الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique

Spécialité : Automatique des systèmes

THEME

COMMANDE LINEARISANTE ENTREES-SORTIES D'UN MODELE DE BRAS MANIPULATEUR DE TYPE SCARA

Proposé et dirigé par,

M. MEDJEBOURI

Préparé et présenté par,

Melle. AZIRA Cherifa

Melle. GACEMI Imane

Année universitaire : 2013-2014

Remerciement :

Nous remercions Dieu tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté de faire ce travail.

Un grand merci à notre encadreur Mr. MEDJBOURI pour sa patience et sa persévérance dans le suivi, et un grand merci au membre de jury,

Nous remercions aussi tous les enseignants et les responsables de département Génie Électrique et de l'Informatique.

Nous remercions tous les professeurs qui enseignent dans notre pays pour leurs efforts pour la science, l'éducation et le développement de notre pays.

Dédicace

A la mémoire de mon cher père ,

A mon adorable mère qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance

J'espère qu'elle trouvera dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour .

A mes chers petits frères Brahim, Djamel et Mohamed,

A mes chères petites sœurs Aicha et Meriem,

A ma chère grande sœur Naima et son épouxOmar,

A mon cher frère Mahdjoubet son épouse Aicha,

A mon cher frère Khaled et son épouse Amina,

A mon cherfrère Mahfoud et son épouse Naçira .

Pour leur soutien moral et leurs sacrifices le long de ma formation.

A mes chers neveux Abdel kader , Amine , Youcef et chakib .

A tous mes amis(es) ; Khoula,Imane, Amina ,Fatiha,Hadjer,Amel ,Madina ,Lubna et ZIREK.

A tous mes collègues de la spécialité «Automatique des systèmes » promotion 2013/2014.

Je dédie ce mémoire

Cherifa

Dédicace

A la mémoire de mon père,

A mon adorable mère qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance

J'espère qu'elle trouvera dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour .

A mes cherspetits frères MOHAMED rida, naser adine

A ma chère grande sœur hesine et son époux lynda

A mon cher frère fyçale son épouse fatima azehra ,

A mon cher frère rodoinne et son épouse nadia

A mon cherfrère jebranne et son épouse baya.

Pour leur soutien moral et leurs sacrifices le long de ma formation.

A mes chers neveux Mohamed wissame adine,lydia,youcefe,safa ,maroi,amine,Mohamed,abd wahabe ,aya,maria, etc….

A tous mes collègues de la spécialité «Automatique des systèmes » promotion 2013/2014.

Je dédie ce mémoire

imane

LISTE D'ABREVIATIONS…….. I
LISTE DES FIGURES …….. II
LISTE DES TABLEAUX…….. III
INTRODUCTION GENERALE…… IV

Chapitre I : Généralités sur le robot manipulateur

1. Introduction…… 01
2. Structure générale d'un robot manipulateur…….. 01
3. Structure mécanique articulée (SMA)…… 02
4. Architecture de robot…… 03
4.1. Vocabulaire…….. 04
4.2. L'actionneur…….. 05
4.3. L'organe terminal…….. 05
5. Mobilité d'une structure mécanique articulée (SMA)…… 06
6. Degré de liberté d'une tache…… 06
6.1. Choix du nombre de degré de liberté d'un robot…….. 06
7. Eléments constituants un robot …….. 07
7.1. Le véhicule…….. 07
7.2. Le porteur…….. 07
7.3. Le poignet…….. 08
8. Classification des poignets…… 08
9. Classification des robots…… 08
9.1. Classification selon morphologie…….. 09
9.2. classification en fonction de l'asservissement …… 12
10. Caractéristiques d'un robot…….. 12
10.1. Espace de SMA (volume de travail)…….. 12
10.2. Différentes charges…….. 13
10.3. Répétabilité…….. 13
10.4. Exactitudes…….. 13
10.5. Fiabilité…… 13
10.6. Vitesse et accélération…….. 13
10.7. Architecture du SMA…….. 14
10.8. Masse du robot…… 14
10.9. cout du robot …… 14
10.10. Maintenance…….. 14
11. Redondance et singularités d'un manipulateur…… 14
11.1. Redondance…….. 14
11.2. Singularité…… 15
12. Conclusion…… 15

Chapitre II : Modalisation de bras manipulateur

1. Introduction…….... 16
2. Modélisation géométrique……. 17
2.1. Modèle géométrique directe (MGD)…… 18
2.2 . Modèle géométrique inverse (MGI)…… 20
3. Modélisation dynamique …… 21
4. Mise du modèle dynamique sous forme d'état……. 24
5. Conclusion……. 24

Chapitre III : Commande de bras manipulateur de type SCARA

1. Introduction…….... 26
2. Principe de la technique de linéarisation au sens des entrées-sorties ……... 26
2.1. Dérivée de lie ……... 27
2.2. Technique de la commande non linéaire …… 28
2.3. Conception du nouveau vecteur de commande v ……... 29
3. Commande non linéaire du bras manipulateur ……. 30
3.1. Choix des sorties …… 30
3.2 . Linéarisation entrée/sortie……... 31
3.3. Degré relatif…….. 31
3.4. Transformation difféomorphisme ……... 32
3.5. Loi de commande non linéaire……. 32
3.6. Elaboration de la loi de commande externe……. 33
4. Résultats de simulation numérique……... 34
5. Conclusion …… 38
CONCLUSION GENERALE……... VII
BIBLIOGRAPHIE
ANNEXE

AFNOR : L'association Française de Normalisation

SMA : Structure Mécanique Articulée

P : Liaison prismatique

R : Liaison rotoïde

OT : Organe Terminal

DDL : Degrés De Libertés

DDM : Degrés De Mobilité

DDT : Degrés De libertés d'une Tâche

SCARA: Selective Compliance Arm for Robotic Assembly

JIRA: Japan Industrial Robot Association

RIA: Robot Institute of America

AFRI : Association Française de Robotique Industrielle

ISO 9946 : Organisation International de Normalisation concernant les caractéristiques des robots manipulateurs industrielles

MGD : Model Géométrique Direct

MGI : Model Géométrique Inverse

D-H: Denavit-Hertenberg

NDDL: nombre de degrés de libertés

S ($\boldsymbol{\theta i}$): Sin (θi)

C ($\boldsymbol{\theta i}$): Cos (θi)

i=1……n

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 Robot industriel ……..... 01
Figure I.2 Structure générale d'un robot manipulateur ……..... 02
Figure I.3 Structure ouverte simple ……... 03
Figure I.4 Structure arborescente……..... 03
Figure I.5 Structure fermée simple …… 03
Figure I.6 Structure fermée …… 03
Figure I.7 Structure parallèle ……. 03
Figure I.8 Liaison pivot ……..…….…….……...…… 04
Figure I.9 Articulation glissière……..... 04
Figure I.10 Architecture d'un robot ……..... 06
Figure I.11 Les éléments constituants un robot ……. 07
Figure I.12 Porteur cartésien ……..... 09
Figure I.13 Porteur cylindrique ……....…..……..……. 10
Figure I.14 Robot sphérique ……. 10
Figure I.15 Porteur SCARA ……. 11
Figure I.16 Porteur articulé …….. 11
Figure I.17 Asservissement en boucle ouverte ……. 12
Figure I.18 Asservissement en boucle fermée …….. 12
Figure I.19 Configurations de la redondance et du signe singularité …… 15

CHAPITRE II

Figure II.1 Robot SCARA (3R+T) …… 16
Figure II.2 Définition paramètre de Denavit-Hartenberg (HD)……. 17
Figure II.3 Les paramètres H-D du robot SCARA considéré …… 18

CHAPITRE III

Figure III.1 Principe de la Commande non linéaire ……... 30
Figure III.2 Système linéarisé découplé …….. 33
Figure III.3 Schéma bloc sous matlab/simulink de la loi de commande du robot manipulateur de SCARA dans l'espace opérationnel ……... 34
Figure III.4 Résultats de simulation dans l'espace opérationnel …… 35
Figure III.5Résultats de simulation dans l'espace articulaire ……..…… 35
Figure III.6 Représentation la trajectoire horizontale réelle et la trajectoire désirée de l'organe terminal dans le plan ……... 36
Figure III.7 Résultats de simulation dans l'espace opérationnel …… 37
Figure III.8 Résultats de simulation dans l'espace articulaire …….. 37
Figure III.9 Représentation la trajectoire horizontale réelle et la trajectoire désirée de l'organe terminal dans le plan avec des erreurs de modélisation ……. 38

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I .1 Différents types de poignets…… 08

Chapitre II

Tableau II .1 Des paramètres H-D…… 19

الملخص

في هذا العمل التحكم الخطى دخول- خروج يستعمل من اجل التحكم الوضعي للعضو الأخير الخاص بالربوتات الالية و الأذرع من نوع SCARA

نموذج الذراع الالى يعبر عن السلوك المناور الذي يتكون من نضام المعادلات التفاضلية اللاخطية من الدرجة الثانية مترابطة التطبيق التقني للطريقة الخطية دخول- خروج التي تتمثل في طريقة خطية تامة يسمح بتحويل نظام اللاخطي متعدد التغيرات بمتتالية النظام الخطي المنقسم بواسطة تغير المتغير و رجوع الحالة اللاخطية

بعد ذلك متابعة المصار المطلوب المتضمن للمراقب الخطي البسيط

في الأخير قمنا بتوضيح نجاح نضام القانون في المحكات العددية بدون صناعة

كلمات مفتاحيه

تشغيل scara ,نموذج تحريكي ,مسافة عملية, لاخطية , طلب خطي, توظيف بالقطب

Résumé : Dans ce travail, la commande linéarisante entrées-sorties est appliquée pour la commande de position de l'organe terminal d'un robot manipulateur de type SCARA. Le modèle dynamique décrivant le comportement du manipulateur est constitué d'un système équations différentielles non linéaires du deuxième ordre fortement couplé. L'application de la technique de linéarisation entrées-sorties, qui se présente comme une méthode de linéarisation exacte permet de transformer le système non linéaire multivariables en une série de systèmes linéaires découplés, par le moyen d'un changement de variables et d'un retour d'état non linéaire. Ensuite, le suivi des trajectoires désirées est assuré par de simples contrôleurs linéaires. Afin de mettre en évidence le succès de la loi de commande, des simulations numériques sont effectuées.

Mots clés— manipulateur SCARA, modèle dynamique, espace opérationnel, non linéaire, commande linéarisante, placement de pôles.

Abstract: In this work feedback linearization method is applied to the position control of the end effectors of SCARA robot arm model. Dynamic model of robot manipulator consists of highly non-linear coupled second-order differential equations. Applying feedback linearization technique, the non-linear MIMO plant is converted into a family of linear decoupled plants. Then we can apply linear systems control theory, which is summarized in a pole placement to ensure asymptotic tracking of reference trajectories with desired performances. Non-linear simulations on the tracking problem for a two-dimension path are performed and the results highlight the success of the designed control law.

Index Terms— SCARA, dynamic model, operational space, non linear, control, feedback linearization, pole placement.

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un organe terminal (l'outil ou l'effecteur) qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides appelés segments reliés entre eux, généralement les uns à la suite des autres où chaque solide est mobile par rapport au précédent au moyen de liaisons appelées articulations. Cette mobilité s'exprime en terme de degrés de liberté (d.d.l) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide S1 par rapport au solide qui lui est directement relié S2. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série soit fermées.

L'architecture mécanique des robots sériels est inspirée du bras humain. Ils sont constitués d'une chaîne cinématique ouverte, son mécanisme est donc composé de segments séparés par des articulations à un seul degré de liberté en rotation ou en translation.

Les robots manipulateurs de type SCARA (SelectivelyCompliantAssembly Robot Arm), figure 1, utilisent deux liaisons rotatives parallèles pour produire un mouvement dans le plan horizontal. Quand la structure est mise en charge, le premier est le deuxième axe (segments) ne produit aucun travail de levage. Le troisième axe fournit le volume de travail en translation verticale. Par l'addition d'un quatrième axe vertical, une rotation autour de l'axe z s'ajoutera pour contrôler l'orientation de l'organe terminal dans le plan horizontal. Ce type de robot ne se trouve que rarement avec plus de quatre axes. Les manipulateurs SCARA sont largement utilisés dans l'assemblage des composants et des dispositifs électroniques, et pour les assemblages mécaniques de petite et moyenne taille [5-6-7].

Mais, pour qu'un robot manipulateur puisse être exploité dans des applications industrielles, il doit être doté d'un système de commande dont les principaux rôles est de générer les trajectoires désirées que l'organe terminale doit suivre afin de réaliser une tache bien définie dans l'espace opérationnel; et de garantir le suivi de ces trajectoires de référence tout en respectant les performances fixées lors de la conception du système de commandeet en assurant la stabilité et la robustesse du système commandé.

Toutes les lois de commande peuvent être divisées en deux grandes familles, des lois de commande linéaires et non linéaires développées à base d'un modèle mathématique décrivant les différentes dynamiques du système commandé.

Dans l'industrie, La majorité des systèmes de commande utilisés sont des contrôleurs linéaires de type PID (Proportionnel-Intégral-dérivé) en raison de la simplicité de la conception et l'implémentation pratique. Mais les forts non linéarités dans le modèle dynamique des robots manipulateurs, les forts couplages entre les articulations (notamment dans le cas des faibles rapports de réduction des engrainages), et les perturbations d'origines externes ou internes (variations paramétriques) empêchent ces lois de commande linéaires de garantir les objectifs cités [5].

