

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



Université de jijel
Mohamed Seddik Ben Yahia
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique
Option : Automatique et informatique industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER
En Automatique et
informatique industrielle

Thème

**Commandes non linéaires à base
d'un observateur d'un robot
mobile**

Proposé et dirigé par :

Mme. **BOUDJEDIR** Hana .

Présenté par :

KHEDIMALLAH Abd el ghafour.

BOUSDIRA Yassine.

Année Universitaire: 2019/2020

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier Allah, le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail. Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention consciente d'un grands nombre de personne, nous souhaitons ici les en remercier.

En premier lieu, nous tenons à remercier très chaleureusement notre encadreur : Mme.BOUDJEDIR.Hana, qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. La patience et la confiance qu'elle nous a témoignée ont été déterminantes pour la réalisation de ce mémoire.

Nos plus sincères remerciements s'étendent également au corps enseignants de la faculté des sciences techniques de l'Université de JIJEL pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploie de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous remercions aussi nos familles pour le soutien inconditionnel pour leur contribution et leur patience.

En fin nous tenons à remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont participé dans la réussite de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce travail....

A nos très chères mères

Affables, honorables, aimables : vous représentez pour nous le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse, et l'exemple de dévouement. Vous n'avez pas cessé de nous encourager et de prier pour nous. Nous vous dédions ce travail en témoignage de notre profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A nos très chers pères

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que nous avons toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour nous éduquer et pour notre bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation et notre formation.

A nos chères sœurs

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que nous portons pour vous. Nous vous dédions ce travail avec tous nos vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A nos chers amis

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, nous vous dédions ce travail et nous vous souhaitons une vie pleine de santé et de bonheur.

A l'âme de ma grand-mère

Qui nous a quittés lors de la préparation de ce travail. Repose en paix.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE..... 1

Chapitre I:Généralités et Modélisation du Segway

I.1.Introduction..... 5

I.2.Historique..... 5

I.3.Présentation du transporteur personnel Segway..... 6

I.3.1.Principe de fonctionnement du Segway..... 7

I.3.2.Composants et sous-systèmes du Segway..... 9

I.3.3.Modélisation du système..... 12

I.3.3.1.Modèle linéaire d'un moteur à courant continu..... 13

I.3.3.2.Modèle dynamique pour un pendule inversé à deux roues 15

I.3.4.Conception du système de contrôle..... 21

I.3.4.1.Problème de contrôle..... 21

I.4.Conclusion..... 22

Chapitre II : Commande par mode glissant

II.1.Introduction 24

II.2.Bref historique 24

II.3.Théorie de la commande par mode glissement 25

II.3.1.Système à structure variable..... 25

II.3.2.Objectif de la commande par mode glissant..... 25

II.4.Notion de base.....	26
II.4.1.Conception de la commande par mode de glissement.....	26
II.4.2.Condition d'existence du mode glissant.....	26
II.4.3.Choix de la surface de glissement.....	27
II.5.La fonction de Lyapunov.....	28
II.6.Phénomène de chattering.....	28
II.6.1.La fonction SAT.....	28
II.6.2.La fonction adoucie (Smooth function).....	29
II.7.Domains d'application de la commande par mode glissant...	30
II.8.Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement.....	30
II.9.Expression analytique de la commande.....	31
II.10.Conclusion.....	32
 Chapitre III : Commande par mode glissant d'un SEGWAY	
III.1.Introduction.....	34
III.2.Synthèse de la commande par mode glissant.....	34
III.3 .Résultats de simulation.....	35
III.4.Interprétation des résultats obtenus.....	38
III.5.Conclusion.....	39
 Chapitre IV: Filtre de Kalman pour Segway	
IV.1.Introduction.....	41
IV.2.Filtre de kalman.....	41
IV.2.1.Hypothèses.....	41
IV.2.2.Structure d'un estimateur non biaisé.....	42
IV.3.Résultats de simulation.....	44
IV.4.Conclusion.....	46
CONCLUSION GENERALE.....	47

Liste des figures

Chapitre I: Généralités et Modélisation du Segway

Figure (I-1): Concept de Shilovsky: Gyrocar.....	05
Figure(I-2): Synoptique de robot mobile à deux roues.....	05
Figure(I-3): Prototypes de robots mobiles auto-équilibrés deux roues.....	06
Figure(I-4): Le transporteur Personnel segway.....	07
Figure(I-5): Principe de fonctionnement du segway -inclinaison vers l'avant et l'arrière....	08
Figure(I-6): Principe de fonctionnement du segway - pour tourner.....	08
Figure(I-7): Les composants dusegway.....	09
Figure(I-8): Les boutons du dispositif de commande infokey.....	09
Figure(I-9): Console et témoins lumineux.....	10
Figure(I-10): Les capteurs de présence du conducteur.....	11
Figure(I-11): Capteurs d'équilibre (BSA).....	12
Figure(I-12): Schéma d'un moteur à courant continu.....	13
Figure(I-13): Schéma de la carrosserie libre des roues	16
Figure(I-14): Schéma de la carrosserie libre du châssis	18
Figure(I-15): Réponse impulsionnelle en boucle ouverte du système	21

Chapitre II:

Figure (II-1): Existence du mode de glissement	26
Figure (II-2): Fonction << SAT >>	29
Figure (II-3): Fonction << SMOOTH >>	29
Figure (II-4): Représentation de la fonction << Sing >>	32

Chapitre III:

Figure (III-1) : L'angle de rotation.....	34
figure(III-2) :résultats de simulation sans perturbation.....	37
figure(III-3): Résultat de simulation avec perturbation.....	38

Chapitre IV:

figure(IV.1): Schéma fonctionnel du filtre de Kalman (cas $D=0$).....	44
Figure(IV.2): résultats de simulation par filtre de Kalman.....	45

Liste des tableaux

Chapitre III:

Tableau (III-1) : paramètre de la commande par mode glissant.....35

Chapitre IV:

Tableau (IV-1): valeurs des paramètres.....44

Liste des abréviations

- ATILF** : Analyse et traitement informatique de la langue française.
- RM2R** : Robot mobile à deux roues.
- EPEL** : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- TP** : Transporteur personnel.
- CU** : Système de contrôle.
- BSA** : Capteurs d'équilibre.
- CSV** : Commande à structure variable.
- VSS** : Système à structure variable en anglais '' saxon variable system''

INTRODUCTION GENERALE

La robotique est un très bon exemple de domaine pluridisciplinaire qui implique de nombreuses thématiques telles que la mécanique, la mécatronique, l'électronique, l'automatique, et l'informatique ou l'intelligence artificielle dont l'ensemble de ces disciplines techniques est articulé autour d'un objectif et d'un objet commun. Cet objectif est l'automatisation flexible de nombreux secteurs de l'activité humaine réputés jusqu'à très récemment comme ne pouvant se passer de la présence de l'homme, et l'objet étant le robot, sorte de machine universelle dont l'homme rêve depuis toujours [1].

En fonction du domaine d'origine des auteurs, il existe donc diverses définitions du terme robot, mais elles tournent en général autour de celle présentée par L'ATILF, :« Appareil effectuant, grâce à un système de commande automatique à base de micro-processeur, une tâche précise pour laquelle il a été conçu » [2]. Plus précisément, un robot peut être défini comme une machine équipée de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il en a.

Les robots mobiles ont une place particulière en robotique. Leur intérêt réside dans leur mobilité qui ouvre des applications dans de nombreux secteurs. Comme les robots manipulateurs, ils sont destinés à assister l'homme dans les tâches pénibles ou répétitives (transport de charges lourdes ou déplacement de personne), monotones ou en ambiance hostile (nucléaire, marine, spatiale, lutte contre l'incendie, surveillance...). ils ont été largement utilisés dans les environnements industriels, Cependant actuellement il y'a une forte tendance à élargir les milieux où évoluent ces robots à des environnements intérieurs et extérieurs. Les types d'applications possibles sont innombrables.

C'est dans cet environnement de plus en plus automatisé que se fait sentir le besoin d'outils capables, non seulement d'effectuer des tâches répétitives ou encore impossibles à l'homme (porter des charges lourdes, découpage ultra précis, ...), mais aussi de manifester une certaine autonomie de déplacement dans de nombreux milieux surtout ceux hostiles à l'homme. Cette autonomie est une faculté qui permet au robot mobile de s'adapter ou de prendre une décision dans le but de réaliser une tâche malgré un manque d'informations préliminaires ou éventuellement erronées.

Avec l'évolution des technologies et les nombreux travaux de recherche mise en œuvre ces dernières années, des progrès ont été réalisés sur la conception de robots mobiles. La partie mécanique est de nos jours, une étape presque parfaitement maîtrisée. Les différentes architectures mécaniques existantes permettent d'envisager tous les types de déplacement dans l'espace dont le plus simple est bien évidemment l'utilisation de roues, qui à moindre coût peut assurer un déplacement plus précis et plus rapide du robot sur un sol plat.

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute aux problèmes généralement rencontrés en robotique et leur résolution nécessitera un emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ou de processeurs particuliers.

La décomposition du problème de la mobilité pour ces robots autonomes amène à Définir une architecture classique en robotique, organisée suivant un fonctionnement Séquentiel « perception / décision / action ». La prise de décision qui peut revêtir plusieurs formes suivant la tâche considérée, nécessite donc un conditionnement le plus robuste possible des données sensorielles issues du système de perception. Les modèles utilisés dans ce contexte sont non linéaires et la propriété de non holonomie qui caractérise un certain nombre de ces robots mobiles conduit à l'utilisation de techniques de commande non linéaire, notamment la commande par mode de glissement. son application s'avère très intéressante lors de la conception des RM2R.

Le RM2R a toujours été avancé comme un moyen de transport indépendant et intelligent [3]. Ces propos sont très optimistes, car il faut préciser que, dans l'utilisation de ce système, l'utilisateur est dans la boucle de commande : par le biais de ses sens et de sa capacité motrice, il peut estimer les changements dans l'environnement puis assurer, par un ajustement de sa posture, la stabilité du véhicule.

Le présent travail a pour but d'étudier la commande non linéaire d'un robot mobile à deux roues (gyropode, segway), à travers l'une des techniques non linéaires, qui est la commande par mode glissant, à base d'un observateur de type Kalman. Pour cela notre mémoire sera structuré en quatre chapitres :

Dans un premier temps, le premier chapitre est consacré à la présentation du robot mobile à deux roues de type gyropode (segway), exposé d'une façon détaillée avec son modèle mathématique et son principe de fonctionnement basé sur le modèle de pendule inversé, un système non linéaire instable sous actionné à plus d'un degré de liberté.

Dans le deuxième chapitre, de nature théorique, nous abordons les bases de la commande des systèmes non linéaires tout en développant celle de la commande par modes de glissement utilisée dans ce travail.

Par la suite, Dans le troisième chapitre, nous étudions l'application de la commande par mode glissement sur le système de base du gyropode qui est le pendule inversé et les différents résultats de simulation sont annoncés et interprétés pour plusieurs tests (avec et sans perturbations).

Le chapitre quatre, s'intéresse quant à lui, à l'observateur de type kalman, utilisé dans ce travail. Après une petite introduction, une démonstration de son modèle dynamique est établit accompagnés de résultats de la simulation du chapitre III après contrôle par cet observateur.

Enfin, nous terminons par une synthèse sur l'ensemble du projet et les perspectives à ce travail sous forme de conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités et Modélisation du Segway

I.1.Introduction

La particularité du système à pendule inversé a suscité l'intérêt de nombreuses recherches en raison de la nature instable de ce modèle qui est un système mécanique, automatique composé d'une tige en position d'équilibre instable, verticale sur une base qui peut être fixe ou mobile.

Les études sur les pendules inversés à deux roues ou communément « balancing robot » a gagné en popularité au cours de la dernière décennie dans un certain nombre de laboratoires de robotique à travers le monde. L'instabilité de ces systèmes a fait un excellent banc d'essai pour l'expérimentation de la théorie de la commande.

Comme une application réussite et courante du pendule inversé, on peut citer le Segway Dans ce chapitre, on propose une description du système Segway (gyropode), ainsi que son principe de fonctionnement. Par la suite, on développe son modèle dynamique sous forme d'équations différentielles.

I.2.Historique

L'idée d'un véhicule de transport auto-équilibré ne date pas d'aujourd'hui : dès 1912, Peter Schilovski a proposé un prototype baptisé Gyrocar. C'est un véhicule de type bicyclette équipé d'un gyroscope mécanique permettant ainsi la stabilisation de l'angle de roulis [4] (**Figure I-1**).



