

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique industrielle

Thème

*Modélisation et commande d'un robot auto-équilibré
à deux roues*

Préparé par :

- IOUKNANE Khaled
- MOURI Taous

Dirigé par :

Mr. TIGHZERT.L

Examiné par :

Mr. MENDIL.B

Mr. HADDAR .H

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

On remercie dieux le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mr.TIGHZERT, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos vifs et chaleureux remerciements vont également au membre de jury Mr. MENDIL et Mr.HADDAR pour le grand honneur qu'ils font en acceptant de juger ce travail.

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

A mes chers parents

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A ma chère sœur

Aldjia pour leur encouragement permanent, et leur soutien moraux.

A mes chers frères

Adnane, Saadi et Hanin pour leurs appuis et leurs encouragements.

A mes grands parents

Ceci est ma profonde gratitude pour votre éternel amour, et à la mémoire de mon grand-père et qu'il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un petit fils qui a toujours priés pour le salut de son âme.

A mes chers oncles

A mes chers cousins et cousines

A mon binôme et chère amie

Taous pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

A mes merveilleux amis

Syphax, Idris, Sofiane, Samia et Tahar pour leurs encouragements, leurs aides et supports dans les moments difficiles.

IOUKNANE Khaled

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

A mes chers parents

Ma mère El-Djouher et mon père qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mon frère

Farez pour leur encouragement, leur conseil précieux tout au long de mes études.

A mes chères sœurs

Fatiha, Liza et Sina pour leur encouragement permanent, et leurs soutiens moraux.

A mes chers oncles et tantes

A mes chers cousins et cousines

A mon binôme et cher ami

Khaled pour sa patience et les efforts dont il a fait preuve et sa compréhension tout au long de ce projet.

A mes merveilleux amis

Sara et Katia pour leurs encouragements, leurs aides et supports dans les moments difficiles.

MOURI Taous

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les robots auto-équilibre	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un robot mobile.....	3
I.3 Classification des robots mobiles.....	4
I.3.1 Classification selon le degré d'autonomie.....	4
I.3.2 Classification selon le type de locomotion.....	5
I.3.2.1 Mobiles à chenilles.....	5
I.3.2.2 Mobiles à pattes.....	5
I.3.2.3 Mobiles à roues.....	6
I.3.3 Classification selon le domaine d'application.....	7
I.4 Caractéristiques d'un robot mobile.....	7
I.5 Constituants d'un robot.....	8
I.5.1 Les capteurs	9
I.5.1.1 Capteurs intéroceptifs.....	9
I.5.1.2 Capteurs extéroceptifs.....	9
I.5.2 Les Actionneurs.....	9
I.5.3 La partie commande.....	10
I.5.3.1 La vision	10
I.5.3.2 Localisation.....	11
I.5.3.3 Planification	11
I.5.3.4 Navigation	12

Table des matières

I.6 Le robot auto-balancé.....	12
I.7 Les pendules inversés	13
I.7.1 Définition	13
I.7.2 Intérêt de l'étude d'un pendule inversé	13
I.8 Conclusion	13

Chapitre II : Modélisation du robot et réalisation sur Matlab

II.1 Introduction.....	15
II.2 Principe de fonctionnement de robot auto-équilibré	15
II.3 Modélisation mathématique	16
II.4 Système de coordonnées spatiales	16
II.5 Le model dynamique.....	17
II.6 Présentation de model physique du robot sur Simscape.....	20
II.7 Réalisation du robot sur Simscape.....	24
II.7.1Réalisation des roues.....	24
II.7.2Réalisation de châssis.....	26
II.7.3 Ensemble châssis-roues	28
II.8 Conclusion:	30

Chapitre. III : équilibration d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

III.1 Introduction.....	31
III.2 L'objectif de commander un robot auto-équilibré à deux roues	31
III.3 Le Régulateur PID	32
III.4 Le principe de la commande PID.....	32
III.5 L'utilisation du contrôleur PID pour équilibrer un robot.....	33
III.6 La robustesse du contrôleur PID.....	35
III.7 La commande floue.....	39
III.7.1 Définition.....	39
III.7.2 Principe de fonctionnement	39
III.8 L'utilisation du contrôleur flou pour équilibrer un robot sur simscape.....	40
III.9 La robustesse de la commande floue.....	45
III.10 Comparaison entre les résultats du contrôleur PID et logique flou.....	47
III.11 La déférence le contrôleur PID et logique flou.....	47
III.12 Conclusion.....	47

Table des matières

Conclusion générale.....	49
ANNEX.....	51

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Le robot mobile « Sejourner » utilisé pour la mission pathfinder de la NASA.....	3
Figure I-2 : Robot mobile à chenilles.....	5
Figure I-3 : Robot mobile à pattes.....	6
Figure I-4 : Robot mobile MIABOT	6
Figure I-5 : Architecture modulaire d'un robot mobile.....	8
Figure I-6 : Robot Auto-Balancé	12

Chapitre II

Figure II-1 : les trois cas du pendule inverse.....	15
Figure II-2 : les coordonnées spatiales du robot auto-équilibré.....	16
Figure II-3 : schémas bloc des roues sur simscape.....	25
Figure II-4 : les roues en 3D <i>sur Simscape</i>	25
Figure II-5 : le rectangle en 3D <i>sur Simscape</i>	26
Figure II-6 : la tige en 3D <i>sur Simscape</i>	27
Figure II-7 : <i>schémas bloc</i> de un sous-système « pillars ».....	27
Figure II-8 : schéma bloc de châssis sur simscape.....	28
<i>Figure II-9 : le châssis en 3D sur Simscape</i>	28
Figure II-10 : schémas bloc de l'ensemble châssis-chariot sur simscape.....	29
<i>Figure II-11 : l'ensemble châssis-chariot sur Simscape en 3D</i>	29

Chapitre III

Figure III.1 Signal d'angle d'inclinaison.....	34
Figure III.2 Signal de force générer.....	34
Figure III.3 visualisation de la stabilité de model 3D du robot.....	35

Figure III.4 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force	36
Figure III.5 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force.....	36
Figure III.6 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force.....	37
Figure III.7 Structure d'un système flou.....	39
Figure III.8 Définition de la structure globale.....	40
Figure III.9 Signal d'angle mesuré.....	42
Figure III.10 Signal de La vitesse angulaire.....	42
Figure III.11 Signal de force générer par le contrôleur.....	43
Figure III.12 visualisation robot en 3D.....	43
Figure III.16 Signal de perturbation d'une variance de 1.....	44
Figure III.17 Signal d'angle d'inclinaison.....	44
Figure III.18 Signal de perturbation d'une variance de 3.....	45
Figure III.19 Signal d'angle d'inclinaison.....	45

Liste des tableaux

Tableau II-1 les dimensions et les masses des pièces du robot	29
Tableau III.1 Les fonction d'appartenance et leurs intervalles.....	42
Tableau III.2 Base de règle de la commande floue.....	42