Dans ce projet de fin d'études, l'objectif est la commande en position d'un bras manipulateur de type SCARA par la technique de a linéarisation entrée-sortie (feedback linearization) basée sur la géométrie différentielle, qui permet par une transformation difféomorphique et un retour d'état non linéaire de découpler et linéariser le modèle mis sous forme canonique [3-4-5-6]. Le suivi des trajectoires de référence est basé sur le principe de l'imposition des pôles [5-6].

Cette technique présente l'avantage de pouvoir commander séparément chaque articulation tout en respectant le couplage et les non linéarités du modèle.

Afin d'atteindre les objectif fixés pour ce projet, le mémoire sera organisé comme suit :

Le premier chapitresera consacré pour la présentationdes notions générales de robotique :les définitions de base, critères de classification, et les caractéristiques des manipulateurs ; puis nous donnerons un aperçu sur l'architecture sur la quelle notre étude sera portée.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéressera à la modélisation dynamique du robot manipulateur SCARA considéré dans l'espace opérationnel. Pour atteindre cet objectif, on va d'abord présenter la démarche de la modélisation géométrique qui permet d'établir la relation entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel, ensuite une modélisation dynamique qui permet de définir la relation entre les couples, les accélérations et les vitesses des articulations sera développée. Enfin, le modèle dynamique du robot manipulateur dans l'espace opérationnel est obtenu par l'association du modèle dynamique dans l'espace articulaire et du modèle cinématique

La commande non linéaire du bras manipulateur fera l'objectif du troisième chapitre. Où après avoir présenté les bases théoriques de la loi de commande, l'application pour le cas du

système considéré sera détaillée. Afin de pouvoir évaluer cette technique de contrôle, les résultats des simulations numériques seront présentés et commentés à la fin du chapitre.

Enfin, une conclusion générale finalise ce mémoire, récapitulant ainsi, en gros, le travail abordé.

1. Introduction

La rousse définit un robot comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable.

L'Association Française de Normalisation (AFNOR)définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements Variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou de plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans Modification permanente du matériel. Dans ce premier chapitre, nous commençons par présenter quelques définitions de base qui sont nécessaires à la compréhension des notions de robotique [1-2-3]



Fig. I.1 . Robot industriel [2]

2. Structure générale d'un robot manipulateur

Un robot manipulateur est l'ensemble formé par : Fig. I.1**.**

Une structure mécanique qui supporte l'organe terminal à situer ;

- Des actionneurs qui servent à agir sur la structure mécanique ;
- Les capteurs divers nécessaires à la commande ;

- Le système de commande qui pilote les actionneurs du robot ;

- Un système décisionnel qui assure la fonction de raisonnement et élabore le mouvement du robot ;

- Un système de communication qui gère les messages transmis entre le système décisionnel et l'opérateur ;

La figure I.2 illustre la composition de la structure générale d'un robot manipulateur.

Dans notre travail, on s'intéressera à la structure mécanique du robot (partie Opérationnelle).

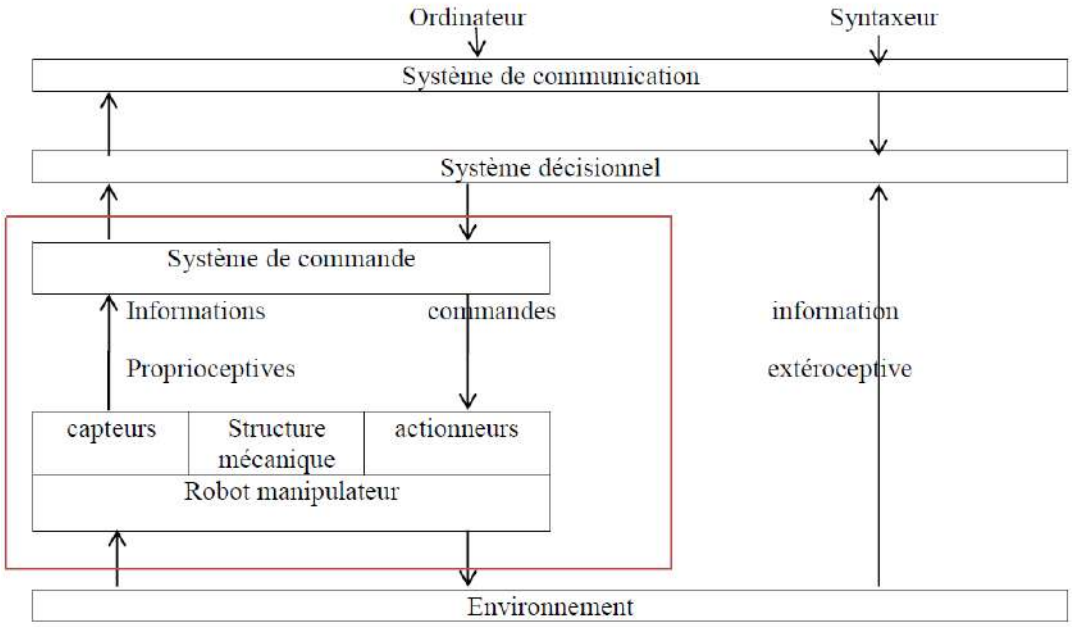


Fig. I.2. Structure générale d'un robot manipulateur [2]

3. Structure mécanique articulée(SMA) [2]

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un (ou plusieurs) organe terminal qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides reliés entre eux, généralement, les uns à la suite des autres par des liaisons usuelles ou articulations, donc chaque solide est mobile par rapport au précédent.

Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations, il existe différentes topologies de la chaîne cinématique (figures I.3 à I.7)

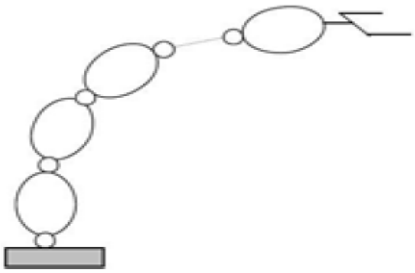


Fig. I.3. Structure ouverte simple.

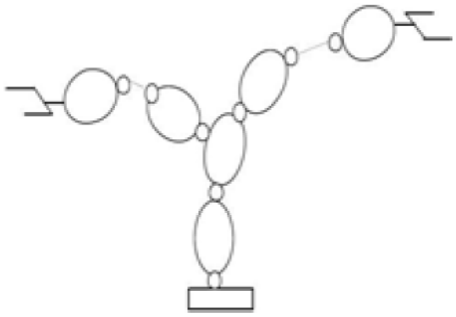


Fig. I.4. Structure arborescente.

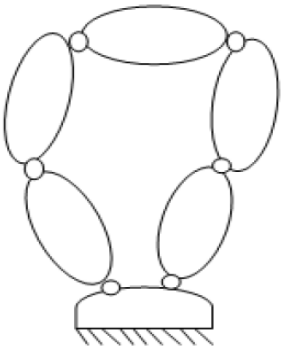


Fig. I.5 . Structure fermée simple.

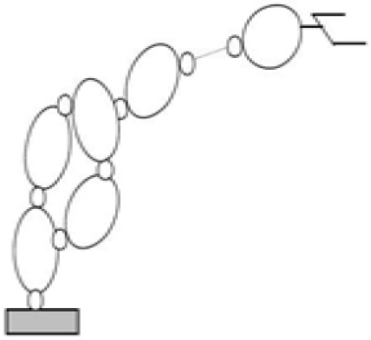


Fig. I.6. Structure fermée

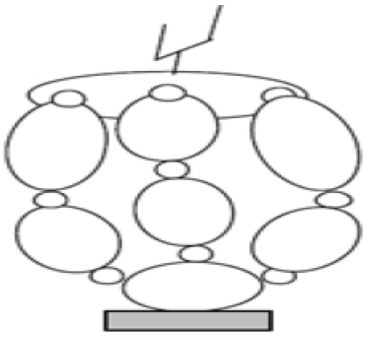


Fig. I.7 . Structure Parallèle.

Comme on le constate, les structures de robots manipulateurs étant nombreuses, on se restreint dans ce travail aux robots manipulateur à structure ouverte simple (figure I.3).

4. Architecture de robot [3]

4.1. Vocabulaire

- *La base*

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

- *Le porteur*

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé, il à pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tache (la situation d'un corps peut être définie comme la position et l'orientation d'un repère attaché à ce corps par rapport à un repère de référence). Il est constitué de :

-Segmen**t** : corps solides rigides susceptibles d'être en mouvement par rapport à la base Du porteur, et les uns par rapport aux autres,

- Articulation : Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté, de l'un par rapport à l'autre. Soit *m* le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que :

$0 \leq m \leq 6$

Lorsque m = 1, ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique.

A- *Articulation rotoïde (pivot)*

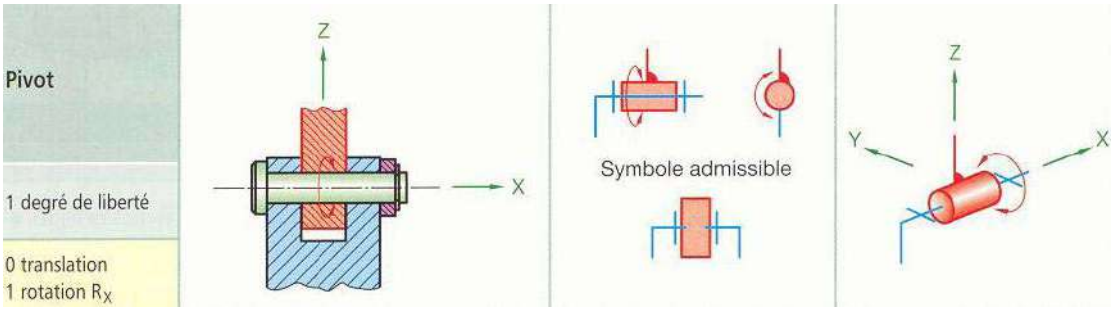


Fig. I.8 . Liaison pivot. [1-2]

B- Articulation prismatique (glissière)

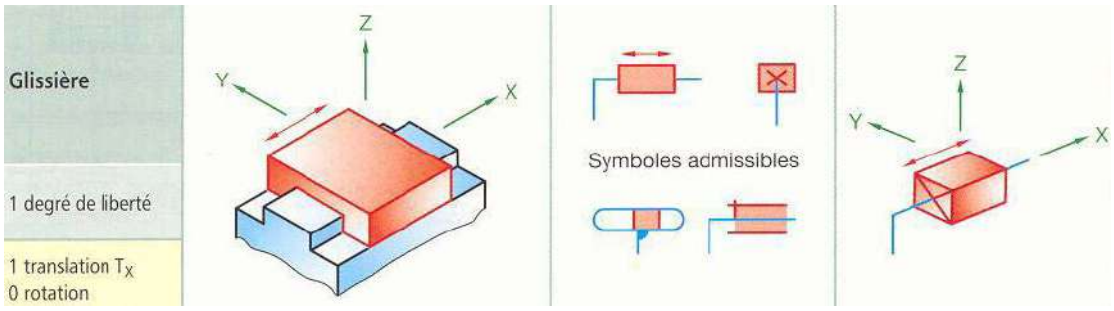


Fig. I.9. Articulation glissière. [1-2]

A noter qu'il est possible de créer des articulations ayant une mobilité **m>1** en combinant les articulations simples. Par exemple, une liaison rotule **(m=3 rotations)** est obtenue avec trois liaisons rotoïdes d'axes concourants.

4.2. L'actionneur [3-4]

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

Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique).

Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (Robots tout ou rien). Un manipulateur à cycles est une structure mécanique articulée avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air [4].

4.3. L'organe terminal

On regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, …), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, …). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique [9].

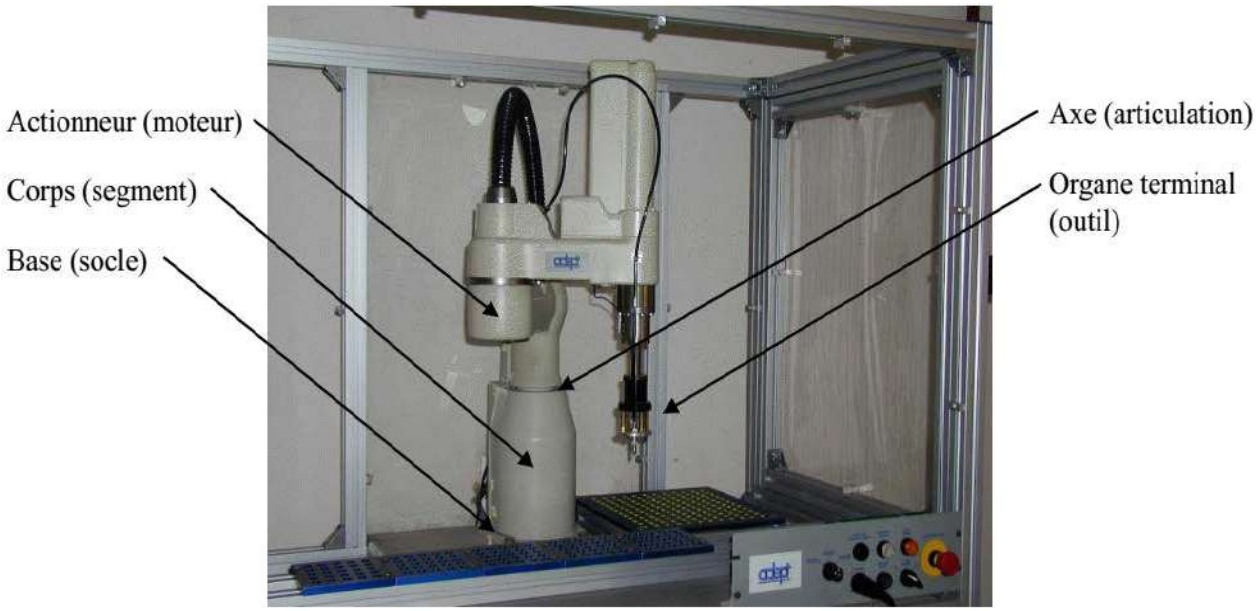


Figure. I.10. Architecture d'un robot [1-4]

5. Mobilité d'une structure mécanique articulée (SMA) [1-2]

Le positionnement d'un solide dans l'espace nécessite 6 paramètres ou mouvements indépendants. Trois paramètres indépendants définissent la position (porteur) et les trois autres déterminent l'orientation du solide (poignet). Toutefois, ce même positionnement (localisation et orientation) peut résulter de l'association d'une multitude de mouvements réels, chacun d'eux pouvant être une translation ou une rotation. Dans le cas d'un système mécanique articulé, les degrés de mobilité **(DDM)** sont liés aux nombres d'axes ou de liaisons motorisées**.** Les degrés de liberté **(DDL)** du robot sont associés au nombre de déplacements indépendants (vis-à-vis du repère fixe) que peut subir l'organe terminal. L'inégalité suivante est toujours vérifiée : **DDL ≤ DDM.**

6. Degré de liberté d'une tache

Le degré de liberté d'une tâche **(DLT)** est égal au nombre de paramètres indépendants qui permettent de fixer toutes les situations que l'organe terminal doit atteindre.