Figure (I-1): Concept de Shilovsky: Gyrocar

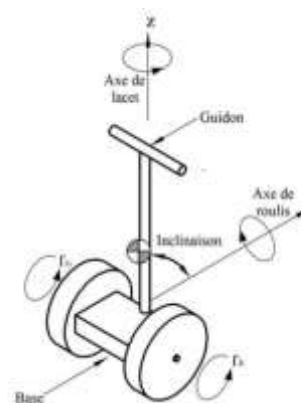


Figure (1-2): Synoptique de robot mobile à deux roues

Le développement spectaculaire des outils informatiques, de la théorie de la commande ainsi que des technologies de fabrication [5] a permis aux chercheurs d'explorer de nouveaux concepts de véhicules mieux adaptés à nos besoins quotidiens tel

que le robot mobile auto-équilibré à deux roues (RM2R) est devenu très populaire cette dernière décennie grâce à son faible encombrement et sa bonne manœuvrabilité dans les espaces étroits, il a la capacité de tourner sur place à l'instar des robots à commande différentielle [6,7,8]. Il a été avancé comme un produit approprié pour les environnements domestiques et de bureau [9]. La commande d'un tel système est un vrai challenge scientifique, car c'est un système complexe, sous-actionné avec des contraintes non-holonomes [10,11] opérant dans des conditions environnementales incertaines [12]. Les premières implémentations sur un pendule inversé à roue ont été effectuées dans les années 80 [13]. Le premier RM2R a été développé par [14], il est commandé par deux roues séparées tournant autour du même axe avec un gyroscope permettant la mesure de l'inclinaison du corps du robot (**Figure:I-2**).

Depuis, d'innombrables prototypes ont vu le jour comme : Joe - prototype l'école polytechnique fédéral de Lausanne [15] et Nbot [16] (**Figure:I-3**). D'autres prototypes destinés à la commercialisation, comme le Segway, qui est le concept le plus connu du grand public [17], inventé par Dean Kamen et inspiré d'un pendule inversé miniature connu sous le nom de Joe-le-Pendule, développé en 1996 au laboratoire d'Electronique Industrielle de l'EPFL. L'objectif de la conception de tel RM2R était de proposer un nouveau concept non conventionnel de véhicule urbain afin de réduire la consommation énergétique, la pollution et les espaces de stationnement dans les villes [5].

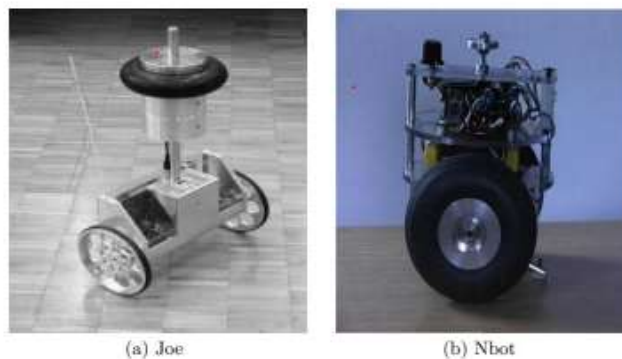


Figure (I-3): Prototypes de robots mobiles auto- à équilibrés deux roues.

I.3.Présentation du transporteur personnel Segway

Le gyropode Segway ou transporteur personnel est un véhicule électrique monoplace, constitué d'une plateforme munie de deux roues sur laquelle l'utilisateur se tient debout, d'un système de stabilisation gyroscopique et d'un manche de maintien et de conduite [18].

Ce type de véhicule permet, tout en occupant la même place qu'un piéton, de se déplacer plus rapidement, silencieusement et sans émission polluante sur un espace piéton. Il représente une alternative au problème de congestion et de pollution des centres urbains [19].

Le gyropode peut être considéré comme un pendule inversé dont la consigne est de rester verticale. Lorsque son utilisateur se penche, le véhicule, conscient de ses états, va accélérer afin de retrouver sa stabilité. Le premier gyropode est le Segway issu de la technologie d'équilibre dynamique sur deux roues parallèles et coaxiales inventée par Dean L. Kamen en l'an 2000 [20]. **(Figure:I-4)** représente des images réelles du Segway



Figure (I-4): Le transporteur Personnel Segway

I.3.1.Principe de fonctionnement du Segway:

Le Segway fonctionne comme le corps humain : quand vous marchez si vous vous penchez en avant, vous faites un pas en avant pour conserver votre équilibre. Si vous vous penchez en arrière, vous faites un pas en arrière. Sur un Segway, lorsque vous vous penchez en avant ou en arrière, la machine actionne des roues dans la direction où vous vous penchez.

Le Segway utilise, cela est possible grâce à une technologie appelée stabilisation dynamique pour maintenir son équilibre et avancer ou reculer [20].

Lorsque vous vous penchez, votre centre de gravité se déplace au-delà de l'aire de

contact (la zone de contact des pneus avec le sol), ce qui entraîne l'inclinaison du Segway. Les systèmes du Segway détectent ce changement et actionnent les roues afin qu'elles restent en dessous de vous **Figure (I-5)**.

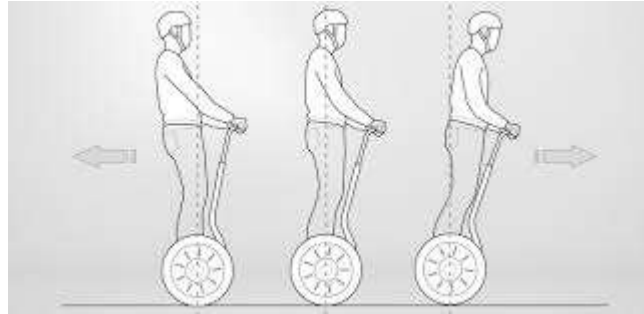


Figure (I-5) : Principe de fonctionnement du Segway - inclinaison vers l'avant et l'arrière

Lorsque vous faites pivoter le guidon (cadre LeanSteer) vers la gauche, le Segway tourne à gauche. Lorsque vous faites pivoter le guidon (cadre LeanSteer) vers la droite, le Segway tourne à droite. Pour faire tourner le Segway, orientez le guidon (cadre LeanSteer) dans la direction voulue en maintenant le guidon aligné par rapport à votre corps. Lorsque le cadre LeanSteer est centré, le Segway va tout droit (**Figure:I-6**).



Figure (I-6): Principe de fonctionnement du Segway - pour tourner

La technologie de stabilisation dynamique du Segway lui permet de s'équilibrer vers l'avant et l'arrière, mais pas d'un côté à l'autre. Si vous faites basculer le Segway sur une seule roue, il ne se placera pas dynamiquement en dessous de vous et risque de tomber. Le conducteur est responsable de maintenir sa stabilité latérale en gardant le corps aligné par rapport au cadre LeanSteer. De même, penchez-vous à l'intérieur des virages et vers l'amont lorsque vous conduisez sur une pente.

I.3.2.Composants et sous-systèmes du Segway

Le Segway comprend les composants et sous-systèmes suivants [21](Figure:I-7)

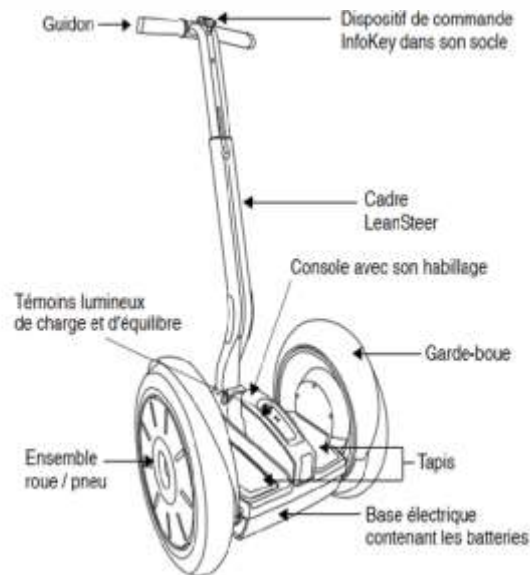


Figure (I-7): Les composants du Segway

I.3.2.1.Dispositif de commande InfoKey :

L'infokey est le dispositif de commande sans fil qui sert à manœuvrer et à contrôler le Segway TP et il est propre à chaque Segway (gyropode). Il est doté de quatre boutons sur son contour externe et d'un écran en son centre. Il n'affiche pas seulement les informations pratiques concernant votre trajet, à savoir la quantité d'énergie restante, le nombre de kilomètres parcourus ou la vitesse instantanée. Il est indispensable pour le démarrage et permet d'activer une alarme qui rend toute tentative de vol inutile [22](Figure:I-8)

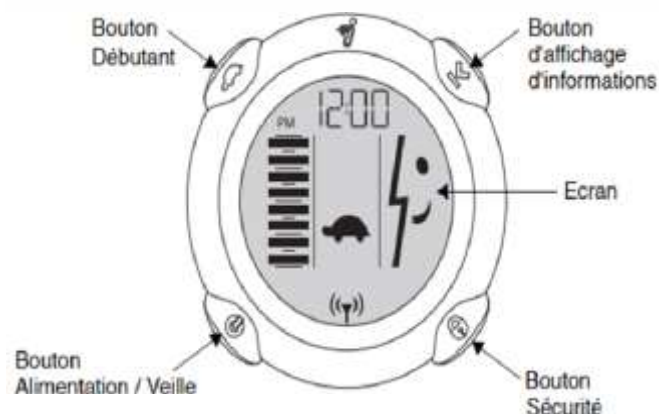


Figure (I-8): Les boutons du dispositif de commande infokey

I.3.2.2.Ensemble cadre LeanSteer / Guidon :

Le cadre LeanSteer pivote à la base pour contrôler la direction gauche/droite du Segway TP.

I.3.2.3.Ensemble roue / pneu et garde-boues :

Le Segway TP est équipé de garde-boues conçus pour protéger le conducteur contre les projections de débris et dans les virages.

I.3.2.4.Base électrique :

La base électrique contient la console, les capteurs de présence de conducteur, les cartes de commande (Système de contrôle (CU), Moteurs, Boîte à vitesses, Centrale inertielle (Capteurs d'équilibre (BSA)).

I.3.2.5.Console équipée de témoins lumineux d'équilibre et de charge :

La console est située sous le cadre LeanSteer et entre les deux tapis. Elle est assemblée avec un couvercle qui ne doit pas être retiré.

Il y a deux groupes de témoins lumineux sur la console: Les témoins lumineux d'équilibre qui indiquent visuellement si le Segway TP est prêt à recevoir le conducteur et les témoins de charge des batteries qui indiquent le niveau de charge des batteries du Segway TP (**Figure:I-9**).

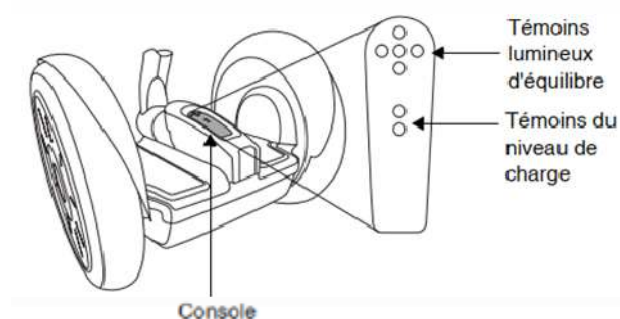


Figure (I-9) : Console et témoins lumineux

I.3.2.6.Tapis :

Le Segway TP contient deux tapis posés à droite et à gauche de la console. Les tapis protègent les capteurs de présence du conducteur situés en dessous et permettant une conduite en tout confort.

I.3.2.7. Les capteurs de présence du conducteur :

Le Segway TP est équipé de quatre capteurs situés sous les tapis pour détecter la présence ou l'absence du conducteur pendant la mise en marche du Segway TP :

- a) Si les pieds sont à la position correcte sur les tapis, les quatre capteurs sont enclenchés, permettant au Segway TP de fonctionner normalement en mode Equilibre.
- b) Si moins de trois capteurs sont enclenchés pendant la conduite, le Segway TP réduit la vitesse limite maximale, que le mode de conduite (Débutant) soit activé ou non. Dès que les pieds sont correctement repositionner, le Segway TP reprend à plein régime.
- c) Si le Segway TP est déplacé trop rapidement en mode Equilibre et qu'aucun capteur de présence ne s'enclenche, un avertissement par vibration du guidon est généré avant de passer du mode Equilibre au mode Veille (**Figure:I-10**).