Symboles

δ	Angle de braquage
D	Distance entre le centre de deux roues
R	Le rayon de roue
θ_L	Le déplacement angulaire de la roue gauche
θ_R	Le déplacement angulaire de la roue droite
m_w	la masse de la roue
T_w^T	L'énergie cinétique de translation de deux roues
J_w	Le moment d'inertie de la roue le long de Y_B
J_{wz}	Le moment d'inertie de la roue le long de Z_G
T_B^T	L'énergie cinétique de translation du corps
m_B	La masse du corps
L	La distance entre masse du corps et centre de l'essieu
θ	Angle d'inclination
T_B^R	L'énergie cinétique de rotation du corps
J_{BZ}	Le moment d'inertie du corps le long de Z_G
J_{BY}	Le moment d'inertie du corps le long de Y_B
V_B	L'énergie potentielle gravitationnelle
g	Accélération de pesanteur
L	La fonction de lagrangienne
C_R	Couple moteur de la roue droite
C_L	Couple moteur de la roue gauche
F(q)	La matrice de contraintes non holonomes
\mathcal{Y}	Le vecteur de force de contrainte
M	Masse du chariot
m	représente la masse du pendule
x	Position du chariot

- F Force exercée sur le chariot
- b Coefficient de frottement des roues du chariot
- d Coefficient de frottement de rotation du pendule
- v_c La vitesse de centre de gravité du pendule.
- E_{cM} L'énergie cinétique du chariot
- E_{cm} L'énergie cinétique du pendule

Introduction générale

Les robots mobiles ont connu une évolution remarquable ces dernières décennies, passant d'objets de science-fiction à des outils industriels et technologiques réels. Ces machines intelligentes et autonomes sont conçues pour se déplacer et interagir avec leur environnement sans nécessiter d'intervention humaine directe. Leur capacité à naviguer dans divers environnements, à accomplir des tâches variées et à s'adapter à des situations changeantes en fait des acteurs clés de nombreuses industries et domaines d'application.

Les robots auto-équilibrés constituent une classe fascinante de robots qui sont capables de maintenir leur équilibre de manière autonome, tout en se déplaçant et en interagissant avec leur environnement. Leur capacité à rester stables sur des surfaces variées, malgré les perturbations externes, en fait des machines particulièrement intéressantes et polyvalentes.

Le concept d'équilibre est essentiel pour les robots auto-équilibrés. Inspirés par les mécanismes de stabilisation du corps humain, ces robots utilisent des capteurs, des actionneurs et des algorithmes de commande sophistiqués pour maintenir leur position verticale. Leur équilibre est généralement atteint en ajustant en temps réel leur centre de gravité ou leur configuration physique.

Dans le contexte de ce qui est dit précédemment, nous avons proposé trois questions majeures :

- 1- Comment modéliser le comportement physique d'un robot auto-équilibré à deux roues ?
- 2- Comment concevoir, modéliser et contrôler efficacement un robot auto-équilibré en utilisant MATLAB?
- 3-Quels sont les différentes commandes utilisées pour maintenir l'équilibre d'un robot auto-équilibré ?

Pour répondre à la problématique précédente on a structuré notre travail en utilisant trois chapitres qui abordent différents aspects pertinents du sujet :

Dans le premier chapitre on a défini le robot mobile, ainsi leur classification selon le degré d'autonomie, type de locomotion et domaine d'application, aussi, les caractéristiques et les constituées d'un robot mobile, puis on a abordé l'exemple d'un robot auto-équilibré et son principe de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré les bases de fonctionnement de robot auto-équilibré, notamment sa modélisation mathématique, ainsi que son modèle dynamique. De plus, les étapes de sa réalisation pratique sur MATLAB.

Dans le troisième chapitre on a abordé le principe de fonctionnement de la commande PID et logique floue pour maintenir l'équilibre du robot, on utilise la comparaison et la différence entre les deux.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale à travers laquelle, on analysera les principaux résultats obtenus et on citera les perspectives à envisager comme suite à ce travail.

CHAPITRE I

Généralité sur les robots mobiles

I.1 Introduction

Le domaine des robots mobiles a connu une évolution spectaculaire ces dernières années, grâce à l'avancée rapide de la technologie mécanique, électronique et informatique. Un robot mobile est un système multifonctionnel capable d'interagir physiquement avec son environnement pour atteindre des objectifs spécifiques. Doté de fonctions de perception, de décision et d'action, un robot mobile peut exécuter une variété de tâches dans des conditions changeantes.

Ce chapitre explore les concepts fondamentaux liés aux robots mobiles, allant de leur définition à leur classification selon différents critères tels que le degré d'autonomie, le type de locomotion et le domaine d'application. De plus, nous examinerons les composants clés d'un robot mobile, tels que les capteurs, les actionneurs et les systèmes de commande, ainsi que leur utilisation dans des applications telles que la navigation autonome. Enfin, nous étudierons en détail le concept de robot auto-balancé, qui présente un intérêt particulier en raison de ses applications variées, notamment dans le domaine de la mobilité humaine assistée.

I.2 Définition d'un robot mobile

Un robot mobile est un système mécanique, électronique et informatique qui agit physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné. Cette machine est polyvalente et capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement. Elle est dotée de fonctions de perception, de décision et d'action. Ainsi, le robot devrait être capable d'effectuer, de différentes manières, des tâches diverses et d'accomplir correctement sa propre tâche, même s'il rencontre de nouvelles situations inopinées [1].

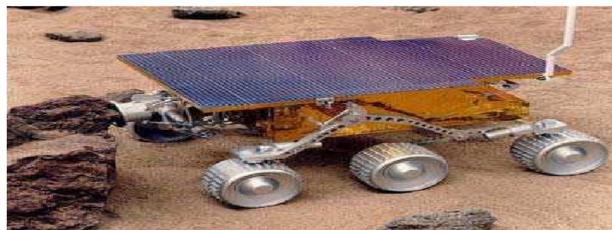


Figure I.1 Le robot mobile « Sejourner » utilisé pour la mission pathfinder de la NASA [1].

L'appellation « *robot mobile* » rassemble tous les types de robots dont la caractéristique commune est la faculté de se mouvoir. Cependant, la manière qui dépend du domaine d'utilisation des robots, fait la différence de ces derniers.

Ainsi, la mobilité par les roues est, par exemple, la structure mécanique la plus communément appliquée. Cette technique assure, selon l'agencement et les dimensions des roues, un déplacement dans toutes les directions avec une accélération et une vitesse importantes.

1.3 Classification des robots mobiles :

La classification des robots se fait selon plusieurs critères, mais principalement elle se fait selon trois critères : le système de locomotion, le degré d'autonomie, le domaine d'application.

Il est important de noter que le terme « robots mobiles » bien que désignant l'ensemble des robots à base mobiles (par opposition aux robots manipulateurs), est généralement employé pour désigner les robots mobiles *terrestres*. Ce sont ces robots qui sont considérés dans ce manuscrit.

1.3.1 Classification selon le degré d'autonomie :

Robot autonome

On considère qu'un robot est autonome s'il est capable à percevoir, décider et agir afin d'atteindre les buts qui lui ont été assignés par un opérateur humain à l'aide d'une interface homme/machine dédiée [2] :

- **Percevoir** : le robot doit acquérir des informations sur l'environnement dans lequel il évolue par l'intermédiaire de ses capteurs. Ces informations permettent de mettre à jour un modèle de l'environnement (architectures hiérarchiques ou délibératives) ou peuvent être directement utilisées comme entrées de comportement de bas niveau (architectures purement réactives).

- **Décider** : le robot doit définir des séquences d'actions résultant d'un raisonnement appliqué sur un modèle de l'environnement ou répondant de manière réflexe à des stimuli étroitement liés aux capteurs.
- **Agir** : il doit exécuter les séquences d'actions élaborées en envoyant des consignes aux actionneurs par l'intermédiaire des boucles d'asservissements.

Robot télécommandé

Ce sont des robots commandés par un opérateur (machine ou être humain), qui leurs dicte chaque tâche élémentaire à faire (avancer, reculer, tourner à droite...etc.).

