

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی والبحث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : DJAFOUR Islah Et FILALI Sarra

Sujet

Contrôle par Backstepping d'un robot à commande haptique pour les systèmes d'apprentissage chirurgicaux

Soutenu en ligne, le 25 / 09 / 2022 , Devant le jury composé de :

Mme/BENREZZAK Nawel
Mr/BENARIBA Hassan
Mr/MATI Abed

MAA
MCB
MCA

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicace-1-

Je dédie ce mémoire

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A mes sœurs, mes cousines et ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont supporté et encouragé tout au long de mon parcours à bras ouvert.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours supporté et encouragé en particulier Ghizlene à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

DJAFOUR Islah

Dédicace-2-

A la source de mes joies, secrets de ma force, mes très chers parents.

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel
et ma considération.*

*Pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et
mon bien être. Ma réussite est la vôtre, que dieu vous accorde une
longue vie dans la santé et le bonheur.*

A mes chères sœurs et mon cher frère, A toute ma famille

A tous mes amis.

A tous ceux que j'aime.

FILALI Sarra

Remerciements

Ce mémoire a été rendu possible grâce à l'aide de plusieurs personnes à qui nous tenons à exprimer notre gratitude.

On remercie en premier notre Dieu de nous avoir donné puissance et pertinence afin de réaliser ce travail, ainsi à tous ceux qui nous ont aidé et contribué dans ce travail de près ou de loin d'une quelconque manière et ont participé dans l'élaboration de ce mémoire.

On voudrait adresser toute la gratitude et reconnaissance à notre directeur de mémoire, notre encadrant Mr MALTI Abed, maître de conférence à l'Université de Tlemcen, pour sa patience, son aide et ses conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

D'autre part nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Madame Nawel BENREZZAK, professeur à l'Université de Tlemcen pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidant le jury de soutenance et à Monsieur Hassan BENARIBA maître de conférences (B) à l'université de Tlemcen d'avoir accepté de faire partie du jury.

Enfin, on remercie nos amis et camarades de promotion en particulier, pour ces cinq années passées ensemble dans les meilleurs moments comme dans les pires.

Sarra FILALI

Islah DJAFOUR

Table des matières

GLOSSAIRE : VII

INTRODUCTION GENERALE : 1

1. CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART 3

**1.1. ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DE LA MANETTE HAPTIQUE DANS LES
SIMULATEURS DE LA CHIRURGIE : 4**

**1.2. ETAT DE L'ART SUR L'UTILISATION DE LA COMMANDE PAR BACKSTEPPING DANS
LES STRUCTURES ROBOTISEES : 8**

**1.3. UTILISATION DU BACKSTEPPING DANS LE CADRE DE LA ROBOTIQUE CHIRURGICALE
: 9**

**1.4. UTILISATION DU BACKSTEPPING ADAPTATIF DANS LE CADRE DE LA ROBOTIQUE
CHIRURGICALE : 10**

**1.5. AVANTAGE DE L'UTILISATION DU BACKSTEPPING ADAPTATIF DANS LE CADRE DE
LA ROBOTIQUE CHIRURGICALE : 11**

2. CHAPITRE 2 : 12

MODELISATION ET COMMANDE PAR BACKSTEPPING INTEGRALE 12

2.1. INTRODUCTION : 13

2.2. TECHNIQUE COMMANDE PAR BACKSTEPPING : 13

2.3. MODELISATION ET COMMANDE PAR BACKSTEPPING : 13

2.3.1. Méthode générale de la commande par backstepping : 13

2.3.2. Backstepping action intégrale: 17

**2.3.3. Application de la commande d'un pendule simple par backstepping intégrale :
18**

2.3.4. RESULTAT DE LA SIMULATION : 21

2.4. CONCLUSION : 22

**3. CHAPITRE 3 : SUIVI DE TRAJECTOIRE PAR BACKSTEPPING INTEGRALE
SUR UNE MANETTE A DEUX DEGRES DE LIBERTE 23**

3.1. DEFINITION GENERALE : 24

3.1.1. Introduction aux robots manipulateurs: 24

3.1.2. Définition de degrés de liberté (DDL): 24

3.2. COMMANDE DE BACKSTEPPING INTEGRALE SUR UNE MANETTE A 2DDL : 24

3.2.1. Modèle dynamique d'une manette haptique à deux degrés de liberté : 25

3.3. SUIVI DE TRAJECTOIRE PAR BACKSTEPPING INTEGRALE : 26

CONCEPTION DE CONTROLE : 27

Contrôle basé sur un modèle : 27

Modèle : 28

3.4. RESULTAT DE LA SIMULATION : 29

3.5. CONCLUSION : 35

**4. CHAPITRE 4 : SUIVI DE TRAJECTOIRES PAR BACKSTEPPING ADAPTATIF
SUR UNE MANETTE A DEUX DEGRES DE LIBERTE 36**

Table des matières

4.1. INTRODUCTION :	37
4.2. <i>Commande par backstepping adaptatif</i> :	37
4.3. PRINCIPE DE LA COMMANDE PAR BACKSTEPPING ADAPTATIF :	37
4.4. COMMANDE DE BACKSTEPPING ADAPTATIF APPLIQUE AU SUIVI DE LA TRAJECTOIRE :	40
4.5. APPLICATION DE LA COMMANDE BACKSTEPPING ADAPTATIF SUR UNE MANETTE A DEUX DEGRES DE LIBERTE :	40
4.6. <i>RESULTATS DE LA SIMULATION</i> :	42
4.7. <i>CONCLUSION</i> :	49
CONCLUSION GENERALE:	50
BIBLIOGRAPHIE	52

Listes des figures :

Figure 1 : Falcon (Novint technologies)..... 5

Figure 2 : Phantom Desktop (Touch X). 5

Figure 3 Appareil geomagic Touch..... 6

Figure 4 : Omega 7 (utilisé dans les téléopérations) 7

Figure 5 : Robot Da Vinci. : Système robotique chirurgical Da Vinci opération basée sur un concept de contrôle maître-esclave 9

Figure 6 Pendule simple..... 18

Figure 7 Position angulaire et la vitesse angulaire par rapport au temps 22

Figure 8 : Structure d'un robot manipulateur à deux degré de liberté 25

Figure 9 : suivi de trajectoire désirée pour les deux articulations 29

Figure 10 : Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations..... 30

Figure 11 : Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 30

Figure 12 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 31

Figure 13 Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 31

Figure 14 Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 31

Figure 15 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 32

Figure 16 : Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations..... 32

Figure 17 : Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations..... 33

Figure 18 : Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 33

Figure 19 : Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 34

Figure 20 : Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 34

Figure 21 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 43

Figure 22 Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 43

Figure 23 Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations 44

Figure 24 : Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 45

Figure 25 : Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations..... 45

Figure 26 : Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations..... 45

Figure 27 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 46

Figure 28 Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 46

Figure 29 Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour les deux articulations 47

Figure 30 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 48

Figure 31 Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations 48

Figure 32 Erreur (e2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulati..... 48

Glossaire :

Acronyme	Signification
DMM	Deux manipulateurs Masters
MCP	Master coté patient
KRDV	Kit de recherches Da Vinci
DDL	Degré de liberté
DOF	Degree of freedom

Introduction générale :

La commande robuste des systèmes non linéaires, notamment les robots, est un sujet d'étude d'actualité et les méthodes développées dans la littérature sont nombreuses...

Basé sur la base de la robotique en tant que science, l'intersection de l'ingénierie et de la technologie, permet la conception et la fabrication de machines automatiques appelées robots. C'est un domaine multidimensionnel impliquant différents domaines de la technologie tels que la physique, l'électronique, l'instrumentation, le contrôle et l'intelligence artificielle. Il existe plusieurs types de robots tels que robots mobiles autonomes, Véhicules à guidage automatique, robots articulés, humanoïdes, bras manipulateurs,...et robots haptique), les robots a interface haptique sont largement utilisé dans plusieurs domaines mais ce qui nous intéresse le plus c'est leur utilisation dans le secteur des soins et de santé pour améliorer l'expérience du patients, des médecins et chirurgiens, ou ce type de robot dépend du cinquième sens, qui est le toucher. La construction des règles pour un robot est considérée comme un système non linéaire, ce qui nécessite de prendre en compte certains points (ou hypothèses) tels que la conformité aux consignes, le rejet des perturbations, la robustesse aux règles. Ce document présente une multitude de structures de contrôle, chacune avec son propre contexte d'application et ses propres caractéristiques. Les problèmes de stabilité sont d'une importance fondamentale pour le contrôle; la recherche de la loi de commande garantissant la stabilité d'un système commandé peut se faire à l'aide des fonctions de Lyapunov. Ceux-ci ont depuis longtemps été des outils importants dans la théorie du contrôle non linéaire. Cependant, le contrôle des robots représente un domaine très intéressant pour concevoir des contrôleurs robustes qui répondent à des exigences telles que la vitesse et la précision tout en assurant la stabilité du robot. Les lois de commandes résolvent le problème de régulation ou de poursuite de trajectoire, parmi lesquelles on trouve la commande backstepping avec ces types (backstepping, backstepping intégrale, backstepping adaptatif). Le backstepping est moins restrictif et n'oblige pas le système à devenir linéaire ce qui le rend une technique de commande puissante assurant une stabilité globale du robot.

Les robots se sont récemment répandu et ont gagné en popularité parmi les médecins et dans le service de chirurgie surtout les robots haptique et robots manipulateurs(bras manipulateurs), ces derniers sont contrôlés par plusieurs approches mais on va étudier l'approche qui intitule ce mémoire qui est l'approche Backstepping, plus précisément la commande par backstepping intégrale et la commande par backstepping adaptatif et voir quel effet à ces deux méthodes de backsteppings sur les performances de ces robots.

Ce mémoire va être décomposé en quatre chapitres; le 1^{er} chapitre qui est l'état de l'art, ce chapitre parle plus précisément sur les manettes haptiques dans les simulateurs de la chirurgie, leur histoire et aussi parle du backstepping simple et backstepping adaptatif et leurs utilisations dans les simulateurs de la chirurgie avec avantage et des brèves historiques des deux méthodes du backstepping.

Introduction générale

Dans le 2^{ème} chapitre intitulé par « Modélisation et commande par backstepping intégral » on se base sur la modélisation du backstepping intégrale en l'introduisant sur une commande d'un pendule simple via MATLAB puis commenter les résultats obtenus et l'impact du backstepping intégrale sur les performances.

Dans le 3^{ème} chapitre on va suivre la trajectoire par backstepping intégrale sur une manette à deux degrés de libertés en expliquant le modèle dynamique d'une manette haptique à deux degrés de liberté puis appliquer cette commande et commenter ses résultats et graphes obtenus en variant la longueur et la masse.

Et enfin dans le 4^{ème} chapitre qui aussi suit la trajectoire mais cette fois-ci par backstepping adaptatif sur une manette à deux degrés de liberté puis appliquer cette commande et commenter les résultats obtenus.

1. Chapitre 1 : Etat de l'art

1.1. Etat de l'art sur l'utilisation de la manette haptique dans les simulateurs de la chirurgie :

Grace aux efforts humains déployés depuis très longtemps la médecine aperçoit une lumière de développement due aux simulations informatiques. Ces dernières ont joué un rôle important dans la formation chirurgicale. Les simulations haptiques ont fait l'objet de recherches pour développer des systèmes avancés d'apprentissage en ligne facilitant ce genre de formation et peuvent aussi être utilisés comme moyen d'acquérir, d'améliorer, d'évaluer les compétences et les connaissances non seulement des chirurgiens résidants mais aussi pour l'apprentissage des chirurgiens compétant par rapport aux environnements de formation actuels dans les écoles de médecines, car les chirurgiens doivent accomplir des tâches des missions et des techniques intellectuelles de haute complexité qui peuvent générer des défis inattendus et sérieux avec une marge d'erreur trop petite ou pas de marge d'erreur de préférence [1].

Il est nécessaire de fournir aux étudiants ou aux praticiens un bon processus d'apprentissage approfondi pour que la chirurgie puisse être effectuée correctement. L'étude a conclu que plusieurs opérations étaient nécessaires pour améliorer les procédures chirurgicales. Ils ont également constaté que les malades et patients soignée par des médecins expérimentés en chirurgie (avec plus de 750 interventions et plus d'expérience) avaient tendance à avoir moins de problèmes de santé moins de que les patients traités par des médecins moins expérimentés [2].

Vu le développement de la technologie et des nouvelles lois dans le domaine médical, plusieurs solutions ont été recherchées pour permettre aux étudiants en médecine à acquérir les compétences nécessaires dans les procédures médicales [2]. Il existe plusieurs façons d'améliorer ces compétences, comme l'utilisation des animaux au bloc opératoire dans des conditions similaires à celles associées à l'homme (tel que le porc qui a les mêmes caractéristiques anatomiques et dermatologiques similaire à celle d'homme pour la suture) ou des dispositifs utilisant des matériaux simulant la peau humaine qui jusqu'à présent n'ont pas vraiment les caractéristiques de la peau humaine, ou la solution la plus fréquente et l'utilisation des cadavres. D'autres solutions suggèrent l'utilisation d'environnements virtuels, qui peuvent simuler des situations avec différents niveaux de risque, ces avancées ont été examinées pour évaluer l'impact sur l'éducation médicale mais cela offre toujours pas le réalisme nécessaire pour former les futurs chirurgien [2]. C'est pourquoi la seule solution est d'aller vers la simulation haptique qui a un grand potentiel pour améliorer la formation médicale. Un dispositif haptique est un dispositif tactile mécanique d'entrée/sortie qui permet aux utilisateurs d'interagir avec environnements en ajoutant le sens du toucher ; ce qui améliore la qualité de l'apprentissage. Sur les cinq sens connus, le toucher est le plus compétent. Le toucher est le seul sens capable d'entrée et de sortie simultanées [1]. L'incorporation des technologies tactiles (haptique) dans les simulations médicales et les logiciels a évolué, et diverses entreprises ont développé des stations médicales utilisant des dispositifs haptiques. Des travaux de recherche ont conduit à la commercialisation de plusieurs systèmes tactiles, on peut distinguer des simulateurs haptique tel que le Phantom Desktop, Omega.x (Omega.7), Falcon de Novint, et Omni, il existe également des interfaces haptiques dédiées comme le joystick à retour de force pour certains jeux vidéo et des interfaces haptique pour les applications médicales [3].



Figure 1 : Falcon (Novint technologies).

Falcon de chez Novint : Le Falcon un appareil tactile 3D créé en 2006 par Novint Technologies, il est toujours le premier et le seul depuis sa première apparition à être un appareil tactile 3D grand public au monde. Ses capacités robotiques sont similaires à celles des appareils de plusieurs ordres de grandeur plus chers, mais il assez robuste et puissant.

Ce Falcon est un contrôleur haptique robotique 3D haute-fidélité. Le toucher fait référence à votre sens du toucher, tout comme les graphismes font référence à votre vision. Falcon vous permet d'en savoir plus sur la 3D tactile avec votre ordinateur. L'utilisation du Falcon est presque le même avec l'utilisation de la souris. Vous pouvez déplacer la poignée dans tous les sens, mais contrairement à une souris, vous pouvez déplacer la poignée de haut en bas en 3D intégrale. L'avantage de ce appareil c'est qu'il est rapide, l'ordinateur suit la position de la poignée puis met à jour les 3 moteurs 1000 fois par seconde ce qui lui permet de donner à l'utilisateur un sens de toucher très réaliste, et c'est pour cette raison que le Falcon peut être utilisé pour simuler des procédures médicales à un niveau tel qu'un vrai chirurgien sentira une représentation virtuelle précise de la procédure médicale [4].



Figure 2 : Phantom Desktop (Touch X).

Auparavant l'appareil geomagic Touch X été connu sous le nom d'appareil Sensable Phantom Desktop. Cet appareil détecte l'amplitude de mouvement qui correspond à un mouvement d'agitation du poignet et constitue la base d'une variété d'applications commerciales, éducatives et dans les simulateurs de la chirurgie [5].

Une première étude de Moody et al ont démontré l'effet d'un système de retour d'effort dans la formation et l'évaluation des chirurgiens. Le système visuo-haptique comprenait une unité PHANTOM Desktop et simulait une procédure de suture [6].



Figure 3 Appareil geomagic Touch

L'appareil geomagic Touch connu auparavant sous les noms de Phantom Omni, il permet une véritable entrée tridimensionnelle avec retour de force, intégrant l'haptique dans les applications commerciales et de recherche et les systèmes de modélisation 3D. Les appareils Geomagic peuvent mesurer avec précision la position spatiale 3D et l'orientation du stylo portable. Des forces sont créées pour repousser la main des utilisateurs afin de simuler le toucher et l'interaction avec des objets virtuels grâce à ces appareils.

Cet appareil tactile geomagic est utilisé dans divers applications, ainsi que dans le domaine médical plus précisément dans les simulateurs de la chirurgie. [5]



Figure 4 : Omega 7 (utilisé dans les téléopérations)

Le dispositif haptique oméga. Avec son extension de préhension active unique, l'omega.7 est l'appareil haptique le plus polyvalent disponible. Son effecteur couvre l'amplitude naturelle des mouvements de la main humaine et est compatible avec la conception de la console de téléopération bi-manuelle.