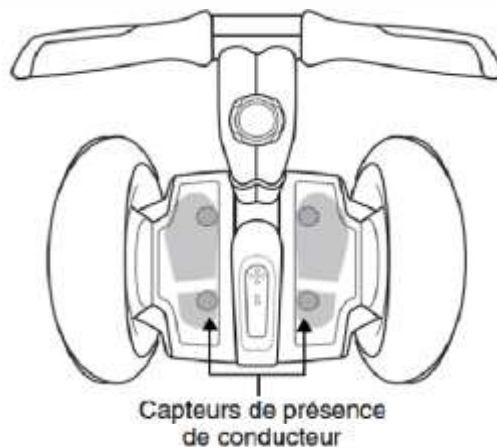


Figure (I-10) : Les capteurs de présence du conducteur

I.3.2.8. Centrale inertielle (Capteurs d'équilibre (BSA)) :

La centrale inertielle ou Le capteur d'équilibre (BSA) est un modèle d'élégance pour un appareil extrêmement résistant et particulièrement sensible qui contient cinq capteurs de taux angulaire (gyroscopes à semi-conducteurs) et deux capteurs d'inclinaison. Elle envoie aux cartes de commande des informations sur l'orientation du Segway TP. Tous les capteurs sont surveillés en permanence par le Segway TP afin d'en assurer le fonctionnement. En cas de défaillance de l'un de ces capteurs, le Segway déclenche un arrêt d'urgence (**Figure:I-11**).

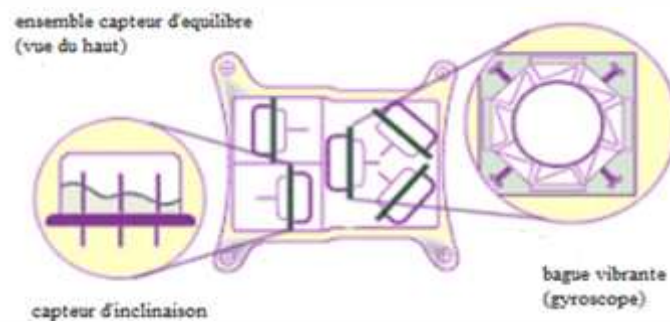


Figure (I-11): Capteurs d'équilibre (BSA)

Le Segway a été conçu dans un souci de sécurité du conducteur et des personnes se trouvant à proximité. Des sous-systèmes redondants assurent le fonctionnement contrôlé du Segway pour le cas improbable d'une défaillance d'un composant. En cas de défaillance d'un composant de sous-système, l'autre composant continue de fonctionner pour permettre l'arrêt en toute sécurité avant de descendre de la machine [21].

I.3.3. Modélisation du système

la dynamique du robot doit être décrite par un modèle mathématique afin de faciliter le développement d'un système de contrôle efficace pour le robot d'équilibrage.

Dans ce chapitre l'équation du mouvement pour un modèle pendulaire et linéaire inversé à deux roues pour un moteur à courant continu est dérivé en détail.

I.3.3.1. Modèle linéaire d'un moteur à courant continu:

Le robot est alimenté par deux moteurs à courant continu Faulhaber. Dans cette section, le modèle spatial de l'état du moteur à courant continu est dérivé. Ce modèle est ensuite utilisé dans le modèle dynamique du robot d'équilibrage pour établir une relation entre la tension d'entrée des moteurs et le couple de commande nécessaire pour équilibrer le robot.

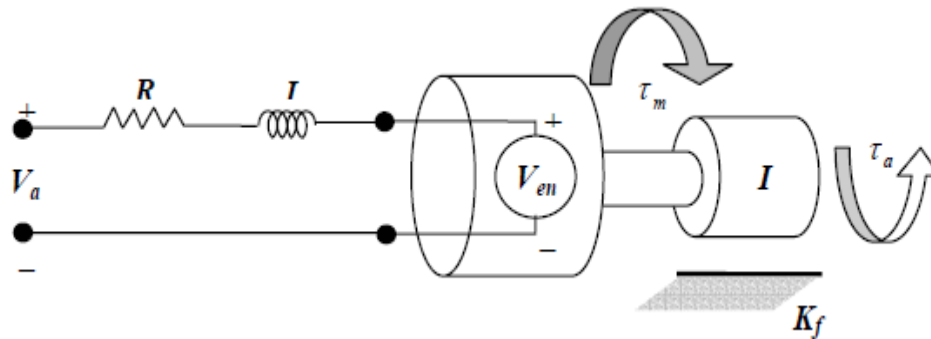


Figure (I-12): schéma d'un moteur à courant continu

La (figur:I-12) illustre un modèle linéaire efficace pour un moteur à courant continu. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes du moteur, un courant i est généré dans le moteur armature. Le moteur produit un couple τ_m , qui est proportionnel au courant. Ce peut s'exprimer sous la forme de :

$$\tau_m = k_m i \quad (\text{I-1})$$

Une paire de résistances en série avec une tension v_{emf} , peut être utilisée pour modéliser la tension du circuit électrique du moteur. Cette tension de force contre-électromotrice est produite parce que les bobines du moteur se déplacent à travers un champ magnétique. La tension produite peut être approximée comme une fonction linéaire de la vitesse de l'arbre.

$$v_e = k_e \omega \quad (\text{I-2})$$

À ce stade, une équation différentielle linéaire pour le circuit électrique du moteur à courant continu peut être écrite en utilisant la loi de Kirchhoff sur la tension, la loi stipule que la somme de toutes les tensions du circuit doit être égale à zéro. Pour le moteur à courant continu, cela peut s'écrire :

$$v_a - Ri - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (\text{I-3})$$

Pour calculer l'équation de mouvement du moteur, la friction sur l'arbre du moteur est approximée comme une fonction linéaire de la vitesse de l'arbre.

L'approximation de la friction sur l'arbre du moteur K_f est une fonction de la vitesse de l'arbre. La loi de Newton sur le mouvement stipule que la somme de tous les couples produits sur l'arbre est linéairement liée à l'accélération de l'arbre par la charge d'inertie de l'armature I_R . La déclaration précédente peut être rédigée comme suit:

$$\sum M = \tau_m - K_f \omega - \tau_a = I_R \dot{\omega} \quad (\text{I-4})$$

En remplaçant les équations (I-1) et (I-2) par les équations (I-3) et (I-4), et en réorganisant des dérivés du temps, conduits aux deux équations fondamentales suivantes qui régissent le mouvement du moteur:

$$\frac{di}{dt} = \frac{R}{L} i + \frac{K_e}{L} \omega + \frac{V_a}{L} \quad (\text{I-5})$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m}{I_R} i + \frac{-K_e}{I_R} \omega - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (\text{I-6})$$

Les deux équations sont des fonctions linéaires du courant et de la vitesse et elles comprennent la première commandée des dérivés temporels. Un modèle simplifié de moteur à courant continu est suffisant pour l'équilibrage du robot. Pour cette raison, l'inductance et la friction du moteur sont considérées négligeables et se rapprochent de zéro. Ainsi, (I-5) et (I-6) peuvent être approchés comme:

$$i = -\frac{K_e}{R} \omega + \frac{1}{R} V_a \quad (\text{I-7})$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m}{I_R} i - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (\text{I-8})$$

En substituant l'équation (I-7) à l'équation (I-8), on obtient une approximation pour le moteur à courant continu qui est uniquement fonction de la vitesse actuelle du moteur, de la tension appliquée et du couple appliqué peut être obtenu:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{K_m K_e}{I_R R} \omega + \frac{1}{I_R R} V_a - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (\text{I-9})$$

Comme l'inductance du moteur est négligée, le courant passant dans les enroulements n'est pas considéré dans l'équation de mouvement du moteur. Le courant atteindra alors un état constant immédiatement par rapport à la vitesse de l'arbre, ce qui

prend du temps pour accélérer d'une certaine vitesse initiale à une vitesse final après un changement de la tension d'entrée.

La dynamique du moteur peut être représentée avec un modèle spatial d'état, c'est un système des équations différentielles du premier ordre avec des paramètres de position θ , et de vitesse ω , qui uniquement représente son fonctionnement. Les entrées du moteur sont alors la tension appliquée et le couple appliqué:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-K_m K_e}{I_R R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_m}{I_R R} & \frac{-1}{I_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_a \end{bmatrix} \quad (\text{I-10})$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_a \end{bmatrix} \quad (\text{I-11})$$

I.3.3.2. Modèle dynamique pour un pendule inversé à deux roues :

Le pendule inversé à deux roues, bien qu'il soit plus complexe dans la dynamique du système, il a un comportement similaire avec un pendule sur un chariot. La dynamique du pendule et des roues est analysés séparément au début, mais cela conduira finalement à deux équations de mouvement qui décrit complètement le comportement du robot en équilibre. Comme le comportement du robot peut être influencé par des perturbations ainsi que par le couple du moteur, le modèle mathématique devra tenir compte de ces forces. Tous d'abord on obtient les équations de mouvement associées aux roues gauche et droite. La figure suivante montre le schéma de la carrosserie libre pour les deux roues. Puisque l'équation pour les roues gauche et droite sont complètement analogues, seule l'équation de la roue droite est donnée:

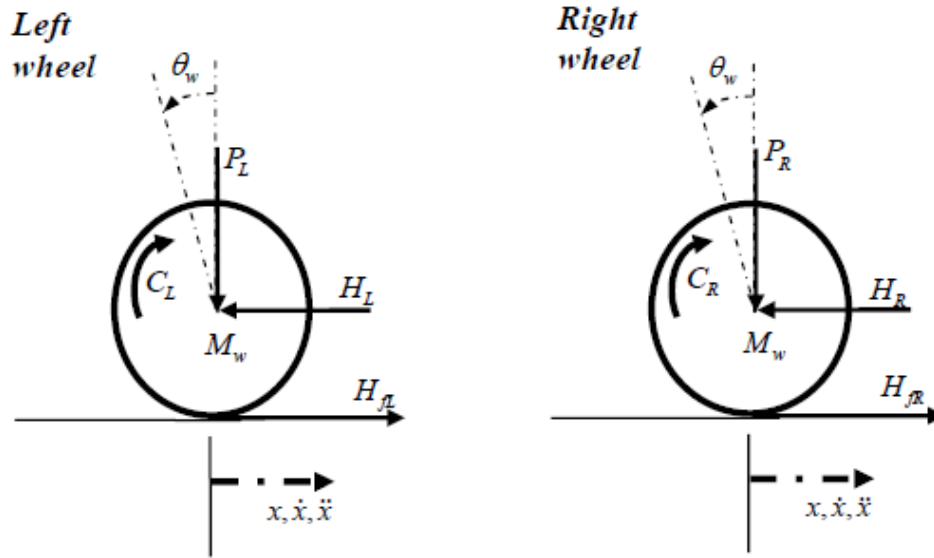


Figure (I-13): Schéma de la carrosserie libre des roues.

En utilisant la loi du mouvement de Newton, la somme des forces sur la direction x horizontale est:

$$\sum F_x = Ma$$

$$M_w \ddot{x} = H_{fR} - H_R \quad (\text{I-12})$$

La somme des forces autour du centre de la roue donne :

$$\sum M_o = I\alpha$$

$$I_w \ddot{\theta}_w = C_R - H_{fR}r \quad (\text{I-13})$$

A partir de la dynamique du moteur à courant continu, le couple moteur peut exprimer sous la forme :

$$\tau_m = I_R \frac{d\omega}{dt} + \tau_a \quad (\text{I-14})$$

En réorganisant l'équation et en remplaçant les paramètres de dérivation du moteur à courant continu, le couple de sortie aux roues est atteint :

$$C = I_R \frac{d\omega}{dt} = \frac{-K_m K_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{K_m}{R} V_a \quad (\text{I-15})$$

Par conséquent, L'équation (1-13) devient :

$$I_w \ddot{\theta}_w = \frac{-K_m K_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{K_m}{R} V_a - H_{fR} r \quad (I-16)$$

Ainsi :

$$H_{fR} = \frac{-K_m K_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{K_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w \quad (I-17)$$

L'équation (I-15) est remplacée par (I-12) pour obtenir l'équation pour les roues gauche et droite :

Pour la roue gauche :

$$M_w \ddot{x} = \frac{-K_m K_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{K_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_L \quad (I-18)$$

Pour la roue droite :

$$M_w \ddot{x} = \frac{-K_m K_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{K_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_R \quad (I-19)$$

Comme le mouvement linéaire agit sur le centre de la roue, la rotation angulaire peut être transformée en mouvement linéaire par simple transformation :

$$\ddot{\theta}_w r = \ddot{x} \quad \Rightarrow \quad \ddot{\theta}_w = \frac{\ddot{x}}{r}$$

$$\dot{\theta}_w r = \dot{x} \quad \Rightarrow \quad \dot{\theta}_w = \frac{\dot{x}}{r}$$

Par la transformation linéaire, les équations (I-18) et (I-19) deviennent:

Pour la roue gauche :

$$M_w \ddot{x} = \frac{-K_m K_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{K_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_L \quad (I-20)$$

Pour la roue droite :

$$M_w \ddot{x} = \frac{-K_m K_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{K_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_R \quad (I-21)$$

L'addition des équations (I-20) et (I-21) donne le résultat :

$$2(M_w + \frac{I_w}{r^2}) \ddot{x} = \frac{-2K_m K_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{2K_m}{Rr} V_a - (H_L + H_R) \quad (I-22)$$

Le châssis du robot peut être modélisé comme un pendule inversé, la **(figure: I-14)** montre le schéma de carrosserie du châssis :

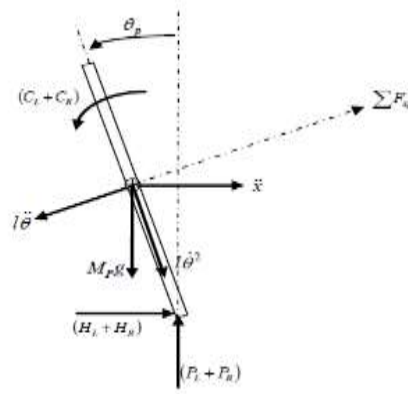


figure (I-14) : Schéma de la carrosserie libre du châssis.