Robot semi-autonome :

Ce type de robot effectuent un certain nombre de tâche par eux même d'une façon complètement autonome mais peuvent être interrompu pour recevoir des commandes de control par un opérateur.

I.3.2 Classification selon le type de locomotion

I.3.2.1 Mobiles à chenilles

Les chenilles assurent à un mobile, une meilleure adhérence au sol et une faculté de franchissement d'obstacles. Elles sont employées lorsque le sol est perturbé, essentiellement en environnement extérieur, sol accidenté ou de mauvaise qualité de l'adhérence (présence de boue, herbe...). La commande est réalisée en imposant une différence de vitesse aux chenilles droites et gauches [3-4].



Figure 1.2 Robot mobile à chenilles.

I.3.2.2 Mobiles à pattes

La structure précédente n'est plus adaptée dans les cas d'applications sur des terrains avec de grandes différences d'amplitudes, comme un sol jonché de rochers. Dans ce contexte, les mobiles ayant les points d'appuis discrets, figure (1.3), sont la solution au problème. La solution consiste à discrétiser les points de contact entre le mobile et le sol par des pattes, à l'image des animaux terrestres, qui pour la majorité, disposent de deux, quatre, six, voire plus de points d'appuis. La réalisation d'un tel système et l'établissement de sa commande sont complexes [5-6].



Figure I.3 Robot mobile à pattes.

I.3.2.3 Mobiles à roues

La très grande majorité de robots mobiles développés jusqu'à ce jour sont équipés de roues plutôt que de jambes. Les principales raisons de ce choix technologique sont : les roues sont plus faciles à contrôler, elles procurent une meilleure stabilité au véhicule, elles dissipent moins d'énergie et elles permettent au véhicule de se déplacer plus rapidement. Ces roues peuvent avoir plusieurs fonctions à savoir : roues motrices, roues directrices, roues motrices- directrices, roues libres (roues folles). Les différentes combinaisons des roues assurent une diversité des commandes de la locomotion. La plupart des combinaisons entraîne un déplacement contraint : la non holonomie. Cette caractéristique impose un déplacement uniquement selon la tangente au mouvement des roues. Certaines configurations des roues associées à des structures mécaniques particulières permettent de s'affranchir de ce problème [7-8].

Par contre, les roues comportent aussi un certain nombre d'inconvénients par rapport aux mécanismes à jambes. Entre autres, elles ne sont utilisables que sur des terrains relativement plats et dont la surface est dure. Sur des terrains accidentés, les roues doivent être plus grandes que les obstacles qu'elles risquent de rencontrer. Dans le cas de surfaces

moins stables, les roues peuvent glisser ou s'enliser, ce qui pose des difficultés de contrôle importantes.

Il existe plusieurs classes de robots à roues déterminées, principalement, par la position et le nombre de roues utilisées. Nous pouvons les classer en quatre classes principales, robot unicycle, robot tricycle, robot voiture et robot omnidirectionnel.

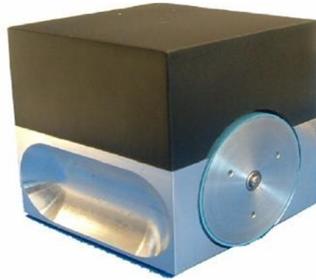


Figure I.4 Robot mobile MIABOT.

1.3.3 Classification selon le domaine d'application

L'un des plus grand avantage des robots mobile est le faite que leurs domaine d'application est illimité, c'est pour cela que nous allons présenter ici quelques domaines d'application :

Les robots industriels et de service

Il existe des robots mobiles destinés à des applications industrielles. Celles-ci concernent principalement le transport et la distribution (dans les usines, les mines, les hôpitaux et les ateliers), le nettoyage, l'entretien et la maintenance, la surveillance et la manutention. Quant aux robots de service, ils sont destinés à aider des handicapés moteurs, à guider les aveugles et à piloter des voitures automatiques.

Les robots militaires

Les applications militaires de la robotique mobile sont nombreuses. Ce champ d'application présente l'intérêt de fournir des spécifications serrées telles que la vitesse des véhicules, leurs capacités de franchissement des obstacles (la robustesse de ce

type de robots est essentielle), et leur rapidité de réaction.

Les robots de laboratoire

Afin de valider des travaux théoriques sur la perception ou en planification de mouvement, de nombreux laboratoires travaillant dans le domaine de la robotique. À l'origine tous les robots viennent d'un laboratoire, issu des travaux de recherche dans ce domaine.

I.4 Caractéristiques d'un robot mobile

- Mobilité : Un robot mobile est conçu pour se déplacer de manière autonome ou semi-autonome. Il peut utiliser des roues, des chenilles, des pattes ou d'autres mécanismes pour se déplacer dans son environnement.
- Capteurs : Les robots mobiles sont équipés de capteurs pour percevoir leur environnement.
- Système de contrôle : Un robot mobile est généralement doté d'un système de contrôle qui lui permet de prendre des décisions et de gérer ses actions.
- Alimentation : Les robots mobiles peuvent être alimentés par des batteries internes, des câbles d'alimentation ou d'autres sources d'énergie.
- Communication : Les robots mobiles peuvent être équipés de capacités de communication pour interagir avec d'autres robots, avec des humains ou avec des systèmes centraux de contrôle. Cela peut inclure des antennes, des modules Wi-Fi, des modules Bluetooth, etc.
- Bras manipulateur (optionnel) : Certains robots mobiles peuvent être équipés d'un bras manipulateur pour effectuer des tâches spécifiques, comme saisir et déplacer des objets.
- Résistance environnementale : ils peuvent être résistants à la poussière, à l'eau, aux températures extrêmes, etc.

I.5 Constituants d'un robot

Un robot mobile est constitué de composants matériels et logiciels. Parmi les premiers (composants matériels), on trouve une plateforme mobile à laquelle sont rattachés tous les autres composants comme les capteurs, les actionneurs et une source d'énergie (batteries).

D'autres organes tels que des bras manipulateurs peuvent lui être ajoutés pour une application particulière [9].

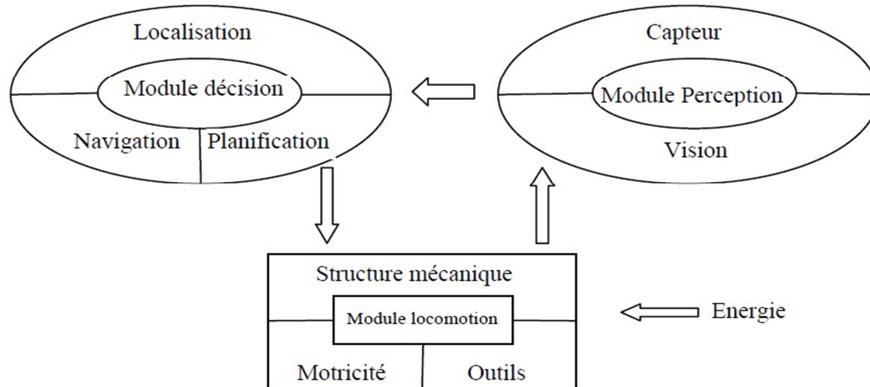


Figure I.5 Architecture modulaire d'un robot mobile.

I.5.1 Les capteurs

La commande des robots mobiles est basée sur deux types d'informations importantes, les informations proprioceptives et les informations extéroceptives [10-11]. Le système de perception est très important pour la sécurité du robot si l'environnement est encombré d'obstacles fixes ou bien mobiles (autres robot). Pour se focaliser sur le problème de navigation, nous allons nous restreindre dans ce chapitre aux capteurs utiles pour la tâche de navigation.