La combinaison de la compensation complète de la gravité et de l'étalonnage sans dérive contribue à un plus grand confort et une plus grande précision de l'utilisateur. Le préhenseur actif peut générer une force de préhension allant jusqu'à 8 Newtons dans les deux sens. [7]. L'utilisation de simulateurs tactiles ou bien haptique offre une nouvelle alternative qui permet également le développement de nouvelles approches pédagogiques. L'avantage des technologies haptiques dans les virtuels environnements, c'est la facilité qu'ils ont à recréer des situations difficiles nées lors des pratiques réelles. Ils ont fourni de nouveaux moyens d'exploration et de représentation. Ils permettent la création de systèmes capables de mettre en œuvre de nouvelles méthodes ou procédures, et dans certains cas, ces systèmes peuvent générer des anatomies inhabituelles en modifiant des modèles avec informations sur les patients tels qu'ils ont été examinés. Par conséquent, ils offrent aux étudiants la possibilité d'effectuer des interventions chirurgicales aussi souvent que nécessaire. Ces dispositifs haptique on les utilise généralement dans la suture, la palpation, les procédures dentaires, endoscopie, laparoscopie et orthopédie et ils peuvent être aussi utilisés dans d'autres spécialités [2].

1.2. Etat de l'art sur l'utilisation de la commande par Backstepping dans les structures robotisées :

La technique de backstepping est une méthode de contrôle relativement récente pour les systèmes non linéaires. Quand cette méthode a fait apparition elle a donné un nouveau souffle à la commande des systèmes non linéaires, qui malgré les grands progrès réalisés, manquait d'approches générales [8]. Cette technique permet, séquentiellement et systématiquement, par choix d'une fonction de Lyapunov de déterminer la loi de commande du système. Son principe est de construire la loi de commande du système non linéaire de manière constructive en traitant certaines variables d'état comme une commande virtuelle et en concevant une loi de commande intermédiaire pour celles-ci. Cette technique a été développée dans les années 80 par Kanellakopoulos et al et inspiré par les travaux et les efforts déployés par Feurer, Morse, Tsinias, Kokotovic et Sussmann [9]. La théorie du backstepping est donc assez récente. Néanmoins, il existe de nombreuses applications pratiques du backstepping dans la littérature, dans divers domaines. Aucune revendication n'est exhaustive, nous fournissons ici quelques-unes de ces applications.

Le backstepping a été largement utilisé pour contrôler les moteurs, qu'ils soient électriques ou diesel. Dans le même domaine, appliquez-le à un réacteur embarqué. Il existe également des applications en robotique car il a une conception de lois de commande simple tel que le bras robotique qui est utilisé énormément dans des applications qui nécessitent de la précision et de l'exactitude [10].

Le backstepping est implémenté dans le système du bras robotique pour pouvoir identifier les paramètres de ce bras [10]. En citant un autre exemple de l'utilisation de la commande backstepping dans les structures robotisées : le robot manipulateur qui dans ces deux dernières décennies s'impose sa présence dans plusieurs applications industrielles divers telles que la peinture, le perçage et le soudage. Il a reçu une grande attention en raison de ses excellentes performances dans les missions nécessitant une grande précision pour suivre l'orbite. Il est très difficile de contrôler le robot manipulateur car son type de système se caractérise par une non-linéarité élevée de degrés. Des efforts ont été déployés pour résoudre ces problèmes et la technique la plus efficace qui a été adaptée pour garantir la poursuite de ces robots et identifier leurs paramètres inconnus c'est la commande backstepping [11].

La méthode de backstepping fournit un outil méthodologique pour construire des boucles fermées de fonctions de Lyapunov pour une grande variété de systèmes non linéaires. Cette approche est largement utilisée dans les systèmes des manipulateurs robotisés et cela revient à sa configuration qui est facile, un autre robot spatial planaire on lui a appliqué le contrôle backstepping robuste, les résultats ont démontré que la stratégie de ce contrôle développé est efficace [11]. Selon Ojha et Khanwadelwal en 2015 l'algorithme de backstepping c'est la solution la plus adaptée pour que le problème de régulation soit résolu [12]. Lors de l'application de cette approche de conception de contrôle par backstepping la flexibilité peut être obtenue en corrigeant les points non linéaires fins et en supprimant les points indésirables. C'est une caractéristique importante dans les systèmes de contrôle industriels car l'annulation de tous les points non linéaires nécessite des modèles d'apprentissage difficiles à obtenir (Krstic, Kanellakopoulos et Kokotovic 1995) [13].

1.3. Utilisation du backstepping dans le cadre de la robotique chirurgicale :

La téléopération permet aux humains d'effectuer des tâches complexes par l'intermédiaire d'un robot esclave. L'application de ces systèmes est large y compris les robots chirurgicaux. Dans une chirurgie à distance assistée par robot, l'objectif principal d'un système de chirurgie à distance idéal est d'obtenir simultanément une transparence et une stabilité complète, cependant pour contrôler un système de chirurgie à distance avec un robot est difficile et compliqué en raison de nombreux défis rencontrés. Parmi les robots maître et esclave utilisés dans la chirurgie le robot Da Vinci, ce robot est utilisé afin d'aider le chirurgien à améliorer la précision qu'il a au contrôle à distance. [13].

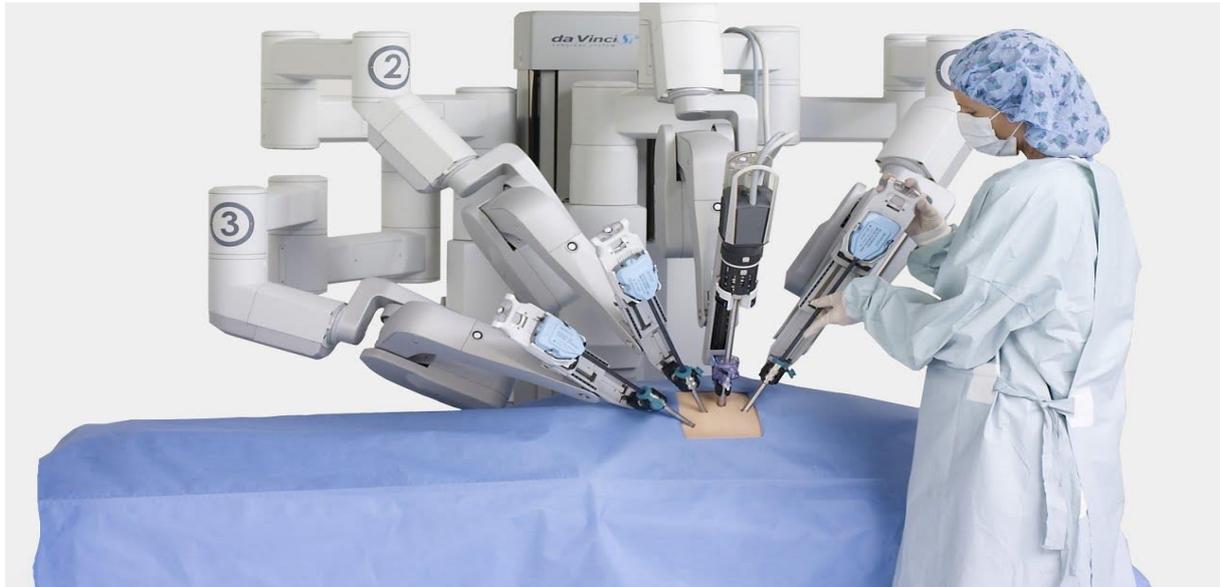


Figure 5 : Robot Da Vinci. : Système robotique chirurgicale Da Vinci opération basée sur un concept de contrôle maître-esclave

Ce système fournit aux professionnels de la santé un environnement d'exploitation réaliste comprenant une visualisation stéréo de haute qualité et une interface homme-machine qui transmet directement les gestes de la main médecin avec des instruments sur le patient [14].

Plus précisément le robot Da Vinci se décompose en deux côtés, le côté maître géré par le chirurgien et le côté esclave côté patient. Le côté Master comporte deux manipulateurs Master (DMM), le chirurgien utilise le robot de ce côté pour contrôler et gérer les bras du robot esclave composés de deux manipulateurs côté patient (MCP) et d'un manipulateur de caméra endoscope. Le problème auquel ce robot est confronté est que sa troisième articulation du MCP est prismatique de forme de frottements inconnus.

Le kit de recherche Da Vinci (KRDV) c'est une plate-forme qui est utilisée aujourd'hui par de nombreux groupes de recherche dans le but d'améliorer la recherche en téléportation haptique et en contrôle semi-autonome. Concevoir un contrôle de couple robuste pour les robots Da Vinci de sorte que le MCP soit capable de suivre la position souhaitée de manière autonome était l'objectif principal. Le contrôle robuste pour les bras robotiques était la cible de la plupart des chercheurs [13].

Il est connu que les systèmes robotiques ont une non-linéarité sévère d'une part et les paramètres des bras des robots d'une autre part le concepteur de la commande a recours à l'utilisation de plusieurs approches non linéaires telles que la commande par mode glissant qui n'a pas la possibilité de stabiliser le système avec des incertitudes désadaptées, le contrôle en

monde glissant flou, la linéarisation par rétroaction [13]. Cependant, les deux seules méthodes pour pouvoir faire face à ces problèmes c'était aller vers l'utilisation de la commande par Backstepping et le contrôle de surface dynamique peuvent être utilisées pour stabiliser le système avec des incertitudes [13]. Pour une telle classe de système, l'algorithme de backstepping est l'une des solutions les plus adaptées pour résoudre le problème de régulation comme définie auparavant [12], l'utilisation de la commande backstepping qui est une approche non linéaire qui peut contrôler les systèmes de robots manipulateurs. Cette approche permet de compenser les incertitudes uniquement décroissantes avec les variables d'état [13]. Cependant cette combinaison rend le schéma de commande plus robuste contre les perturbations adaptées et non adaptées en l'absence du modèle dynamique des robots et de leurs paramètres d'actionneurs [11]. En outre, y a aussi le PHANTOM Omni Robot qui est un dispositif de retour de force, et a été largement appliqué dans l'éducation, les soins de santé, les jeux, l'ingénierie et de nombreux autres domaines. Ce robot est contrôlé par une commande de backstepping du côté esclave et un contrôleur PID du côté maître. la commande backstepping est introduite dans le côté du robot esclave pour qu'il suive le robot maître après les essais ils ont montré que cette approche à assurer la stabilité du système ils ont pu obtenir une bonne performance de suivi de position et de force [15].

1.4. Utilisation du backstepping adaptatif dans le cadre de la robotique chirurgicale :

Comme expliqué auparavant, l'utilisation du backstepping adaptatif dans le cadre de la robotique chirurgicale et similaire à celle du backstepping.

Les manipulateurs haptiques sont devenus la technologie robotique la plus importante développée à ce jour, ils sont largement utilisés avec succès dans les simulateurs de formation chirurgicale tel que le robot Omni.

Cette technologie est encore pleinement exploitée, et son succès dépend de la résolution d'un certain nombre de défis, parmi lesquels : la non linéarité des appareils haptiques. Le contrôle de la dynamique non linéaire incertaine est l'un des sujets les plus difficiles des problèmes d'ingénierie, donc il leur faut ces manipulateurs tactiles un système de contrôle pour assurer la stabilité d'un système non linéaire complexe, ce système aussi doit résister aux perturbations générées par les paramètres dynamiques internes du système et de ses actionneurs, y compris les perturbations non échantillonnées et les perturbations externes c'est-à-dire il doit être robuste [16]. En outre ces manipulateurs confrontent d'autres problèmes en pratique, leur modélisation dynamique exact est difficile et cela revient aux incertitudes et de l'indisponibilité de certaines variables mesurées par exemple le retour de la vitesse.

Plusieurs approches ont été proposées qui ont eu un retour positif d'une part et un retour négatif d'autre part [16]. Par conséquent les méthodes de contrôle adaptatif basées sur la théorie de Lyapunov se révèlent pour trouver des solutions suprêmes pour faire face aux problèmes confrontés par les manipulateurs haptiques. C'est pour cette raison que le contrôle du backstepping adaptatif a été pris en considération et mis en œuvre sur ces robots haptiques avec des paramètres d'actionneurs exploités dans un simulateur de formation chirurgicale et aussi avec une dynamique inconnue. L'utilisation de cette approche leur a permis de compenser les incertitudes décroissantes avec des variables d'état ce qui est considéré comme une perturbation adaptée. Et en plus de cela le schéma de commande est devenu plus robuste contre les perturbations adaptées et non adaptées même si le modèle dynamique est absent ainsi que les paramètres d'actionneurs [16].

1.5. Avantage de l'utilisation du backstepping adaptatif dans le cadre de la robotique chirurgicale :

D'après les études et les applications du backstepping, ce dernier a eu un impact positif dans le domaine médical plus précisément dans la chirurgie. Par exemple dans le domaine de téléopération le PHANTOM Omni dans une étude a été pris comme objet de contrôle. Le contrôle de la force et de la position est réalisé par une méthode qui combine le contrôle par backstepping, backstepping adaptatif et le contrôle PID.

Après avoir effectué quelques simulations qui ont été menées à l'aide de MATLAB pour vérifier la méthode proposée pour le système de téléopération qui se compose de ces robots PHANTOM Omni, les résultats de la simulation montrent que lorsque le système est soumis à des perturbations externes, la méthode proposée qui combine le contrôle par backstepping et le contrôle PID peuvent assurer la stabilité du système et conserver de bonnes performances [17].

Ou dans le cas aussi de l'étude qui a été faite par des chercheurs et médecins sur des robots maître-esclave (Da Vinci) après avoir introduit plusieurs approches sur ces robots afin d'obtenir une haute précision et de bonnes performances.

Lorsque un système robotique a une dynamique non linéaire sévère, le concepteur de la commande a recours à l'utilisation de méthodes non linéaires telles que la commande par mode glissant [18, 19, 20] ou l'approche de linéarisation par rétroaction [21]. Parmi les méthodes non linéaires connues, la linéarisation par rétroaction ou la méthode basée sur un modèle sont connues en tant qu'approche de contrôle. Cependant, la linéarisation par rétroaction ne peut pas être considérée comme une approche robuste, car le contrôle du signal est obtenu à l'aide du modèle du système. De plus, une incertitude d'un système non linéaire peut être classée comme une incertitude appariée et non appariée. Une incertitude non concordante apparaît dans l'équation d'état avant l'entrée de commande tandis que l'incertitude concordante apparaît dans l'équation d'état au même point que l'entrée de commande [13]. Un manipulateur robotique avec des articulations flexibles est un exemple d'incertitude non concordante dans les systèmes robotiques. L'approche non linéaire connue telle que la commande par modes glissants n'est pas capable de stabiliser un système avec des incertitudes désadaptées et souffre d'un inconvénient majeur qui est le broutement [22].

Cependant, deux méthodes connues telles que la backstepping et le contrôle de surface dynamique peuvent être utilisées pour stabiliser le système avec des incertitudes. La commande backstepping [23] est une approche non linéaire pour contrôler les systèmes de robots manipulateurs. Dans], une méthode de backstepping adaptatif filtrée par commande basée sur la régression du vecteur de support est utilisée comme une approche adaptative robuste pour contrôler un système de robot en tenant compte des perturbations et des incertitudes du modèle [13].

Sur ce on conclut que l'avantage d'introduire l'approche backstepping et backstepping adaptatif dans les robots chirurgicaux a un impact positif car on peut l'appliquer à des robots aux paramètres et dynamique inconnues, elle affecte la compensation des incertitudes en les décroissant, rend le système plus stable et augmente la robustesse du système et du schéma de commande qui lui permet de résister contre les perturbations.

2. Chapitre 2 :

Modélisation et commande par backstepping intégrale

2.1. Introduction :

Depuis quelques années, beaucoup de recherches ont été faites dans ce domaine de la commande des systèmes non linéaires, le backstepping en est une nouvelle méthode de contrôle.

Ce chapitre commence dans un premier temps par un bref historique du backstepping et un exemple sera donnée sur la méthode générale du backstepping par un modèle non linéaire de du deuxième ordre. La technique de backstepping permet d'obtenir de manière constructive une loi de commande assurant la stabilité du système via la fonction de Lyapunov.

Dans un deuxième temps, on introduit une modification sur le backstepping en appliquant un terme intégrale, procure ce type de modification " backstepping intégrale" une grande amélioration dans les performances (précision, rapidité...), c'est pourquoi nous avons fait l'application de la commande par backstepping intégrale d'un pendule simple assurant ainsi la stabilité de tous les états du système.

Finalement, quelques observations et les résultats de simulation représentent la stabilité du pendule.

2.2. Technique commande par backstepping :

La technique de la commande par backstepping a été développée par Kanellakopoulos en 1991. Cette technique fournit une approche systématique pour effectuer la conception des contrôleurs des systèmes non linéaires. L'idée de base est calculer la loi de commande pour garantir une certaine fonction de Lyapunov, définie positive et sa dérivée est toujours négative. La technique consiste à calculer une commande garantissant la stabilité en plusieurs étapes système global.

2.3. Modélisation et commande par backstepping :

2.3.1. Méthode générale de la commande par backstepping :

2.3.1.1. L'objectif du backstepping :

Dans le cas étudié, les commandes de Backstepping sont une technique efficace qui prend en charge la non-linéarité du système. La stabilité de ceci est remarquable. Cette technique se base sur l'utilisation de la fonction de Lyapunov. Le backstepping a pour objectif d'utiliser l'état comme étant une commande virtuelle. Le système est partagé en plusieurs sous-systèmes joints par ordre décroissant droit. La loi de commande apparaît à la fin de l'algorithme du Backstepping. Au stade de la liaison intermédiaire, l'instabilité du système non linéaire est prise en compte pour déterminer l'ordre du système, et la stabilité globale, la continuité et la phase de régulation du système non linéaire sont augmentées.

2.3.1.2. Méthode du backstepping :

Le système est partagé en plusieurs sous-systèmes comme mentionné auparavant ; on va étudier le cas le plus simple qui se compose de deux sous-systèmes appelé un système de 2^{ème} ordre.

Le backstepping passe par deux étapes importantes, la première consiste à étudier le 1^{er} sous-système et la deuxième concerne le 2^{ème} sous-système.