6.1. *Choix du nombre de degré de liberté d'un robot*

Pour manipuler un solide, un robot peut disposer de 6 degrés de liberté. Toutefois, si ce solide présente une symétrie de révolution, cinq degrés liberté suffisent car il n'est pas nécessaire de spécifier la rotation autour de l'axe de révolution. De même, pour situer un corps dans un plan, il suffit qu'il y ait trois degrés de liberté: deux fixent les coordonnées

d'un point du corps dans le plan et le troisième son orientation dans ce plan. A partir de ces constatations, on déduit que :

- les caractéristiques des solides manipulés par le robot, donc la classe de tâches à réaliser, permettent de déterminer le nombre de degrés de liberté dont il doit disposer.
- une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il y ait compatibilité entre le robot et la tâche réside dans le fait que le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal du robot soit supérieur ou égale à celui de la tâche **(DDL≥DLT)**, le mécanisme peut alors placer l'organe terminal dans la situation désirée.

7. Eléments constituant un robot

La structure mécanique d'un robot se distingue par quatre ensembles :

Le véhicule ;

Le porteur ;

Le poignet;

L'organe terminal**.**

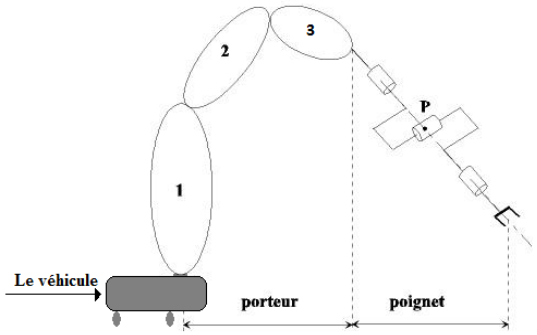


Fig. I.11 . Les éléments constituants un robot [02]

7.1. Le Véhicule

Il assure le transport de la structure mécanique vers la zone d'action. Ce sous-ensemble est inexistant sur les robots industriels à poste fixe. Néanmoins, certains robots possèdent un véhicule à six ddl (satellite, sous-marin), deux ddl (robot mobile terrestre) ou un degré de liberté (pont roulant).

7.2. Le Porteur

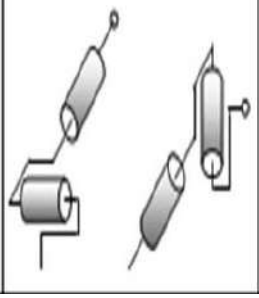
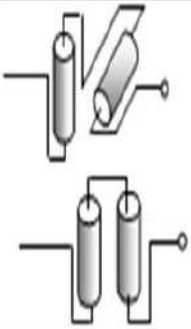
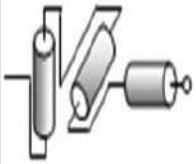
Il est constitué des degrés de liberté 1, 2, 3 à partir du bâti. Il effectue des mouvements de grande amplitude et d'approche rapide. Il présente des segments massifs pour soutenir les parties en amont de l'architecture et permet de fixer la position d'un point de l'extrémité de la structure mécanique articulée dans l'espace. L'extrémité du troisième segment permet de balayer un certain volume par déplacement de ces segments. On rencontre plusieurs types de porteurs. On les classe en 5 familles (voir §9.1)

7.3. Le poignet

Le poignet fixé à l'extrémité du porteur, qui est destiné à l'orientation de l'organe terminal (pince, outil, effecteur). Il est caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et une masse plus faible que celle du porteur.

8. Classification des poignets

Il existe plusieurs types de poignets allant de un à trois axes concourants et non concourants. Le tableau I.1 illustre les différents types de poignets.

Poignet à un axe	Poignet à 2 axes concourants	Poignet à 2 axes non concourants	Poignet à 3 axes concourants	Poignet à 3 axes non concourants
				

Tab. I.1. Différents types de poignets

9. Classification des robots

Les trois classifications les plus connues sont celles de la *JIRA*, de la *RIA* et de l'*AFRI* (voir liste des abréviations). D'après ces trois classifications, les robots manipulateurs peuvent être classés selon :

- Leur morphologie ;
- Leur type d'asservissement;
- La structure de la chaine cinématique (ouverte ou fermée) ;
- Le nombre de degrés de libertés ;
- Le niveau d'intelligence ;

- Le type de programmation (programmation par langage ou par apprentissage) ; Nous allons présenter quelque classification

9.1. Classifications selon la morphologie

C'est la classification des porteurs ou structures de base. Pour les structures ouvertes simple, on dénombre trente-six (36) morphologies possibles à 3ddl. Parmi ces architectures, douze (12) seulement sont mathématiquement différentes et non redondantes. Dans ces 12 architectures, il est possible de les classer en 5 familles : cartésien, cylindrique, sphérique, articulé et SCARA.

- *Le porteur cartésien*

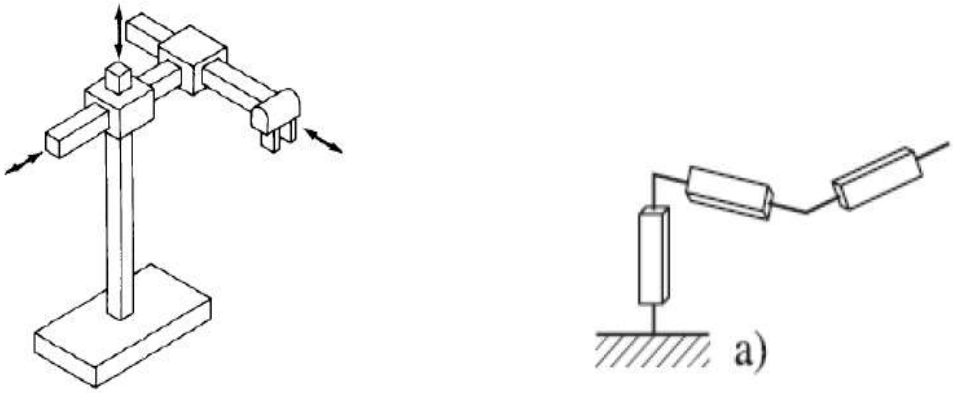


Fig. I.12. Porteur cartésien

Sa structure possède trois degrés de libertés en translations (figure I.11). C'est la plus ancienne : elle est semblable au mouvement d'une machine-outil traditionnelle comme la fraiseuse ou la rectifieuse. Son volume de travail est de type parallélépipédique et est limité par la structure du robot. Le mode de génération de mouvement est plus facile et rapide car c'est une trajectoire rectiligne.

Cette structure relativement peu utilisée, sauf dans quelques application comme : soudage par point ; palettisation; assemblage (serrage,…).

- *Le porteur cylindrique : (RPP ou PRP)*



Fig. I.13. Porteur cylindrique

Il associe une rotation et deux translations, son volume de travail est un cylindre creux (figure I.12). Le mouvement du robot fonctionne avec des à-coups (lorsque la 1ere et la dernière articulation travaillent simultanément) donc le robot perd de la précision.

Cette structure présente l'inconvénient d'offrir un volume de travail faible devant un encombrement total important. On la trouve dans l'industrie des machines, des véhicules,…..

- *Le porteur Sphérique : (RRP)*

Le porteur sphérique est constitué d'un bâti rotatif, d'une colonne verticale qui supporte un axe de rotation horizontal autour duquel peut tourner un bras à déplacement télescopique (Figure I.13).

Le Volume de travail a la forme d'une coquille sphérique et n'est pas limité à la structure de base.

Certains porteurs présentent une certaine flexibilité. L'axe horizontal leur permet d'atteindre des objets au sol, ce qui les privilèges dans le transport des charges, la manutention, les machines-outils, le domaine médicale,…



Fig. I.14. Robot sphérique [04]

- *Le porteur torique-SCARA- :(RPR)*



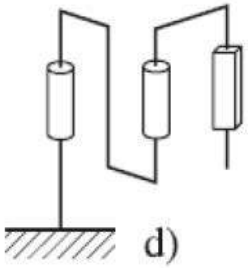
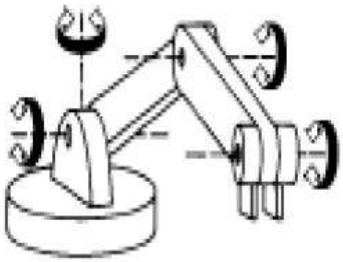


Fig. I.15. Porteur SCARA

La structure SCARA à des axes de rotation parallèles. Elle est l'une des plus utilisées et très répandue, en particulier, pour des tâches de manutention ou d'assemblage très fréquentes dans l'industrie. Généralement, on lui associe un poignet à un degré de liberté en rotation. Le volume de travail dépend du dimensionnement de la structure, soit cylindre plein ou creux.

- *Le porteur anthropomorphe-articulé- :(RRR)*



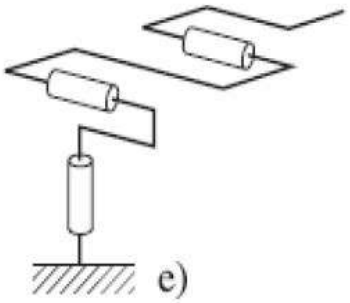


Fig.I.16. Porteur articulé

Il est muni de trois rotations, généralement une à axe vertical et deux à axes horizontaux et parallèles, pas forcément que les axes des deux premières articulations soient concourants. Les robots ayant la structure anthropomorphes sont les plus utilisés, du fait, qu'ils peuvent se programmer facilement pour différents types de tâches et disposent d'un volume de travail (sphère pleine) conséquent par rapport aux autres porteurs à dimensions égales. On les trouve dans l'assemblage, palettisation, Soudage (point par point, en arc)…

9.2. Classification en fonction de l'asservissement :

Les robots peuvent être asservis en **boucle ouverte** ou en **boucle fermée**.

Dans le premier cas, l'exécution d'un mouvement n'a aucun effet sur les commandes qui l'ont provoqué, c-à-d aucune correction n'est faite sur le déplacement et la vitesse de l'organe terminal. La grandeur d'entrée de la boucle est la tension d'alimentation et la position désirée, la grandeur de la sortie est le déplacement de l'organe terminal.



Fig. I.17. Asservissement en boucle ouverte

Concernant l'asservissement du robot en boucle fermée, on doit disposer d'un comparateur qui mesure l'écart entre la valeur de consigne et la valeur réelle, et délivre un signal correctif à un dispositif de commande qui modifie la valeur de sortie en conséquence

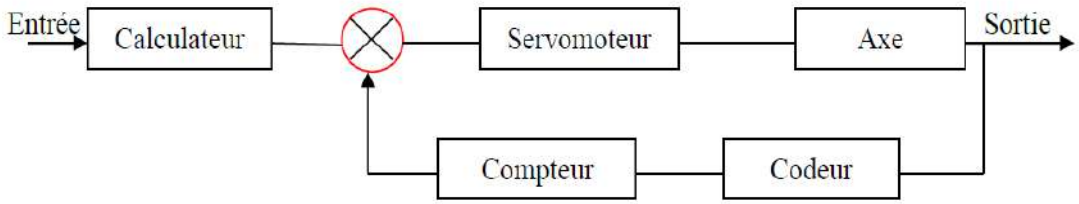


Fig. I.18. Asservissement en boucle fermé

10. Caractéristique d'un robot

Les principales caractéristiques données par la norme ISO 9946 sont :

10.1. Espace de S.M.A (volume de travail)

Est défini comme l'espace physique engendré par un point de l'organe terminal lorsque la configuration du robot évolue. Il s'exprime en unités volumiques, mais la forme de son enveloppe (qui peut-être compliquée puisque formée par la combinaison des mouvements de plusieurs articulations) est aussi importante.

On définit aussi deux types d'espace relatif au robot :

a) *Espace articulaire*

C'est celui dans lequel est représentée la situation de tous ses corps. On utilise des variables articulaires pour chaque articulation.

Dans une structure de type chaîne ouverte (simple ou arborescente) les variables articulaires sont indépendantes.

b) *Espace opérationnel*

L'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'effecteur, ou il peut être défini par le nombre de paramètres indépendants nécessaires pour décrire la situation de l'organe terminal dans l'espace.

10.2. Différentes charges

- Charge maximale : c'est la charge que peut porter le robot sans dégrader la répétabilité et les performances dynamiques. Elle est directement dépendante des actionneurs.
- Charge maximale transportable (de quelques kilos à quelques tonnes) : charge à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximale).