I.5.1.1 Capteurs intéroceptifs

Fournissent des données sur l'état interne du robot (vitesse, position, orientation,...). Ces informations renseignent le robot en cas de mouvement, sur son déplacement dans l'espace (la localisation). Ce sont des capteurs que l'on peut utiliser directement, mais ils souffrent d'une dérive au cours du temps qui rend leur utilisation seul inefficace ou avec limitation. Nous citons par exemple: l'odomètre, radar doppler, systèmes inertiels... [10-12].

I.5.1.2 Capteurs extéroceptifs

Ont pour objectif d'acquérir des informations sur l'environnement proche du véhicule. Ils fournissent des mesures caractéristiques de la position que le robot peut acquérir dans son environnement par la détection des objets qui contourne. Ces informations peuvent être de natures très variées. Nous citons comme exemple les télémètres à ultrason, infrarouge, laser, les caméras,...etc.

Pour la navigation autonome d'un robot mobile et selon la mission visée (à accomplir), on peut utiliser aussi les capteurs suivants [9], [12], [13] : *Les capteurs tactiles, Les boussoles, Les balises, Le GPS (Global Positioning System)*.

I.5.2 Les Actionneurs

Un robot est équipé d'actionneurs, peut être muni d'un ou de plusieurs moteurs pouvant faire tourner ses roues afin d'effectuer des déplacements.

Généralement, les roues du robot sont contrôlées par deux commandes motrices, soit une vitesse d'avancement et un taux de rotation. Habituellement, ces commandes s'expriment en mètres par seconde (m/s) et en degrés de rotation par seconde (deg /s) [9].

Le type de locomotion définit deux types de contraintes [14]:

- Les contraintes cinématiques, qui portent sur la géométrie des déplacements possibles du robot;
- Les contraintes dynamiques, liées aux effets du mouvement (accélérations bornées, vitesses bornées, présence de forces d'inertie ou de friction).

I.5.3 La partie commande

Afin de faire fonctionner un robot mobile, plusieurs modules logiciels sont mis à contribution. Ces modules peuvent servir à interpréter les données perçues par les capteurs afin d'y extraire des informations, ou à traiter des commandes de haut niveau pour générer d'autres commandes à un niveau inférieur. Les modules les plus fréquemment utilisés sont les modules de vision, localisation, de navigation, de planification du robot. Ces aspects de ces modules logiciels seront donnés avec plus de détails dans les sections suivantes. .

I.5.3.1 La vision

La vision fournit une grande quantité de données en provenance de l'environnement et permet d'entreprendre une interaction intelligente avec les environnements dynamiques (Évitement d'obstacles mobiles, rendez-vous avec autres agents mobiles. . .). De ce fait, il n'est pas surprenant de trouver une grande quantité de recherches sur le développement de capteurs qui essaient d'imiter le système visuel humain. De plus, les capteurs visuels utilisés par les robots intelligents doivent avoir les mêmes sensibilités et réponses à la lumière que notre système de vision. En robotique, au cours des deux dernières décennies, les innovations technologiques concernant la fabrication de caméras et l'évolution des ordinateurs ont permis d'intégrer des systèmes complexes de vision dans les systèmes embarqués, que ce soit sur des robots mobiles pour la navigation autonome ou sur des véhicules pour l'aide à la conduite. La vision artificielle revêt une importance toute particulière car elle permet de fournir à la machine les capacités nécessaires pour réagir avec son environnement ; elle fournit les représentations à partir desquelles le robot prend des décisions [16-17].

I.5.3.2 Localisation

Un robot mobile doit toujours connaître sa situation pour se déplacer d'un point à un autre, soit en identifiant des repères, on parle de localisation absolue, soit tout simplement en mesurant les distances parcourues et les directions empruntés depuis sa position initiale. Les méthodes de localisation se regroupent en deux catégories, soit : [17-18] :

- Localisation à l'estime ou relative: obtenue par des informations issues des capteurs proprioceptifs, et consiste à déterminer la variation des coordonnées de position lors d'un déplacement en mesurant tout simplement les distances parcourues et les directions, empruntées depuis sa position initiale.

- Localisation absolue: obtenue par des informations issues de capteurs extéroceptifs; le robot doit toujours connaître sa situation pour se déplacer d'un point à un autre en identifiant des repères artificiels, la méthode des balises est la plus employée.

I.5.3.3 Planification

Une fois que le robot dispose d'une représentation de l'environnement et d'une estimée de sa position, il convient de s'en servir pour générer les tâches qui lui permettront d'atteindre son objectif.

Pour cela plusieurs méthodes sont possibles. Le choix d'une méthode de planification est guidé par deux questions :

1. Quel type d'espace utilisé : l'espace de travail ou l'espace des configurations?
2. Quel type de méthodes : des méthodes exactes ou des méthodes approchées?

Les méthodes exactes sont basées sur une exploitation complète de la description de l'environnement. Par opposition, les méthodes approchées réalisent tout d'abord une discrétisation de l'environnement sous forme de grilles régulières ou irrégulières. L'espace libre ainsi représenté est un sous-ensemble de l'espace libre réel.

Alors que les méthodes exactes sont susceptibles d'être complètes, les méthodes approchées ne le sont jamais [2].

I.5.3.4 Navigation

La navigation autonome d'un robot mobile est tout simplement la capacité d'aller d'une position initiale à une position finale de manière autonome.

Réaliser une tâche telle que se déplacer vers le point de coordonnées (x, y) , aussi simple puisse-elle paraître à un humain, requiert la mise en œuvre de fonctionnalités potentiellement complexes de perception/décision/action.

I.6 Le robot auto-balancé

C'est le cas d'application de notre projet, Le robot auto-balancé est constitué d'une plateforme solidaire de deux roues. L'axe des roues est perpendiculaire à l'axe de déplacement du robot [19].

La masse M est supposée être un homme en équilibre sur la plate-forme. Le principe du contrôle de position est basé sur le pendule inversé. L'inclinaison de la plate-forme d'un angle α , va provoquer le déplacement du robot, de telle sorte que l'angle redevienne nul.

D'où le nom de " Robot Auto-Balancé".

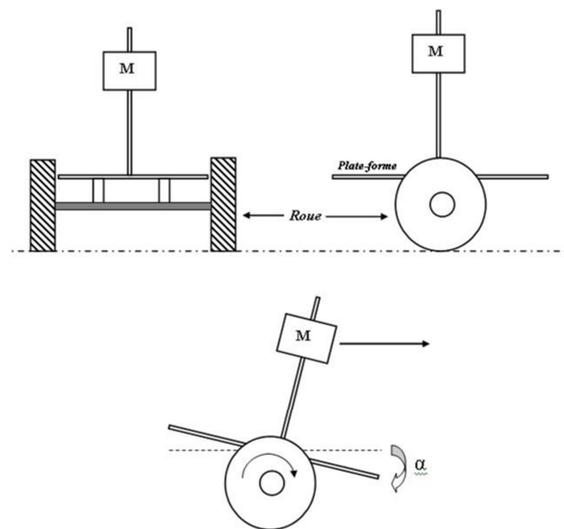


Figure I.6 Robot Auto-Balancé.