On considère le cas des systèmes non linéaires de la forme :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)$$

$$x \in \mathbb{R}^n$$

$x \in \mathbb{R}$ (x est l'état du système)

$u \in \mathbb{R}$ (u entrée ou commande)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(x_2)u \\ y = x_1 \end{cases}$$

Etape 1 :

On prend le 1^{er} sous-système du modèle d'état

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \quad 2.1$$

On prend x_{d_1} comme une valeur désirée de x_1 et e est l'erreur de poursuite :

$$e_1 = x_{d_1} - x_1 \quad 2.2$$

Ensuite on dérive l'erreur de poursuite afin d'obtenir cette équation :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{d_1} - \dot{x}_1 \quad 2.3$$

On remplace le \dot{x}_1 par sa valeur :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{d_1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2] \quad 2.4$$

Le but de cette étape est de s'assurer que x_1 continue dans la direction de l'orbite désirée x_{d_1} , on considère la fonction de Lyapunov candidate suivante :

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2} e_1^2 \quad 2.5$$

Puisqu'il est clair que cette fonction de Lyapunov est définie positive il faut montrer que sa dérivée soit négative afin d'atteindre la stabilité du 1^{er} sous-système :

$$\dot{V}_1(e_1) = e_1 \dot{e}_1 \quad 2.6$$

(2.4) dans (2.6) on trouve :

$$\dot{V}_1(e_1) = e_1 [\dot{x}_{d_1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2]] \quad 2.7$$

La dérive de Lyapunov doit être négative pour assurer la stabilité du 1^{er} sous-système donc elle doit forcément prendre cette valeur : $\dot{V}_1(e_1) < 0$

$$\dot{V}_1(e_1) = -k_1 e_1^2 \quad \mathbf{2.8}$$

Avec $k_1 > 0$

Par identification entre (2.7) et (2.8) on obtient :

$$\dot{V}_1(e_1) = e_1 [\dot{x}_{d_1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2]] = e_1(-k_1 e_1) \quad \mathbf{2.9}$$

On obtient donc :

$$\dot{x}_{d_1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2] = -k_1 e_1 \quad \mathbf{2.10}$$

On trouve :

$$x_2 = \frac{1}{g_1(x_1)} [\dot{x}_{d_1} - f_1(x_1) + k_1 e_1] \quad \mathbf{2.11}$$

Etape 2 :

Soit le 2^{ème} sous-système du modèle d'état :

$$\dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(x_2)u \quad \mathbf{2.12}$$

On prend maintenant x_{d_2} comme une valeur désirée de x_2 pour qu'on puisse définir l'erreur de poursuite :

L'erreur de poursuite :

$$e_2 = x_{d_2} - x_2 \quad \mathbf{2.13}$$

Maintenant on dérive la 2^{ème} erreur de poursuite :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_{d_2} - \dot{x}_2 \quad \mathbf{2.14}$$

On remplace l'équation (2.12) dans (2.14) on trouve :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_{d_2} - [f_2(x_2) + g_2(x_2)u] \quad \mathbf{2.15}$$

On est passé par cette 2^{ème} étape dans le but d'assurer la poursuite de x_2 vers sa trajectoire x_{d2} (c à d $e_2 \rightarrow 0$)

On considère une autre fois la fonction de Lyapunov candidate celle qu'on avait appliqué dans la 1^{ère} étape avec le 1^{er} sous-système mais cette fois ci on introduit les deux sous-systèmes :

$$V_2(e_1, e_2) = V_1(e_1) + \frac{1}{2} e_2^2 \quad \mathbf{2.16}$$

Puisqu'il est clair que cette fonction de Lyapunov est définie positive il faut montrer que sa dérivée est négative afin d'atteindre la stabilité du 2^{ème} sous-système.

On dérive (2.16) :

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = \dot{V}_1(e_1) + e_2 \dot{e}_2 \quad \mathbf{2.17}$$

En substituant (2.7) et (2.15) dans (2.17) on trouve :

$$\Leftrightarrow \dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2$$

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 [\dot{x}_{d1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2]] + e_2 [\dot{x}_{d2} - [f_2(x_2) + g_2(x_2)u]] \quad \mathbf{2.18}$$

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \left[\dot{x}_{d1} - [f_1(x_1) + g_1(x_1)(x_{d2} - e_2)] \right] + e_2 \left[\dot{x}_{d2} - [f_2(x_2) + g_2(x_2)u] \right] \quad \mathbf{2.19}$$

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \left[\dot{x}_{d1} - f_1(x_1) + g_1(x_1)e_2 - g_1(x_1)x_{d2} \right] + e_2 \left[\dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2)u \right] \quad \mathbf{2.20}$$

Pour que (2.13) soit stable il est nécessaire que $x_{ed} = x_2$ et on remplace dans l'équation (2.20)

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \left[\dot{x}_{d1} - f_1(x_1) - g_1(x_1)e_1 - g_1(x_1)x_2 \right] + e_2 \left[\dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2)u \right] \quad \mathbf{2.21}$$

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \left[\dot{x}_{d1} - f_1(x_1) - g_1(x_1)x_2 \right] + e_1 e_2 g_1(x_1) + e_2 \left[\dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2)u \right] \quad \mathbf{2.22}$$

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = e_1 \left[\dot{x}_{d1} - f_1(x_1) - g_1(x_1)x_2 \right] + e_2 \left[e_1 g_1(x_1) + \dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2)u \right] \quad \mathbf{2.23}$$

D'après l'équation (2.10) on a :

$$\dot{x}_{d1} - f_1(x_1) - g_1(x_1)x_2 = -k_1 e_1 \quad \mathbf{2.24}$$

On la remplace dans l'équation (2.23), on obtient :

$$\dot{V}_2(e_1, e_2) = -k_1 e_1^2 + e_2 \left[e_1 g_1(x_1) \dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2)u \right] \quad \mathbf{2.25}$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov doit prendre la valeur suivante pour qu'elle soit négative

$\dot{V}_2(e_1, e_2) < 0$; On choisit :

$$\dot{V}_1(e_1) = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad 2.26$$

Avec k_1 et $k_2 > 0$

Par identification entre (2.24) et (2.25) on obtient :

$$e_1 g_1(x_1) + \dot{x}_{d2} - f_2(x_2) - g_2(x_2) = -k_2 e_2 \quad 2.27$$

Avec une loi de commande :

$$u = \frac{1}{g_2(x_2)} \left[-k_2 e_2 - e_1 g_1(x_1) - f_2(x_2) - \dot{x}_{d2} \right] \quad 2.28$$

Dans cette étape nous avons $\dot{V}_2(e_1, e_2) < 0$ d'où la stabilité asymptotique du sous système

Donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_1(e_1) < 0 \\ \dot{V}_2(e_2) < 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(x_2)u \end{array} \right. \quad \text{Stable}$$

Donc :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{est stable}$$

2.3.2. Backstepping action intégrale:

La structure du contrôleur créée par la version classique du backstepping comprend une action d'échelle, qui s'ajoute à une action dérivée sur les erreurs. Une telle structure rend le système sensible au bruit de mesure.

L'absence d'intégrateur provoque également l'apparition d'une erreur statique constante non nulle. La solution à ce problème est de concevoir une nouvelle version du backstepping avec une action intégrée. Cela revient à introduire intégrateurs dans le modèle et à appliquer le backstepping conventionnel à ce nouveau modèle. L'action intégrale sera automatiquement convertie du modèle à la loi de contrôle.

2.3.2.1. Rôle du backstepping intégrale :

Le rôle essentiel de l'action intégrale est l'élimination de l'erreur statique et d'annuler l'écart entre la mesure et la consigne. Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est proportionnel à l'intégrale de l'écart mesure-consigne.

2.3.3. Application de la commande d'un pendule simple par backstepping intégrale :

Dans cette partie on présente l'application de la commande par backstepping intégrale pour le pendule simple.

Le modèle didactique d'un robot manipulateur à un seul degré de liberté dont le modèle est donné par Berguis [Berguis, 1993] [24].

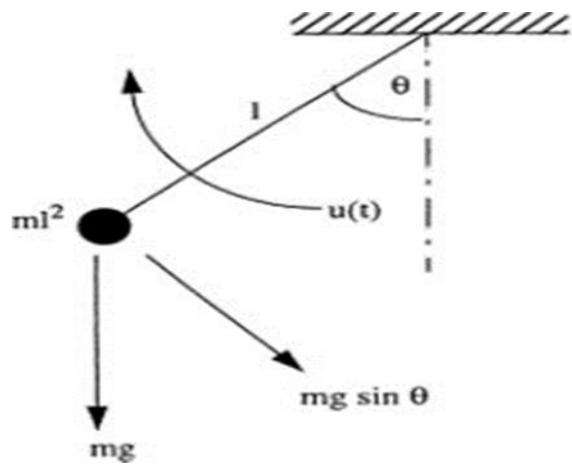


Figure 6 Pendule simple

Le modèle dynamique est présenté par dans l'équation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ x_1 = \alpha \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma u \end{cases} \quad 2.29$$

$$\text{Avec : } \alpha = -\frac{g}{l} \quad ; \quad \beta = -\frac{k}{m} \quad ; \quad \gamma = \frac{1}{ml^2}$$

l : est la longueur du pendule.

g : est l'accélération (gravité).

θ : est l'angle de la tige à partir de la position verticale.

v : est la tension appliquée.

m : est la masse du pendule.

u : est l'entrée de la commande.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma x_3 \\ \dot{x}_3 = u \end{cases} \quad \alpha < 0 \quad *$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-g}{l} \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma \omega \end{cases} \quad \mathbf{2.30}$$

On a :

$$V_1 = -\left(-\frac{g}{l}\right)(1 - \cos(x_1)) + \frac{1}{2} x_2^2$$

On dérive le V_1

$$\dot{V}_1 = \frac{g}{l} x_1 \sin(x_1) + \left(\frac{-g}{l} \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma \omega\right) x_2$$

$$\dot{V}_1 = \beta x_2^2 + \gamma x_2 \omega$$

On choisit :

$$\omega = -\left(\frac{\beta}{\gamma} - \frac{k}{\gamma}\right) x_2, k > 0$$

Le système (2.30) est globalement asymptotiquement stable :

$$\omega = -\left(\frac{\beta}{\gamma} + \frac{k}{\gamma}\right) x_2$$

$$\mathbf{(2.30) \rightarrow} \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-g}{l} \sin(x_1) - k x_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma x_3 \\ \dot{x}_3 = u \end{cases}$$

$$z = x_3 - \omega = x_3 + \left(\frac{\beta}{\gamma} + \frac{k}{\gamma} \right) x_2$$

$$\Leftrightarrow x_3 = \omega - \left(\frac{\beta}{\gamma} + \frac{k}{\gamma} \right) x_2 - z$$

(*) Se réécrit comme :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \alpha \sin(x_1) + \beta x_2 + \gamma \left[\left(-\frac{\beta+k}{\gamma} \right) x_2 + z \right] \\ \dot{x}_3 &= \alpha \sin(x_1) - kx_2 + \gamma z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{x}_3 + \left(\frac{\beta+k}{\gamma} \right) \dot{x}_2 \\ \dot{z} &= V + \frac{\beta+k}{\gamma} (\alpha \sin(x_1) - kx_2 + \gamma z) \\ \dot{z} &= \frac{\beta+k}{\gamma} \alpha \sin(x_1) - \left(\frac{\beta+k}{\gamma} \right) k x_2 + (1+k)z + V \end{aligned}$$

Le système à commande avec V :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha \sin(x_1) - kx_2 + \gamma z \\ \dot{z} = \frac{\beta+k}{\gamma} \alpha \sin(x_1) - \left(\frac{\beta+k}{\gamma} \right) k x_2 + (\beta+k)z + V \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha \sin(x_1) - kx_2 + \gamma z \\ \dot{z} = \frac{\beta+k}{\gamma} \alpha \sin(x_1) - \frac{(\beta+k)k}{\gamma} x_2 + (\beta+k)z + V \end{cases}$$

2.31

$$V(x_1, x_2, z) = -\alpha(1 - \cos(x_1)) + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}z^2$$

On dérive V :

$$\dot{V}(x_1, x_2, z) = -\alpha \dot{x}_1 \sin(x_1) + \dot{x}_2 x_2 + \dot{z} z$$

$$= -kx_2^2 + \gamma z + x_2 + \left(\frac{\beta+k}{\gamma} \alpha \sin(x_1) - \frac{(\beta+k)k}{\gamma} x_2 + (\beta+k)z \right)$$

$$= -kx_2^2 + z \left(\frac{\beta+k}{\gamma} \alpha \sin(x_1) - \frac{(\beta+k)k}{\gamma} x_2 + \gamma x_2 + (\beta+k)z + V \right)$$

$$\Rightarrow \dot{V}(x_1, x_2, z) = -kx_2^2 - k_2 z^2$$

Le système (2.31) est globalement asymptotiquement stable.

$\Rightarrow (x_1, x_2, z) \Rightarrow (0, 0, 0)$ asymptotiquement lorsque $t \rightarrow \infty$, Pour tout $x_1(0), x_2(0), z(0) \in \mathbb{R}$

$\Rightarrow (**)$ $\Rightarrow x_3 \rightarrow 0$ asymptotiquement lorsque $t \rightarrow \infty$ pour tout $x_3(0) \in \mathbb{R}$

2.3.4. Résultat de la simulation :

Pour l'évaluation des performances de la commande par backstepping intégrale d'un pendule, nous avons procédé une simulation sous environnement MATLAB.

La simulation présentée est réalisé sur l'angle du pendule, nous avons pris les paramètres de la commande utilisée avec ces valeurs:

- Les gains :

$$k= 100 \quad ; \quad k_2=15$$

- Les constants :

$$\alpha= -0.1 \ ; \ \beta = -0.01 \ ; \ \gamma= 0.5$$

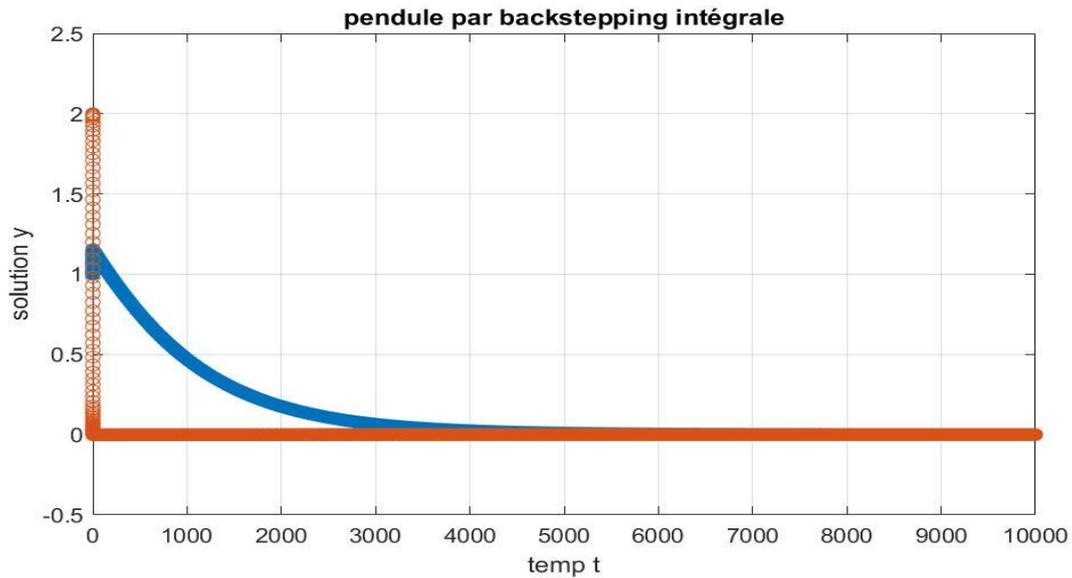


Figure 7 Position angulaire et la vitesse angulaire par rapport au temps

La figure 7: présente le résultat de la simulation de la commande par backstepping intégrale d'un pendule (angle), la position angulaire et la vitesse angulaire.

- On Remarque que la position angulaire et la vitesse angulaire converge vers le zéro après un temps $t=3000s$

On note que les performances sont bonnes.

La backstepping intégrale a obligé le pendule à se stabiliser et ceci est assuré par l'action intégrale car cette action a la possibilité d'éliminer les erreurs comme définie auparavant dans le rôle de cette action intégrée.

2.4. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre était l'évaluation les performances de la commande non linéaire par backstepping intégrale d'un pendule simple.

Ce chapitre a été consacré dans un premier temps à une présentation générale de technique de commande par backstepping au système d'ordre n étapes par étape, est conçue et une analyse de stabilité est établie (l'objectif, la méthode)

En deuxième temps, nous utilisons la commande de backstepping intégrale d'un pendule simple, la structure contrôleur généré par la version classique du backstepping est composée d'une action proportionnelle la solution de ce problème est la conception d'une nouvelle version du backstepping intégrale pour l'asservissement de vitesse parce qu'il offre de bonnes performances (précision et rapidité).

Les résultats de la simulation montrent les avantages de la commande backstepping intégrale d'un pendule simple, et assurant la stabilité de pendule et convergent vers le zéro rapidement.

3. Chapitre 3 : Suivi de trajectoire par backstepping intégrale sur une manette à deux degrés de liberté

3.1. Définition générale :

La robotique est une science multidisciplinaire comprenant la mécanique, l'automatisation, le génie électrique, l'informatique et les domaines médicaux et chirurgicaux.

3.1.1. Introduction aux robots manipulateurs:

Les robots manipulateurs sont largement utilisés dans le temps actuel tel que leurs applications dans l'industrie, le domaine spatial et médical comme le robot connu Da Vinci. Une importance majeure est donnée au bras et au robot manipulateur, surtout dans les travaux dangereux, fastidieux, délicats et monotones. Ces robots manipulateurs se composent de plusieurs bras manipulateurs, ils sont programmables, avec des fonctions similaires à un bras humain.