Encore une fois en utilisant la loi du mouvement de Newton, la somme des forces dans la direction horizontale :

$$\sum F_x = M_p \ddot{x}$$

$$(H_L + H_R) - M_p I \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p I \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p = M_p \ddot{x} \quad (\text{I-23})$$

Ainsi:

$$(H_L + H_R) = M_p \ddot{x} + M_p I \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p I \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (\text{I-24})$$

La somme des forces perpendiculaire au pendule :

$$\sum F_{xp} = M_p \ddot{x} \cos \theta_p$$

$$(H_L + H_R) \cos \theta_p + (P_L + P_R) \sin \theta_p - M_p g \sin \theta_p - M_p l \ddot{\theta}_p = M_p \ddot{x} \cos \theta_p \quad (\text{I-25})$$

La somme des moments autour du centre de masse du pendule :

$$\sum M_o = I \alpha$$

$$-(H_L + H_R) l \cos \theta_p - (P_L + P_R) l \sin \theta_p - (C_L + C_R) = I_p \ddot{\theta}_p \quad (\text{I-26})$$

Le couple appliqué au pendule par le moteur, tel que défini dans l'équation (I-15) et après une transformation linéaire :

$$C_L + C_R = \frac{-2K_m K_e \dot{x}}{R} + \frac{2K_m V_a}{R}$$

En substituant cela dans l'équation (1-26), on obtient :

$$-(H_R + H_L)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p - \left(\frac{-2K_m K_e \dot{x}}{Rr} + \frac{2K_m V_a}{R} \right) = I_p \ddot{\theta}_p$$

Ainsi:

$$-(H_R + H_L)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p = \frac{-2K_m K_e \dot{x}}{Rr} + \frac{2K_m V_a}{R} + I_p \ddot{\theta}_p \quad (I-27)$$

Multipliez l'équation (I-25) par -1:

$$\left[-(H_R + H_L)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p \right] + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (I-28)$$

Substituer l'équation (I-27) à l'équation (I-28) :

$$I_p \ddot{\theta}_p - \frac{2K_m K_e \dot{x}}{Rr} + \frac{2K_m V_a}{R} + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (I-29)$$

Pour éliminer ($H_L + H_R$) de la dynamique motrice, l'équation (I-24) est remplacée par l'équation (I-22):

$$2(M_w + \frac{I_w}{r^2}) \ddot{x} = \frac{-2K_m K_e \dot{x}}{Rr^2} + \frac{2K_m V_a}{Rr} - M_p \ddot{x} - M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (I-30)$$

Le réarrangement des équations (I-29) et (I-30) donne les équations de mouvement non linéaire du système :

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\theta}_p - \frac{2K_m K_e \dot{x}}{Rr} + \frac{2K_m V_a}{R} + M_p g l \sin \theta_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (I-31)$$

$$\frac{2K_m V_a}{Rr} = (2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p) \ddot{x} + \frac{2K_m K_e \dot{x}}{Rr^2} + M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (I-32)$$

Les deux équations ci-dessus peuvent être linéarités en supposant que $\theta_p = \pi + \phi$, où ϕ représente un petit angle par rapport à la verticale vers le haut. Cette simplification a été utilisée pour permettre un modèle linéaire à obtenir pour pouvoir mettre en œuvre des contrôleurs d'espace à état linéaire .

Par conséquent:

$$\cos \theta_p = -1, \sin \theta_p = -\phi \text{ et } \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right) = 0$$

L'équation linéarité du mouvement est:

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\phi} - \frac{2K_m K_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2K_m}{R} V_a - M_p g l \phi = M_p l \ddot{x} \quad (\text{I-33})$$

$$\frac{2K_m}{Rr} V_a = (2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p) \ddot{x} + \frac{2K_m K_e}{Rr^2} \dot{x} - M_p l \ddot{\phi} \quad (\text{I-34})$$

Afin d'obtenir la représentation de l'espace d'état du système, les équations (I-33) et (I-34) sont réorganisés :

$$\ddot{\phi} = \frac{M_p l}{(I_p + M_p l^2)} \ddot{x} + \frac{2K_m K_e}{Rr(I_p + M_p l^2)} \dot{x} - \frac{2K_m}{R(I_p + M_p l^2)} V_a + \frac{M_p g l}{(I_p + M_p l^2)} \phi \quad (\text{I-35})$$

$$\ddot{x} = \frac{2K_m}{Rr(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p)} V_a - \frac{2K_m K_e}{Rr^2(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p)} \dot{x} + \frac{M_p l}{(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p)} \ddot{\phi} \quad (\text{I-36})$$

En substituant l'équation (I-35) à l'équation (I-34), en substituant l'équation (I-36) à l'équation (I-33) et après une série de manipulations algébrique, l'équation de l'espace d'état pour le système est obtenue :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2K_m K_e (M_p l r - I_p - M_p l^2)}{Rr^2 \alpha} & \frac{M_p^2 g l^2}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2K_m K_e (r\beta - M_p l)}{Rr^2 \alpha} & \frac{M_p g l \beta}{\alpha} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2K_m (I_p + M_p l^2 - M_p l r)}{Rr \alpha} \\ 0 \\ \frac{2K_m (M_p l - r\beta)}{Rr \alpha} \end{pmatrix} V_a \quad (1.37)$$

Où:

$$\beta = (2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p) \quad \alpha = \left[I_p \beta + 2M_p l^2 (M_w + \frac{2I_w}{r^2}) \right]$$

Dans le modèle ci-dessus, on suppose que les roues du véhicule resteront toujours en contact avec le sol et qu'il n'y a pas de glissement des roues. Les forces de virage sont également considérés comme négligeables.

I.3.4. Conception du système de contrôle

Le système de robot d'équilibrage décrit dans ce chapitre est un excellent banc d'essai pour le contrôle parce qu'il présente une dynamique de système non linéaire et instable. Objectifs de contrôle de ces systèmes sont toujours difficiles à mettre en place, car l'état complet du système n'est souvent pas mesurée.

I.3.4.1. Problème de contrôle:

Comme le système est intrinsèquement instable, une impulsion est appliquée à la boucle ouverte ainsi l'angle d'inclinaison et la position du robot s'élèveront sans limite.

La **(Figure:I-15)** montre la simulation lorsqu'une entrée d'impulsion au système non contrôlé.

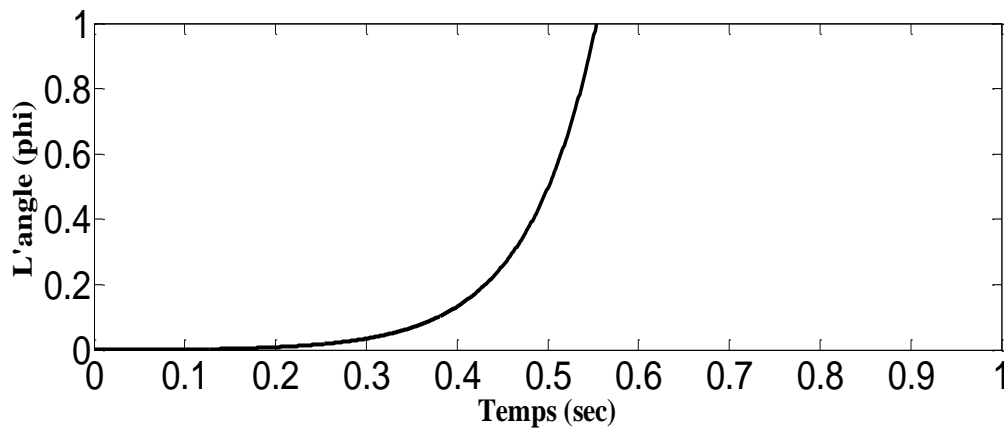


Figure (I-15-1): l'angle (ϕ)

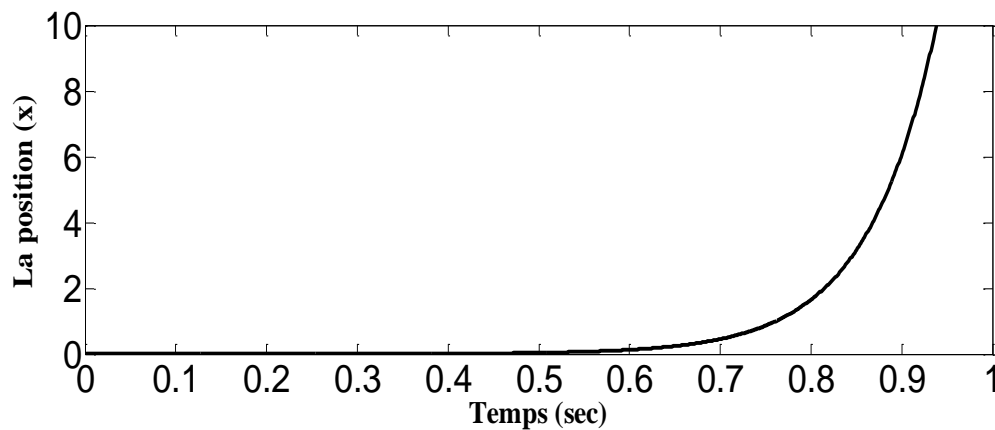


figure (1-15-2): la position (x)

Figure (1-15): Réponse impulsionnelle en boucle ouverte du système

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'un des systèmes dynamiques, qui représente un intérêt particulier dans le domaine de l'automatique. Ce système est le transporteur personnel gyropode (Segway), qui est basé sur le principe du pendule inversé. A cet effet, le principe de base du pendule inversé a été présenté ainsi que son modèle dynamique. Par la suite, le système Segway a été introduit à travers son principe de fonctionnement, les composants et les sous-systèmes qui le constituent.

Puis, la modélisation du Segway a été établie via son modèle dynamique en utilisant la loi du mouvement de Newton. Ce modèle est nécessaire au développement des commandes du système, parmi lesquelles, la commande non linéaire qui sera présentée dans le prochain chapitre.

A la fin de ce chapitre, un test en boucle ouverte a été appliqué pour vérifier la stabilité du modèle et nous avons trouvé que le système est instable vue que la position x et l'angle ϕ s'élèvent instantanément.

CHAPITRE II

Commande par mode glissant

II.1.Introduction

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de la recherches orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commandes robustes. Ces techniques évoluent avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. Nous pouvons citer à titre d'exemple la commande floue, la commande adaptative, la commande par mode de glissement...etc. L'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants [23].

Le mode de glissement est un mode de fonctionnements particulier des systèmes à structure variable. La commande par mode de glissement est une méthode de réglage dans laquelle la structure est commutée de manière à ce que le vecteur d'état "x" suit une trajectoire $S(x)=0$ dans l'espace d'état [24]. Cette technique de commande s'adapte aux variations des paramètres du procédé à commander. Dans ce chapitre, nous allons appliquer la commande par mode glissant à la machine asynchrone dans le but d'obtenir de bonnes performances même en présence des perturbations.

II.2.Bref historique

Une attention considérable a été concentrée sur la commande du système non linéaire à dynamique incertaine, souvent sujet aux perturbations et aux variations de paramètres. Des contrôleurs à structure variable ont fait leur apparition dans la littérature soviétique et ont été largement identifiés comme une approche potentielle à ce problème. Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par Decarlo et autres (1998) et par Hung et autres (1993). L'action de commande force la trajectoire du système à contraindre l'espace d'état intitulé surface du glissement [25].

