast.com/users/2798765>. [Consulté le : 08 janv 2024.]
- [5]. 1961 Unimate, the world's first industrial robot, goes to work on a General Motors assembly line. Récupéré sur pinterest: <https://www.pinterest.com/pin/199706564709621444> [Consulté LE 10 AVRIL 2024]
- [6]. Milijana, M. (2023, septembre 18). *robot sophia* . sur blic.rs :<https://www.blic.rs/autori/milijana-miliksic> [Consulté LE 10 AVRIL 2024]
- [7]. Kouame, Michel ingenieure industriel professeur certefie .2019 cours licence 2 *Initiation a la robotique industrielle* 15p
- [8]. Antoine, Crochet Damais . *Robotique : définition, cas d'application et lois*. 27 septembre 2022.<https://www.journaldunet.fr/intelligence-artificielle/guide-de-l-intelligence-artificielle/1501853-robot/>. [Consulté le : 10 Avril 2024.]
- [9]. *Les éléments des robots industriels*. (2017), sur conceptek.net: <https://conceptek.net/fr/techniques-de-base/robotique/les-robots-industriels,-d%C3%A9finition,-types-et-applications> [Consulté LE 10 AVRIL 2024]
- [10]. HASNI I, DJOUDI Y, A E . Développement d'un robot mobile assistant au service de la santé. PROJET DE FIN D'ETUDE Pour l'obtention du diplôme de MASTER en Automatique et Informatique industrielle & Automatique et système. Université BLIDA, 2021/2022
- [11]. *Five green lawn mowers guaranteeing effortless mowing (robot roombo)*. (s.d.). Récupéré sur homecrux.com: <https://www.homecrux.com/five-green-lawn-mowers-guaranteeing-effortless-mowing/18080/> [Consulté LE 11 AVRIL 2024]

[12]. *robot de livraison* . (s.d.). Récupéré sur bizjournals.com: <https://www.bizjournals.com/sanjose/news/2016/11/10/meal-delivery-robots-coming-to-peninsula-city.html> [Consulté LE 11 AVRIL 2024]

[13]. *robot roomba j6+*. (s.d.). Récupéré sur pocket-lint: <https://www.pocket-lint.com/best-prime-day-robot-vacuum-deals/> [Consulté LE 11 AVRIL 2024]

[14]. *Atlas Robot Boston Dynamics Low-poly 3D model*. Récupéré sur cgtrader: <https://www.cgtrader.com/3d-models/character/sci-fi-character/atlas-robot-boston-dynamics> [Consulté LE 11 AVRIL 2024]

[15]. *EU RobotCub project iCub Robot*. Récupéré sur egomachines: <http://egomachines.com/animoid/> [Consulté LE 11 AVRIL 2024]

[16]. *un drone* .Récupéré sur autocasion: <https://www.autocasion.com/actualidad/noticias/drones-dgt-multas-aire-radares> [Consulté LE 12 AVRIL 2024]

[17]. *Les industriels, renforts indispensables à la robotisation des armées*. Récupéré sur usinenouvelle: <https://www.usinenouvelle.com/article/les-industriels-renforts-indispensables-a-la-robotisation-des-armees.N1102879> [Consulté LE 12 AVRIL 2024]

[18]. *un robot sous marins* . Récupéré sur ecosub robotics : <https://www.ecosub.uk/m-science-series.html> [Consulté LE 12 AVRIL 2024]

[19]. *Le Robot chirurgical*. Récupéré sur clinique-bourgoin: <https://www.clinique-bourgoin.com/la-chirurgie/robot-chirurgical/> [Consulté LE 13 AVRIL 2024]

[20]. *Robot teleprésence*. Récupéré sur spectrum.ieee: <https://spectrum.ieee.org/irobot-and-intouch-health-announce-rpvita-telemedicine-robot> [Consulté LE 13 AVRIL 2024]

[21]. *eobot diagnostic* . Récupéré sur echosciences: <https://www.echosciences-grenoble.fr/communautes/le-magazine-des-sciences-de-rcf-isere/articles/l-intelligence-artificielle-et-la-medecine> [Consulté LE 13 AVRIL 2024]

e

[22]. DRAISSIA A. MAZOUNI F, S .CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN BRAS MANIPULATEUR [ALG.-M. O.- 02]. COMMANDÉ PAR ARDUINO UNO, Projet de Fin

d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA, 2020/2021.

[23]. Dr . AMEDDAH, HACENE. COURS Dynamique Concept robotique 74p.Université de Batna.

[24]. MORBIDI, Fabio. Robotique Industrielle. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2020.

[25]. Mohamed, BENMEDDOUR Mohand ouali et BEDIAR.*Mémoire de fin d'étude Commande guidée par les données appliquée aux robots manipulateurs*. bejaia : 2021/2022.

[26]. Abdelouahab, Chebbah.*commande des Robots Manipulateurs :Master en Automatique*. universite jijel : 2018-2019.