Le contrôle de robot est un domaine de recherche et de développement mature et productif [25]. La commande des robots manipulateurs est un domaine très vaste, il est en cours d'évolution on ne cesse jamais de le développer. Des algorithmes de commande ont été proposés et développés pour atteindre les objectifs exigés et avoir de bonnes performances. Pour contrôler un robot ou un bras manipulateur, il est nécessaire généralement qu'un modèle mathématique et une sorte d'intelligence soient disponibles pour agir sur le modèle. En contrepartie, cette intelligence requiert des capacités sensorielles et des moyens pour agir et réagir aux variables détectées. Ces actions et réponses du robot sont le résultat de la conception du contrôleur.

Dans ce chapitre, on passe en revue les concepts nécessaires de la théorie du contrôle qui a été utilisée dans le contrôle des robots. [26]. Des techniques et méthodologies de contrôle nombreuses peuvent être appliquées pour contrôler les manipulateurs. La méthode de contrôle spécifique choisie et la manière dont elle a été mise en œuvre peuvent avoir un impact remarquable sur les performances de l'opérateur. Par exemple, le suivi de chemin continu nécessite une architecture de contrôle différente de celle du contrôle point à point [9]. D'après [27] Le problème de commande d'un robot en marche peut être formulé comme la détermination de l'évolution des efforts généraux (forces ou couples) que l'actionneur doit agir pour assurer l'exécution de la tâche tout en répondant à certains critères de performance. Différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. La conception mécanique du bras manipulateur a une influence sur le choix du schéma de commande [28]. Un manipulateur est une structure mécanique complexe dont l'inertie autour des axes des articulations varie non seulement avec la charge mais aussi avec la configuration, la vitesse et l'accélération.

3.1.2. Définition de degrés de liberté (DDL):

Le nombre de degrés de liberté d'un manipulateur est le nombre de variables de position indépendantes qui doivent être spécifiées pour positionner toutes les pièces du mécanisme. C'est un terme général utilisé. Dans le cas des robots médicaux typiques, le nombre d'articulations est égal au nombre de degrés de liberté.

3.2. Commande de backstepping intégrale sur une manette à 2ddl :

Les robots manipulateurs sont des systèmes mécaniques avec une dynamique non linéaire. Dans cette application on va utiliser la commande backstepping intégrale pour traiter le cas des paramètres connus.

3.2.1. Modèle dynamique d'une manette haptique à deux degrés de liberté :

On considère un bras manipulateur rigide à deux degrés de libertés (2ddl) présenté dans la figure ci-dessous :

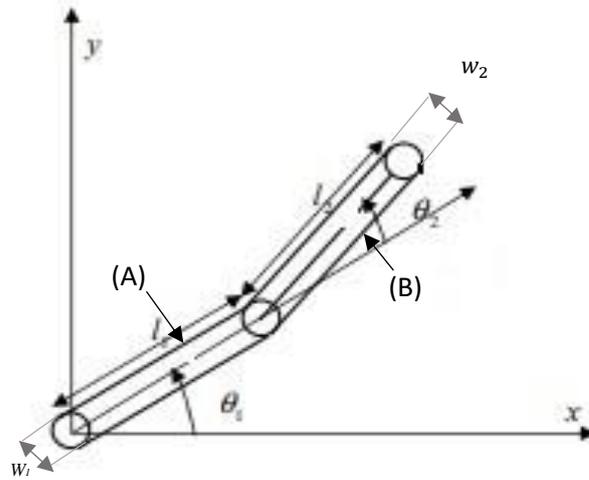


Figure 8 : Structure d'un robot manipulateur à deux degré de liberté

Le modèle dynamique de ce robot est donné par les équations matricielles suivantes :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = K_m I \quad 3.1$$

$$L\dot{I} + R_m I + K_v \dot{\theta} = U \quad 3.2$$

Matrice d'inertie :

$$M = \begin{bmatrix} \alpha + 2\beta\cos\theta_2 & \delta + \beta\cos\theta_2 \\ \delta + \beta\cos\theta_2 & \delta \end{bmatrix}$$

Matrice de Coriolis et de centrifuge :

$$C = \begin{bmatrix} -\beta(\sin\theta_2)\dot{\theta}_2 & -\beta(\sin\theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ \beta(\sin\theta_2)\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

Avec : $\alpha = I_{z_1} + I_{z_2} + m_1 \left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + m_2 \left[l_1^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2\right]$

$$\beta = m_2 l_1 \left(\frac{l_2}{2}\right)$$

$$\delta = I_{z_2} + m_2 \left(\frac{l_2}{2}\right)^2$$

I_{z_1} et I_{z_2} sont les moments d'inerties des tiges (A) et (B) avec :

$$I_{z_1} = \frac{m_1}{12}(l_1^2 + w_1^2) \quad ; \quad I_{z_2} = \frac{m_2}{12}(l_2^2 + w_2^2)$$

3.3. Suivi de trajectoire par backstepping intégrale :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = K_m I \quad \text{3.1}$$

$$L\dot{I} + R_m I + K_v \dot{\theta} = U \quad \text{3.2}$$

$\dot{\theta}, \ddot{\theta} \in \mathbb{R}^2$ (vitesse, accélération)

$M(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ (est définie positive)

$C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ (coriolis centrifuge)

$K_m \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ (commande de transmission moteur – couple inversible + diagonale)

$I \in \mathbb{R}^2$ (courant d'induit)

$U \in \mathbb{R}^2$ (contrôler la tension d'entrée)

$L \in \mathbb{R}^2$ (diagonale de l'inductance de l'actionneur)

$R_m \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ (diagonale de la résistance de l'actionneur)

$K_v \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ (constante de tension de la diagonale de l'actionneur)

Supposition 01 :

$\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d$, les trajectoires de référence souhaitées (connus, continus et bornés)

Supposition 02 :

Matrices et vecteurs du système $M(\theta)$ et $C(\theta, \dot{\theta})$ sont inconnues

Avec M^{-1} existe

Supposition 03 :

Les paramètres des actionneurs sont positives et bornés et :

$\|L\| < X_1, \|R_m\| < X_2$ et $\|K_v\| < X_3$ d'ou X_1, X_2 et X_3 sont des constantes positives

Propriété 1 :

$\dot{M} - 2C$ est une matrice symétrique connue

Lemme :

$V(y)$ fonction de Lyapunov définie positive et continue

- $\varphi_1(y) \leq V(y) \leq \varphi_2(y)$

- $\dot{V}(y) \leq -K_i V(y) + C_i$ $K_i C_i > 0$ constante

La solution y est aussi bornée.

Conception de contrôle :

Contrôle basé sur un modèle :

$$e_1 = \theta - \theta_d \tag{3.3}$$

$$e_2 = \dot{\theta} - \alpha \tag{3.4}$$

$$\alpha = \dot{\theta}_d - \Lambda e_1 \tag{3.5}$$

$$\zeta_1 = \dot{\alpha} \tag{3.6}$$

$\Lambda \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ matrice diagonale définie positive.

α controle virtuelle

Etape 1 :

$$V_1(e_1) = \frac{1}{2} e_1^T e_1 \tag{3.7}$$

On dérive V_1 , et en utilisant (3.3) à (3.7)

$$\rightarrow \dot{V}_1(e_1) = e_1^T \dot{e}_1 = (\dot{\theta} - \dot{\theta}_d)^T (\theta - \theta_d)$$

On utilise l'équation (3.3) et (3.4) pour obtenir :

$$\dot{V}_1 = e_1^T (e_2 + \alpha - \dot{\theta}_d) \tag{3.8}$$

En substituant (3.5) à (3.8) on trouve

$$\begin{aligned} &= e_1^T (e_2 + \alpha - \alpha - \Lambda e_1) \\ &= e_2 - e_1^T \Lambda e_1 \end{aligned} \tag{3.9}$$

D'après (9), on peut remarquer que $\dot{V}_1 = -e_1^T \Lambda e_1$

$$\text{Si } e_2 = 0 \rightarrow V_1(e_1, e_2) < 0$$

Etape 2 :

A partir de (3.4) nous avons :

$$\dot{\theta} = e_2 + \alpha \tag{3.10}$$

$$\ddot{\theta} = \dot{e}_2 + \dot{\alpha} = e_2 + \zeta_1 \quad 3.11$$

Modèle :

La substitution de (3.10) et (3.11) dans (3.1)

$$M(\theta)\dot{e}_2 + C(\theta, \dot{\theta})e_2 + M(\theta)\zeta + C(\theta, \dot{\theta})\alpha = K_m I \quad 3.12$$

La deuxième fonction de Lyapunov définie positive comme suit :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^T M e_2 + \frac{1}{2}e_1^T L e_1 \quad 3.13$$

$e_1 = I - I_d$ Est l'erreur de courant réel (I) est la courant désiré (I_d)

On dérive le V_2 :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2^T M \dot{e}_2 + e_1^T L \dot{e}_1 + \frac{1}{2}e_2^T \dot{M} e_2 \quad 3.14$$

Donc, en substituant ($M(\theta)\dot{e}_2$) à partir de (3.12) et en utilisant la propriété 1, donne :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2^T (K_m I - C e_2 - M \zeta_1 - C \alpha) + e_1^T L \dot{e}_1 + \frac{1}{2}e_2^T \dot{M} e_2$$

$$\dot{V}_2 = -e_1^T \Lambda e_1 + e_1^T e_2 + e_2^T (K_m I - M \zeta_1 - C \alpha) + \frac{1}{2}e_2^T (\dot{M} - 2C) e_2 + e_1^T L \dot{e}_1$$

$$\dot{V}_2 = -e_1^T \Lambda e_1 + e_1^T e_2 + e_2^T (K_m I - \mu) + e_1^T L \dot{e}_1 \quad 3.15$$

Avec $\mu = M \zeta + C \alpha$

- Choix du contrôle :

$$I = K_m^{-1}(\mu - K e_2 - e_1) \quad 3.16$$

avec $K \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$

On introduit l'équation (3.16) dans l'équation (3.15) pour obtenir le résultat suivant :

$$\rightarrow \dot{V}_2 = -e_1^T \Lambda e_1 + e_1^T + e_2^T (\mu - K e_2 - e_1 - \mu) + e_1^T L \dot{e}_1$$

$$\rightarrow \dot{V}_2 = -e_1^T \Lambda e_1 - e_2^T K e_2 + e_1^T L \dot{e}_1$$

- Control voltage :

$$U = L \dot{I}_d + R_m I + K_v \dot{\theta} - K_1 e_1 \quad 3.17$$

$, K_1(\text{diagonale positive})$

En Substituant l'équation (3.17) dans l'équation (3.2), donne :

$$L\dot{e}_I - K_1 e_I = 0 \quad 3.18$$

Cependant, puisque le courant désiré est défini selon (3.16) comme :

$$I_d = K_m^{-1}(\mu - K e_2 - e_1) \quad 3.19$$

La dynamique de la boucle de suivi de sortie (3.12) peut être réécrite comme :
(3.12) →

$$M\dot{e}_2 + C e_2 + M\zeta_1 + C\alpha = K_m(I - I_d) \quad 3.20$$

Basé sur (3.17), (3.18) et (3.16). Dans (3.15) peut être représenté comme :

$$\dot{V}_2 = -e_1^T \Lambda e_1 - e_2^T K e_2 - e_I^T K_1 e_I \quad 3.21$$

3.4. Résultat de la simulation :

Les figures suivantes montrent le résultat de simulation d'une manette haptique à deux degré de libertés par backstepping intégrale.

Pour établir les simulations nous avons pris les paramètres de synthèse suivants :

l1=0.2m l2=0.2m m1= 0.1kg m2=0.1kg gamma=2
w1=0.02 w2 =0.02 km = 0.5 kv = 0.7 rm = 20

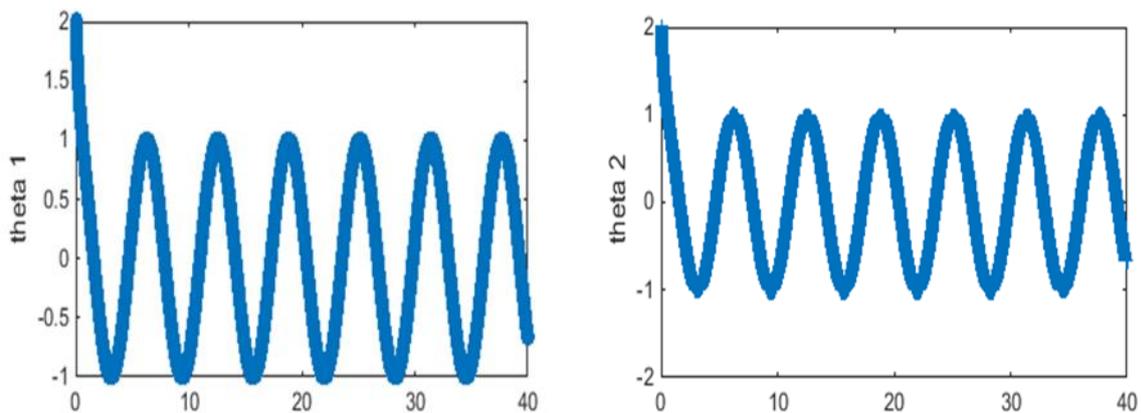


Figure 9 : suivi de trajectoire désirée pour les deux articulations

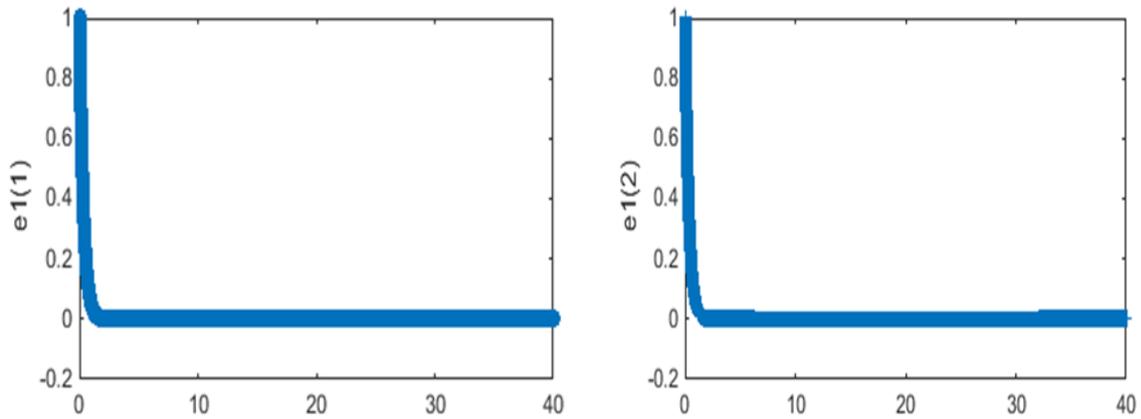


Figure 10 : Erreur ($e1$) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

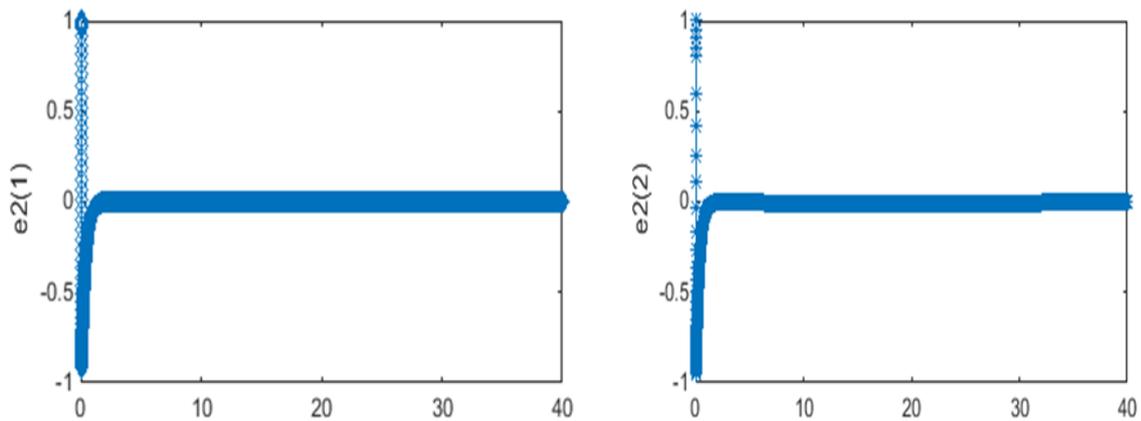


Figure 11 : Erreur ($e2$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

Interprétation :

Les figures (9), (10) et (11) représentent le résultat de la commande par backstepping intégrale lorsque tous les paramètres sont bien connus. Le suivi de trajectoire désirée est réalisé après 1 seconde et les erreurs $e1$ et $e2$ sont presque nulle est atteinte le 0 après 2 secondes.

Comme 2^{ème} essai nous allons maintenant changer les paramètres électriques et garder les paramètres mécaniques avec les valeurs du 1^{er} essai.