Les trajectoires de système sont alors confondues avec la surface de glissement durant l'utilisation des commandes à une haute fréquence de commutation. L'avantage saillant de la commande à structure variable avec le mode glissant, est la robustesse contre des changements des paramètres ou des perturbations. Le phénomène «chattering» associé à la commande par mode glissant, présent un inconvénient majeur par ce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable.

Une approche emploie une couche limite autour de la commutation. Une autre méthode, remplace la commande du type « maximum / minimum » par une fonction de vecteur d'unité avec une constante positive. Cependant ces approches ne fournissent

aucune garantie quant à la convergence exacte au mode glissant et présente un dilemme chattering-robustesse.

II.3. Théorie de la commande par mode glissement

La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale des systèmes à structure variable est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue. Les commutations de la commande s'effectuent en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une "variété" ou "hyper surface" dite de glissement dont le but est de forcer la dynamique du système de correspondre avec celle définie par l'équation de l'hyper surface.

Quand l'état est maintenu sur cette hyper surface, le système est dit en régime glissant. Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système [26].

II.3.1. Système à structure variable:

Un système à structure variable en anglais "saxon variable system VSS" est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement produit est appelé mouvement de glissement.

II.3.2. Objectif de la commande par mode glissant:

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

1-Synthétiser une surface $S(x, t)$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.

2-Déterminer une loi de commande (commutation) $U(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

II.4. Notion de base

Avant d'entamer les méthodes utilisées dans la synthèse de contrôle par mode de glissement, nous allons expliquer quelques notions de bases du régime glissant [27].

II.4.1. Conception de la commande par mode de glissement:

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes:

- 1-Le choix de la surface ;
- 2-L'établissement des conditions d'existence de la convergence ;
- 3-La détermination de la loi de commande.

II.4.2. Condition d'existence du mode glissant:

Le mode de glissement existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre u_{max} et u_{min} , (**Figure: II-1**), lorsque le système réglé est considéré du deuxième ordre, les grandeurs d'état sont x_{s_1} et x_{s_2}

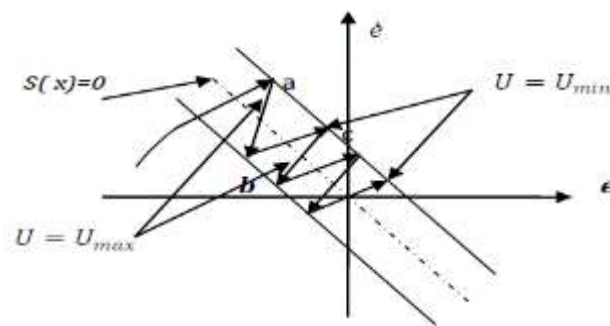


Figure (II-1) : Existence du mode de glissement

Les commutations ont lieu sur les droites décalées parallèlement de $\pm \Delta S_h$. Une trajectoire avec $u = u_{max}$ touche au point (a) le seuil de basculement inférieur. Si avec $u = u_{min}$, la trajectoire est orientée vers l'intérieur de la zone montrée par (**Figure:II-1**). Elle touche au point (b) le seuil de basculement ou a lieu une commutation sur $u = u_{min}$. Si

la trajectoire est de nouveau orientée vers l'intérieur, elle touche le point (c) le seuil de basculement inférieur et ainsi de suite. Il y a donc un mouvement continu à l'intérieure de cette zone.

Ce mouvement s'approche du régime stationnaire dans une certaine zone ou des commutations continues existent. La fréquence de commutation est finie. On suppose dans le cas idéal que cette zone est infiniment petite. La loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de $S(x_s)$. Par conséquent, le vecteur d'état x_s suit une trajectoire qui respecte cette condition. La fréquence de commutation est donc infiniment élevée [28].

II.4.3.Choix de la surface de glissement:

Elle est déterminée sur la base du système et des performances désirées. Dans un cas général, considérons le système décrit par la représentation d'état non linéaire suivante [29]:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x) + g(x).u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

La forme de équation générale pour la surface de glissement, proposée par « J.J.Slotine » et assurant la convergence d'une variable vers sa valeur désirée, est donnée par :

$$S(x) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right) \right]^{r-1} e(x) \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$e(x) = x_{ref} - x$: Écart de la variable à régler.

λ_x : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : degré relatif.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$. Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence[26][30][31].

II.5. La fonction de Lyapunov

S'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état

Du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$)

Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{II-3})$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x) \quad (\text{II-4})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (\text{II-5})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal [32].

II.6. Phénomène de chattering

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées. Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence. Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction « sign » par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences. On donne ci-dessous des exemples de ces fonctions [33] [34]:

II.6.1 La fonction SAT :

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > \mu \\ -1 & \text{si } S < -\mu \\ \frac{s}{\mu} & \text{si } |S| < \mu \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

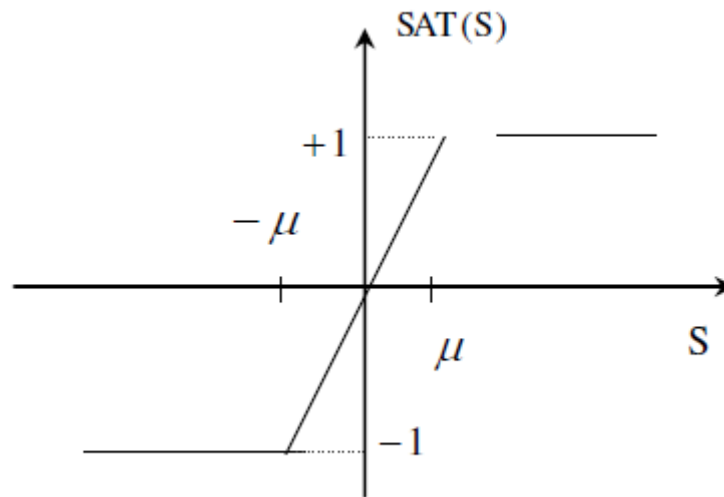


Figure (II-2): Fonction «SAT »

II.6.2.La fonction adoucie (Smooth function):

On peut aussi remplacer la fonction « sign » par une fonction de adoucie soit :

$$smooth(S) = \frac{s}{|s| + \mu}$$

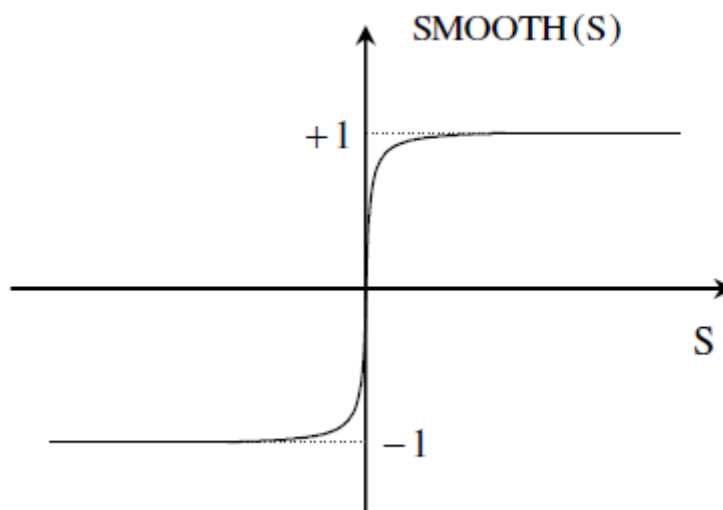


Figure (II-3): Fonction « SMOOTH »

II.7. Domaines d'application de la commande par mode glissant

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydraulique ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables, ou complètement ouvertes ou fermées.

Les entraînements électriques pour les machines électriques, ou robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation).

Il faut mentionner que dans certains domaines tels que, les processus chimique et métallurgiques, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions [32].

II.8. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement

Il est reconnu que la robustesse vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du modèle présente le point fort d'une commande par mode de glissement. Contrairement à une loi de

Commande classique, les performances dynamiques sont maintenues quelles que soient les variations des paramètres et quelle que soit l'amplitude des perturbations appliquées au système. De plus, la réduction de l'ordre du système constitue un autre point fort de ce type de commande, il permet de simplifier la complexité du système.

Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients :

1-Un phénomène de chattering où broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande et qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs.

2-Le système est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré et ceci n'est pas souhaitable.

Parmi les solutions proposées à ces problèmes on peut citer la commande par mode glissant à bande limite qui consiste à remplacer la fonction de commutation dans la commande par une fonction de saturation (hystérésis, arc tangente,... etc.)[35].

II.9.Expression analytique de la commande

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + g(x,t)u(t) \quad (\text{II-7})$$

Le vecteur u est composé de deux grandeurs : u_{eq} et u_N soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \quad (\text{II-8})$$

Nous avons :

$$\dot{s}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \{f(x,t) + g(x,t)u_{eq}(t)\} + \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x,t)u_N\} \quad (\text{II-9})$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro) .Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq} = \left\{ \frac{\partial s}{\partial x} g(x,t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial s}{\partial t} f(x,t) \right\} u_N = 0 \quad (\text{II-10})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (II-10) dans l'équation (II-9) .Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x,t)u_N\} \quad (\text{II-11})$$

Le problème revient à trouver u_N tel quel :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x,t)u_N\} < 0 \quad (\text{II-12})$$

La solution la plus simple est de choisir u_N sous la forme de relais (**Figure : II-3**) .Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = -k \text{sign}(s(x)) \quad (\text{II-13})$$

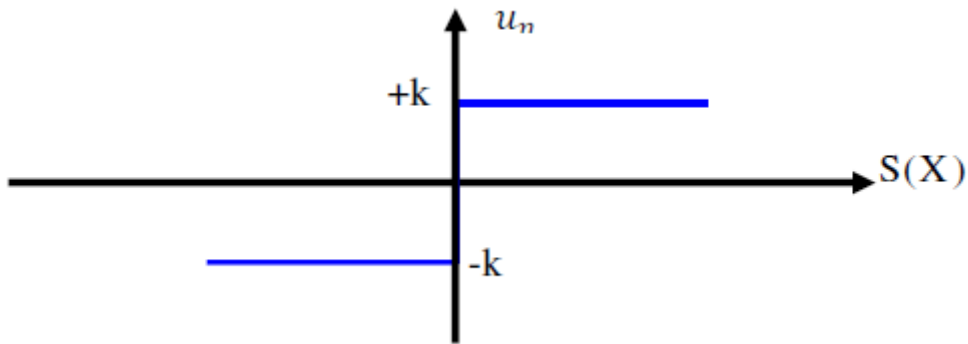


Figure (II-4) : Représentation de la fonction « Sign».

En remplaçant l'expression (II-12) dans (II-13) on obtient :

$$S(x) \dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} g(x,t) k |s(x)| < 0 \quad (\text{II-14})$$

Où le facteur $\frac{\partial s}{\partial x} g(x,t)$ est toujours négatif pour la classe des systèmes que nous considérons. Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (II-14). Le choix de ce gain est très influé sur la commande car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande à structure variable (CSV) fonctionnant en mode de glissement. Après la présentation de la théorie de base de cette commande, nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande; nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances suite à la nature de la commande par mode glissant qui s'adapte bien aux systèmes non linéaires.

CHAPITRE III

Commande par mode glissant d'un SEGWAY

III.1.Introduction

La commande par mode de glissement est représentée pour le robot mobile Segway qui est un système sous actionnée ou les deux sorties x et ϕ sont commandées par la même entrée V_a .

Des simulations ont été effectuées à la fin de ce chapitre à l'aide du logiciel Matlab, pour montrer l'efficacité de la méthode.

III.2.Synthèse de la commande par mode glissant:

Le modèle dynamique du robot mobile segway est définie par :

$$\begin{cases} \ddot{x} = a_1 \dot{x} + b_1 \dot{\phi} + c_1 V_a \\ \ddot{\phi} = a_2 \dot{x} + b_2 \dot{\phi} + c_2 V_a \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

C'est un système sous actionnée ou les deux sorties x et ϕ sont commandées par la même entrée V_a .