I.7 Les pendules inversés

I.7.1 Définition

Un pendule inversé est un système mécanique, automatique composé d'une tige posée en position d'équilibre instable verticale sur une base qui peut être fixe ou mobile. La dynamique non linéaire et instable de ce système physique a fait de lui un système très intéressant et largement étudié dans la communauté des automaticiens, ce qui explique l'existence de plusieurs aspects et formes de pendules inversés [20].

I.7.2 Intérêt de l'étude d'un pendule inversé :

- L'homme est un pendule double inversé dont les deux axes de rotation principaux sont les chevilles et les hanches. Quand nous sommes en position debout, nos articulations travaillent sans arrêt pour nous y maintenir. Les spécialistes qui travaillent à la réalisation de prothèses pour les hanches sont amenés à utiliser le modèle du pendule double inversé pour calculer l'ensemble des contraintes qui sont soumises à la prothèse.
- La robotique utilise le principe du pendule inversé, en particulier dans de nouveaux moyens de transports à deux roues comme le segway qui permet d'avancer en se penchant en avant comme nous le verrons dans la suite.
- On voit apparaître des moyens de locomotion dotés de deux roues montées sur un même axe sur lequel on est en position debout. On accélère en se penchant en avant et en ralenti en se penchant en arrière. Le système est le même que le pendule inversé. La stabilité est aussi assurée par des gyroscopes [21].
- Dans le domaine de l'aérospatiale aussi, l'étude des pendules inversés a une grande importance, par exemple pour commander et stabiliser l'attitude du satellite, le lancement des fuséesetc.

I.8 Conclusion

En conclusion, le chapitre a jeté les bases nécessaires pour comprendre l'univers fascinant des robots mobiles. De la définition d'un robot mobile à sa classification selon divers critères, en passant par les composants essentiels qui le composent, ce domaine offre des opportunités infinies pour explorer et innover. Les robots mobiles ont prouvé leur utilité dans de nombreux domaines, de l'industrie à la recherche scientifique en passant par les applications militaires et de service. Leur capacité à interagir avec un environnement en constante évolution, combinée à leurs avancées technologiques continues, promet un avenir riche en nouvelles découvertes et applications.

L'étude approfondie du concept de robot auto-balancé a également révélé des applications passionnantes, de l'assistance à la mobilité humaine à la stabilisation de systèmes complexes.

CHAPITRE II

**Modélisation du robot auto-équilibré
et réalisation Sur Matlab**

II.1 Introduction

Le chapitre suivant traite du principe de fonctionnement d'un robot auto-équilibrant sur deux roues. Ce type de robot est un système dynamique instable, ce qui signifie qu'il est susceptible de tomber en avant ou en arrière en l'absence de forces extérieures. Pour maintenir son équilibre, le centre de gravité du robot doit être aligné avec l'axe vertical passant par les roues.

Ce chapitre explore les bases de fonctionnement de ce type de robot, notamment sa modélisation mathématique et ses coordonnées spatiales, ainsi que son modèle dynamique. De plus, il aborde également la réalisation pratique d'un robot auto-équilibrant sur MATLAB en décrivant les étapes de construction des roues, du châssis et de leur assemblage.

II.2 Principe de fonctionnement de robot auto-équilibrer

Robot sur deux roues d'équilibrage est un système instable dynamique, cela signifie que le robot est libre de tomber en avant ou en arrière sans aucunes forces appliquées. Robot est équilibre lorsque son centre de gravité et les roues sont situés sur une ligne verticale imaginaire identique. Sinon, les roues devraient suivre les chutes du robot jusqu'à ce robot lui-même l'équilibre. L'utilisation de deux roues seulement pour robot sur deux roues d'équilibrage de fournir un poids plus léger et plus lisse manœuvre. La figure illustre les fonctions de base du robot équilibrage.

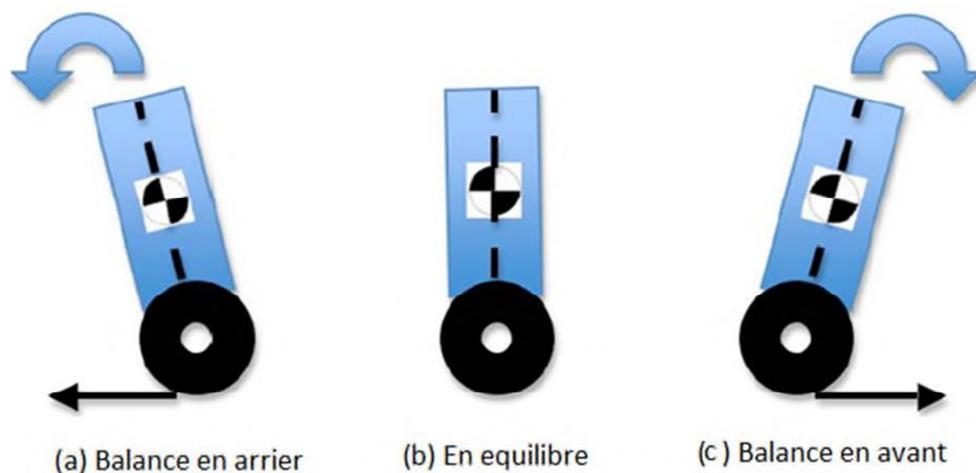


Figure II-1 les trois cas du pendule inverse.

II.3 Modélisation mathématique

Considérant que la structure du robot est symétrique et la consommation d'énergie de l'ensemble du robot est principalement concentrés dans les roues et la carrosserie [22], les éléments suivants des hypothèses peuvent être faites pour simplifier le modèle :

- paramètres des roues gauche et droite sont exactement les mêmes.
- les roues sont purement roulantes sans glisser.
- ignorer la perte de friction entre les roues et le sol et les essieux également.
- ignorer l'énergie cinétique de rotation et la perte du rotor du moteur.

II.4 Système de coordonnées spatiales

Le système de coordonnées spatiales du robot auto-équilibrage à deux roues comprend les coordonnées au sol $OG (X_G, Y_G, Z_G)$ et les coordonnées du corps $OB (X_B, Y_B, Z_B)$, comme illustré à la Figure II-2.

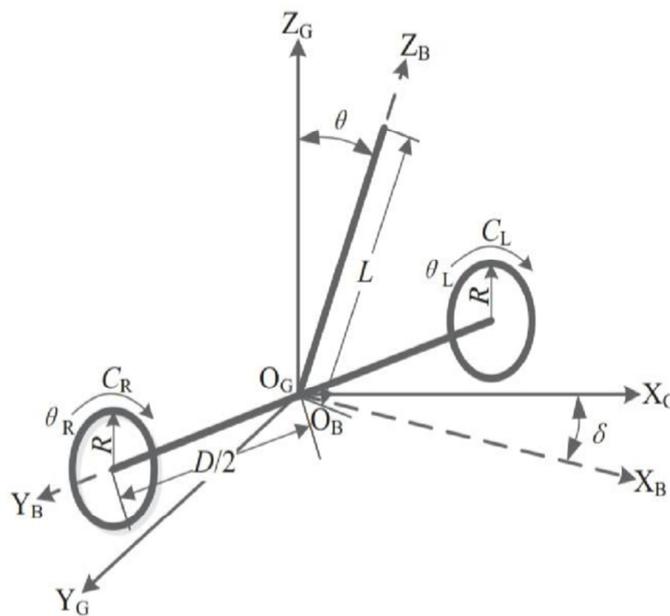


Figure II-2 les coordonnées spatiales du robot auto-équilibré.

Dans les coordonnées au sol, X_G pointe vers l'Est, Y_G pointe vers le Sud, et Z_G pointe vers la direction opposée de l'accélération de la gravité.