10.3. Répétabilité

Ce paramètre caractérise la capacité d'un robot à retourner vers un point donné (position, orientation).

La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 mm.

10.4. Exactitude

L'exactitude est l'erreur de position entre une situation réel, défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien, et le point atteint (commandé).

10.5. Fiabilité

Comme tout autre système, un robot peut subir des pannes. La fiabilité sera définie par un taux de pannes qui peut être exprimé soit par la fraction du temps durant lequel le robot ne remplit pas la fonction qui lui est assignée, soit par un MTBF (Mean Time Between Failures).

10.6. Vitesse et accélération

C'est évidemment, elles sont les caractéristiques fondamentales pour les robots industriels, puisqu'elles déterminent les temps nécessaires à l'exécution d'une tâche.

- *Vitesse :*

- les robots sont caractérisés par la vitesse maximale de translation ou de rotation de chaque axe

- Les constructeurs donnent souvent une vitesse de translation maximale de l'organe terminal.

- *Accélération :*

- Dépend fortement de l'inertie donc de la position du robot.

10.7. Architecture du S.M.A :

Le choix est guidé par la tâche à réaliser (quelle est la rigidité de la structure ?).

10.8. Masse du robot.

10.9. Coût du robot.

10.10. Maintenance.

D'autres caractéristiques doivent être prises en compte : techniques (énergie, commande, programmation ...) et commerciales (coût, maintenance...).

11. Redondance et singularités d'un manipulateur

11.1. Redondance

Un robot est redondant lorsque le nombre de DDL est inférieur aux nombres de DDM (redondance structurelle), ou lorsque le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre de degrés de libertés de l'espace articulaire (redondance vis-à-vis de la tâche).Cette propriété permet d'augmenter le volume du domaine accessible et de préserver les capacités de déplacements de l'organe terminal en présence d'obstacle. Les combinaisons d'articulations dans le champ ouvert simple donne une structure redondante :

- Plus de six articulations.
- Plus de trois articulations rotoïdes d'axes concourants.
- Plus de trois articulations rotoïdes d'axes parallèles (figure I.13.b).
- Plus de trois articulations prismatiques.
- Deux axes d'articulations prismatiques parallèles.
- Deux axes d'articulations rotoïdes confondues (figure I.13.a).

(NDDL) d'organe terminal > (NDDL) tâche

NB : (NDDL) = Nombre De Degré de Liberté.

Exemple d'une redondance vis-à-vis de la tâche :

- Meulage
- Soudage par arc ou par points
- Collage
- Assemblage électronique sur des cartes

11.2. Singularité

Pour tous les robots, qu'ils soient redondants ou non, il se peut que dans certaines configurations dites singulières, le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal soit inférieur au nombre de degrés de mobilité. Ce cas se présente par exemple lorsque :

- Deux axes d'articulations prismatiques se retrouvent parallèles.
- Deux axes d'articulations rotoïdes se trouvent confondues.

Configuration singulières :(a)et(c)Configuration redondance : (b)

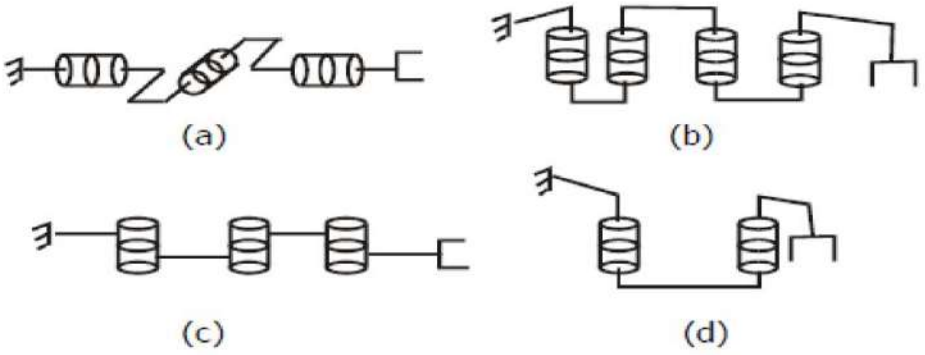


Fig. I.19 . Configurations de la redondance et de la singularité.

12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes, leurs différentes morphologies et leurs constituants.

Nous avons aussi rappelé certaines notions de base (degré de liberté, degré de mobilité, singularité, redondance, etc.…), qui sont nécessaires, pour l'étude et la modélisation des robots manipulateurs.

1. Introduction

Les robots manipulateurs de type SCARA (Selectively Compliant Assembly Robot Arm), figure 1, utilisent deux liaisons rotatives parallèles pour produire un mouvement dans le plan horizontal. Quand la structure est mise en charge, le premier est le deuxième axe (segments) ne produit aucun travail de levage. Le troisième axe fournit le volume de travail en translation verticale. Par l'addition d'un quatrième axe vertical, une rotation autour de l'axe z s'ajoutera pour contrôler l'orientation de l'organe terminal dans le plan horizontal. Ce type de robot ne se trouve que rarement avec plus de quatre axes. Les manipulateurs SCARA sont largement utilisés dans l'assemblage des composants et des dispositifs électroniques, et pour les assemblages mécaniques de petite et moyenne taille [5-6-7].

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation dynamique d'un robot manipulateur de type SCARA dans l'espace opérationnel. Pour atteindre cet objectif, on va d'abord présenter la démarche de la modélisation géométrique qui permet d'établir la relation entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel, ensuite une modélisation dynamique qui permet de définir la relation entre les couples, les accélérations et les vitesses des articulations sera développée. Enfin, le modèle dynamique du robot manipulateur dans l'espace opérationnel est obtenu par l'association du modèle dynamique dans l'espace articulaire et du modèle cinématique.

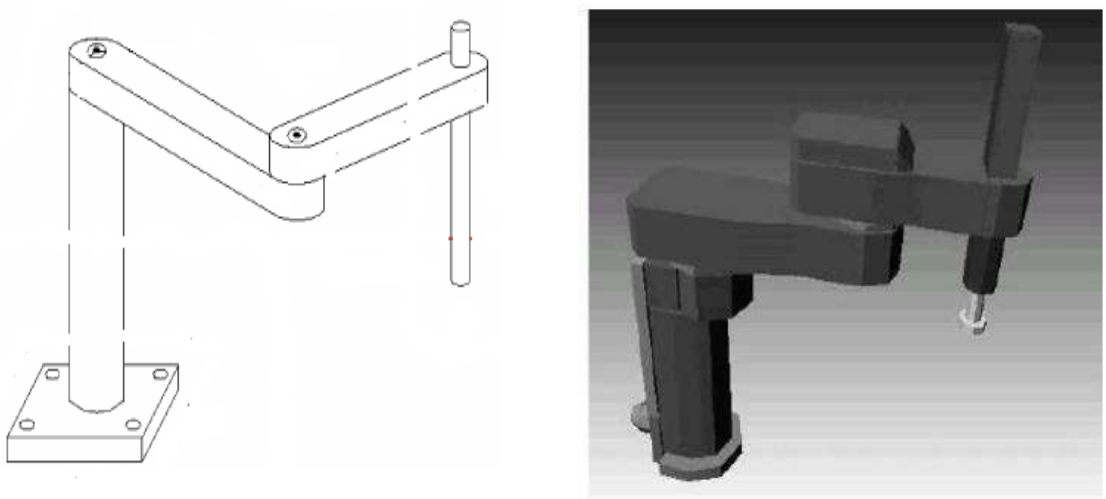


Figure II .1 *Robot SCARA (3R+T)*

2. Modélisation géométrique

Les paramètres de Denavit-Hartenberg modifié permettent de disposer d'un paramétrage des liaisons tel que les matrices de passage aient toutes la même forme littérale, ce qui facilite les calculs [8-9].

La méthode qui suit s'applique lorsque le robot correspond à une chaîne simple ouverte et que ses articulations sont rotondes, ou prismatiques (ce qui est le cas en général).

Les corps constituant le robot sont supposés parfaitement rigides et connectés par des articulations idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité).

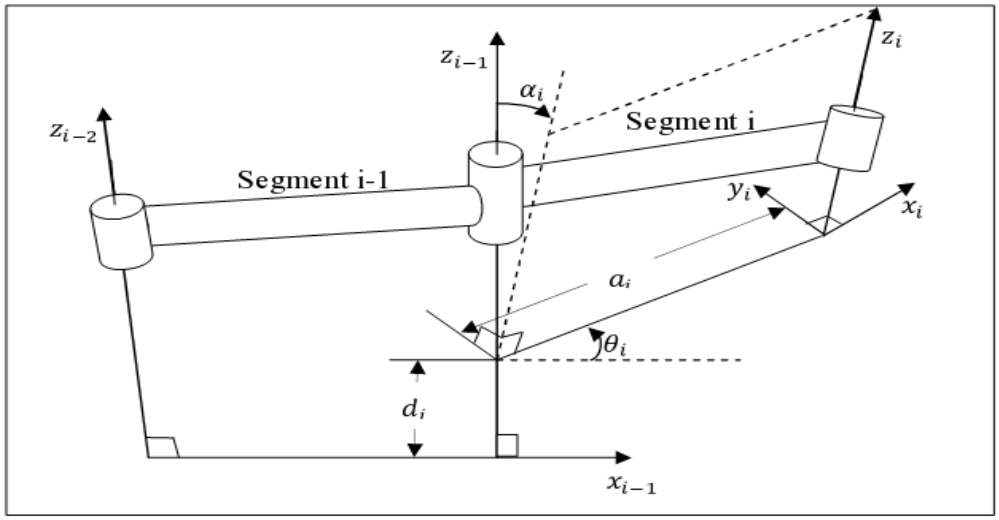


Fig. II.2: Définition paramètre de Denavit-Hartenberg (HD).

On a les paramètres de Denavit- Hartenberg (HD) qui sont pressantes par :

- d_i : reprisentes une translation de lang de l'axe Zi-1 entre les axes Xi-1 et Xi
- θ_i :reprisantes l'angle de retation auyeur del'axe Zi-1 entre les axes Xi-1 et Xi
- a_i reprisante la distance minimale entr l'axe Zi-1 et Zi misures sur Xi
- αi :reprisantes l'angle de retation auteur de l'axe Xi entre les axes Zi-1 et Z

On prend comme exemple un manipulateur a deux degres de libertéon aura pour la convontion denavit-Hartenberg les paramétre suivante :

Les paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés permettent de disposer d'un paramétrage des liaisons tel que les matrices de passage aient toutes la même forme littérale, ce qui facilite les calculs. Cette convention s'applique lorsque le robot correspond à une chaîne simple ouverte et que ses articulations sont rotoïdes, ou prismatiques (ce qui est le cas

en général). Les corps constituant le robot sont supposés parfaitement rigides et connectés par des articulations idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité)

Le repère Rj lié au corps Cj est défini de sorte que :

- L'axe Zj est porté par l'articulation j.
- L'axe Xj-1 est l'axe Xj-1 coupe l'axe Zj.
- porté par la perpendiculaire commune aux axes Zj-1 et Zj.

Si les axes Zj et Zj+1 sont parallèles ou colinéaires, le choix de Xj n'est pas unique. En général des considérations de symétrie ou de simplicité permettent un choix rationnel.

2.1. Modèle géométrique directe (MGD)

Le Modèle géométrique direct consiste à exprimer la situation de l'organe terminal(OT) en fonction des variables articulaires du robot [8-9].

On définies comme façon générale que L'étude de la géométrie directe des robots manipulateurs comprend plusieurs étapes pour arriver aux objectifs visés par cette modélisation.

Dans un premier temps on fixe les repères aux différentes parties du mécanisme, ensuite décrit les relations entre ces repères, et aussi on localise ces repères lorsque le manipulateur s'articule.