Cependant, le mouvement de translation est contrôlé par la rotation du chariot autrement dit l'angle de rotation ϕ est responsable du mouvement de translation. La Figure (III-1) l'explique:

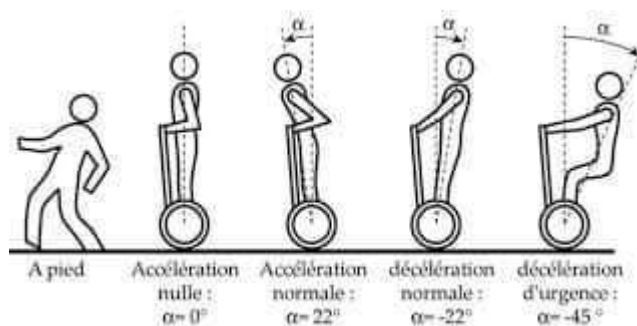


Figure (III-1) : L'angle de rotation ϕ

Dans ce chapitre la loi de commande par mode glissant est synthétisée pour contrôler pour l'angle ϕ comme suit :

$$\ddot{\phi} = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + c_2 V_a + B = H + c_2 V_a + B \quad (\text{III-2})$$

Avec :

B est un terme qui regroupe les perturbations et les incertitudes de modélisation, la surface de glissement dans ce cas est définie par :

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad \text{et } \lambda > 0 \quad (\text{III-3})$$

Avec e est l'erreur de poursuite sur le mouvement de rotation de chariot, d'où :

$$e = \phi_d - \phi \quad (\text{III-4})$$

La dynamique de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{S} = \ddot{\phi}_d + \lambda \dot{e} - H - c_2 V_a + B \quad (\text{III-5})$$

La loi de commande par mode de glissement qui garantit la stabilisation et les performances pour le robot segway est définie par :

$$V_a = \frac{1}{c_2} (\ddot{\phi}_d + \lambda \dot{e} - H + k \sin g(s)) \quad (\text{III-6})$$

En remplaçant (III-6) dans (III-5) on aura :

$$\dot{S} = -k \sin g(s) - B \quad (\text{III-7})$$

Avec : $k > 0$

Le paramètre k doit être choisis suffisamment grand pour compenser les perturbations B .

III.3.Résultats de simulation :

Des simulations ont été effectuées sur le modèle dynamique de robot segway afin de monter l'efficacité de la loi de commande synthétisée.

Les différents paramètres utilisés sont présenté au tableau :

Tableau (III-1) : paramètre de la commande par mode glissant.

λ_2	500
K2	20000
G2	0.2456
F2	[-0.0293 172.1160]

Premier cas : sans perturbation

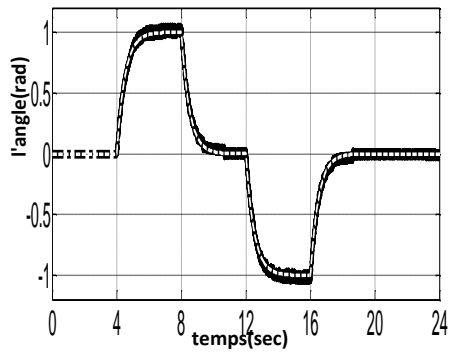


Figure (III-2-1): l'angle ϕ

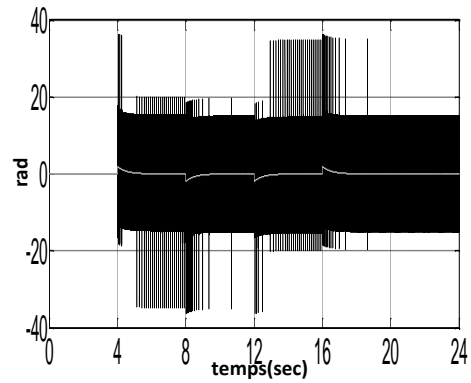


Figure (III-2-2): ϕ

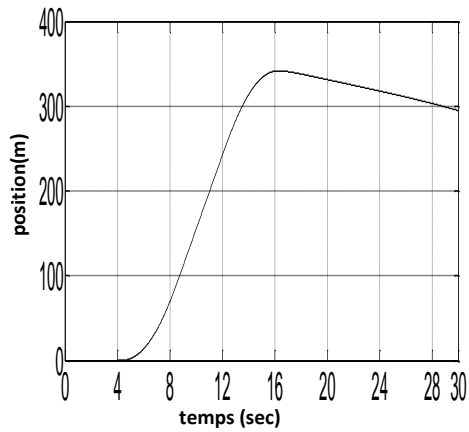


Figure (III-2-3): La position x

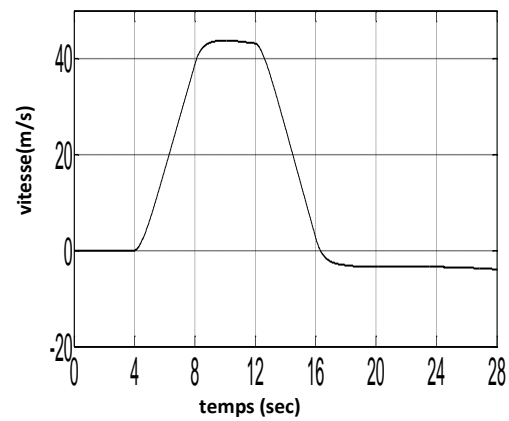


Figure (III-2-4): \dot{x}

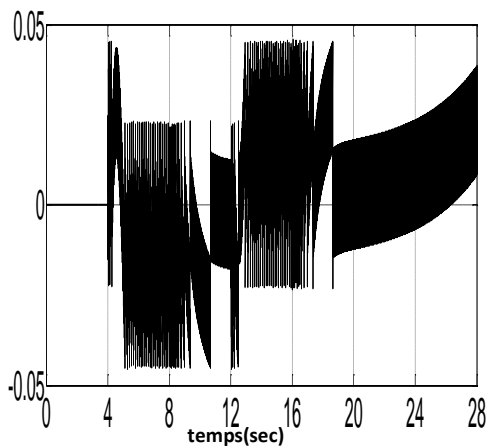
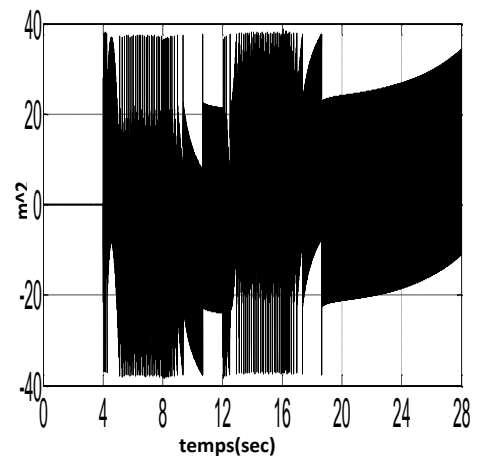


Figure (III-2-5): L'erreur



Figure(III-2-6): s

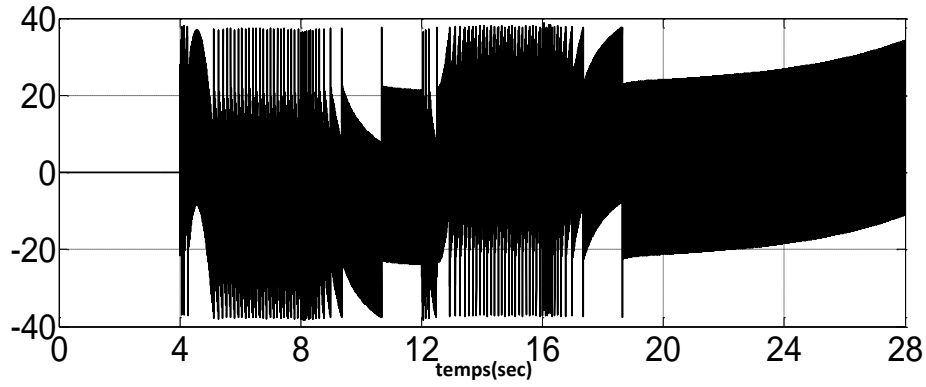


Figure (III-2-7): la commande u

Figure(III.2) : résultats de simulation sans perturbation avec

(— : Trajectoire réelle, - - - : trajectoire désirée)

deuxième cas : avec perturbation

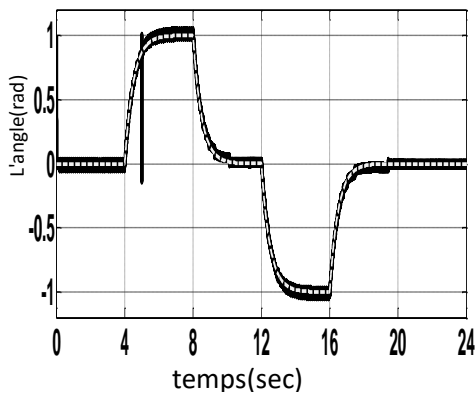


Figure (III -3-1): L'angle ϕ

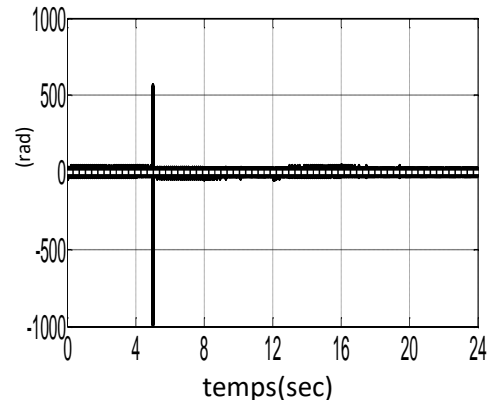


Figure (III -3-2): $\dot{\phi}$

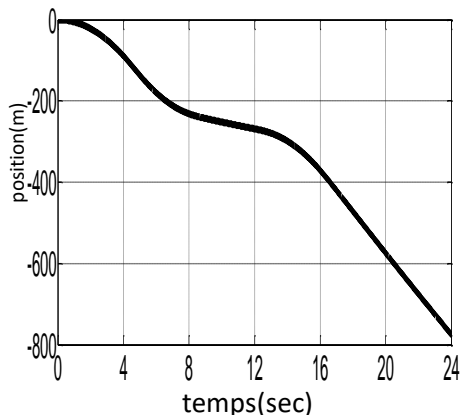


Figure (III-3-3): La position x

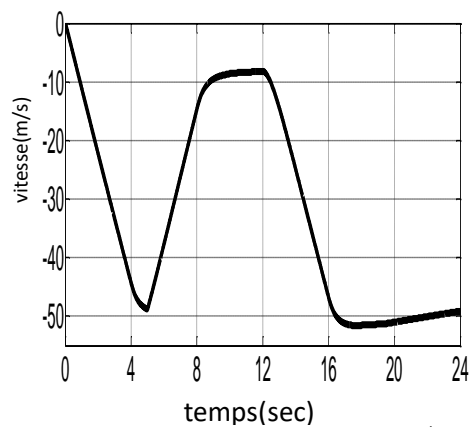
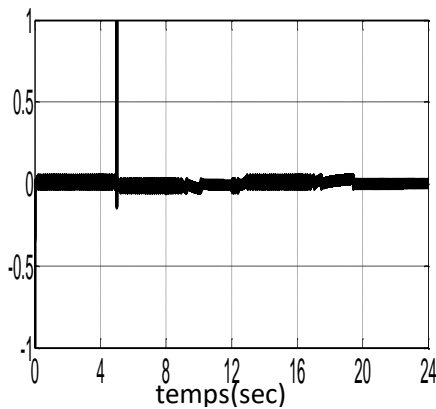
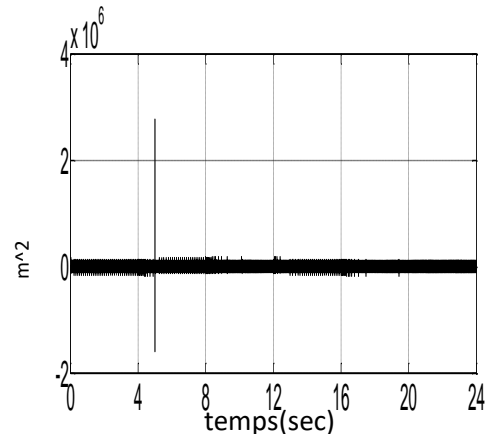


Figure (III-3-4): \dot{x}



Figure(III-3-5): L'erreur



Figure(III-3-6): s

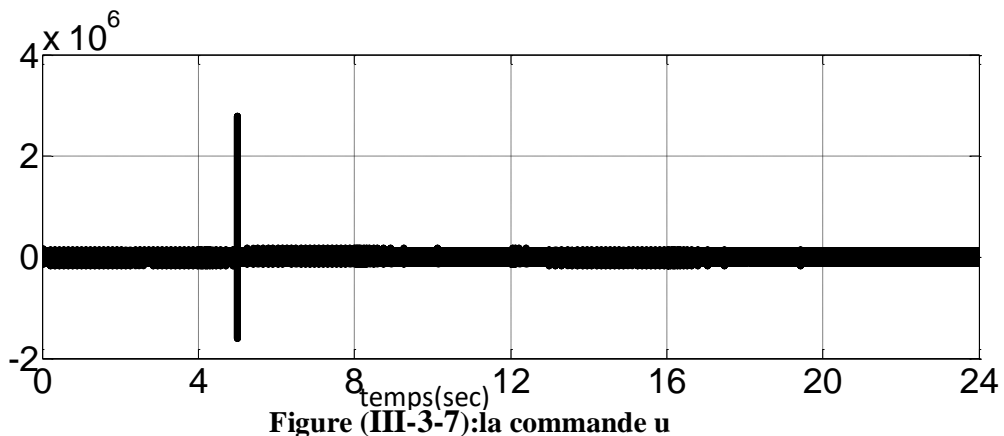


Figure (III-3-7): la commande u

Figure (III-3): Résultat de simulation avec perturbation

(— : Trajectoire réelle, - - - trajectoire désirée)

III.4. Interprétation des résultats obtenus :

La Figure:(III-2) montre l'application de la commande par mode glissant au système sans perturbations.