- Pour les paramètres nous avons pris :

$l1=0.2m$ $l2=0.2m$ $m1= 0.1kg$ $m2=0.1kg$ $gamma=2$
 $w1=0.02$ $w2 =0.02$ $km = 0.5$ $kv = 0.7$ $rm = 12$

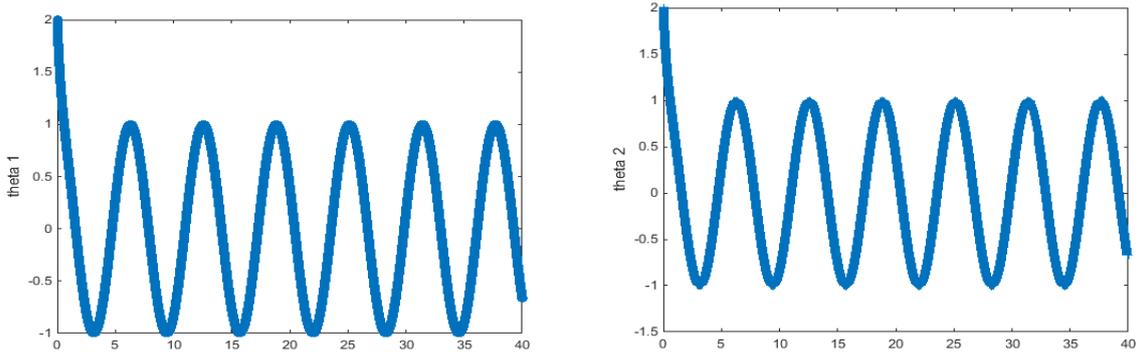


Figure 12 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

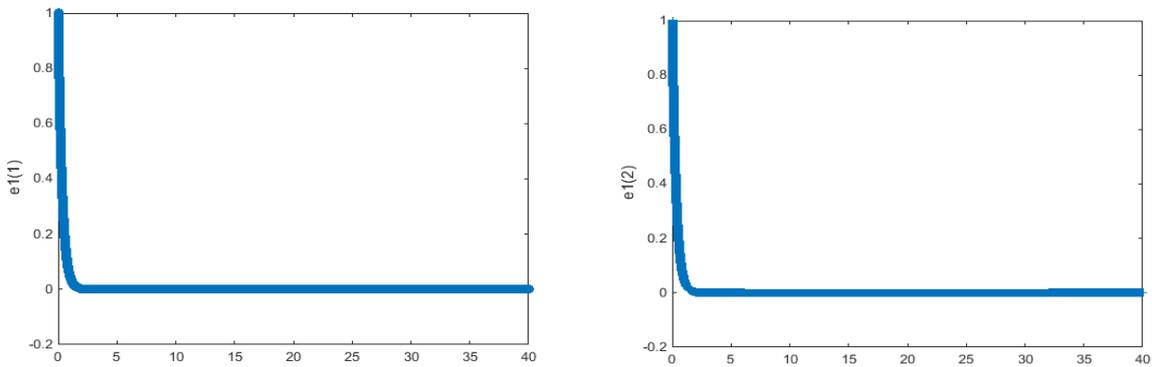


Figure 13 Erreur ($e1$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

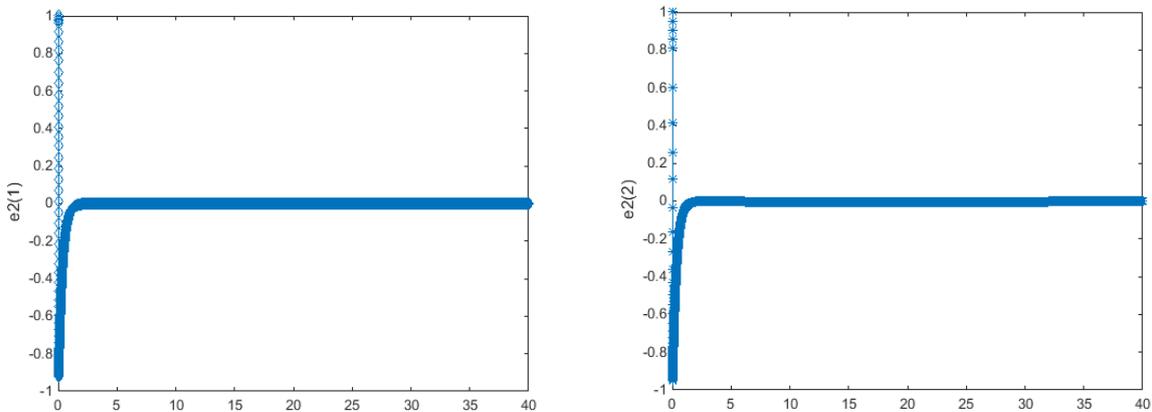


Figure 14 Erreur ($e2$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

Interprétation :

Les figures (12), (13) et (14) représentant respectivement le résultat de la commande par backstepping intégrale lorsque tous les paramètres sont bien connus. Le suivi de trajectoire désirée est réalisées après un temps petit et leurs erreurs $e1$ et $e2$ sont presque nulle et prennent la valeur 0 rapidement. Le changement des paramètres électriques n'a pas vraiment affecté sur le résultat

Pour le 3^{ème} essai on changera cette fois ci les paramètres mécaniques en gardant les valeurs originales des paramètres électriques que nous avons pris lors du 1^{er} essai.

- Pour les paramètres de synthèse nous avons pris :

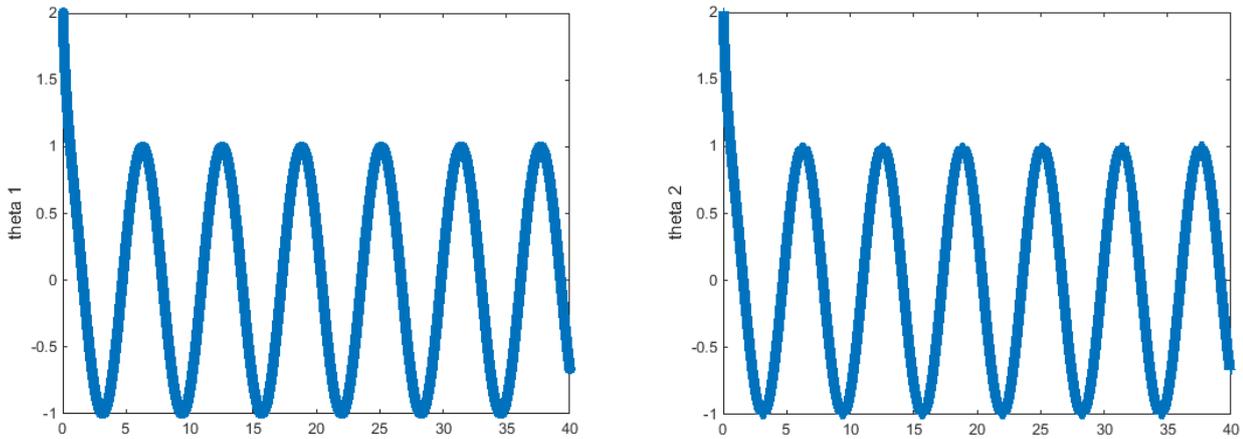


Figure 15 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

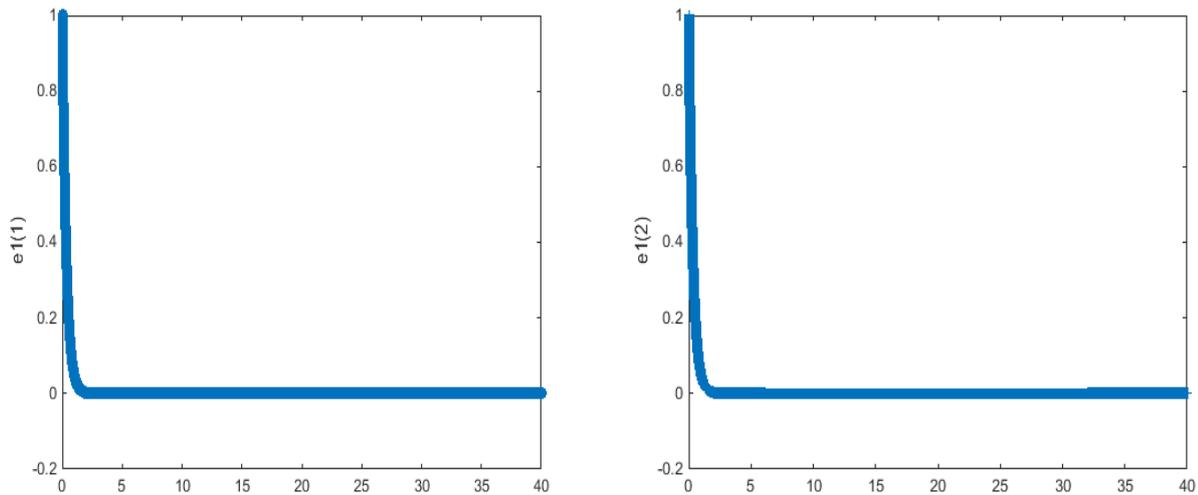


Figure 16 : Erreur ($e1$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

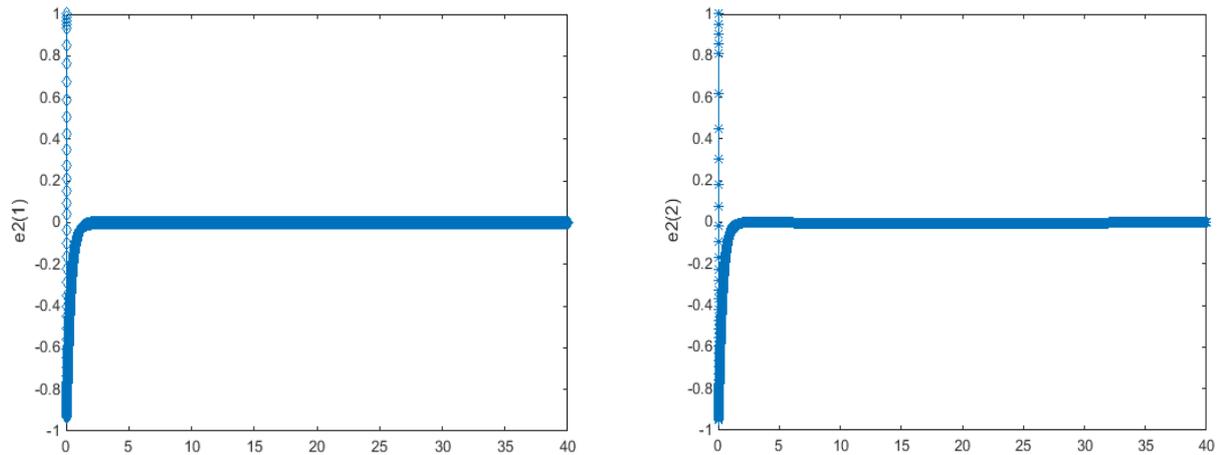


Figure 17 : Erreur (e_2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

Interprétation :

Les figures (15), (16) et (17) montrent le suivi de trajectoire. On remarque que les trajectoires désirées et les erreurs poursuite tendent vers zéro vers un temps qui ne dépasse pas trois secondes et cela revient à l'impact de l'adhésion de l'action intégrale au backstepping.

$l_1=0.15m$	$l_2=0.25m$	$m_1=0.12kg$	$m_2=0.09kg$	$\gamma=2$
$w_1=0.03$	$w_2=0.03$	$k_m=0.125$	$k_v=0.6$	$r_m=20$

Et pour le dernier essai qui est le 4^{ème} on change les deux paramètres électriques et mécaniques au même temps.

- Pour les paramètres de synthèse nous avons pris :

$l_1=0.25m$	$l_2=0.09m$	$m_1=0.12kg$	$m_2=0.15kg$	$w_1=0.4$	$w_2=0.5$
$k_m=0.7$	$k_v=0.3$	$r_m=19$	$\gamma=2.5$		

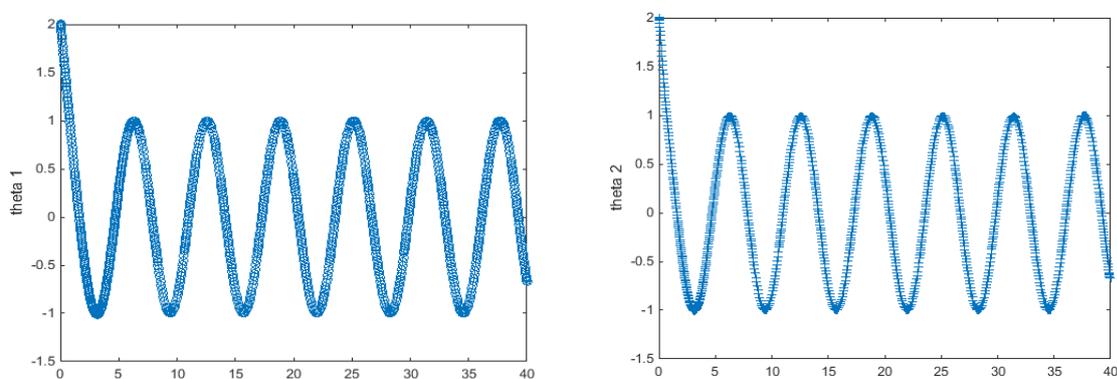


Figure 18 : Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

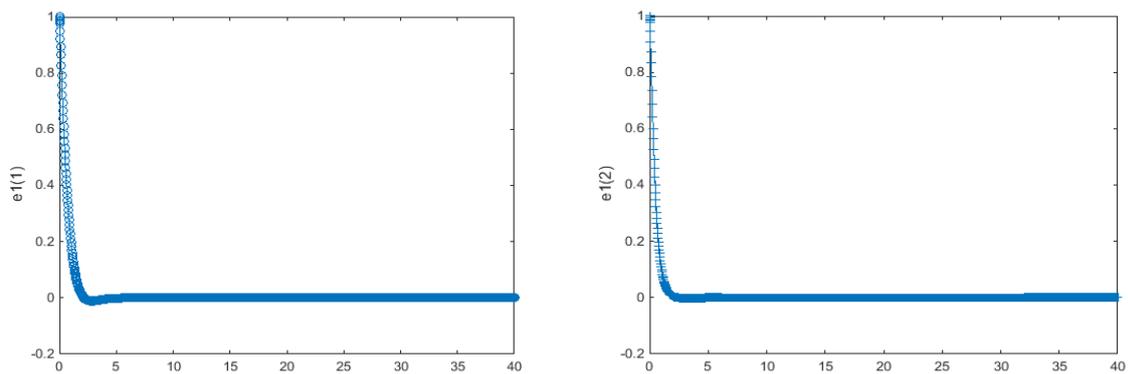


Figure 19 : Erreur ($e1$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

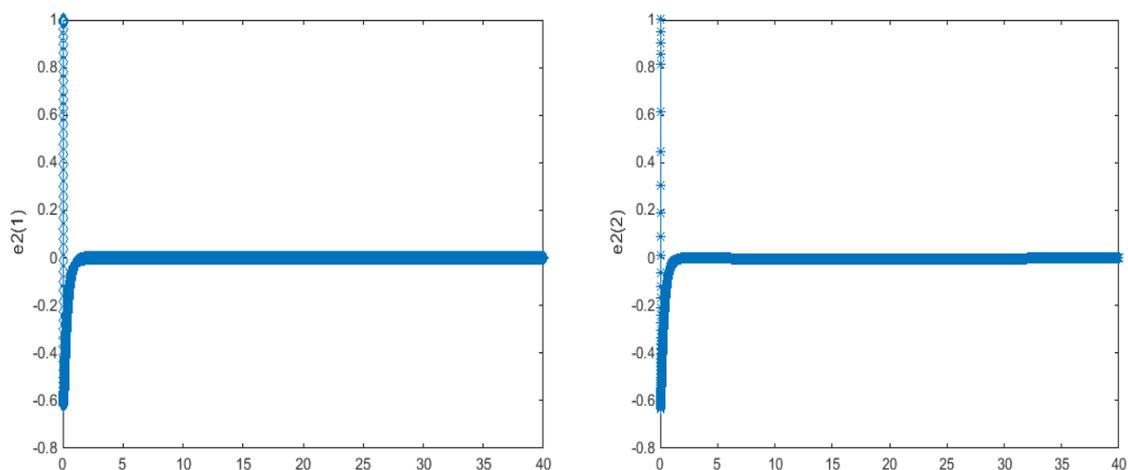


Figure 20 : Erreur ($e2$) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

Interprétation :

Les résultats de simulation sont donnés, respectivement par les figures (18), (19) et (20), leur suivi de trajectoire. On remarque que les trajectoires désirées et les erreurs poursuite tendent vers zéro vers un temps qui ne dépasse pas deux secondes et cela revient à l'impact de l'adhésion de l'action intégrale au backstepping. L'erreur de suivi (2) après avoir effectué un changement au niveau des paramètres électriques et mécaniques au même temps et on note bien que cette erreur tends vers le zéro rapidement et descend pas jusqu'à la valeur de -1 en la comparant au^x essais effectué auparavant.

3.5. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre était de suivre la trajectoire par backstepping intégrale sur une manette à deux degrés de libertés.

Ce chapitre était à l'origine consacré à la présentation générale de commande par backstepping intégrale, est conçue et une analyse de stabilité est établie (l'objectif, la méthode)

On conclut que le changement commis a un impact sur l'erreur de suivi.

L'ajout de l'action intégrale au backstepping aide les erreurs de suivi à converger vers la valeur nulle dans un temps rétrécie et cela assure et confirme l'impact de cette action à éliminer ces erreurs.

4. Chapitre 4 : Suivi de trajectoires par backstepping adaptatif sur une manette à deux degrés de liberté

4.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est l'évaluation de la robustesse et les performances, pour résoudre les problèmes de la commande non linéaires de la position de la manette à deux degrés de liberté et planifier sa trajectoire qui est un sujet d'étude très important dans le domaine de la robotique, nous proposons une commande adaptative pour trouver un chemin « sûr », assurant la stabilité du système. La première partie introduit un principe de la reconnaissance de la commande de backstepping adaptatif.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'application de la commande adaptative par backstepping à suivi de trajectoire de la manette à 2ddl.

Enfin, nous présentons les résultats de simulation obtenus.

4.2. Commande par backstepping adaptatif :

La commande de backstepping adaptatif est développée comme technique avancée pour surmonter l'incertitude des paramètres. Backstepping adaptatif la version adaptative du backstepping fournit une approche itérative et systématique, permet pour des systèmes non linéaires d'ordre quelconque de construire récursivement les trois parties nécessaire à une commande adaptative basée sur Lyapunov.

- Loi de commande : permet de respecter les spécifications quant au comportement du système commandé.