Les paramètres H-D du robot SCARA de la figure suivante [10] :

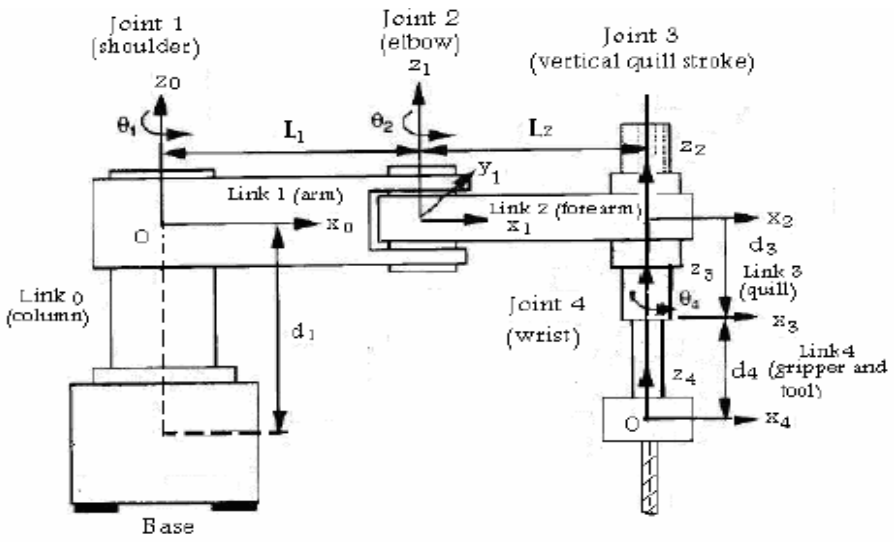


Fig. II.3: Les paramétres H-D du robot SCARA considéré.

i	θ_i	d_i	li	α_i
1	θ_1	d_1	*l1*	*0*
2	θ_2	d_2	*l2*	*180*
3	*0*	d_3	*0*	*0*
4	θ_4	*0*	*0*	*0*

Tab. II.1 Le tablau des paramétre H-D

La matrice de transformation donnes par :

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} & -S_{\theta 1} & 0 & l_1 C_{\theta 1} \\ S_{\theta 1} & C_{\theta 1} & 0 & l_1 S_{\theta 1} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.1)}$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & S_{\theta 2} & 0 & l_2 C_{\theta 2} \\ S_{\theta 2} & -C_{\theta 2} & 0 & l_2 S_{\theta 2} \\ 0 & 0 & -1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.2)}$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.3)}$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} C_{\theta 4} & -S_{\theta 4} & 0 & 0 \\ S_{\theta 4} & C_{\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.4)}$$

$$T_0^3 = T_0^1\, T_1^2\, T_2^3$$

$$= \begin{bmatrix} C_{\theta 1}C_{\theta 2} - S_{\theta 1}S_{\theta 2} & -C_{\theta 1}S_{\theta 1} - S_{\theta 1}C_{\theta 2} & 0 & l_2(C_{\theta 1}C_{\theta 2} - S_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1 C_{\theta 1} \\ S_{\theta 1}C_{\theta 2} + C_{\theta 1}S_{\theta 2} & -S_{\theta 1}S_{\theta 2} + C_{\theta 1}C_{\theta 1} & 0 & l_2(S_{\theta 1}C_{\theta 2} + C_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1 S_{\theta 1} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

Les coordonnées de l'organe terminal dans le repaire $(x_0,\ y_0, z_0)$ fixé à la base, sont données par les trois premières lignes de la quatrième colonne de T_0^4 :

$$\begin{bmatrix} P_x^0 \\ P_y^0 \\ P_z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_0^1\, T_1^2\, T_2^3\, T_3^4 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

on a donc la résulta suivante :

$$\begin{cases} P_x^0 = l_2(C_{\theta 1}C_{\theta 2} - S_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1C_{\theta 1} \\ P_y^0 = l_2(S_{\theta 1}C_{\theta 2} + C_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1S_{\theta 1} \\ P_z^0 = d_1 + d_2 - d_3 \end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

2.2. Modèle géométrique inverse (MGI)

Bien que le modèle cinématique directe établisse la relation entre l'espace articulaire et l'espace opérationnel, le modèle cinématique inverse déterminer tous les ensembles possibles des variables articulaires qui finiront par ramener l'effecteur à une positions et une orientations voulu dans l'espace opérationnel cartésien [8-9-10-11]. Basé sur la figure II.3, les équations cinématiques inverses du Robot SCARA sont calculées comme suit:

$$P_x^0 = l_2(C_{\theta 1}C_{\theta 2} - S_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1C_{\theta 1} \quad \text{(II.7)}$$

$$P_y^0 = l_2(S_{\theta 1}C_{\theta 2} + C_{\theta 1}S_{\theta 2}) + l_1S_{\theta 1} \quad \text{(II.8)}$$

$$P_z^0 = d_1 + d_2 - d_3 \quad \text{(II.9)}$$

De (II.7) et (II.8) :

$$P_x^{0\,2} + P_y^{0\,2} = l_1^2 + l_2^2 + 2\,l_1\,l_2C_{\theta 2}$$

Alors :

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{P_x^{0\,2} + P_y^{0\,2} - l_1^2 - l_2^2}{2\,l_1\,l_2}\right) \quad \text{(II.10)}$$

De l'équation (II.8) :

$$P_x^0 = C_{\theta 1}(\,l_1 + l_2C_{\theta 2}) - S_{\theta 1}(l_2C_{\theta 2}) \quad \text{(II.11)}$$

De l'équation (II.9) :

$$P_y^0 = S_{\theta 1}(\,l_1 + l_2C_{\theta 2}) - C_{\theta 1}(l_2C_{\theta 2}) \quad \text{(II.12)}$$

Réarrangeant (II.9) :

(II.13)

$$S_{\theta 1} = \frac{P_y^0 - C_{\theta 1}(\, l_2 C_{\theta 2})}{(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2})}$$

En substituant (II.13) dans l'équation (II.11) et réarrangeant les termes :

$$C_{\theta 1} = \frac{P_x^0(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2}) + P_y^0(\, l_2 C_{\theta 2})}{l_1^2 + l_2^2 + 2\, l_1\, l_2 C_{\theta 2}} \qquad \text{(II.14)}$$

En substituant (II.14) dans l'équation (II.12) et réarrangeant les termes :

$$S_{\theta 1} = \frac{P_y^0(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2}) - P_x^0(\, l_2 C_{\theta 2})}{l_1^2 + l_2^2 + 2\, l_1\, l_2 C_{\theta 2}} \qquad \text{(II.15)}$$

Alors de (II.14) et (II.15) :

$$\tan\theta_1 = \frac{P_y^0(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2}) - P_x^0(\, l_2 C_{\theta 2})}{P_x^0(\, l_1 + l_2 C_{\theta 2}) + P_y^0(\, l_2 C_{\theta 2})} \qquad \text{(II.16)}$$

$$\theta_1 \; = \tan^{-1}\left(\frac{P_y^0(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2}) - P_x^0(\, l_2 C_{\theta 2})}{P_x^0(\, l_1 + \, l_2 C_{\theta 2}) + P_y^0(\, l_2 C_{\theta 2})}\right) \qquad \text{(II.17)}$$

3. modélisation dynamique

Les équations de la dynamique des deux premières articulations mécaniquement couplées sont obtenues en utilisant les Équations de Lagrange comme décrites dans [5-10]. Les équations de mouvement du système comprennent deux équations différentielles ordinaires (ODE) non linéaires et fortement couplées. Les deux coordonnées généralisées sont définies comme θ_1 et θ_2 :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \; pour \; i = 1{,}2 \qquad \text{(II.18)}$$

Où L est le Lagrangien ($L = T\text{-}V$) qui représente la différence entre l'énergie cinétique et potentielle du système. Q_i représentent les couples généralisées agissant sur les deux articulations, et q_i est la coordonnée généralisée.

L'énergie cinétique de chaque liaison peut être exprimée comme:

(II.19)

$$T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

Où v est la vitesse linéaire, ω est la vitesse angulaire, m est la masse de point au centre de la masse et *I* est le moment d'inertie du corps rigide en son centre de masse.

Pour la liaison 1 :

$$T_1 = \frac{1}{2}m_1\left(\frac{1}{2}\,a_1\dot{\theta}_1\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{12}m_1a_1^2\right)\omega_1^2 = \frac{1}{8}m_1\,{a_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + \frac{1}{24}m_1a_1^2{\dot{\theta}_1}^2 = \frac{1}{2}m_1a_1^2{\dot{\theta}_1}^2$$

$U_1 = 0$ (Il n'ya pas de changement de hauteur)

$$L_1 = \frac{1}{2}m_1a_1^2{\dot{\theta}_1}^2 \qquad \text{(II.20)}$$

Pour la liaison 1 : des équations (II.7) et (II.8), les coordonnées des positions cartésiennes P_{x2}^0 et P_{y2}^0du centre de masse de la liaison sont les suivants:

$$P_{x2}^0 = a_1C_1 + \frac{1}{2}a_2C_{12}$$

$$P_{y2}^0 = a_1S_1 + \frac{1}{2}a_2S_{12}$$

Alors :

$$\dot{P}_{x2}^0 = -a_1S_1\dot{\theta}_1 - \frac{1}{2}a_2S_{12}\dot{\theta}_{12} \qquad \text{(II.21)}$$

$$\dot{P}_{y2}^0 = -a_1C_1\dot{\theta}_1 + \tfrac{1}{2}a_2C_{12}\dot{\theta}_{12} \qquad \text{(II.22)}$$

De cette équation le carré de la vitesse v_2 de la deuxième liaison :

$$v_2^2 = {\dot{P}_{x2}^0}^2 + {\dot{P}_{y2}^0}^2 = {a_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + \tfrac{1}{4}{a_2}^2{\dot{\theta}_{12}}^2 + a_1a_2C_2S_{12}\left({\dot{\theta}_1}^2 + \dot{\theta}_{12}\right) \qquad \text{(II.23)}$$

Alors l'énergie cinétique est :

$$T_2 = \frac{1}{2}m_2\left({a_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + \frac{1}{4}{a_2}^2{\dot{\theta}_{12}}^2 + a_1a_2C_2S_{12}\left({\dot{\theta}_1}^2 + \dot{\theta}_{12}\right)\right) + \frac{1}{24}m_2a_2^2{\dot{\theta}_{12}}^2$$

$U_2 = 0$ (Il n'ya pas de changement de hauteur)

$$L_2 = \frac{1}{2}m_2\left({a_1}^2{\dot{\theta}_1}^2 + \frac{1}{4}{a_2}^2{\dot{\theta}_{12}}^2 + a_1a_2C_2S_{12}\left({\dot{\theta}_1}^2 + \dot{\theta}_{12}\right)\right) + \frac{1}{24}m_2a_2^2{\dot{\theta}_{12}}^2 \quad \text{(II.24)}$$

Le Lagrangien global du manipulateur SCARA est définit comme :

$$L = T - U = T_1 + T_2 \quad \text{(II.25)}$$

L'application de l'équation permet de définir le modèle dynamique :

$$\left[\left(\frac{1}{3}m_1 + m_2\right)a_1^2 + \frac{1}{3}m_2a_2^2 + m_2a_1a_2C_2\right]\ddot{\theta}_1 + m_2\left(\frac{1}{3}a_2^2 + \frac{1}{2}a_1a_2C_2\right)\ddot{\theta}_2 - m_2a_1a_2S_2\left(\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\right) - \frac{1}{2}m_2a_1a_2S_2\left({\dot{\theta}_2}^2\right) = T_1 \quad \text{(II.26)}$$

$$m_2\left(\frac{1}{3}a_2^2 + \frac{1}{2}a_1a_2C_2\right)\ddot{\theta}_1 + \frac{1}{3}m_2a_2^2\ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_2a_1a_2S_2\left({\dot{\theta}_1}^2\right) = T_2 \quad \text{(II.27)}$$

Etant donné que le robot manipulateur est actionné au moyen de moteurs à courant continu à aimants permanents, et du fait que la dynamique électrique qui est beaucoup plus rapide que la dynamique mécanique ; l'inductance entre les armatures de l'induit peut être négligée [10] ($\boldsymbol{L_a \approx 0}$).

Alors l'expression du courant et du couple des deux moteur à courant continu sont donnés par :

$$\boldsymbol{I_{a1} = \frac{V_{a1} - K_e\dot{\theta}_1}{R_a}},\ \boldsymbol{I_{a2} = \frac{V_{a2} - K_e\dot{\theta}_2}{R_a}}$$

$$cem_1 = K_TI_{a\mathbf{1}} = K_T\frac{V_{a\mathbf{1}} - K_e\dot{\theta}_1}{R_a} \quad \text{(II.28)}$$

$$cem_2 = K_TI_{a\mathbf{2}} = K_T\frac{V_{a\mathbf{2}} - K_e\dot{\theta}_2}{R_a} \quad \text{(II.29)}$$

Avec :

$i_{a1},\ i_{a2}$: Le courant de l'induit des deux actionneurs.

$V_{a1,}V_{a2}$: La tension d'alimentation des deux actionneurs.

R_a : La résistance de l'induit.

K_e : La constante de la force contre-électromotrice.

K_T : La constante du couple électromagnétique.

Cem : couple électromagnétique.

Le modèle dynamique du robot SCARA donné par le système d'équations (II.26), (II.27), (II.28), et (II.29), peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$M(\theta).\ddot{\theta} + h(\theta,\dot{\theta}) = K.V_a \quad \text{(II.30)}$$

Où :

$V_a = [V_{a1}\, V_{a2}]^T$

$\theta = [\theta_1\, \theta_2]^T$

$K = \dfrac{K_T K_e}{R_a}$

$M(\theta)$Est la matrice d'inertie dont les éléments sont :

$M_{11} = \left(\dfrac{1}{3}m_1 + m_2\right)a_1^2 + \dfrac{1}{3}m_2 a_2^2 + m_2 a_1 a_2 cos\theta_2$

$M_{12} = m_2\left(\dfrac{1}{3}a_2^2 + \dfrac{1}{2}a_1 a_2 cos\theta_2\right)$

$M_{21} = m_2\left(\dfrac{1}{3}a_2^2 + \dfrac{1}{2}a_1 a_2 cos\theta_2\right)$

$M_{22} = \dfrac{1}{3}m_2 a_2^2$

Les éléments du vecteur $h(\theta,\dot{\theta})$ sont donnés par :

$h_1 = -m_2 a_1 a_2 sin\theta_2(\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) - \dfrac{1}{2}m_2 a_1 a_2 sin\theta_2\left(\dot{\theta}_2{}^2\right) + KK_e\dot{\theta}_1$

$h_2 = \dfrac{1}{2}m_2 a_1 a_2 sin\theta_2\left(\dot{\theta}_1{}^2\right) + KK_e\dot{\theta}_2$

4. Mise du modèle dynamique sous forme d'état

Le modèle dynamique donné par l'équation (II.30) peut être mis sous la forme d'état :

(II.31)

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x).U \\ y = [x_1\ x_2]^T \end{cases}$$

Avec :

$$x^T = [x_1\ x_2\ x_3\ x_4]^T = [q^T \dot{q}^T]^T$$

x: Le nouveau vecteur d'état de dimensions 4x1.

$$U = [u_1 u_2]^T = V_a$$

U : Le vecteur de commande de dimensions 2x1

$$F(x) = [f_1(x) f_2(x) f_3(x) f_4(x)]^T = [x_3\ x_4\ (-M^{-1}(x).h(x))^T]^T$$

$F(x)$: Vecteur de dimensions 4x1.

$$G(x) = [O_{2\times2}^T (M^{-1}(x).K)^T]^T$$

$G(x)$: Matrice de dimensions 4x2.