Dans la coordonnée du corps, O_B se situe dans le centre de l'essieu, X_B pointe d' O_B à la direction de déplacement des points d' O_B au centre de masse du corps.

II.5 Le model dynamique

Les contraintes non holonomies existent lorsque les deux-roues du robot auto-équilibré est en condition de roulement pur [23], comme suit :

$$\begin{cases} -\dot{x}\sin\delta + \dot{y}\cos\delta = 0 \\ \dot{x}\cos\delta + \dot{y}\sin\delta + \frac{D\dot{\delta}}{2} - R\dot{\theta}_R = 0 \\ \dot{x}\cos\delta + \dot{y}\sin\delta - \frac{D\dot{\delta}}{2} - R\dot{\theta}_L = 0 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où (x, y) est la valeur des coordonnées de OB dans les coordonner du sol OG

- δ est l'angle de braquage (l'angle entre XB et XG)
- D est la distance entre le centre de deux roues
- R est le rayon de roue
- θ_L et θ_R sont le déplacement angulaire de gauche et roue droite, respectivement.

1. $-\dot{x}\sin\delta + \dot{y}\cos\delta = 0$: Cette équation représente la première contrainte. Elle signifie que dans une condition de roulement pur, le mouvement du robot est restreint de telle manière que la composante latérale du mouvement est perpendiculaire à la direction de déplacement.
2. $\dot{x}\cos\delta + \dot{y}\sin\delta + \frac{D\dot{\delta}}{2} - R\dot{\theta}_R = 0$: Cette équation représente la deuxième contrainte. Elle exprime la relation entre les vitesses linéaires et angulaires du robot liée à la roue droite. Elle traduit la contrainte imposée par le mouvement de roulement pur du robot.
3. $\dot{x}\cos\delta + \dot{y}\sin\delta - \frac{D\dot{\delta}}{2} - R\dot{\theta}_L = 0$: Cette équation représente la troisième contrainte. Elle est similaire à la deuxième équation, mais elle concerne la roue gauche du robot. Elle stipule que la somme des termes correspondants doit également être égale à zéro.

L'énergie cinétique de translation de deux roues est :

$$T_w^T = m_w R^2 (\dot{\theta}_L^2 + \dot{\theta}_R^2) / 2 \quad (\text{II.2})$$

Où m_w est la masse de la roue

L'énergie cinétique de rotation de deux roues est :

$$T_w^R = J_w (\dot{\theta}_L^2 + \dot{\theta}_R^2) / 2 + J_{wz} \dot{\delta}^2 \quad (\text{II.3})$$

Où J_w et J_{wz} sont le moment d'inertie de la roue le long de Y_B et Z_G , respectivement.

L'énergie cinétique de translation du corps est :

$$T_B^T = \frac{1}{2} m_B \left\{ \left[\dot{\theta} L \cos \theta + \frac{R(\dot{\theta}_L + \dot{\theta}_R)}{2} \right]^2 + (\dot{\theta} L \sin \theta)^2 + (L \sin \theta \dot{\delta})^2 \right\} \quad (\text{II.4})$$

Où m_B est la masse du corps.

L est la distance entre centre de masse du corps et centre de l'essieu.

θ : l'angle d'inclinaison (l'angle entre Z_B et Z_G).

- $\left[\dot{\theta} L \cos \theta + \frac{R(\dot{\theta}_L + \dot{\theta}_R)}{2} \right]^2$: représente la somme de la contribution de la vitesse angulaire du corps ($\dot{\theta}$) à sa translation, multipliée par $L \cos \theta$, qui correspond à la composante dans la direction de la translation et la composante dans la direction de la translation affectée par le rayon R .
- $(\dot{\theta} L \sin \theta)^2$: , représente la contribution de la vitesse angulaire à la translation, mais cette fois-ci dans la direction perpendiculaire à la première composante.
- $(L \sin \theta \dot{\delta})^2$: représente la contribution de la vitesse de braquage ($\dot{\delta}$) du corps à sa translation.

L'énergie cinétique de rotation du corps :

$$T_B^R = (J_{BY} \dot{\theta}^2 + J_{BZ} \dot{\delta}^2) / 2 \quad (\text{II.5})$$

Où J_{BY} et J_{BZ} sont les moments d'inertie du corps le long de Y_B et Z_G , respectivement.

Prendre la hauteur du centre de la roue comme point de potentiel zéro, l'énergie potentielle gravitationnelle du robot peut être décrit comme:

$$V_B = m_B g l \cos \theta \quad (\text{II.6})$$

Où g est l'accélération de la pesanteur.

Les variables d'état initiales du système sont prises comme :

$$q = [x \ y \ \delta \ \theta \ \theta_R \ \theta_L] \quad (\text{II.7})$$

La fonction de lagrangienne est donc :

$$L = T_W^T + T_W^R + T_B^T + T_B^R - V_B \quad (\text{II.8})$$

D'après la formule de Lagrange, on obtient l'équation dynamique non holonome de Routh, les coordonnées généralisée peuvent alors être dérivées comme:

$$\frac{d}{dt} (\partial l / \partial \dot{q}) - \frac{\partial l}{\partial q} = T(q) C + F^T(q) \gamma \quad (\text{II.9})$$

$$T(q)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.10})$$

$$C=[C_R C_L]^T \quad (\text{11})$$

$$F(q)=\begin{bmatrix} -\sin\delta & \cos\delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\delta & \sin\delta & \frac{D}{2} & 0 & -R & 0 \\ \cos\delta & \sin\delta & -\frac{D}{2} & 0 & 0 & -R \end{bmatrix}^T \quad (\text{II.11})$$

C_R et C_L sont respectivement le couple moteur de gauche et de droite roue.

$T(q)$ est une matrice dépendante des coordonnées généralisées q et est utilisée pour représenter les relations de contrainte entre les différentes parties du système.

$F(q)$ est la matrice de contraintes non holonomes.

γ : Le vecteur de force de contrainte.

En résolvant l'équation (9) et en réarrangeant le premier ordre et termes du second ordre, l'équation dynamique non holonome du système est dérivé comme suit :

$$M(q)\ddot{q}+V(q,\dot{q})=T(q)C+F^T(q)\gamma \quad (\text{II.12})$$

$$M(q)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 k_4 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 k_3 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 k_5 & k_3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$k_1=m_B L^2 \sin^2 \theta + 2J_{wz} + 2J_{Bz}, \quad k_5=m_B L^2 + J_{By}$$

$$k_3=m_w R^2 + m_B R^2 / 4,$$

$$k_4=m_B R L \cos \theta / 2, \quad k_5=m_w R^2 / 4$$

$$V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_B L^2 \dot{\delta} \dot{\theta} \sin 2\theta \\ -m_B L^2 \dot{\delta}^2 \sin \theta \cos \theta - m_B g L \sin \theta \\ -m_B R L \dot{\theta}^2 \sin \theta / 2 \\ -m_B R L \dot{\theta}^2 \sin \theta / 2 \end{bmatrix}$$

$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$: Ce terme représente la composante inertielle de l'équation. $M(\mathbf{q})$ est une matrice dépendante des coordonnées généralisées \mathbf{q} du système. Elle est utilisée pour représenter les propriétés d'inertie, telles que les masses et les moments d'inertie, du système, $\ddot{\mathbf{q}}$ est la seconde dérivée temporelle des coordonnées généralisées par rapport au temps, ce qui représente l'accélération du système.