- Loi d'adaptation : permet de déterminer la dynamique d'estimation des paramètres inconnus.

Il doit assurer leur convergence vers les valeurs respectives, sans affecter le fonctionnement, notamment la stabilité de l'ensemble.

- Fonction de Lyapunov : permet une sélection complète des deux lois précédentes, et assure la convergence et la stabilité de la structure adaptative à tout moment.

La construction de ce triplet s'effectue simultanément. Trois opérations sont effectuées en alternance, peut prendre en compte différents effets destructeurs, afin de maintenir la stabilité du système. Le système est globalement asymptotiquement stable par backstepping adaptatif dont le but de minimiser l'erreur de suivi et d'assurer la stabilité de Lyapunov.

4.3. Principe de la commande par backstepping adaptatif :

Un exemple sera utilisé pour démontrer la stabilité de la commande backstepping adaptative (Benaskeur, 2002). Considérons le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \theta_1 f_1(x_1) & S_1 \\ \dot{x}_2 = \theta_2 f_2(x_1, x_2) + u & S_2 \end{cases} \quad 4.1$$

f_1 et f_2 sont deux fonctions dérivables. Considérons (S_1). Si x_2 était l'entrée, pour la déterminer, ainsi que la loi d'adaptation de θ_1 , nous définirons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2\gamma}(\theta_1 - \hat{\theta}_1)^2 \quad 4.2$$

Avec : θ_1 est le paramètre inconnu à estimer

γ est un gain positif

$\hat{\theta}_1$ est l'estimation de θ_1

- La dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V}_1 = x_1\dot{x}_1 - \frac{1}{\gamma}(\theta_1 - \hat{\theta}_1)\dot{\hat{\theta}}_1 \quad 4.3$$

$$\dot{V}_1 = x_1(x_2 + \theta_1 f_1(x_1)) - \frac{1}{\gamma}(\theta_1 - \hat{\theta}_1)\dot{\hat{\theta}}_1$$

$$\dot{V}_1 = x_1(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1(x_1)) + x_1(\theta_1 - \hat{\theta}_1)f_1(x_1) - \frac{1}{\gamma}(\theta_1 - \hat{\theta}_1)\dot{\hat{\theta}}_1$$

$$\dot{V}_1 = x_1(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1(x_1)) + (\theta_1 - \hat{\theta}_1)\left\{x_1 f_1(x_1) - \frac{1}{\gamma}\dot{\hat{\theta}}_1\right\} \quad 4.4$$

$$\dot{V}_1 \leq 0 \text{ Si } \begin{cases} x_2 = x_2^* = -K_1 x_1 - \hat{\theta}_1 f_1(x_1) \\ \dot{\hat{\theta}}_1 = \gamma x_1 f_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \dot{V}_1 = -K_1 x_1 \leq 0$$

Or x_2 était utilisé pour définir l'erreur e_2 .

$$e_2 = x_2 - x_2^* = x_2 + K_1 x_1 + \hat{\theta}_1 f_1(x_1)$$

$$\Rightarrow x_2 = e_2 - K_1 x_1 - \hat{\theta}_1 f_1(x_1)$$

Par conséquent \dot{x}_1 devient :

$$\dot{x}_1 = -K_1 x_1 + e_2 + (\theta_1 - \hat{\theta}_1)f_1(x_1) \quad 4.5$$

La dynamique de e_2 est :

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & \theta_2 f_2(x_1, x_2) + K_1(x_2 + \theta_1 f_1(x_1)) + \dot{\hat{\theta}}_1 f_1(x_1) \\ & + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_2 + \theta_1 f_1(x_1)) + u \end{aligned} \quad 4.6$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & \hat{\theta}_2 f_2(x_1, x_2) + K_1(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1(x_1)) + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_2 + \theta_1 f_1(x_1)) + \dot{\hat{\theta}}_1 f_1(x_1) \\ & + (\theta_2 - \hat{\theta}_2) f_2(x_1, x_2) + (\theta_1 - \hat{\theta}_1) \left\{ K_1 f_1(x_1) + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \cdot f_1(x_1) \right\} + u \end{aligned} \quad 4.7$$

Soit V_2 une nouvelle fonction de Lyapunov :

$$V_2 = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2\gamma} (\theta_1 - \hat{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2\gamma} (\theta_2 - \hat{\theta}_2)^2 \quad 4.8$$

La dérivée de V_2 est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \mathbf{x}_1 \{ (\theta_1 - \hat{\theta}_1) f_1(x_1) e_2 K_1 x_1 \} \\ & + \mathbf{e}_2 \left\{ \hat{\theta}_2 f_2 + K_1(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1) + (\theta_2 - \hat{\theta}_2) f_2 + \dot{\hat{\theta}}_1 f_1 + u \right. \\ & + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2}(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1) + (\theta_1 - \hat{\theta}_1) \left(K_1 f_1 + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2} \cdot f_1 \right) \\ & \left. - \frac{1}{\gamma} (\theta_1 - \hat{\theta}_1) \dot{\hat{\theta}}_1 - \frac{1}{\gamma} (\theta_2 - \hat{\theta}_2) \dot{\hat{\theta}}_2 \right\} \end{aligned} \quad 4.9$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -K_1 x_1^2 + e_2 \left\{ K_1(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1) + x_1 + \dot{\hat{\theta}}_1 f_1 + u + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2}(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1) \right\} \\ & + (\theta_1 - \hat{\theta}_1) \left\{ x_1 f_1 + \mathbf{e}_2 \left(\hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2} x_1 + K_1 f_1 - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_1 \right) \right\} \\ & + (\theta_2 - \hat{\theta}_2) \left\{ \mathbf{e}_2 f_2 - \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{\theta}}_2 \right\} \end{aligned} \quad 4.10$$

On calcule u , $\dot{\hat{\theta}}_1$ et $\dot{\hat{\theta}}_2$ de façon à rendre \dot{V}_2 semi-définie négative :

$$\begin{cases} u = -x_1 K_1(x_2 + \theta_1 f_1) - K_2 e_2 - \hat{\theta}_2 f_2 - \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2}(x_2 + \hat{\theta}_1 f_1) - \dot{\hat{\theta}}_1 f_1 \\ \dot{\hat{\theta}}_1 = \gamma \left[K_1 f_1 + \hat{\theta}_1 \frac{\partial f_1}{\partial f_2} x_1 \right] \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = \gamma e_2 f_2 \end{cases} \quad 4.11$$

$$\dot{V}_2 = -K_2 x_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0$$

D'où le système **4.11** est asymptotiquement stable

4.4. Commande de backstepping adaptatif appliqué au suivi de la trajectoire :

Quand la manette haptique se déplace, les paramètres de modèle ne peuvent pas être connus avec précision (les matrices M et C).

Il faut donc trouver une méthode fiable, dans notre cas de backstepping adaptatif qui est utilisé, afin de modifier la dynamique estimée pour éliminer l'erreur de suivi et assuré la stabilité des systèmes. Cette commande présente une exécution remarquable et très facile.

4.5. Application de la commande backstepping adaptatif sur une manette à deux degrés de liberté :

$$I_d = K_m^{-1}(\hat{M}(\eta)\zeta + \hat{C}(\eta, \dot{\eta})\alpha - Ke_2 - e_1) \quad 4.12$$

Et

$$u = \hat{f} - K_1 e_1 \quad 4.13$$

Où \hat{M} et \hat{C} sont des estimations de M et C et \hat{f} est une estimation de la fonction $f(I_d, I, \dot{\eta}) = L \dot{I}_d + R_m I + K_v \dot{\eta}$.

Au lieu de formuler les matrices de le robot manipulateur (1) et les paramètres des actionneurs par approche FAT Huang und Chien (2010); Chien und Huang (2004), une nouvelle modification peut être apportée à cette approche en éliminant l'introduction de fonctions de base qui seraient autrement choisi manuellement et affecterait directement la précision de l'adaptation. Ainsi, définissez :

$$\begin{cases} M_e = M - \varepsilon_M \\ C_e = C - \varepsilon_C \\ F_e = f - \varepsilon_f \end{cases} \quad 4.14$$

tel que $M_e \in R^{n \times n}$, $C_e \in R^{n \times n}$ et $F_e \in \mathbb{R}^n$ est la meilleure approximation de la matrice inertie/masse, Coriolis et matrice centrifuge, force gravitationnelle et forces externes, $\varepsilon_M \in R^{n \times n}$, $\varepsilon_C \in R^{n \times n}$, respectivement, et $\varepsilon_f \in \mathbb{R}^n$ sont les erreurs d'approximation bornées.

En insérant l'équation **4.12** en **3.18**, la dynamique de la boucle de suivi de sortie **3.18** devient :

$$M \dot{e}_2 + C e_2 + M_e \zeta + C_e \alpha + G_e - \varepsilon_1 = K_m (I - I_d) \quad 4.15$$

Où $\varepsilon_1 = \varepsilon(\varepsilon_M, \varepsilon_C) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'erreur d'approximation forfaitaire. En substituant **2.21** à (**), la représentation dynamique du mouvement de la boucle de suivi de courant **2.16** devient :

$$L\dot{e}_1 + F_e - \varepsilon_2 = u \quad 4.16$$

où $\varepsilon_2 = \varepsilon(\varepsilon_f) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'erreur d'approximation des paramètres des actionneurs.

Par conséquent, l'entrée courant/tension de commande (**2.20**, **2.21**) peut être reformulée comme suit :

$$I_d = K_m^{-1}(\widehat{M}_e \zeta + \widehat{C}_e - K e_2 - e_1) \quad 4.17$$

$$u = \widehat{F}_e - K_1 e_1 \quad 4.18$$

Le remplacement de l'entrée de commande de courant (**4.15**) dans (**4.13**) et de commande de tension **4.16** dans **4.14** donne :

$$M\dot{e}_2 + C e_2 + K e_2 + e_1 = K_m(I - I_d) - \widetilde{M}_e \zeta - \widetilde{C}_e \alpha + \varepsilon_1 \quad 4.19$$

$$L\dot{e}_1 + K_1 e_1 = -\widetilde{F}_e + \varepsilon_2 \quad 4.20$$

Où $\widetilde{M}_e = M_e - \widehat{M}_e$, $\widetilde{C}_e = C_e - \widehat{C}_e$, et $\widetilde{F}_e = F_e - \widehat{F}_e$ sont les erreurs d'estimations. Une sélection de lois mises à jour appropriées conduit directement : $I \rightarrow I_d$, $\widetilde{M}_e \rightarrow 0$, $\widetilde{C}_e \rightarrow 0$, et $\widetilde{F}_e \rightarrow 0$.

Remarque 1. Contrairement au FAT conventionnel Huang und Chien (2010) ; Chien und Huang (2004) qui ignore les erreurs d'approximation : ε_M , ε_C , et ε_f , ces erreurs sont pris en compte dans le contrôleur proposé. Leurs variations sont bornées et satisfont : $\|k\varepsilon_1\| \leq \gamma_1$, et $\|k\varepsilon_2\| \leq \gamma_2$, où γ_1 , γ_2 sont des constantes positives inconnues [16].

Une fonction candidate de Lyapunov peut être constituée comme suit :

$$V_3 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T M e_2 + \frac{1}{2} e_1^T L e_1 + \frac{1}{2} \text{Tr}(\widetilde{M}_e^T \Lambda_{M_e} \widetilde{M}_e + \widetilde{C}_e^T \Lambda_{C_e} \widetilde{C}_e + \widetilde{F}_e^T \Lambda_{F_e} \widetilde{F}_e) \quad 4.21$$

où $\Lambda_{M_e} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Lambda_{C_e} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Lambda_{F_e} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sont des matrices diagonales définies positives, et $\text{Tr}(\cdot)$ représente la trace de la matrice. En remplaçant **3.7** dans la dérivée temporelle de **4.19**, on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -e_1^T \Lambda e_1 + e_1^T M \dot{e}_2 + \frac{1}{2} e_2^T \dot{M} e_2 + e_1^T L \dot{e}_1 + \text{Tr}(\dot{\widetilde{M}}_e^T \Lambda_{M_e} \widetilde{M}_e + \dot{\widetilde{C}}_e^T \Lambda_{C_e} \widetilde{C}_e \\ & + \dot{\widetilde{F}}_e^T \Lambda_{F_e} \widetilde{F}_e \end{aligned} \quad 4.22$$

Si on insert $\dot{M} e_2$ de l'équation **4.17** et $L \dot{e}_1$ de l'équation **4.18** dans **4.20**, Eq. **4.20** devient :

4.23

$$\dot{V}_3 = -e_1^T \Lambda e_1 + e_2^T \left(\frac{1}{2} \dot{M} - C \right) e_2 - e_2^T K e_2 - e_2^T \tilde{M}_e \zeta - e_2^T \tilde{C}_e \alpha - e_1^T \tilde{F}_e - e_1^T K_1 e_1 + e_1^T \varepsilon_2 + Tr(\tilde{M}_e^T \Lambda_{M_e} \tilde{M}_e + \tilde{C}_e^T \Lambda_{C_e} \tilde{C}_e + \tilde{F}_e^T \Lambda_{F_e} \tilde{F}_e)$$

Si on utilise **Propriété1**, et les relations suivantes :

$$e_2^T \tilde{M}_e \zeta = Tr(\zeta e_2^T \tilde{M}_e) \quad 4.24$$

$$e_2^T \tilde{C}_e \alpha = Tr(\alpha e_2^T \tilde{C}_e) \quad 4.25$$

$$e_1^T \tilde{F}_e = Tr(\tilde{F}_e e_1^T) \quad 4.26$$

L'équation 4.21 peut être réduite :

$$\dot{V}_3 = -e_1^T \Lambda e_1 - e_2^T K e_2 - e_1^T K_1 e_1 + e_2^T \varepsilon_1 + e_1^T \varepsilon_2 - Tr(\zeta e_2^T \tilde{M}_e + \alpha e_2^T \tilde{C}_e + e_1^T \tilde{F}_e) + Tr(\tilde{M}_e^T \Lambda_{M_e} \tilde{M}_e + \tilde{C}_e^T \Lambda_{C_e} \tilde{C}_e + \tilde{F}_e^T \Lambda_{F_e} \tilde{F}_e) \quad 4.27$$

Par conséquent, par répartition :

$$\dot{V}_3 = -e_1^T \Lambda e_1 - e_2^T K e_2 - e_1^T K_1 e_1 + e_2^T \varepsilon_1 + e_1^T \varepsilon_2 + Tr\left(\left(\tilde{M}_e^T \Lambda_{M_e} \tilde{M}_e - \zeta e_2^T\right) \tilde{M}_e\right) + Tr\left(\left(\tilde{C}_e^T \Lambda_{C_e} \tilde{C}_e - \alpha e_2^T\right) \tilde{C}_e\right) + Tr\left(\left(\tilde{F}_e^T \Lambda_{F_e} \tilde{F}_e - e_1^T\right) \tilde{F}_e\right) \quad 4.28$$

où $(\cdot)_e = (\cdot)_e - (\cdot)_e$. Les lois mises à jour ont été incorporées pour assurer la stabilité (semi-définie négative de la dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov candidate (\dot{V}_3) du robot manipulateur comme suit :

$$\begin{cases} \hat{M}_e^T = (\zeta e_2^T + \mu_{M_e} \tilde{M}_e^T) \Lambda_{M_e}^{-1} \\ \hat{C}_e^T = (\alpha e_2^T + \mu_{C_e} \tilde{C}_e^T) \Lambda_{C_e}^{-1} \\ \hat{F}_e^T = (e_1^T + \mu_{F_e} \tilde{F}_e^T) \Lambda_{F_e}^{-1} \end{cases} \quad 4.29$$

D'où $\mu_{(\cdot)_e} > 0$, et définie : $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_{(\cdot)_e} = 0$ and $\int_0^t \mu_{(\cdot)_e} dt = Q_{(\cdot)_e} < \infty$.

En Substituant 4.27 dans 4.26, ça donne :

$$\dot{V}_3 = -e_1^T \Lambda e_1 - e_2^T K e_2 - e_1^T K_1 e_1 + e_2^T \varepsilon_1 + e_1^T \varepsilon_2 + \mu_{M_e} Tr(\tilde{M}_e^T \tilde{M}_e) + \mu_{C_e} Tr(\tilde{C}_e^T \tilde{C}_e) + \mu_{F_e} Tr(\tilde{F}_e^T \tilde{F}_e) \quad 4.30$$

4.6. Résultats de la simulation :

La simulation présentées dans ce chapitre sont réalisées le backstepping adaptatif sur manette à 2ddl en prenant de nouveaux paramètres pour les masses, longueurs, gain...