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous présenté en détails la modélisation dynamique du robot manipulateur SCARA considéré dans l'espace des coordonnées opérationnelles. Nous avons d'abord présenté la modélisation géométrique qui décrit la loi algébrique qui permet le passage de l'espace articulaire vers l'espace opérationnel (MGD) et l'inverse (MG.I). Ensuite le modèle dynamique du robot qui définit la relation entre les déplacements, les vitesses et les accélérations des articulations est déduit ainsi nous sommes arrivé sa non linéaire fortement couplé que nous l'avons mis sous forme d'état plus adaptée pour faire des simulations. Dans le chapitre suivant nous allons étudier la commande linéarisante du bras manipulateur présenté dans ce chapitre.

1. Introduction

La conception d'un contrôleur donné dépend de la nature du système lui même et de la qualité des performances exigées. L'intérêt constant d'améliorer les performances des systèmes commandés conduit à des modélisations de plus en plus précises. Les modèles résultants sont souvent non linéaires et les outils fondamentaux de synthèse de lois de commande dans le domaine linéaire deviennent insuffisants. Il peut donc être nécessaire d'avoir recours à de nouvelles méthodes. Plusieurs techniques de synthèses des régulateurs sont disponibles et chacune d'elles dépend du degré des non linéarités et de l'ordre du système considéré.

Dans ce mémoire, l'objectif est la commande en position d'un bras manipulateur de type SCARA par la technique de a linéarisation entrée-sortie basée sur la géométrie différentielle, qui permet par une transformation difféomorphique et un retour d'état non linéaire de découpler et linéariser le modèle mis sous forme canonique [12-13-14-15]. Le suivi des trajectoires de référence est basé sur le principe de l'imposition des pôles [16-17-18-19-20].

Cette technique présente l'avantage de pouvoir commander séparément chaque articulation tout en respectant le couplage et les non linéarités du modèle.

2. Principe de la technique de linéarisation au sens des entrées-sorties

Le concept de la linéarisation au sens des entrées-sorties est maintenant très connu, plusieurs références décrivant la manière de l'appliquer sont disponibles. Nous allons montrer comment obtenir une relation linéaire entre la sortie *y* et une nouvelle entrée *v*, en effectuant un bon choix de la loi de linéarisation. Le modèle équivalent étant linéaire, on peut lui imposer une dynamique stable en se basant sur les méthodes linéaires classiques [18].

Soit un système d'ordre n, multi-entrées et multi-sorties, décrit par la représentation d'état non linéaire suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x).u \\ y &= h(x) \end{aligned} \qquad \text{(III.1)}$$

Avec :

u: Vecteur de commande (d'entrée).

f(x), *g(x)* : Champs de vecteurs.

h(x) : Vecteur de sortie.

Les éléments des champs vectoriels *f*, *g* et *h* sont des fonctions lisses (différentiables).

Si l'on considère le cas des systèmes avec *m* entrées et *m* sorties, en cherche un bouclage statique de la forme $u = \alpha(x) + \beta(x)v$, tel que le comportement entrée-sortie du système (III.1) après bouclage soit linéaire et découplé. Ainsi on obtient un ensemble de *m* sous système mono entrée mono sotie indépendants où les entrées du sous système *i* n'affectent pas la sortie y_j et réciproquement.

Avec:

v: Nouvelle variable de commande du système linéaire ;

α: Matrice non singulière de dimension m×m ;

β : Vecteur de dimension m×1.

La nouvelle commande permet de ramener le comportement entrée-sortie du système, défini par l'équation (III.1) à celui d'un système linéaire, par différentiation des sorties $y_i$du système jusqu'à l'apparition des anciennes commande u_i en utilisant la dérivée de Lie.

2.1. Dérivée de Lie

Etant donnée la fonction scalaire continue $h_i(x)$ défini de $\Re^n \rightarrow \Re$ et un champ de vecteur $f(x)$ continu défini de $\Re^n \rightarrow \Re^n$ le dérivé de *Lie* de $h_i(x)$ selon la direction du champ vectoriel $f(x)$ est défini comme suit [12-13-15]:

$$L_f h_i(x) = \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} . f(x) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial h_i(x)}{\partial x_i} . f_i(x) \tag{III.2}$$

La dérivée de *Lie* d'ordre *k* est :

$$L_f^k h_i(x) = L_f\left(L_f^{k-1} h_i(x)\right) = \frac{\partial\left(L_f^{k-1} h_i(x)\right)}{\partial x} f(x) \tag{III.3}$$

De la même manière, si g est un autre champ vectoriel, la fonction scalaire $L_g\, L_f h_i(x)$ est donnée par :

$$L_g\, L_f\, h_i(x) = \frac{\partial\left(L_f\, h_i(x)\right)}{\partial x} g(x) \tag{III.4}$$

2.2. Technique de la commande non linéaire

L'application de la dérivée de *Lie* à la sortie y_j du système (III.1), donne la première dérivée comme :

$$\dot{y}_j = L_f h_j + \sum_{i=1}^{m} L_{g_i} h_j u_i \tag{III.5}$$

Lorsque la première dérivée de *yj* ne dépend d'aucune entrée, alors $L_{g_i} h_j = 0, \forall i \in \{1, \ldots, m\}$et la commande n'apparaît pas.

On continue la dérivation de y, jusqu'à ce qu'un des coefficients de commande ne soit pas nul. On peut écrire, dans ce cas :

$$y_j^{(r_j)} = L_f^{r_j} h_j + \sum_{i=1}^{m} L_{g_i} h_j^{(r_j-1)} u_i \tag{III.6}$$

Avec :

$L_{g_i} h_j^{(r_j-1)} \neq 0 \ \forall x \in \Omega$, Ω: ensemble des états.

On appelle r_j le degré relatif de la sortie *yj*.rest défini comme étant la somme de tous les degrés relatifs obtenus à l'aide de (III.6) et doit être inférieur ou égal à l'ordre du système [16-18]:

$$r = \sum_{j=1}^{m} r_j \leq n \tag{III.7}$$

On dit que le système(III.1) a pour degré relatif (*r*) s'il vérifie:

$$L_{g_i} L_f^k h_j = 0 \; 0 < k < r_j - 1, \; 1 \leq j \leq p \;\; 1 \leq i \leq m$$

$L_{g_i} L_f^k h_j \neq 0 \qquad\qquad k = r_j - 1$

Dans le cas où le degré relatif total est égal à 1'ordre du système, on est en présence d'une linéarisation au sens des entrées-états. Si par contre le degré relatif total est strictement inférieur à l'ordre du système, la linéarisation est dite linéarisation au sens des entrées sorties [12-16-17].

Pour trouver l'expression de la loi linéarisante *u* permettant de rendre linéaire la relation linéaire entre l'entrée et la sortie, on récrit l'expression (III.6) sous forme matricielle:

$$\left[y_1^{r_1} \dots y_p^{r_p}\right]^T = \zeta(x) + D(x)u \quad \text{(III.8)}$$

Avec :

$$\zeta(x) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ \vdots \\ L_f^{r_p} h_p(x) \end{bmatrix} D(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(x) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_2-1} h_2(x) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_p-1} h_p(x) & L_{g_2} L_f^{r_p-1} h_p(x) & \dots & L_{g_p} L_f^{r_p-1} h_p(x) \end{bmatrix}$$

$D(x)$:est appelée matrice de découplage du système.

Si on suppose que $D(x)$ n'est pas singulière, la loi de commande linéarisante est donnée par :

$$u = D(x)^{-1}[-\zeta(x) + v] \quad \text{(III.9)}$$

En remplaçant (III.9) dans (III.1), le système équivalent devient linéaire et totalement découplé de la forme:

$$y_j^{(r_j)} = v_j \quad \text{(III.10)}$$

Où :

$$\left[y_1^{(r_1)} \dots y_p^{(r_p)}\right]^T = \left[v_1 \dots v_p\right]^T \quad \text{(III.11)}$$

Ce qui nous permet de lui imposer n'importe quelle dynamique avec la conception d'un nouveau vecteur d'entrée $v = \left[v_1 \dots v_p\right]^T$.

Remarquons que 1'expression (III.11) représente *p* intégrateurs en cascade[16-17-18].

2.3. Conception du nouveau vecteur de commande v

Le vecteur *v* est conçu selon les objectifs de commande. Pour le problème de poursuite envisagé, il doit satisfaire [16-17-18-19-20]:

$$v_j = y_{dj}^{(r_j)} + K_{r_j-1}\left(y_{dj}^{(r_j-1)} - y_j^{(r_j-1)}\right) + \dots + K_0\left(y_{dj} - y_j\right) \quad \text{(III.12)}$$

Où les vecteurs $\left\{y_{dj}\, y_{dj}^{(1)} \dots\dots y_{dj}^{(r_j-1)}\, y_{dj}^{(r_j)}\right\}$définissent les trajectoires de référence imposées pour les différentes sorties.

Si on remplace (III.12) dans (III.10), on arrive à la dynamique de poursuite suivante :

$$e_j^{(r_j)} + K_{r_j-1} e_j^{(r_j-1)} + \cdots K_1 \dot{e}_j + K_0 e_j = 0 \qquad \text{(III.13)}$$

Si les $K_i$sont choisis de façon à ce que le polynôme $s^{r_j} + K_{r_j-1} s^{r_j-1} + \cdots K_1 s + K_0$soit un polynôme *d'Hurwitz*(possède des racines avec des parties réelles négatives), alors on peut montrer que l'erreur $e_j(t) = y_{dj}^{(r_j-1)} - y_j^{(r_j-1)}$satisfait :

$$\lim_{t\to\infty} e_j(t) = 0$$

Le système linéarité en boucle fermée est donné par la figure III.1.

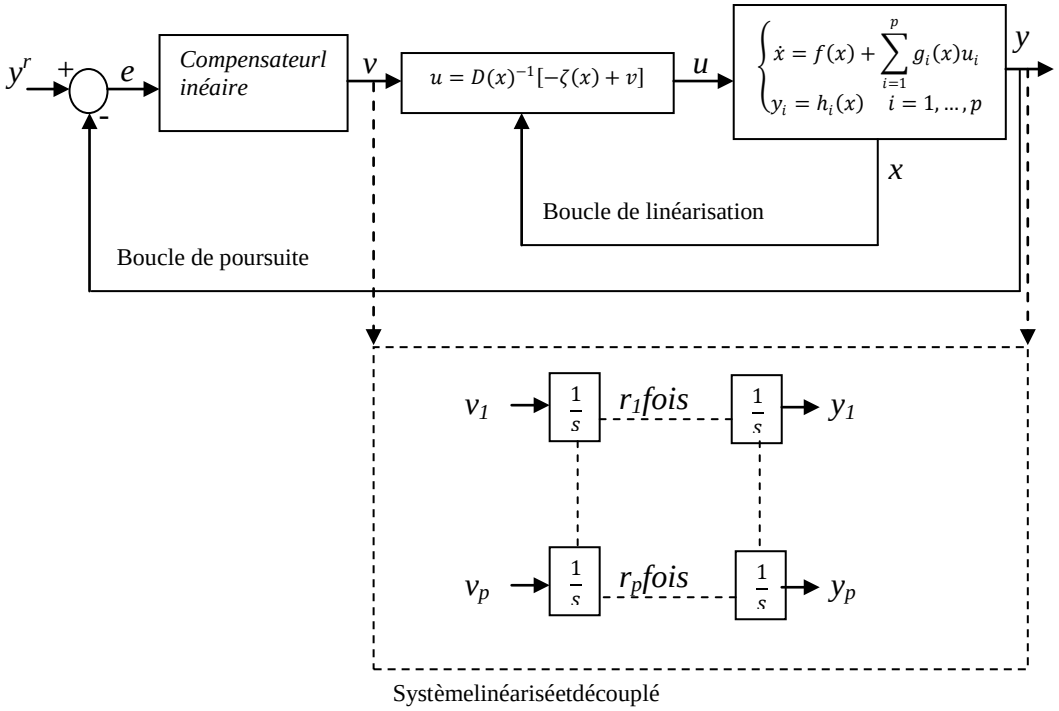


Fig. III.1. Principe de la Commande non linéaire.

3. commande non linéaire du bras manipulateur

3.1. Choix des sorties

Le choix des sorties est lié aux objectifs de commande, on choisit comme sortie x1 et x2 (les positions angulaires des deux articulations); on pose :

$$Y(x) = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 = q_1 \\ x_2 = q_2 \end{bmatrix} \qquad \text{(III.14)}$$

3.2. Linéarisation entrée/sortie

La condition permettant de vérifier si le système non linéaire admet une linéarisation E/S est la détermination du degré relatif.

3.3. Degré relatif

Le degré relatif d'une sortie est le nombre de fois qu'il faut dériver pou faire apparaître au moins un terme de commande [3-4-5-6].

$$\dot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \dot{h}_1(x) \\ \dot{h}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f h_1(x) \\ L_f h_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 = \dot{q}_1 \\ x_4 = \dot{q}_2 \end{bmatrix} \tag{III.15}$$

$$\ddot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \ddot{h}_1(x) \\ \ddot{h}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {L^2}_f h_1(x) + L_g L_f h_1(x).U \\ {L^2}_f h_2(x) + L_g L_f h_2(x).U \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{x}_3 = \ddot{q}_1 \\ \dot{x}_4 = \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = M^{-1}(x)[-V(x) + K.U] \tag{III.16}$$

L_f : La dérivée de Lie [3-4].