$V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: ce terme représente les forces non inertielle, également appelées forces généralisées ou forces de Coriolis. Il dépend des coordonnées généralisées \mathbf{q} et de leur première dérivée temporelle $\dot{\mathbf{q}}$. Ces forces sont généralement dues à des contraintes ou des interactions spécifiques dans le système et ne sont pas directement liées aux propriétés d'inertie.

II.6 Présentation de model physique du robot sur Simscape

Pour simplifier et représenter un modèle physique d'un robot auto-équilibré à deux roues sur Simulink avec Simscape, il est envisageable de considérer la suppression de certaines contraintes afin de simplifier le modèle :

- Négliger les couples du moteur gauche et droit.
- Limiter les degrés de liberté : les roues se déplace selon l'axe horizontal Y et ne quitte pas le sol, le chassais tourne selon l'axe X, cela permet d'éliminer l'axe Z.
- Restreindre les rotations du robot : limitation des rotations des mouvements autour de l'axe de lacet, les mouvements de tangage (pitch) et de roulis (roll) sont ignorés.
- En négligeant les angles de rotation des roues, les roues du robot sont considérées comme des objets qui peuvent uniquement rouler sans effectuer de rotation sur elles-mêmes.

Après l'élimination des contraintes des moteurs, les roues et l'angle de braquage, le model dynamique du robot correspond à un model dynamique d'un ensemble du chariot-pendule,

ce dernier possède deux degrés de liberté dont les coordonnées généralisées sont respectivement : x pour le déplacement horizontal du chariot et θ pour la rotation du pendule.

L'énergie cinétique du chariot en mouvement est donnée par l'équation [24] :

$$E_{cM} = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (\text{II.13})$$

L'énergie cinétique du pendule est exprimée par l'équation

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.14})$$

v_c : La vitesse de centre de gravité du pendule.

$\dot{\theta}$: La vitesse angulaire du pendule.

La position du centre de gravité du pendule, notée r_c à partir de ces coordonnées est donnée par :

$$r_c = (x + l \sin \theta) \hat{i} + l \cos \theta \hat{j} \quad (\text{II.15})$$

\hat{i}, \hat{j} : étant les vecteurs unitaires du repère x, y .

La vitesse du centre de gravité du pendule est donc

$$v_c = \frac{dr_c}{dt} = (\dot{x} + l \cos \theta \dot{\theta}) \hat{i} - l \sin \theta \dot{\theta} \hat{j} \quad (\text{II.16})$$

En substituant les équations (II.15) et (II.16) dans l'équation (II.14), l'expression de l'énergie cinétique du pendule devient :

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m \left(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \right) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.17})$$

Qui s'écrit après simplification, du terme $l^2 \dot{\theta}^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = l^2 \dot{\theta}^2$:

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m \left(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2 \right) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.18})$$

Finalement, l'énergie cinétique totale de l'ensemble chariot et pendule est exprimée par :

$$E_c = E_{cM} + E_{cm} = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l \cos \theta \dot{\theta} + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad (\text{II.19})$$

Energie potentielle du système

Le chariot étant en mouvement sur un rail horizontal, seul le pendule en mouvement possède une énergie potentielle. L'énergie potentielle du centre de gravité du pendule est donnée par :

$$E_p = mgl \cos \theta \quad (\text{II.20})$$

Maintenant que les expressions de l'énergie cinétique E_c de l'ensemble chariot-pendule

(Equation II.19) et l'énergie potentiel du système E_p (Equation II.20) sont établies, on utilise

L'équation générale d'Euler-Lagrange pour déterminer les équations de mouvement de l'ensemble chariot-pendule.

En substituant les équations (II.8) et (II.9) dans l'équation (II.1) on trouve :

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l \cos \theta \dot{\theta} + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta \quad (\text{II.21})$$

L'équation générale d'Euler-Lagrange est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi_j} + \frac{\partial D_f}{\partial \dot{\xi}_j} = F_j \quad (\text{II.22})$$

Où ξ : désigne les degrés de liberté. Dans le cas du pendule, ces deux degrés de liberté sont la position du chariot $x(t)$ et l'angle de rotation du pendule $\theta(t)$: D_f désigne l'énergie dissipée par frottement, F : la force généralisée.

On définit donc l'équation de Lagrange pour le pendule inversé comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi_j} = F_j \quad (\text{II.23})$$

Pour le degré de liberté $\xi(t) = x(t)$, on a :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F - b\dot{x} \quad (\text{II.24})$$

Où F : représente la force exercée sur le chariot.

La dérivée partielle du lagrangien suivant \dot{x} et t s'écrit :

$$\frac{d}{dt} (M\dot{x} + m\dot{x} + ml\cos\theta \dot{\theta}) - 0 = F = b\dot{x} \quad (\text{II.25})$$

Donc, la première équation de Lagrange est :

$$(M + m)\ddot{x} + ml \sin \theta \dot{\theta} - ml \sin \theta \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.26})$$

Pour le degré de liberté $\xi(t) = \theta(t)$, on a :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -d\dot{\theta} \quad (\text{II.27})$$

La dérivée partielle du lagrangien suivant θ et t s'écrit :

$$\frac{d}{dt} (+ml\dot{x} \cos \theta + ml^2\dot{\theta} + j\dot{\theta}) - (-ml\dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + mgl \sin \theta) = -d\dot{\theta} \quad (\text{II.28})$$

Donc la deuxième équation de Lagrange est :

$$(ml^2 + j)\ddot{\theta} + ml\dot{x} \cos \theta - ml\dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + ml\dot{x} \sin \theta \dot{\theta} = mgl \sin \theta = -d\dot{\theta} \quad (\text{II.29})$$

Le modèle de connaissance de l'ensemble chariot-pendule (Equation II.28 et II.29) est donné par le système d'équations :

$$\begin{aligned} h\ddot{x} + b\dot{x} + ml \cos \theta \dot{\theta} - ml \sin \theta \dot{\theta}^2 &= F \\ \{ml\dot{x} \cos \theta + N\ddot{\theta} + d\dot{\theta} - mgl \sin \theta &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

Où $h = M + m, N = ml^2 + j$

II.7 Réalisation du robot sur Simscape

Simscape est un langage multi-domaine, est une extension de Matlab/Simulink, il permet de créer rapidement des modèles de systèmes physiques dans l'environnement Simulink.

Les blocs nécessaires pour réaliser un robot auto-équilibré sur Simscape :

- La configuration de solveur est chargée d'effectuer les calculs.
- Le cadre mondial : c'est le cadre de référence global de modèle mécanique.
- La configuration du mécanisme : il spécifie les paramètres de gravité et de simulation du mécanisme auquel le bloc se connecte.
- Les solides : pour construire les étagères du châssis.
- Les cylindres : pour construire les roues et les tiges.
- Les transformées rigides : il fait tourner et translate le cadre de port suiveur (F) par rapport au cadre de port de base (B).
- Articulation prismatique: modélise une connexion qui limite le mouvement relatif entre deux cadres à un degré de liberté de translation.
- Articulation tournant: modélise une liaison qui a un degré de liberté de rotation.
- Des convertisseurs Simulink-PS : il convertit le signal d'entrée en un signal physique.
- Des scoops : il affiche les données de simulation et capture les données pour une analyse ultérieure.
- Un gain : pour convertir l'angle mesuré en radian
- Random number : pour générer des perturbations.