Pour les paramètres de système nous avons pris :

$m_1 = 0.1;$ $m_2 = 0.1;$ $l_1 = 0.2;$ $l_2 = 0.2;$ $k_m = 0.5;$
 $k_v = 0.7;$ $r_m = 20;$ $\gamma = 2;$ $w_1 = 0.02;$ $w_2 = 0.02;$

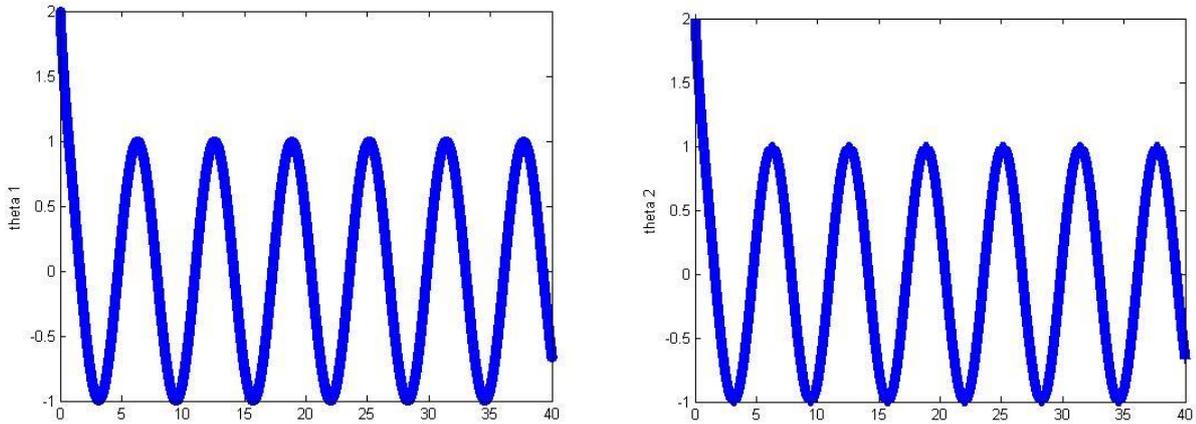


Figure 21 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

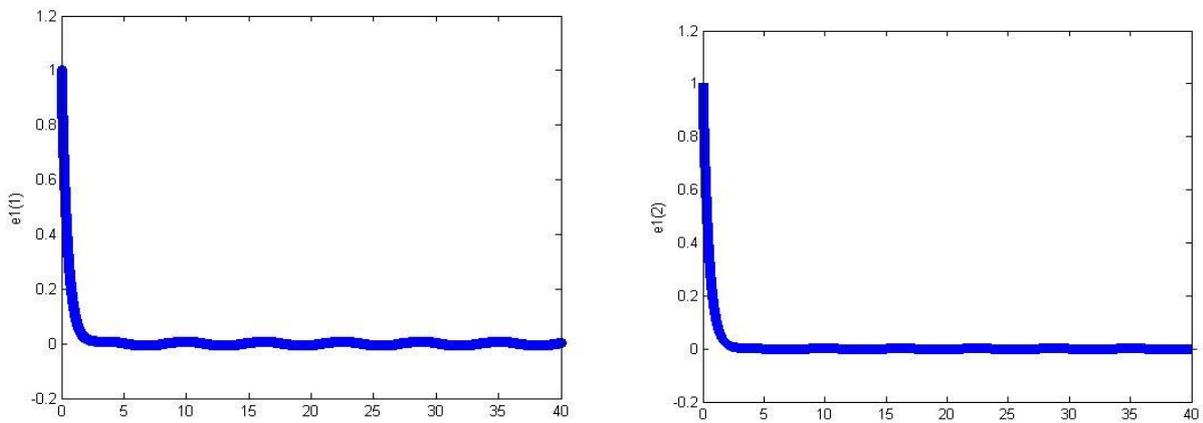


Figure 22 Erreur (e1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

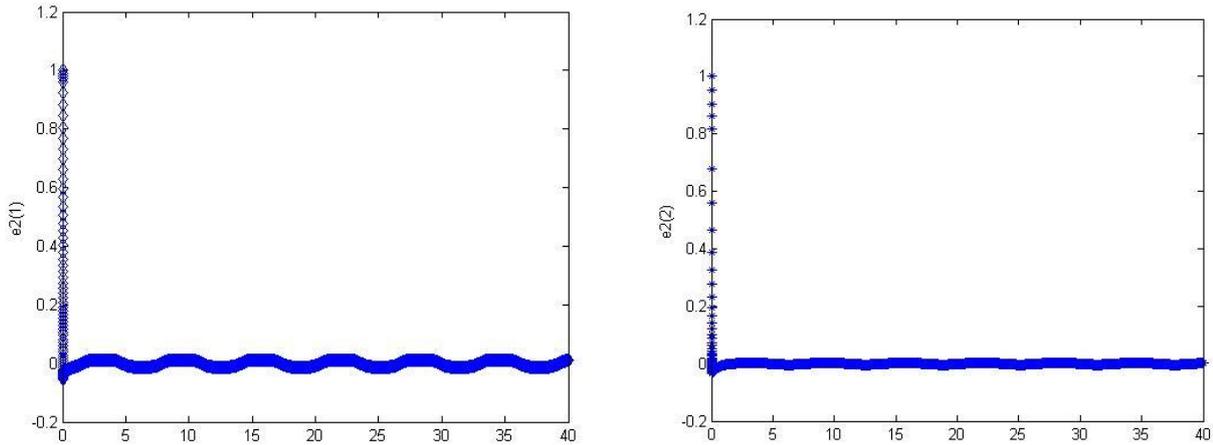


Figure 23 Erreur (e_2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulations

Interprétation :

Les résultats de simulation fournis par les figures (21),(22),et (23) à travers lesquels on peut voir les bonnes performances de la commande de backstepping adaptatif sur la manette à deux degré de liberté .Le suivi de trajectoire très satisfaisant. Les erreurs de suivi presque nul, il est acceptable.

Nous pouvons conclure en examinant tous les résultats que la commande appliquée sur la manette à 2ddl garantit asymptotiquement la stabilité globale du système.

L'erreur de suivi e_2 oscille légèrement au niveau de la valeur 0 mais se stabilise et prend cette dernière valeur.

Pour le 2^{ème} essai on change les paramètres électriques en gardant les mêmes valeurs du 1^{er} essai des paramètres mécaniques :

Les valeurs prises sont :

$$\begin{array}{lllll}
 m_1 = 0.1; & m_2 = 0.1; & l_1 = 0.2; & l_2 = 0.2; & w_1 = 0.02; \\
 w_2 = 0.02; & k_m = 0.5; & k_v = 0.7; & r_m = 14.5; & \text{gamma} = 2;
 \end{array}$$

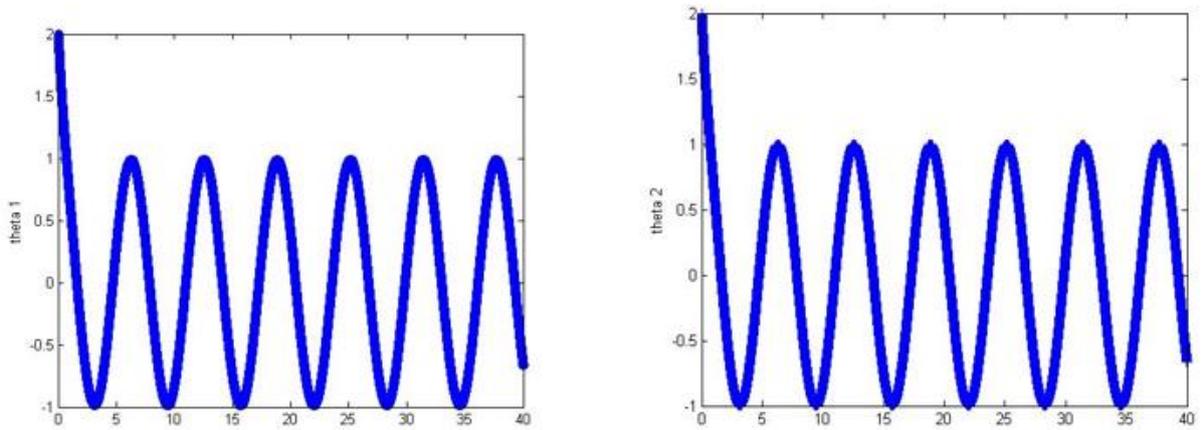


Figure 24 : Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

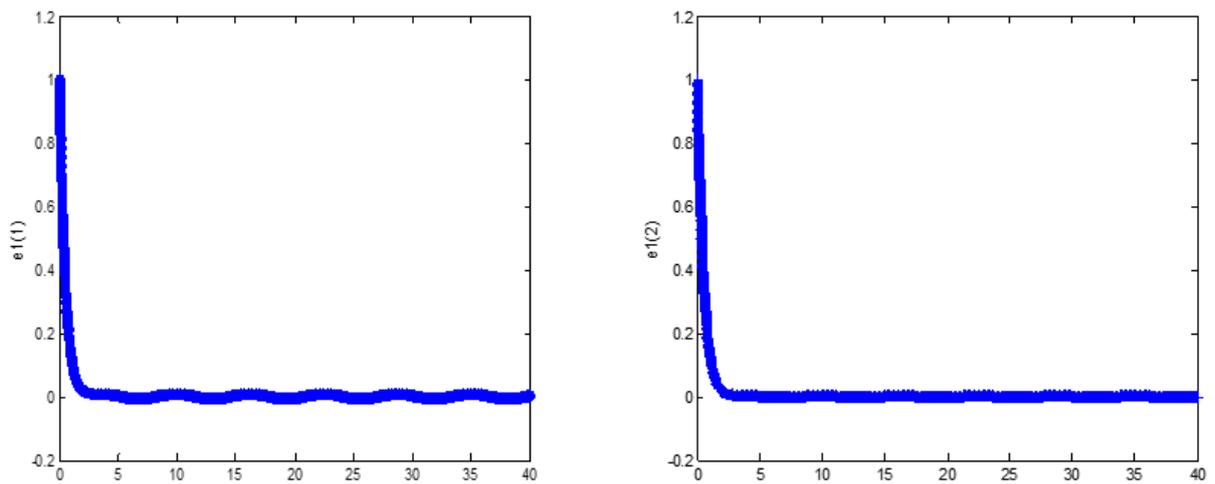


Figure 25 : Erreur ($e1$) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

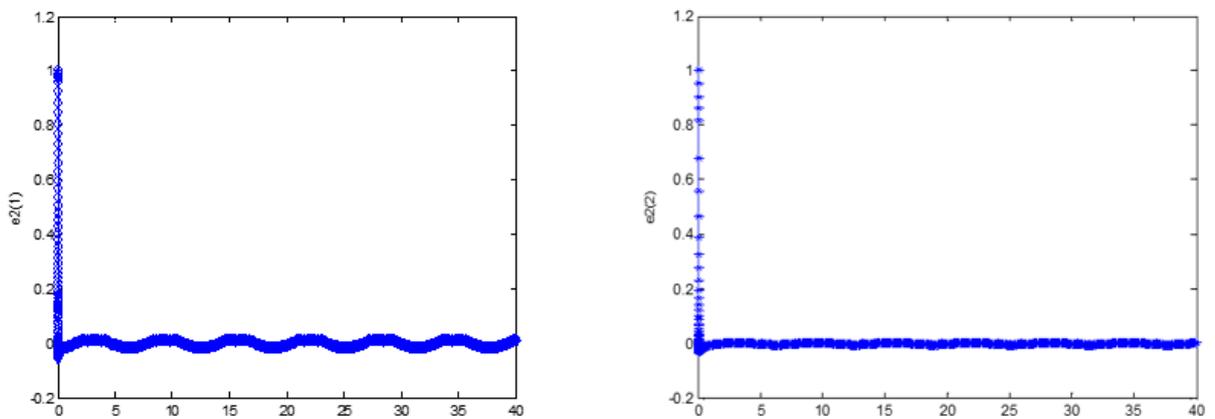


Figure 26 : Erreur ($e2$) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

Interprétation :

Les figures (24), (25) et (26) montre des résultats similaires aux celles d'auparavant on ne remarque aucun changement au niveau des erreurs ni du suivi de la trajectoire désirée pour les deux articulations. L'erreur de suivi e_2 oscille légèrement au niveau de la valeur 0 mais se stabilise et prend cette dernière valeur.

On peut mettre comme remarque que le changement des paramètres électriques n'affecte pas sur le résultat.

Dans ce 3^{ème} essai nous allons changer les paramètres mécaniques en gardant les paramètres électriques comme dans le 1^{er} essai :

Les valeurs prises :

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 0.13; & m_2 &= 0.095; & I_1 &= 0.21; & I_2 &= 0.17; & k_m &= 0.8; \\
 k_v &= 0.6; & r_m &= 20; & \gamma &= 2; & w_1 &= 0.03; & w_2 &= 0.03;
 \end{aligned}$$

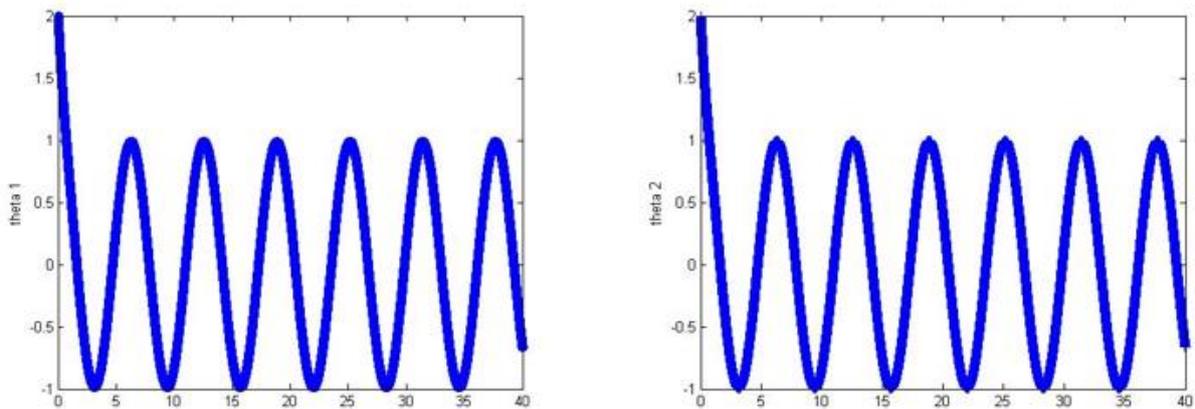


Figure 27 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

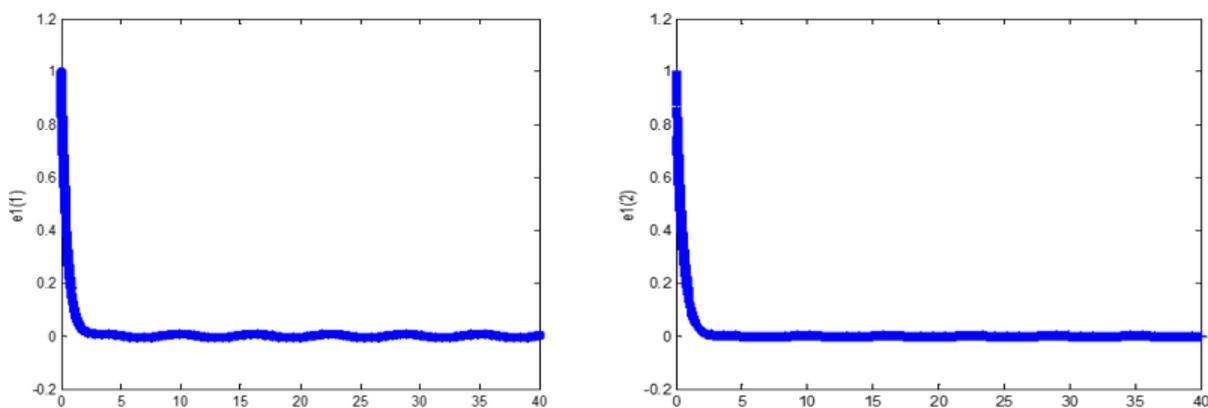


Figure 28 Erreur (e_1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

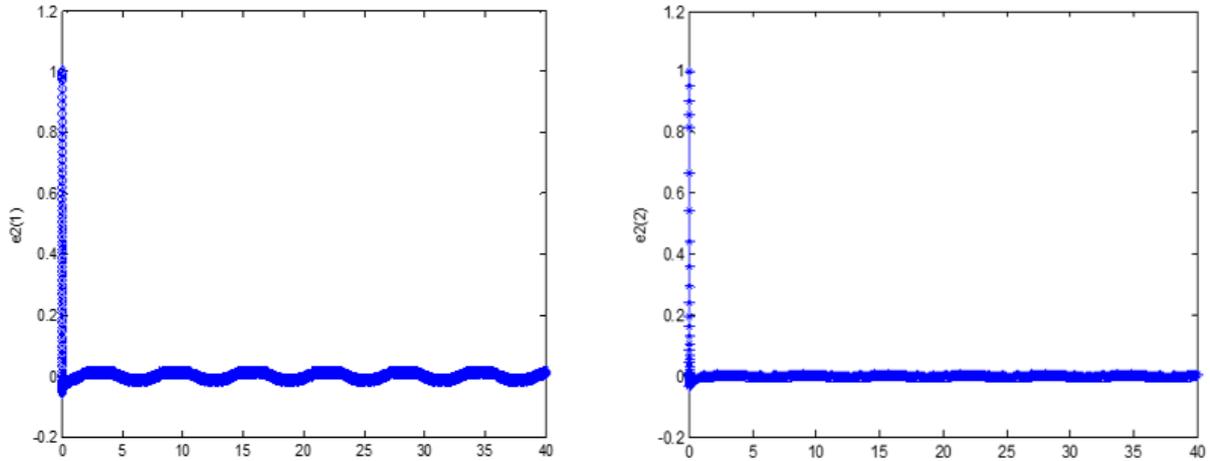


Figure 29 Erreur (e_2) de suivi de la trajectoire désirée pour les deux articulations

Interprétation :

La même remarque pour le résultat obtenu lors du 2^{ème} essai.

Les résultats de simulation donnée par les figures (27), (28) et (29) à travers lesquels on peut voir le suivi de trajectoire qui est très satisfaisant. Les erreurs de suivi presque nul, avec des oscillations légères mais le résultat est acceptable.