La relation (18) peut s'écrire sous la forme :

$$\ddot{Y}(x) = \begin{bmatrix} \ddot{h}_1(x) \\ \ddot{h}_2(x) \end{bmatrix} = A(x) + D(x).U \tag{III.17}$$

Avec :

$$A(x) = \begin{bmatrix} {L^2}_f h_1(x) \\ {L^2}_f h_2(x) \end{bmatrix} = -M^{-1}(x).V(x) \tag{III.18}$$

$$D(x) = \begin{bmatrix} L_g L_f h_1(x) \\ L_g L_f h_2(x) \end{bmatrix} = M^{-1}.K \tag{III.19}$$

Les degrés relatifs par rapport à chaque sortie q_1, $q_2$sont *r1=2, et r2=2* respectivement.

Le degré global du système *r=r1+r2=4,* est égale à l'ordre du système *n=4*. Donc le système est complètement linéarisable par un retour d'état non linéaire.

3.4. Transformation difféomorphisme

Le changement de coordonnées non linéaire nécessaire est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned} z_1 &= h_1(x) = x_1 \\ z_2 &= L_f h_1(x) = f_3(x) \\ z_3 &= h_2(x) = x_2 \\ z_4 &= L_f h_2(x) = f_4(x) \end{aligned} \tag{III.20}$$

L'application du changement de variables (III.20) au système d'équations (II.31) aboutit à l'écriture suivante :$\dot{z}_1 = z_2$

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= L^2{}_f h_1(x) + L_g L_f h_1(x).U = v_1 \\ \dot{z}_3 &= z_4 \\ \dot{z}_4 &= L^2{}_f h_2(x) + L_g L_f h_2(x).U = v_2 \end{aligned} \tag{III.21}$$

3.5. Loi de commande non linéaire

Pour avoir une linéarisation E/S complète en boucle fermée, il faut appliquer le retour d'état non linéaire :

$$U = D^{-1}(x).[V - A(x)] \tag{III.22}$$

Où $A(x)$ et $D(x)$ sont donnés par les relations (III.18) et (III.19) respectivement. Le terme $V = [v1\ v2]^T$ est la nouvelle entrée de commande.

L'application de la loi de commande (III.22) au système d'équation (III.16) aboutit au modèle linéaire découplé (III.23) schématisé par la figure 3.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= v_1 \\ \dot{z}_3 &= z_4 \\ \dot{z}_4 &= v_2 \end{aligned} \tag{III.23}$$

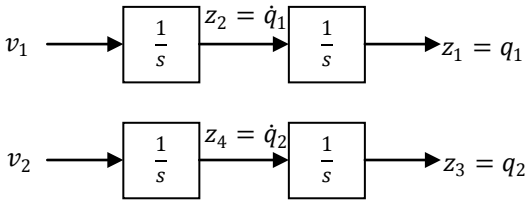


Figure. III.2. Système linéarisé découplé.

3.6. Elaboration de la loi de commande externe

Le bouclage non linéaire (III.22), nous a conduits au système linéaire découplé suivant :

$$\frac{d^2q_1}{dt^2} = v_1, \qquad \frac{d^2q_2}{dt^2} = v_2 \tag{III.24}$$

Pour que le système (II.31) arrive à poursuivre les trajectoires de référence (*q1ref*) et (*q2ref*) avec une certaine dynamique, on impose à ce système des pôles stables répondant aux performances désirées. Les entrées v1, v2 peuvent être calculées de la façon suivante [5-6]:

$$v_1 = \ddot{q}_{1ref} + K_{12}\left(\dot{q}_{1ref} - \dot{q}_1\right) + K_{11}\left(q_{1ref} - q_1\right) \tag{III.25}$$

$$v_2 = \ddot{q}_{2ref} + K_{22}\left(\dot{q}_{2ref} - \dot{q}_2\right) + K_{21}\left(q_{2ref} - q_2\right)$$

Les équations des erreurs de poursuite deviennent :

$$\ddot{e}_1 + K_{12}\dot{e}_1 + K_{11}e_1 = 0 \tag{III.26}$$

$$\ddot{e}_2 + K_{22}\dot{e}_2 + K_{21}e_2 = 0$$

Avec :

$$e_1 = \left(q_{1ref} - q_1\right)$$

$$e_2 = \left(q_{2ref} - q_2\right)$$

Si on passe dans le plan de Laplace, le système (III.26) devient:

$$s^2 + K_{12}s + K_{11} = 0 \tag{III.27}$$

$$s^2 + K_{22}s + K_{21} = 0$$

Si les coefficients K_{ij} $(i = 1,2; j = 1,2)$ sont les coefficients d'un polynôme de Hurwitz, la convergence à zéro de l'erreur de poursuite est garantie [5-6].

4. Résultats de simulation numérique

Ici la stratégie de commande proposée ci-dessus pour le robot manipulateur à deux articulations électriquement commandé est vérifiée par des simulations numériques en utilisant le logiciel Matlab / Simulink.

Les trajectoires de référence dans l'espace opérationnel sont données par les expressions :$x_{ref} = 0.075\sin(0.4\pi t)$

$$y_{ref} = 0.075\cos(0.4\pi t) - 0.325$$

Avec les conditions initiales : $q_1(0) = 0$ rad, $q_2(0) = 0$ rad, $\dot{q}_1(0) = 0$ rad et$\dot{q}_2(0) = 0$ rad.

Les paramètres du robot manipulateur :

$m_1 = 1{,}90$ kg, $m_2 = 0{,}93$ kg, $a_1 = 0{,}25$m, $a_2 = 0{,}15$m, $R_{a1} = R_{a2} = 3{,}5\ \Omega$, $K_{e1} = K_{e2} = 0{,}047$ V/rad/s, $K_{T1} = K_{T2} = 0{,}047$ Nm/A, $N_1 = 90$, $N_2 = 220$.

Dans (III.25), les coefficients K_{ij} sont :$K_{12} = K_{22} = 20$ et $K_{11} = K_{21} = 100$.

Le schéma bloc de la loi de commande du robot manipulateur SCARA dans l'espace opérationnel est donné par la figure ci-dessous

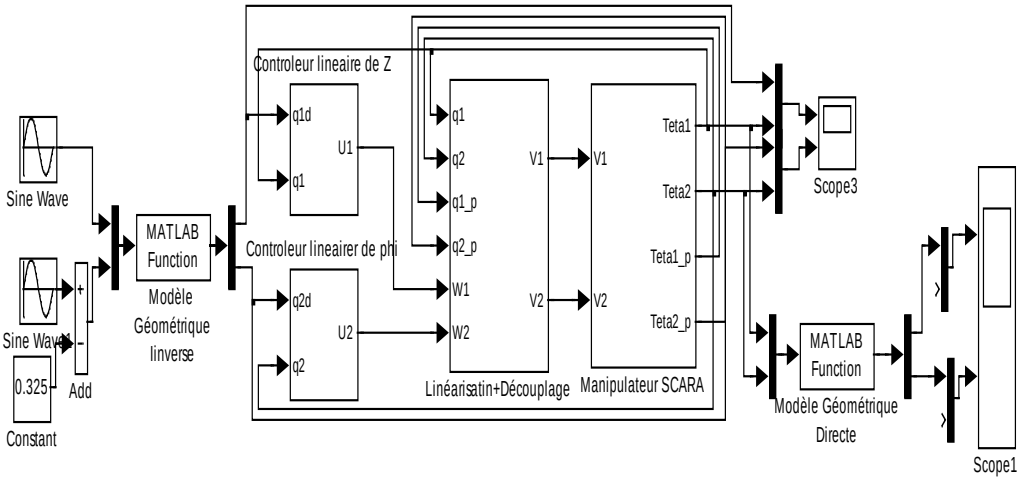
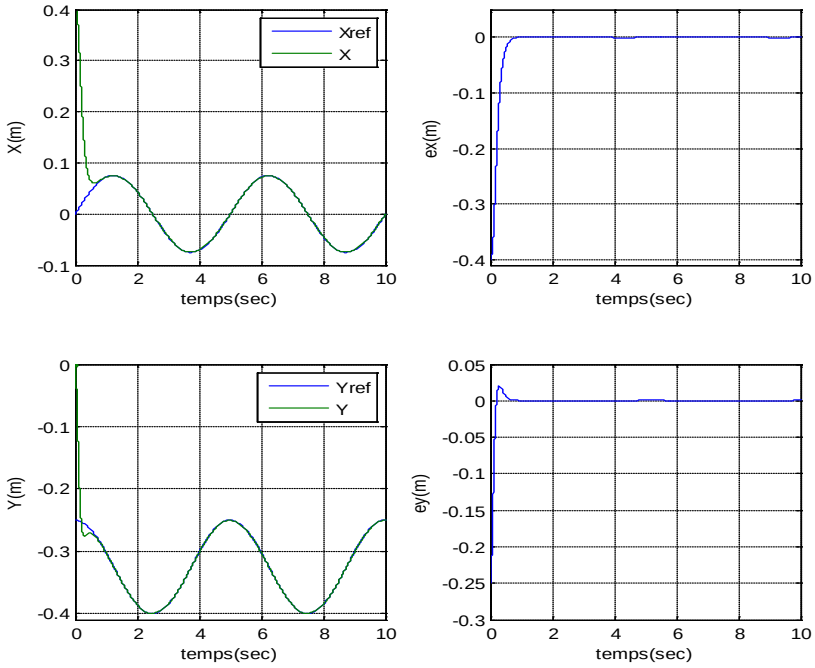
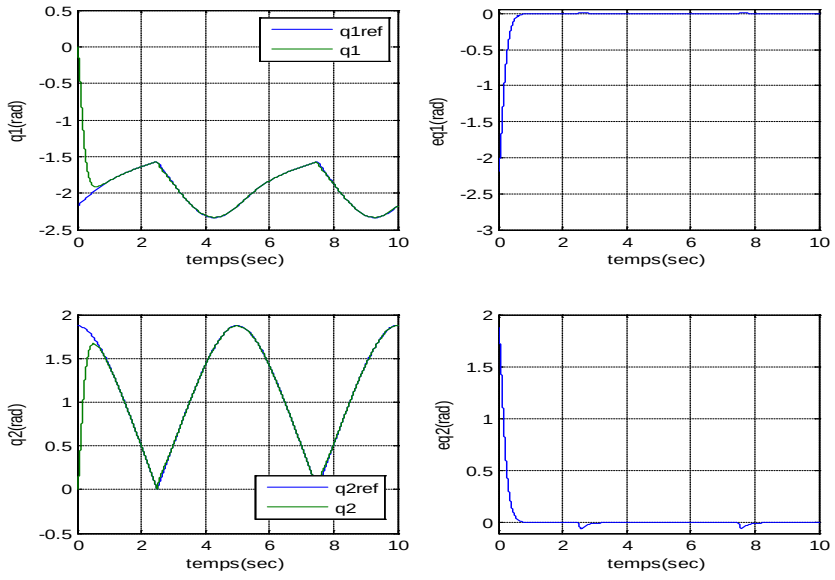


Fig. III.3.*Schéma bloc sous Matlab/Simulink de la loi de commande du robot manipulateur SCARA dans l'espace opérationnel.*



(a) *(b)*

Fig.III.4.*Résultats de simulation dans l'espace opérationnel.*
(a) Positions x, y de l'organe terminal.
(b) Erreurs de poursuite.



(a) *(b)*

Fig.III.5.*Résultats de simulation dans l'espace articulaire.*
(a) Variables articulaires q1, q2 des trois articulations du manipulateur.
(b) Erreurs de poursuite.

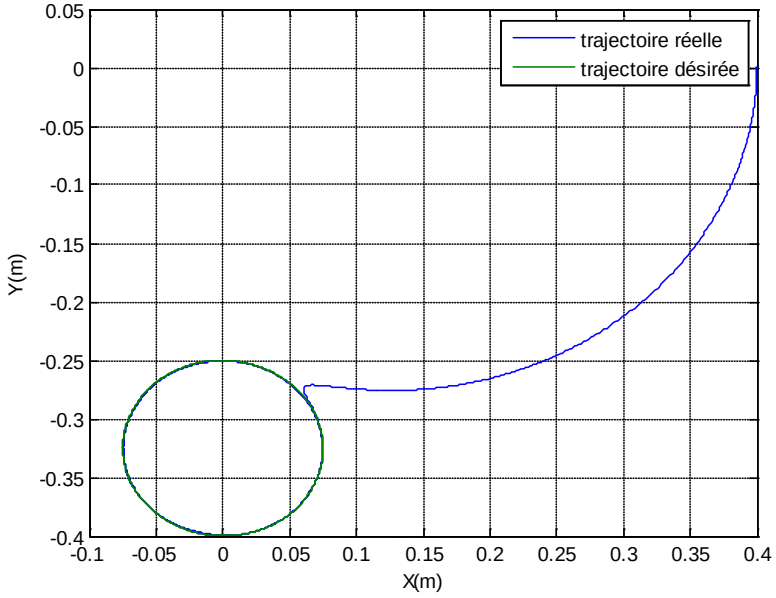


Fig.III.6.*représentation la trajectoire horizontale réelle et la trajectoire désirée de l'organe terminal dans le plan.*

Les figures III.4 et III.5 montrent les trajectoires réelles et désirées des deux articulations dans l'espace opérationnel et dans l'espace articulaire. Les trajectoires réelles et désirées sont pratiquement identiques. Alors les résultats ainsi obtenus montrent clairement que la qualité de poursuite de la boucle d'asservissement sont assez satisfaisantes avec un temps de réponse inférieur à 1 sec et des erreurs de poursuite pratiquement nulles en régime permanent pour les deux articulations. Mais pour que cette loi de commande puisse appliquée dans la réalité, elle doit avoir un caractère robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation (ou des erreurs paramétriques). Pour s'assurer de la nature robuste de la commande par mode de glissement, on propose d'introduire des erreurs da modélisation dans le modèle du manipulateur dans l'essai suivant.