[27]. WISAMA. Khalil, ET Dombre. Modeling and Control of Manipulators - Part I: Geometric and Kinematic Models. paris : Hermes Science Publications, 2002. p. 480 pages.

[28]. W, KHALIL.E. (2002). Représentation d'un point. *Matrice de transformation entre vecteurs*, . paris: Hermes Science Publications.

[29]. W, KHALIL.E. (2002). *Transformation d'un repère*. Transformations homogènes [Paul 81] *Matrice de transformation entre vecteurs*, . paris: Hermes Science Publications.

[30]. W, KHALIL.E. (2002). *Transformation d'un vecteur*. Transformations homogènes [Paul 81] *Matrice de transformation entre vecteurs*, . paris: Hermes Science Publications.

[31]. W, KHALIL.E. (2002). Transformation de translation pure. Transformations homogènes [Paul 81] *Matrice de transformation entre vecteurs*, . paris: Hermes Science Publications.

[32]. W, KHALIL.E. (2002). *Transformation de rotation pure autour de l'axe x*. Transformations homogènes [Paul 81] *Matrice de transformation entre vecteurs*, . paris: Hermes Science Publications.

[33].W, KHALIL.E. (2002). Robot à structure ouverte simple. *Modèle géométrique direct des robots à chaine ouverte simple* . paris: Hermelous Science Publications.

[34]. DOMBRE, Wisama KHALIL et Etienne .Paris, France : Hermès Science Publications, 1999.

[35]. Kermiche, Salah.Modélisation et commande d'un robot par méthodes intelligentes

(Thèse de doctorat, option Automatique Industrielle). ANNABA : s.n., 2006. these doctorat.

[36]. ADOUANE, Lounis. TP Modélisation et Commande des Robots. france .Clermont-Ferrand : GDR Robotique , Novembre 2010.

[37]. Comparison of numerical methods in code as solvers for simulation of robotic systems. *Revista de Computo Aplicado* December 2020 DOI:10.35429/JCA.2020.15.4.1.8

[38]. J. E. Lavin-Delgado, S. Chavez-Vazquez, J. F. Gomez-Aguilar, G *Fractional-order passivity-based adaptive controller for a robot manipulator type scara*. *Fractals* : May 2020.

[39]. Hidemasa Goya, Kento Matsusaka, Mitsunori Uemura, Yasutaka Nishioka, Sadao Kawamura. *Realization of High-Energy Efficient Pick-and-Place Tasks*. Vilamoura, Algarve, Portugal : 7-12 octobre 2012. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

[40]. Salima IMOUDACHE Commande référencée vision du robot Scara à 3ddl. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Automatique Juin 2013 E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger

[41]. ROSS, Mickaël CAMUS et Etienne DEGUINE et Daniel. Régulation par PID.

[42]. Régulation De Processus Industriel , QU'EST-CE QUE LE PID , 11 DÉCEMBRE 2018, [HTTPS://BLOG.TECHNIC-ACHAT.COM/QUEST-CE-QUE-LE-PID/](https://blog.technic-achat.com/quest-ce-que-le-pid/) [Consulté LE 5 MAI 2024]

[4]. Nguyen, Thi Van Anh. *Commande de robots manipulateurs basée sur le modèle de Takagi-Sugeno : nouvelle approche pour le suivi de trajectoire*. Valenciennes Espagne : Sciences Pour l'Ingénieur (ED SPI 072) (LAMIH UMR 8201) , OCT 2019

[43]. System asservis linear, Structure PID
[HTTPS://WWW.NUMLOR.FR/ELEARNING/AUTO/CO/91DCORRECTEURSPID.HT](https://www.numlor.fr/elearning/auto/co/91dcorrecteurspid.html)
ML [Consulté LE 9 MAI 2024]

[44]. El Mehdi. Chicago, 2009 , *asservissement PID.*, *6-asservissement_PID.*, [consulte le 2.mai 2024]

- [45]. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006) Advanced PID Control. Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [46]. Felipe de Jesús Torres-Del Carmen, Ricardo Jaramillo-Hernández, Arnaldo Díaz-Sánchez, et Diego Alfredo Núñez-Altamirano. *Comparison of numerical methods in code as solvers for simulation of robotic systems*. 15, December 2020, Article in Revista de Computo Aplicado, Vol. 4, pp. 1-8.
- [47]. J. E. Lavin-Delgado, S. Chavez-Vazquez, J. F. Gomez-Aguilar, G *Fractional-order passivity-based adaptive controller for a robot manipulator type scara*. Fractals : May 2020
- [48]. W, KHALIL. loi Polynômial de degré trois . *Generation de mouvements* . paris: Hermes Science Publications. (2002).
- [49]. W, KHALIL.E. (2002). loi Polynômial de degré cinq . *Generation de mouvements* . paris: Hermes Science Publications.