Les Figures (III-2-1), (III-2-3) et (III-2-4) représentent respectivement les schémas de l'angle ϕ , de la translation et de la vitesse linéaire. L'analyse de ces résultats est détaillée comme suit:

- De (0-4) sec quand le chariot est en position de repos ($\phi=0$), le Segway ne se déplace pas ($x=0$) et sa vitesse également est égale à 0 ($\dot{x}=0$).
- De (4-8) sec quand le chariot est penché vers l'avant ($\phi>0$), le Segway avance et sa vitesse augmente graduellement.
- De (8-12) sec une fois le chariot est remis à sa position initiale ($\phi=0$), le Segway continue à s'avancer à une vitesse stable ($v=cte$).
- De (12-16) sec dès que le chariot est incliné vers l'arrière ($\phi<0$), le Segway avance toujours tout en dégradant sa vitesse.

- De (16-24) sec le chariot remis à sa position initiale ($\phi=0$), le segway recule et sa vitesse reste stable.

La figure (III-3) montre le test de robustesse, la perturbation est présente à partir l'instant 0 sec sur la sortie rotative, et elle dure 5 sec.

La simulation montre la robustesse de la loi de commande utilisée.

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'application de la commande par mode glissement sur le système de base du gyropode. Le système segway est un système sous actionné, dont les deux sorties x et ϕ sont commandées par la même entrée.

Physiquement le déplacement du sagway est provoqué par la rotation du chariot. Un angle de rotation positif implique le déplacement avec une accélération positive dans le plan. Un angle de rotation négatif (vers le conducteur) implique un déplacement avec une accélération négative dans le plan. Ce mouvement est généralement utilisé pour minimiser la vitesse de translation et s'arrêter à la fin.

Le fait de garder le chariot à sa position d'équilibre donne un déplacement à une vitesse constante. Pour cela un bon positionnement du chariot implique le bon déplacement dans le plan, alors la commande est synthétisée pour commander l'angle de rotation ϕ est par conséquent le mouvement de translation sera commandé par cette dernière.

Les résultats de simulation présentés montrent la relation physique entre l'angle de rotation et le mouvement de translation.

CHAPITRE IV

Filtre de Kalman pour Segway

IV.1.Introduction

La commande d'un procédé nécessite souvent la connaissance complète et à tout instant de ces différentes variables d'état. Compte tenu des contraintes économiques, technologiques et même de faisabilité, il est souvent difficile d'accéder à toutes les variables qui constituent le vecteur d'état. Alors, pour résoudre ce problème, la conception d'un tel système auxiliaire, appelé observateur d'état dont ses entrées sont les entrées et les sorties du système réel et sa sortie est le vecteur d'état estimé, s'avère fort indispensable.

Les premiers travaux sur les observateurs ont été publiés vers les années soixante par Kalman [36][37] et par suite par Luenberger [38]. Depuis, les chercheurs se sont intéressés à la conception des observateurs d'état pour les systèmes linéaires invariants dans le temps. La non linéarité et la non stationnarité des systèmes industriels ont incité les chercheurs à développer des approches étendues des observateurs linéaires telle que le filtre de Kalman étendu [37].

Les chercheurs ont proposé la synthèse d'un observateur pour une classe des systèmes non linéaires dont le système d'erreur est linéarisable à l'aide des transformations d'état qui rendent les non linéarités du système dépendantes uniquement des entrées et des sorties mesurables du système [39][40][41].

Dans ce travail, nous avons choisis comme observateur le filtre de Kalman qui a connu un grand succès qui s'explique par sa simplicité d'implémentation en dépit de la complexité des systèmes non linéaires.

IV. 2.Filtre de kalman

La représentation d'état d'un système linéaire est donnée par (IV.1) avec des entrées déterministes $u(t)$ et aléatoires $w(t)$ et $v(t)$. Nous supposons donc que notre système perturbé peut être modélisé par le modèle d'état suivant appelé **modèle de Kalman** :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + M_w w(t) & \text{équation d'état } x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, w \in \mathbb{R}^q \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + v(t) & \text{équation de mesure, } y \in \mathbb{R}^p, v \in \mathbb{R}^p \end{cases} \quad (\text{IV-1})$$

Auquel nous adjoindrons les hypothèses suivantes :

IV.2.1.Hypothèses:

Nous supposons que :

H1: la paire (A, C) est observable, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de mode instable et inobservable dans le système,

H2: les signaux $w(t)$ et $v(t)$ sont des **bruits blancs gaussiens centrés** de **Densité spectrale de puissance (DSP)** w et v respectivement, c'est-à-dire :

- $E[w(t)w(t+\tau)^T] = w\delta(\tau)$
- $E[v(t)v(t+\tau)^T] = v\delta(\tau)$
- $E[w(t)v(t+\tau)^T] = 0$

(Cette dernière relation traduit l'indépendance stochastique des bruits $w(t)$ et $v(t)$: cette hypothèse est introduite pour alléger les calculs qui vont suivre mais n'est pas nécessaire. on trouvera dans la référence [42] les formules qui prennent en compte une corrélation entre les bruits d'état et de mesure).

H3: v est inversible (il y a autant de sources de bruits blancs indépendantes que de mesures dans l'équation de mesure).

IV.2.2. Structure d'un estimateur non biaisé:

Un filtre de Kalman est un système dynamique avec 2 entrées (vectorielles): la commande déterministe u et la mesure y , c'est-à-dire tous les signaux connus du système. L'état \hat{x} (ou la sortie) de ce filtre est un estimé de l'état x du système.

Soit:

$$\dot{\hat{x}} = A_f \hat{x}(t) + \begin{bmatrix} B_f & K_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (\text{IV-2})$$

$$= A_f \hat{x}(t) + B_f u(t) + K_f y(t) \quad (\text{IV-3})$$

La représentation d'état de ce filtre. Bien entendu il faut **initialiser ce filtre avec** $\hat{x}(t_0)$: l'estimé de l'état du système à l'instant initial t_0 .

On note $\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ l'erreur d'estimation de l'état du système $\varepsilon(t_0) = x(t_0) - \hat{x}(t_0)$ l'erreur d'initialisation.

En remplaçant l'équation (IV-3) de l'équation d'état (IV-1) et en utilisant l'équation de mesure, nous pouvons écrire:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= Ax + Bu + M_w - A_f \hat{x} - B_f u - K_f (Cx + Du + v) \\ &= (A - K_f C)x - A_f \hat{x} + (B - B_f - K_f D)u + M_w - K_f v \\ &= (A - K_f C)\varepsilon + (A - K_f C - A_f) \hat{x} + (B - K_f D - B_f)u + M_w - K_f v \end{aligned} \quad (\text{IV-4})$$

Etant donné que les bruits w et v sont gaussiens et le système est linéaire, on peut affirmer que $\varepsilon(t)$ est une variable aléatoire gaussienne. Nous allons maintenant nous intéresser à l'espérance mathématique (moyenne) de $\varepsilon(t)$.

Estimateur non biaisé : avant tout, on souhaite que l'estimateur soit non biaisé, c'est-à-dire que:

- Quel que soit le profil de commande $u(\tau)$ appliqué sur l'horizon $\tau \in [t_0 \ t]$
- Quel que soit l'initialisation $\hat{x}(t_0)$

On souhaite que la moyenne de l'erreur d'estimation tende vers 0 lorsque t tend vers l'infini. Les bruits w et v étant centrés, nous pouvons écrire :

$$E\left[\dot{\varepsilon}(t)\right] = (A - K_f C)E[\varepsilon(t)] + (A - K_f C - A_f)E\left[\hat{x}(t)\right] + (B - K_f D - B_f)u(t)$$

Et $\lim_{t \rightarrow \infty} E[\varepsilon(t)] = 0, \quad \forall u(t), \quad \forall E\left[\hat{x}(t)\right]$, si et seulement si :

$$A_f = A - K_f C, \quad B_f = B - K_f D \tag{IV-5}$$

$$\text{et } A_f = A - K_f C \text{ est stable.} \tag{IV-6}$$

$$E[\varepsilon(t)] = e^{(A - K_f C)(t - t_0)} \varepsilon(t_0) \quad \text{et} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} E[\varepsilon(t)] = 0$$

Si l'on reporte (IV-5) dans (IV-3), l'équation du filtre de Kalman s'écrit :

$$\dot{\hat{x}} = (A \hat{x} + Bu) + K_f (y - C \hat{x} - Du) \tag{IV-7}$$

On reconnaît dans le premier terme du second membre de cette équation, le modèle du système $(A \hat{x} + Bu)$ qui est exploité pour prédire l'évolution de l'état du système à partir de l'estimation courante \hat{x} . Cette prédiction est en fait une simulation en ligne du modèle du système. Le modèle étant faux, la prédiction est recalée en fonction de l'erreur entre la mesure y et la mesure prédite $\hat{y} = C \hat{x} - Du$ et du gain du filtre K_f . Le signal d'erreur $y - \hat{y}$ est aussi appelé l'innovation. Le schéma correspondant (dans le cas où $D=0$) est représenté sur la figure (IV-1). Cette structure garantit que l'estimateur est non biaisé quel que soient les matrices A, B, C, D du système et le gain K_f tel que $A - K_f C$ soit stable (cela justifie en fait l'hypothèse **H1** : la présence d'un mode instable et inobservable ne permet pas de trouver de gain K_f stabilisant et donc de construire un estimateur non-biaisé).

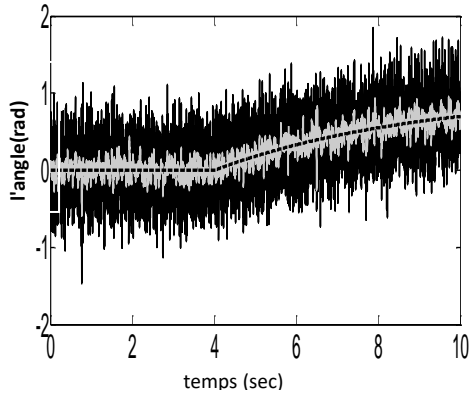


Figure (IV-2-1): L'angle ϕ , $\phi_{\acute{e}s}$ et ϕ_d

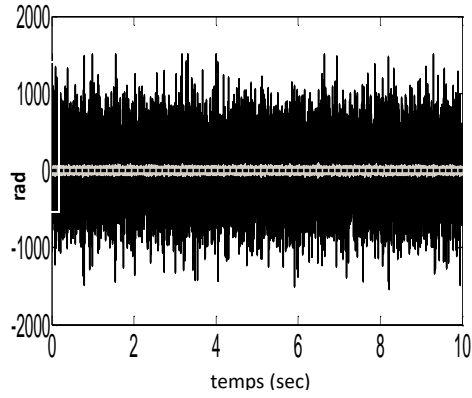


Figure (IV-2-2): $\dot{\theta}$, $\dot{\theta}_{\acute{e}s}$ et $\dot{\theta}_d$

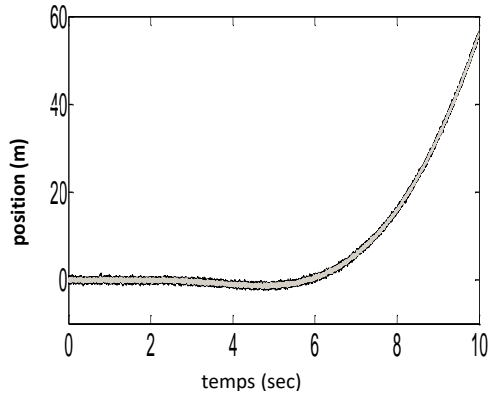


Figure (IV-2-3): La position $(x, x_{\acute{e}s})$

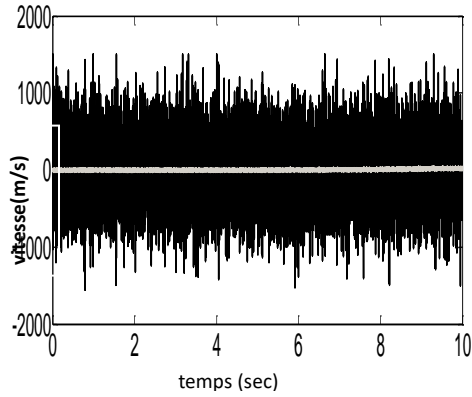


Figure (IV-2-4): \dot{x} et $\dot{x}_{\acute{e}s}$

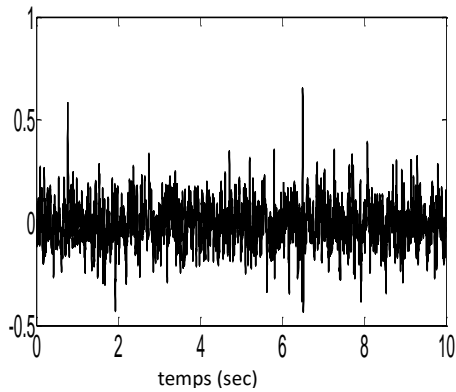


Figure (IV-2-5): L'erreur (e)