Teste de robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation

Afin de s'assurer de la robustesse de la stabilité et des performances de la loi de commande linéarisante E/S, on propose dans cet essai d'introduire des erreurs de modélisation sur les matrices du modèle de l'équation (II.30) les erreurs sur les matrices sont définies comme suit :

ΔM=10% de M ; Δh=10% de h ;

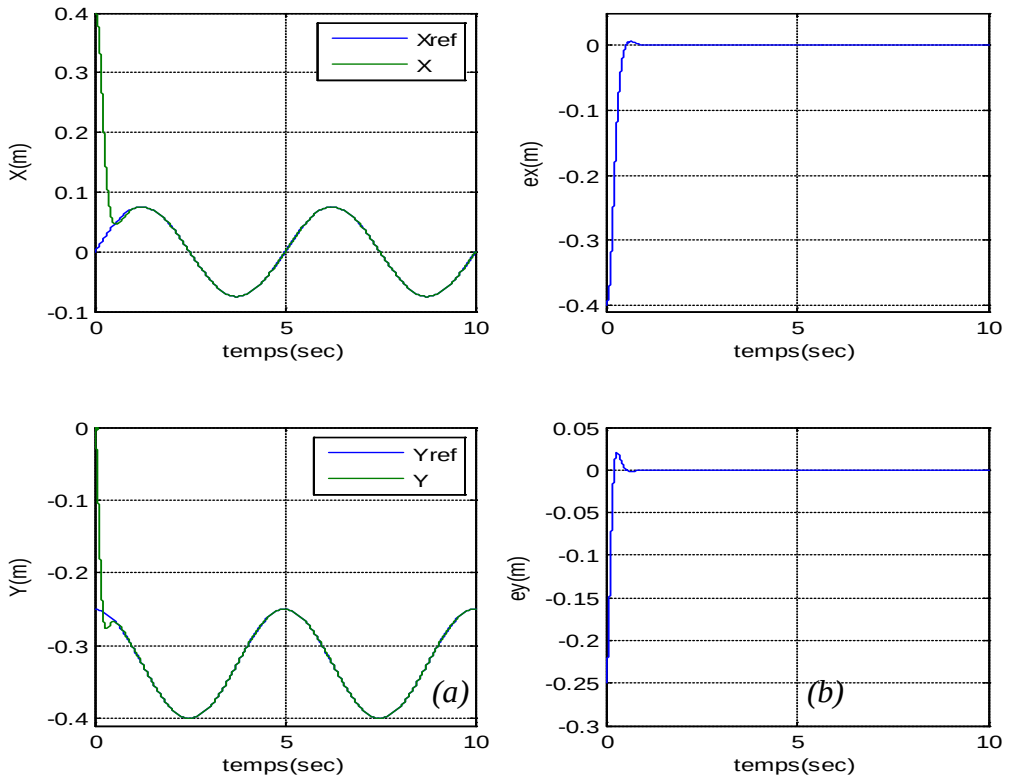


Fig.III.7.*Résultats de simulation dans l'espace opérationnel.*
(a) Positions x, y de l'organe terminal.
(b) Erreurs de poursuite.

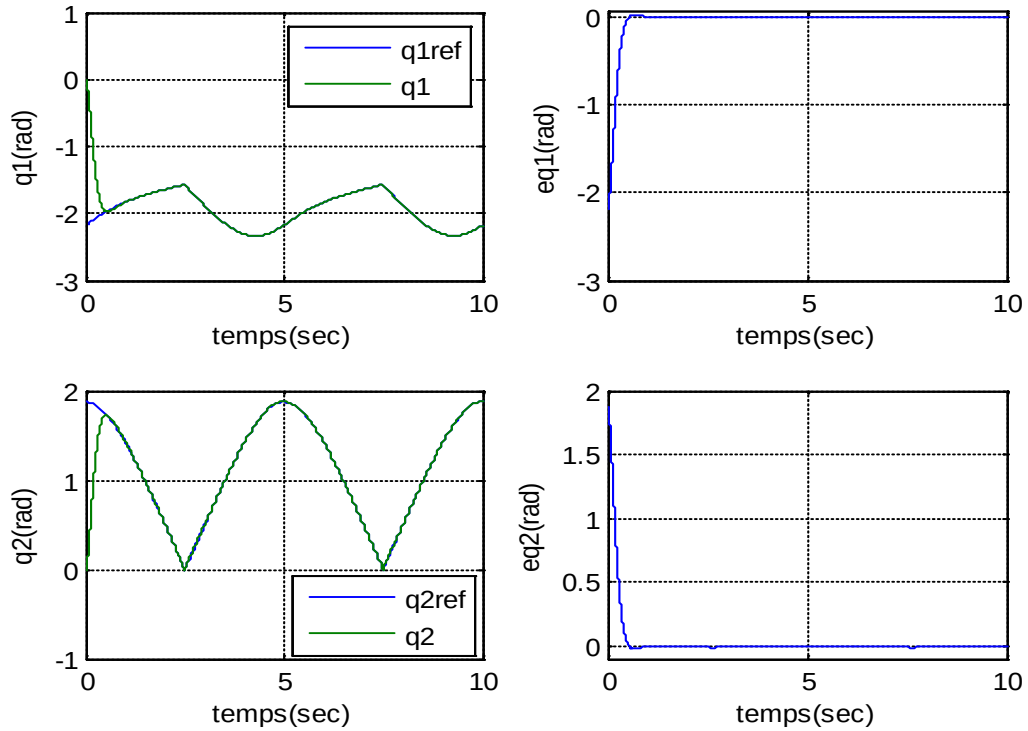


Fig.III.8.*Résultats de simulation dans l'espace articulaire.*

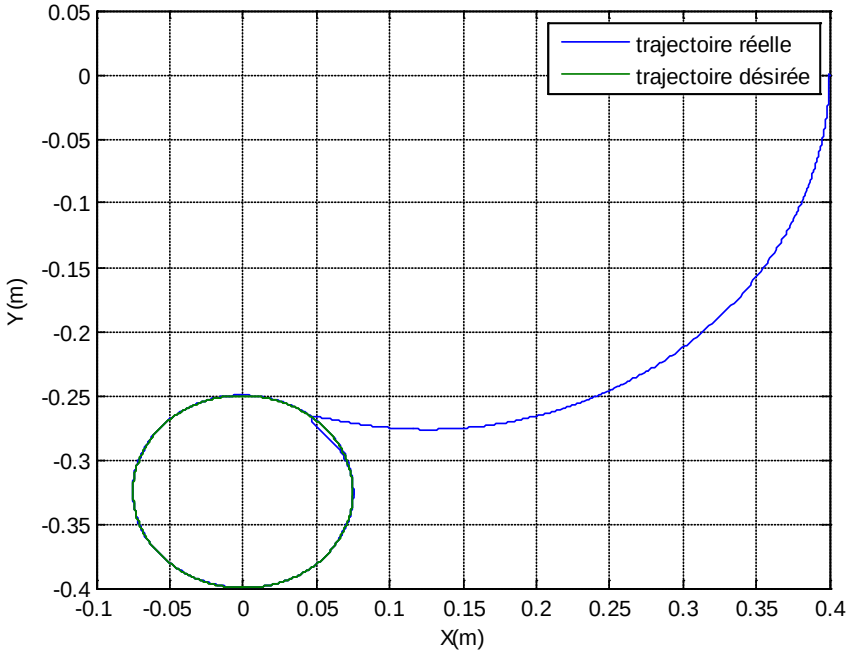


Fig.III.9. Représentation la trajectoire horizontale réelle et la trajectoire désirée de l'organe terminal dans le plan avec des erreurs de modélisation.

Les résultats ainsi obtenus montrent clairement le caractère robuste de la commande par non linéaire vis-à-vis des erreurs du modèle, ce qui augmente la possibilité de la réussite de cette loi de commande dans le cas d'une réalisation pratique sur le système réel.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, avons présenté la commande de position horizontale d'un robot manipulateur de type SCARA par la technique de linéarisation E/S du modèle. Où après avoir compenser les termes non linéaires du modèle par un retour d'état non linéaire, le contrôle de position des deux articulations est réalisé par un correcteur classique (imposition de la dynamique d'élimination de l'erreur par placement de pôles). Les performances de ce système de contrôle sont satisfaisantes du point de vue performances de poursuite et robustesse vis-à-vis des incertitudes du modèle.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude dela loi de commande linéarisante entrées-sorties applique pour le contrôle de position de l'organe terminal du bras manipulateur structure ouverte simple 4 degrés de type SCARA.

En premier lieu, un rappel de terminologie fondamentale de robotique est donnée(définition de la robotique, structures articulées, articulations, degré de liberté, degré de mobilité, types de poignets, types de porteurs, etc…) nécessaire à la compréhension des notions de robotique.

En second lieu, on a abordé les la modélisation du robot manipulateur dans l'espace opérationnel. Cette modélisation résulte de l'association des modèles dynamique et géométrique de natures différentiel et algébrique respectivement, alors le modèle mathématique globale est définit par un système algébrico-différentiel extrêmement non linéaire et couplé. Une fois le modèle qui gouverne le comportement du système établit, on pouvait alors passer vers la tache de commande.

L'application de la commande linéarisante entrées-sorties connu communément sous le nom de la commande non linéaire au troisième chapitre, nous a permet de résoudre cette difficulté en transformant ce système MIMO (multi-entrées/ multi-sorties) extrêmement non linéaire en série de systèmes linéaire mono-variables (SISO) entièrement découplées les uns des autres grâce à un retour d'état non linéaire. Le suivi des trajectoires de référence (altitude et angle de lacet désirées) à été assuré par des contrôleurs linéaires classiques.

Afin de tester les performances de cette loi de commande, des simulations numériques ont été réalisées, les résultats ainsi obtenus on été suffisamment satisfaisantes du point de vue performances de poursuite ainsi que la robustesse vis-à-vis des incertitudes du modèle du système. Cela sollicite l'application de ces contrôleurs sur le système réel en vu d'effectuer une vérification et de s'assurer des performances.

Bibliographie

[1] B. Jean-Louisboimond, “robotique ”, des recherche, université Angers.

[2] NourAbdelkader, « etude d’une configuration générale d’un robot à bras manipulateurapplication au bras de mesure 3d », mémoire de magister en génie mécanique univ. boumerdes–univ. medea–univ. chlef 2012.

[3] M.mokhtari, s.fergani ,“ modélisation et conception d’un robot SCARA à l’aide de logiciels ” , mémoire d’ingénieur, école nationale polytechnique Algérie 2010.

[4] Chaalmerouane, « modélisation cinématique d’un robot manipulateur à chaine continue ouverte », mémoire master professionnel, universitékasdimerbahOuargla 2013.

[5] N. Munro, F. L. Lewis, "Robot Manipulator Control-Theory and Practice", 2e edition Marcel Dekker, Inc. 2004.

[6] Amir-A Amiri-M, M. R. Gharib, M. Moavenian, and K. Torabi Z, "Modeling and control of a SCARA robot using quantitative feedback theory", Proc. IMechE, Vol. 223, Part I: J. Systems and Control Engineering, pp. 919-928, Juin 2009.

[7] S. Akamatsu, M. Konishi, and J. Imai, "Position Control of 2-Link SCARA Robot by using Internal Model Control", Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University, Vol. 43, pp. 49-54, Janvier 2009.

[8] W. Khalil, E. Dombre, “Modélisation identification et commande des robots”, 2e édition, HERMES Science Publication, Paris, 1999.

[9] Craig, J. J. Introduction to Robotics- Mechanics and Control, Pearson Education, Inc., 2005.

[10] K. S. M. Sahari, K. H. Weng. "Design and Development of a 4-DOF SCARA Robot for Educational Purposes". Journal Teknologi, UniversitiTeknologiMalysia, pp. 193–215, Janvier 2011.

Bibliographie

[11] M. Taylan Das, L. CananDülger, "Mathematical Modeling, Simulation and Experimental Verification of a SCARA Robot", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 13, pp. 257-271, 2005.

[12] Q. Lu, Yanzhang, S. Mei. "Nonlinear Control Systems And Power System Dynamics". Kluwer Academic Publishers, 2001.

[13] J. J. Slotine, W. Li. "Applied Non Linear Control" Prentice-Hall, Inc., New Jersey, U.S.A, 1991.

[14] A. Isidori. "Nonlinear Control Systems". Third edition, Springer-Verlag London, 1995.

[15] S. H. Zak. "Systems and Control". Oxford University press, 2003.

[16] A. Ben Ferdia. "Commande non Linéaire d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents". Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.

[17] O. Fadli. "Modélisation Et Commande Non Linéaire De L'Association : Machine Synchrone À Aimants Permanents-Onduleur De Tension À Trois Niveaux". Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.

[18] A. Medjebouri. " Commande Linéarisante Entrées-Sorties d'un Bras Manipulateur de Type SCARA ". 2ème Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle, Skikda, 2013.

[19] Y. Bendaha, B. Mazari, et M. Chebre, " Commande Adaptative Linéarisante par Géométrie Différentielle d'un Moteur Asynchrone", Acta Electrotehnica, Vol. 53, Number 2, pp. 115-120, 2012.

[20] A. Bentaallah, A. Meroufel, A. Massoum, A. Bendaoud, et K. Medles " Commande Non Linéaire d'une Machine Asynchrone sans Capteur Mécanique avec Observateur du Flux Rotorique par Mode Glissant", Acta Electrotehnica, Vol. 48, Number 1, pp. 3-9, 2007.