Après avoir changé tous les paramètres électriques et mécaniques au même temps on obtient ces résultats :

Les valeurs prises lors de ce 4^{ème} essai :

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 0.2; & m_2 &= 0.16; & l_1 &= 0.33; & l_2 &= 0.17; & k_m &= 0.8; \\
 k_v &= 0.6; & r_m &= 23; & \gamma &= 4; & w_1 &= 0.025; & w_2 &= 0.025;
 \end{aligned}$$

Les résultats obtenus :

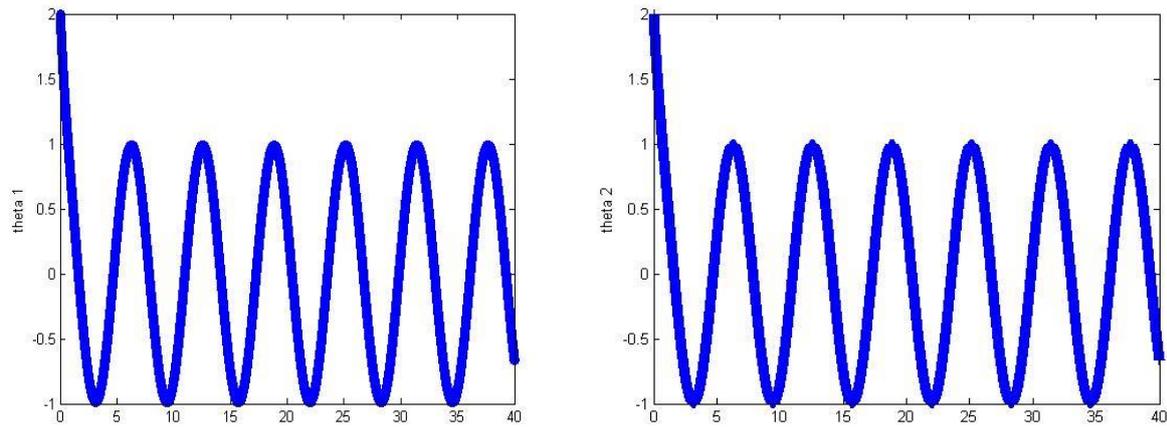


Figure 30 Suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

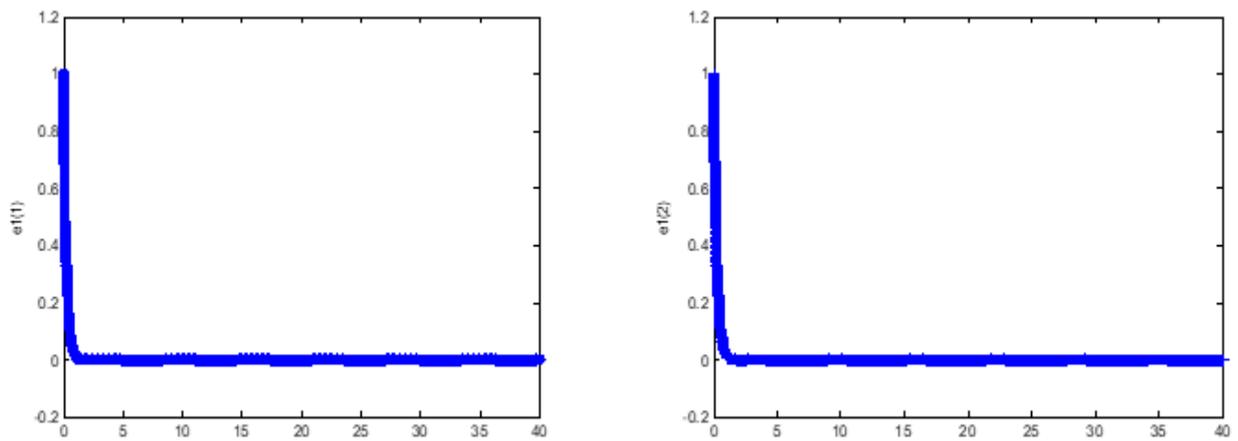


Figure 31 Erreur (e_1) de suivi de la trajectoire désirée pour deux articulations

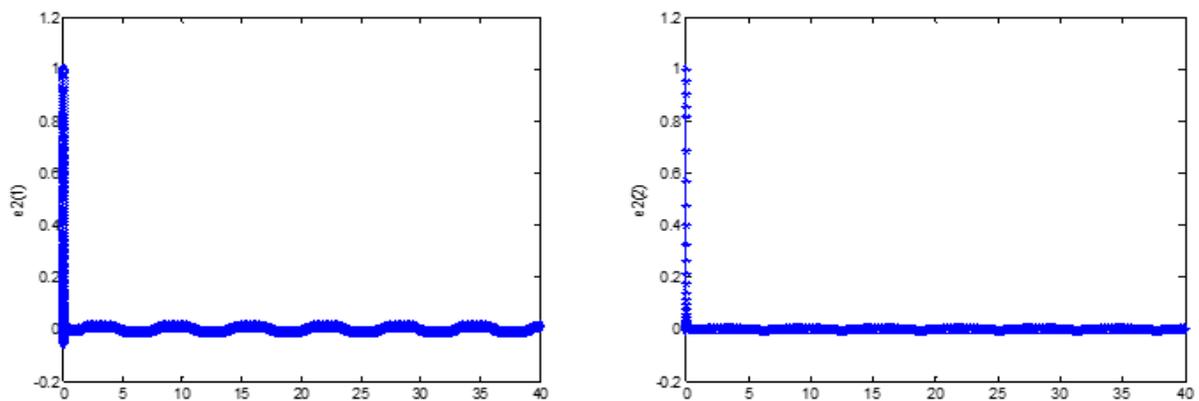


Figure 32 Erreur (e_2) de suivi de la trajectoire désirée pour de articulation

Interprétation :

Pour validation des résultats de simulation de la commande de backstepping adaptatif sur la manette à deux degrés de liberté, nous avons changé quelques paramètres.

Les figures (31) et (32) montrent que les erreurs de suivi sont négligeables, malgré le changement des paramètres la commande de backstepping adaptatif qui assure la stabilité du système.

Le temps qu'il a fallu pour atteindre la valeur zéro est trop petit et cela revient la rapidité du système grâce à l'approche backstepping adaptatif.

Les résultats ne sont pas si différents que celles des essais précédents.

Remarque :

Les performances de la robustesse sont satisfaisantes, nous remarquons que la commande du backstepping adaptatif utilisée a permis la stabilisation et la poursuite de trajectoire désirée.

4.7. Conclusion :

Après un rappel du principe de backstepping adaptatif .ce chapitre a été consacré au développement de la méthode de backstepping adaptatif et son application sur une manette à deux degrés de liberté. La commande backstepping adaptatif a permis de résoudre le problème de la stabilisation des systèmes non linéaires, en présence d'incertitudes paramétriques. Les résultats qu'on a obtenus sont encourageants, les erreurs de suivi de trajectoire convergent vers le zéro, sont acceptables, cette commande assure la stabilité du système et cela nous permet également d'assurer la robustesse de cette méthode et des performances améliorées.

Conclusion Générale:

Les travaux qu'on a présentés dans ce mémoire concernent une étude détaillée de la commande d'une manette à deux degrés de liberté, cette étude a été faite et appliquée par plusieurs techniques de contrôle.

Dans le premier chapitre on s'est concentré sur l'état de l'art de ces manettes et leur utilisation dans les simulateurs de la chirurgie et à quel point la technologie ne cesse de développer ce genre de manette pour faciliter aux médecins, chirurgiens et aussi aux chirurgiens résidents à faciliter les tâches qu'ils ont à faire avec haute précision et moins d'erreurs médicales. Puis nous avons parlé de la méthode du Backstepping et Backstepping adaptatif un état d'art de ces approches et comment elles ont été intégrées dans les commandes qui pilotent et contrôlent les différents types de robots et manette surtout dans le domaine médical et le point qu'elles ont marqué à avoir un impact positif sur ces dispositifs.

La deuxième partie de ce travail a porté sur l'approche de la technique de backstepping, Cette technique fournit une approche systématique pour effectuer la conception des contrôleurs de systèmes non linéaires. L'idée de base est calculer la loi de commande pour garantir une certaine fonction de Lyapunov. Nous avons utilisé une nouvelle version du backstepping avec action intégrale, cela revient à introduire des intégrateurs dans le modèle et à appliquer le backstepping conventionnel à ce nouveau modèle. L'action intégrale sera automatiquement convertie du modèle à la loi de contrôle. Le backstepping intégrale est appliqué à un pendule simple pour obtenir de bonnes performances, de la précision et la rapidité, les résultats de simulation présente les avantages de cette commande et assure la stabilité du pendule rapidement.

La troisième partie de ce travail consiste à étudier une manette à 2 degrés de liberté qui est très utilisée dans les applications qui nécessitent précision et l'exactitude comme le domaine de la chirurgie. Pour résoudre le problème de suivi trajectoire d'une manette de 2ddl, nous utilisons une commande de backstepping intégrale avec des paramètres connus. L'ajout d'action intégrale à cette commande a diminué les erreurs et amélioré les performances en se concentrant sur l'erreur de suivi de trajectoire. Les résultats de la simulation assurent un bon suivi et satisfaisants. Il garantit également asymptotiquement la stabilité du système.

Enfin dans le quatrième chapitre qui est le dernier chapitre dans ce mémoire, nous avons suivi la trajectoire cette fois-ci en intégrant l'approche Backstepping adaptatif sur une manette à deux degrés de liberté comme une 2ème approche utilisée dans ce mémoire. On considère qu'une structure de commande nécessite une connaissance précise du modèle dynamique du robot, et nous avons essayé d'améliorer les performances contre l'incertitude des paramètres du robot, une modification liée à la loi de commande a été introduite en, ajoutant une loi adaptative tout en assurant la stabilité du robot. Les résultats qu'on a obtenus sont bons sur le suivi des erreurs et l'estimation des paramètres inconnus. Cette approche a amélioré les performances vis-à-vis de l'erreur de suivi et l'estimation des paramètres inconnus, elle a permis aussi à préserver toutes les non linéarités du système et l'avantage de l'utiliser et l'intégrer est qu'elle impose les propriétés de stabilité souhaitées en fixant pour chaque sortie donnée, fonction de stockage, entrée et fonction de stabilité pour chaque étape récurrente du système. Les résultats

qui concerne l'erreur de suivi sont acceptable d'ailleurs les erreurs sont éliminé et ne sont pas affecté par le changement des paramètres effectuée lors des autres essais cela revient à la robustesse de la méthode donc on conclut que cette méthode est idéal pour éliminer les erreurs, certes qu'il y a quelques désavantage mais ils peuvent être diminué par l'élimination de quelques non linéarités dans le système de commande, et on conclut également que la méthode du backstepping adaptatif est un peu plus rapide que la méthode du backstepping intégrale.

Bibliographie

- [1] F. Hamza-Lup, C. Bodgan et O. Costea, *A survey of Visio-Haptic Simulation in surgical Training*, 2011.
- [2] D. Escobar-Castillejos, J. Noguez, L. Neri, A. Magana et B. Benes, «A reviews of simulators with Haptic devices for medical training,» 2016.
- [3] S. Chendeb , «Chirurgie virtuelle : modélisation temps réel des tissus mous,interactions et système dédié».
- [4] « Haptics House (Seling falcon haptic controllers),» [En ligne]. Available: <https://hapticshouse.com/pages/novints-falcon-haptic-device.com>. [Accès le 27 Aout 2022].
- [5] «Kalisto,» [En ligne]. Available: <https://www.kallisto.net/9-logiciel-peripherique-modelisation-3d-systeme-tactile-geomagic-touch.html.com>. [Accès le 28 Aout 2022].
- [6] L. Moody, C. Baber et T. Arvanitis, *The role of haptic feedback in the training and assessment of surgeons*, Brimingham UK, 2002.
- [7] «Force dimension,» [En ligne]. Available: <https://www.forcedimension.com/products/omega.com>. [Accès le 28 Aout 2022].
- [8] M. Mecifi, *Contribution a la commande non linéaire d'un robot manipulateur hyper dynamique*, Oran: université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF, 2013.
- [9] F. Loucif, *Contribution à la commande non linéaire d'un robot mmanipulateur*, Guelma: Université 8 mai 1945, 2021.
- [10] M. Junaid, L. Beebi et . C. Ashima, «Backstepping and adaptive backstepping control on robotic ARM,» chez *International confernce on Control Communication Computing India*, India, 2015.
- [11] R. Hilal, S. Zeghlache et L. Benyettou , *Commande Tolérant aux défauts du robot manipulateur basé sur flou type 2adaptatif backstepping en présence de la variation de charge utile*, 2021.
- [12] A. Humaidi, S. Kadhim et A. Gataa, *Development of a Novel optimal Backstepping Control Algorithm of Magnetic Impeller-Bearing System for Artificial Heart Verticle Pump*, 2020.
- [13] M. Hamedani, M. Selvaggio, M. RahimKhani, F. Ficuciello, H. Sadeghian et M. Zekri, *Robust Dynamic surface control of a da Vinci Robot Manipulator Considering Uncertainties: A Fuzzy based Approach*, Tahrán, 2019, pp. 23-418.
- [14] A. Gutiérrez-Giles, P. Sánchez-Sánchez, J. Pliego-Jiménez et J. Castro-Diaz, *A Proposal of Haptic Technology*.

- [15] R. Kong, X. Dong et X. Liu, *Position and Force control of Teleoperation System based on PHANTOM Omni Robots*, Chengdu, 610039, 2016.
- [16] B. Brahmi, K. El-Monajjed et M. Driscoll, *Novel adaptive backstepping control of uncertain electrically driven haptic robot for surgical training system*, 2020, pp. 1-24.
- [17] R. Kong, X. Dong et X. Liu, «Position and Force Control of Teleoperation,» *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 5, n° % 11, pp. 57-61, January 2016.
- [18] J. Prendergast et M. Rentschler, «Towards autonomous motion control in minimally invasive robotic surgery,» *Expert review of medical devices*, vol. 13, n° % 18, pp. 741-748, 2016.
- [19] M. Zhihong, A. Paplinski et H. Wu, «A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators,» *Transactions on automatic control*, vol. 39, n° % 112, pp. 2464-2469.
- [20] Y. Tang, «Terminal sliding mode control for rigid robots,» *Automatica*, vol. 34, n° % 11, pp. 51-56, 1998.
- [21] D. Wang et M. Vidyasagar, «Control of class of manipulators with a single flexible link: part-Feedback linearization,» *Journal of dynamic systems ,measurement, and control*, vol. 113, n° % 14, pp. 655-661, 1991.
- [22] J. K. Hedrick et B. Song, «Dynamic Surface Control of Uncertain Nonlinear systems An LMI Approach,» 2011.
- [23] J. K. Hedrick et P. P. Yip, «Adaptive dynamic surface control : A simplified algorithm for adaptive backstepping control non linear systems,» *International journal of control* , vol. 71, n° % 15, 1998.
- [24] H. Berghuis, *Model-based robot control: From theory to practice*, 1995.
- [25] K. HK, *Nonlinear Systems. 3emeedition.*, 2002.
- [26] M. Spong et M. Vidyasagar, *Robot dynamics and control*, New York, 1989.
- [27] L. Sciavicco et B. Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2000.
- [28] I. Herrera-Aguilar, *Commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service*, 2007.

Résumé :

L'objectif assigné à ce travail pour contrôler la position de la manette haptique d'un système non linéaire. Différentes techniques ont été présentées et chacune d'elle doit assurer robustesse et la stabilité. Le premier chapitre a été dédié à l'état de l'art sur l'utilisation de la manette haptique dans les simulateurs de la chirurgie. Le chapitre suivant, pour obtenir la stabilité, nous avons appliqué la commande backstepping avec action intégrale d'un pendule simple. Avec la même commande précédente nous l'avons appliqué dans le troisième chapitre pour des performances meilleures de poursuite de trajectoire de la manette à 2ddl. Dans le quatrième chapitre le dernier nous avons suivi la trajectoire de la manette à 2ddl par commande de backstepping adaptatif, les résultats donnés sont excellent, les performances sont bonnes et le système est devenu plus stable et robuste. Ce travail on l'a terminé avec une conclusion générale présente les différentes contributions que ce mémoire a apportées.

Mot clé : Backstepping, Backstepping adaptatif, Backstepping intégrale, Commande non linéaire, Formation chirurgicale, Manette haptique.

Abstract :

The objective assigned to this work to control the position of the haptic joystick of a nonlinear system. Different techniques have been presented and each of them must ensure robustness and stability. The first chapter was dedicated to the state of the art on the use of the haptic joystick in surgery simulators. The next chapter, to obtain stability, we applied the backstepping command with integral action of a simple pendulum. With the same previous command we applied it in the third chapter for better trajectory tracking performance of the joystick at 2 dof. In the fourth chapter the last we followed the trajectory of the joystick at 2ddl by adaptive backstepping command, the results are excellent, the performances are good and the system has become more stable and robust. This work was completed with a general conclusion presenting the different contributions that this thesis has made.

Keyword: Backstepping, Adaptive backstepping, Integral backstepping, Nonlinear control, Surgical training, Haptic joystick.

ملخص

الهدف المخصص لهذا العمل هو التحكم في موضع عصا التحكم للنظام غير الخطي. تم تقديم تقنيات مختلفة ويجب أن يضمن كل منها المتانة والاستقرار. تم تخصيص الفصل الأول لأحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا في استخدام عصا التحكم اللمسية في أجهزة محاكاة الجراحة. الفصل التالي، للحصول على الاستقرار، قمنا بتطبيق أمر

backstepping avec action intégrale لنواس بسيط. باستخدام نفس الأمر السابق قمنا بتطبيقه في الفصل الثالث لتحسين

أداء تتبع المسار لعصا التحكم 2ddl. في الفصل الرابع، الفصل الأخير، اتبعنا مسار عصا التحكم عند 2ddl

عن طريق أمر **Backstepping adaptatif**، وكانت النتائج ممتازة، والأداء جيد وأصبح النظام أكثر استقراراً وقوة

تم الانتهاء من هذا العمل بخاتمة عامة تعرض المساهمات المختلفة التي قدمتها هذه الأطروحة

كلمة مفتاحية: باكستيبينغ، باكستيبينغ متكامل، باكستيبينغ غير خطي، التدريب الجراحي، عصا التحكم اللمسية، باكستيبينغ التكيفي.