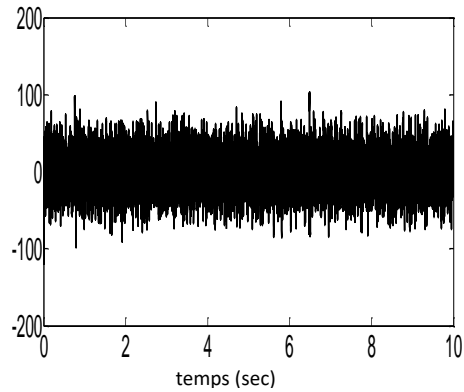


Figure (IV-2-6): La surface (s)

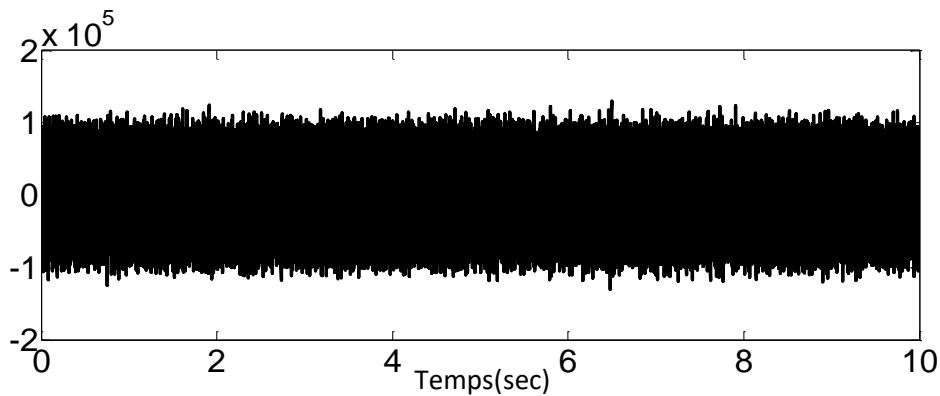


Figure (IV-2-7): La commande u

Figure(IV.2): résultats de simulation par filtre de Kalman

(— : Trajectoire réelle, - - - : trajectoire désirée,
 — : Trajectoire estimée).

Les performances sont bonnes dues à la loi de commande utilisée, mais la remarque la plus importante est que les signaux issus du filtre de Kalman c'est-à-dire les variables d'états estimés sont la moyenne des trajectoires réelles.

IV.4. Conclusion

Le filtre de Kalman permet de donner une estimation de l'état de système à partir d'une information a priori sur l'évolution de cet état (modèle) et de mesures réelles.

Il est utilisé pour estimer des conditions initiales inconnues, prédire des trajectoires de mobiles (trajectographie), localiser un engin (navigation, radar,...) , et également pour implanter des lois de commande fondées sur un estimateur de l'état et un retour d'état.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail entre dans le cadre d'une commande non linéaire appliquée à un transporteur personnel Segway. Ce gyropode qui représente un moyen de transport très intéressant, qui permet aux individus de se déplacer d'une façon moderne, économique, moins encombrante et maniable.

L'intérêt porté sur le développement de tels systèmes d'un point de vue automatique a mené à l'amélioration des techniques de commande.

Dans ce but, nous avons proposé dans ce travail de fin d'étude, une analyse détaillée du système segway qui est un système sous actionné, dont les deux sorties x et ϕ sont commandées par la même entrée. Ce système non linéaire lié aux équations mathématiques, est régi par son modèle dynamique abordé dans chapitre I. Nous avons également présenté la conception d'une commande par mode glissant sur ce modèle.

Ce mémoire, propose plusieurs tests sur le modèle du système (Segway). D'après les résultats trouvés, On peut conclure à travers les courbes simulées pour les cas d'étude, présentées dans le troisième chapitre, que l'application de la commande par mode glissant a été bonne, ainsi que ces résultats de simulation montrent la relation physique entre l'angle de rotation et le mouvement de translation.

Références Bibliographiques

- [1] https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00655005/PDF/Filliat_RobotiqueMobile_ENSTAParisTech.pdf
- [2] wikipedia
- [3] Pinto, L. J., Kim, D.-H., Lee, J. Y., and Han, C.-S. (2012). Development of a segway robot for an intelligent transport system. In *System Integration (SII), 2012 IEEE/SICE International Symposium on*, pages 710–715. IEEE.
- [4] Baloh, M. and Parent, M. (2003). Modeling and model verification of an intelligent self-balancing two-wheeled vehicle for an autonomous urban transportation system. In *The conference on computational intelligence, robotics, and autonomous systems*, pages 1–7. Citeseer.
- [5] Tirmant, H., Baloh, M., Vermeiren, L., Guerra, T., and Parent, M. (2002). B2, an alternative two wheeled vehicle for an automated urban transportation system. In *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE*, volume 2, pages 594–603. IEEE.
- [6] Kausar, Z., Stol, K., and Patel, N. (2012). The effect of terrain inclination on performance and the stability region of two-wheeled mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9.
- [7] Li, J., Gao, X., Huang, Q., Du, Q., and Duan, X. (2007). Mechanical design and dynamic modeling of a two-wheeled inverted pendulum mobile robot. In *Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on*, pages 1614–1619. IEEE.
- [8] Choi, D. and Oh, J.-H. (2008). Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced-order disturbance observer. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 2521–2526. IEEE.
- [9] Kim, Y., Kim, S. H., and Kwak, Y. K. (2005). Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 44(1) :25–46.
- [10] Xu, J.-X., Guo, Z.-Q., and Lee, T. H. (2012). Synthesized design of a fuzzy logic controller for an underactuated unicycle. *Fuzzy Sets and Systems*, 207 :77– 93.
- [11] Huang, J., Guan, Z.-H., Matsuno, T., Fukuda, T., and Sekiyama, K. (2010). Sliding-mode velocity control of mobile-wheeled inverted-pendulum systems. *Robotics, IEEE Transactions on*, 26(4) :750–758.
- [12] Katariya, A. S. (2010). *Optimal state-feedback and output-feedback controllers for the*

- wheeled inverted pendulum system*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- [13] Castro, A. (2012). Modeling and dynamic analysis of a two-wheeled inverted-pendulum.
- [14] Ha, Y.-S. et al. (1996). Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot. *Robotics and autonomous systems*, 17(1) :65–80.
- [15] Grasser, F., D'arrigo, A., Colombi, S., and Rufer, A. C. (2002). Joe : a mobile, inverted pendulum. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 49(1):107– 114.
- [16] Anderson, D. P. (2003). nbot balancing robot. <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>. Accessed : 11/02/2016 at 11 :20.
- [17] Robotics, S. (2016). Segway rmp. <http://rmp.segway.com>. Accessed : 11/02/2016 at 12 :00.
- [18] Wikipedia, Gyropode, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gyropode>.
- [19] <http://www.segway.fr/>.
- [20] Manuel de référence Segway, TP i2, x2<http://www.segway.com>.
- [21] H. Benariba, "Commande d'un robot mobile sur deux roues", mémoire de Magister, Université de Telemcen 2013.
- [22] F. Mudry, "Modélisation et régulation d'un pendule inversé", Notes d'application, Institut d'Automatisation Industrielle, 2001.
- [23] **HADDAD** Salah ; **CHARIF** Mourad "Etude comparative de la commande vectorielle et celle par mode glissement de moteur asynchrone" **Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2005**.
- [24] **KAHIL** Zoubir ; **LATRECHE** Houari " Commandes par retour d'état non linéaire d'un moteur asynchrone " Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA , JUIN 2006.
- [25] **KEDJOUTI** Seddik ; **MESSAOUDI** Chouaib " Réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone a double alimentation par des régulateurs en mode glissant " **Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA , JUIN 2005**.
- [26] **NAIDJI** Omar "Commande à structure variable appliquée au simulateur de vol d'hélicoptère" **mémoire de master Université de M'SILA, JUIN 2012**.
- [27] **BOUKHELKHAL** Abdelouahab ; **HACHEMI** Ahmed adel "Commande par mode de glissement d'une suspension active d'un vé chile" **Mémoire d'Ingéniorat Université de M'SILA,2006**

- [28] **YAHIAOUI** Omar ; **LABZA** Tahar " Etude et simulation d'association onduleur de tension
-moteur asynchrone et réglage par mode glissant" **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2007.**
- [29] **ZORIG** Abd elaziz ; **BELOUADAH** Ahmed hamza " Commande en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone à aimant permanent " **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2006**
- [30] **IHADDADENE** Kerim ; **CHAIBI** Madani ; **ABDELATIF** Billal " Etude comparative entre la commande pi et celle par mode glissant d'un moteur asynchrone triphasé" **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2009.**
- [31] **AMGHAR** Billal ; **HEDID** Abdelkader " Commande par Fuzzy Sliding Mode d'un variateur de vitesse hydrodynamique " **Mémoire d'Ingénieurat Ecole Nationale Polytechnique2007.**
- [32] **BELKHEIR** Med elamine ; **HAMDI** Mohamed ; **ROUMAIR** Tariq " Synthèse de lois de commande par floue mode glissement avec une surface de glissement non linéaire appliques a système Hydraulique " **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2010**
- [33] **BOUCHAALA** Safia "Commande à structure variable d'une machine à induction"
mémoire de master Université de M'SILA, JUIN 2012
- [34] **ACHOUR** Abdelmalak ; **AICHOUCHE** Azedine " Réglage par mode glissant d'un machine asynchrone" **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2005.**
- [35] **DJERIOUI** Ali ; **KHELIFI** Faris "Commande et observation par mode glissant des convertisseurs multicellulaires séries " **Mémoire d'Ingénieurat Université de M'SILA,2009**
- [36] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering Prediction Problems".
Transactions ASME, Journal Basic Engineering, vol. 82 : pp. 34-45, 1960.
- [37] R. E. Kalman, and R. Bucy. "New Results in Linear Filtering and Prediction Theory".
Transactions ASME, Journal Basic Engineering, vol. 83 : pp. 95–108, 1961.
- [38] D. Luenberger. "An Introduction to Observer". *IEEE Transactions on Automatic and Control*, AC-16 : pp. 596–602, 1971.

- [39] A. Krener, and W. Respondek. "Nonlinear Observers with Linearizable Error Dynamics". *SIAM Journal Control Optimisation*, vol. 23 : pp. 197–216, 1985.
- [40] A. J. Krener, and A. Isidori. "Linearization by Output Injection and Nonlinear Observers". *Systems & Control Letters*, vol. 3 : pp. 47–52, 1983.
- [41] X. H. Xia, and W. B. Gao. "Nonlinear Observer Design by Observer Error Linearization". *SIAM Journal Control Optimization*, vol. 27 : pp. 199–216, 1989.
- [42] "Le filtrage et ses applications": M. Labarrère, J. P. Krief et B. Gimonet, Cépaduès Editions.

Résumé

Le robot mobile à deux roues de type gyropode (segway) est basé sur le modèle de pendule inversé, un système non linéaire instable sous actionné à plus d'un degré de liberté.

L'étude est basé sur une commande non linéaire appliquée à un transporteur personnel Segway lié aux équations mathématiques avec la présentation et la conception d'une commande par mode glissant sur ce modèle. Pour arriver par la fin à une simulation du cas d'étude.

Mots clés : gyropode, Segway, systèmes non linéaires, robot mobile, mode glissant

Abstract :

The two-wheel mobile gyropod (segway) robot is based on the inverted pendulum model, an unstable non-linear system under operated at more than one degree of freedom.

The study is based on a non-linear control applied to a Segway personal transporter related to mathematical equations with the presentation and design of a sliding mode control on this model. To arrive at the end at a simulation of the case studied.

Key words: gyropode, Segway, non-linear system, robot mobile, sliding mode