II.7.1 Réalisation des roues

- L'intérieur de la roue

Les dimensions sont spécifiées dans le bloc solide cylindre avec les dimensions suivant : un rayon de 30 mm, une épaisseur de 12,5 mm et une masse de 50 g. La couleur jaune est définie pour l'intérieur de la roue

- Les pneus de la roue

Les dimensions sont également un rayon de 32,5 mm, une épaisseur de 12,5 mm et une masse de 50 g. La couleur noire est définie pour les pneus de la roue, pour refléter la réalité.

- L'arbre de la roue

Le bloc solide rectangle est utilisé avec des dimensions de 1 cm x 1 cm x 20 cm et un poids de 100 g, il est connecté aux roues. Pour placer chaque roue à une extrémité de l'arbre, il

faut spécifier son axe d'orientation et la distance entre les roues et l'axe de l'arbre dans le bloc de transformation rigide :

- La roue droite tourne et translate sur l'axe Z+ avec une de distance de 10 cm.
- La roue gauche tourne et translate sur l'axe Z- avec une de distance de 10 cm.

Tous les composants sont regroupés dans un sous-système appelé « cart ».

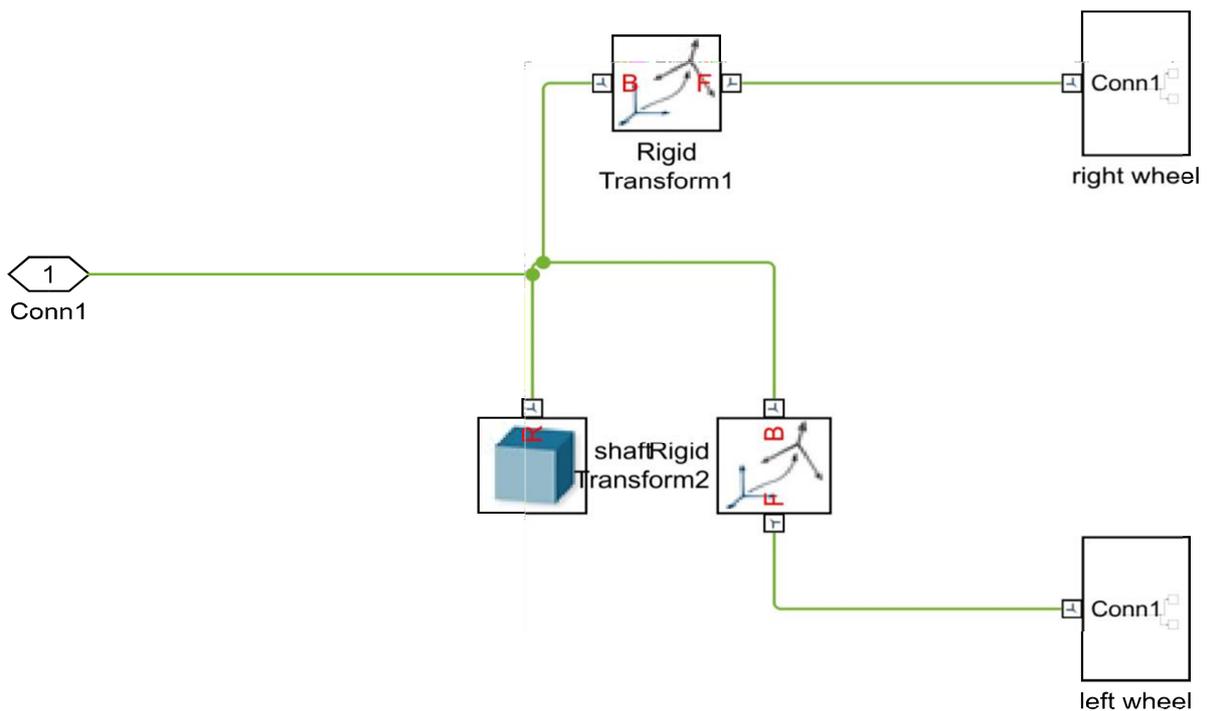


Figure II-3 schémas bloc des roues sur Simscape

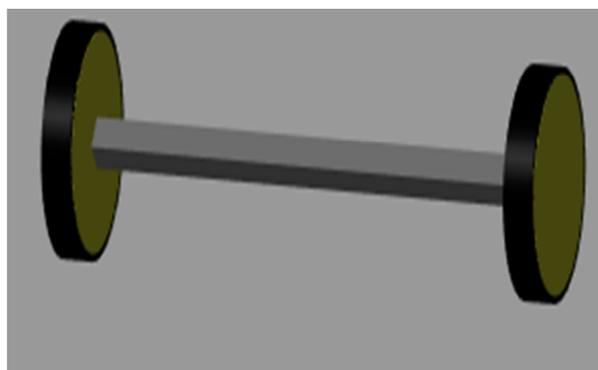


Figure II-4 les roues en 3D sur Simscape.

II.7.2 Réalisation de châssis

Le châssis est constitué de trois étagères attachées avec quatre tiges

- **Les trois étagères**

Choisir un bloc solide en brique pour faire un plan rectangulaire, avec des dimensions de 18 cm x 8 cm x 0,3 cm et une masse de $\frac{1}{4}$ kg. Cette forme est ensuite dupliquée pour former trois étagères.

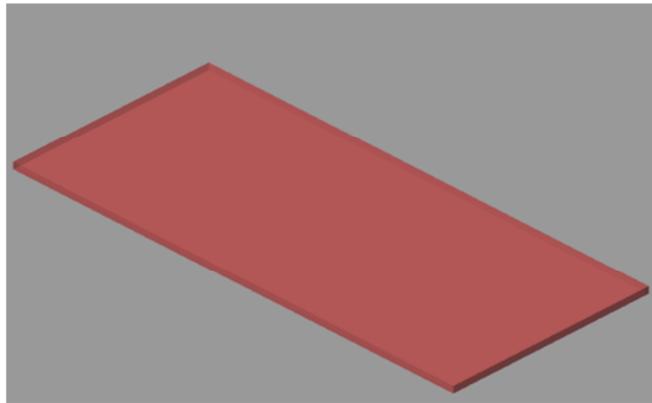


Figure II-5 le rectangle en 3D sur *Simscape*.

L'étage 2 est relié à l'étage 1 à l'aide d'une transformation rigide, avec une distance de 10 cm sur l'axe Z+.

L'étage 1 est relié à l'étage 3 à l'aide d'une transformation rigide, avec une distance de 25 cm sur l'axe Z+.

L'étage 2 et 3 sont maintenant connectés à un seul étage, où l'étage 1 joue le rôle de cadre de base et les autres étagères agissent en tant que suiveurs.

- **Les tiges**

La forme de la tige est spécifiée dans un bloc solide cylindre de 25 cm de longueur, 5 mm de rayon et un poids de $\frac{1}{16}$ kg.

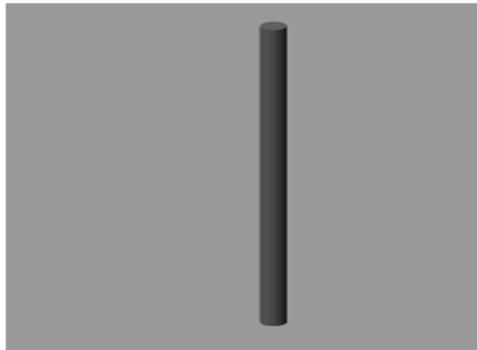


Figure II-6 la tige en 3D sur Simscape.

Cette forme est ensuite dupliquée pour en fabriquer d'autres et regroupés dans un sous-système appelé « pillars ».

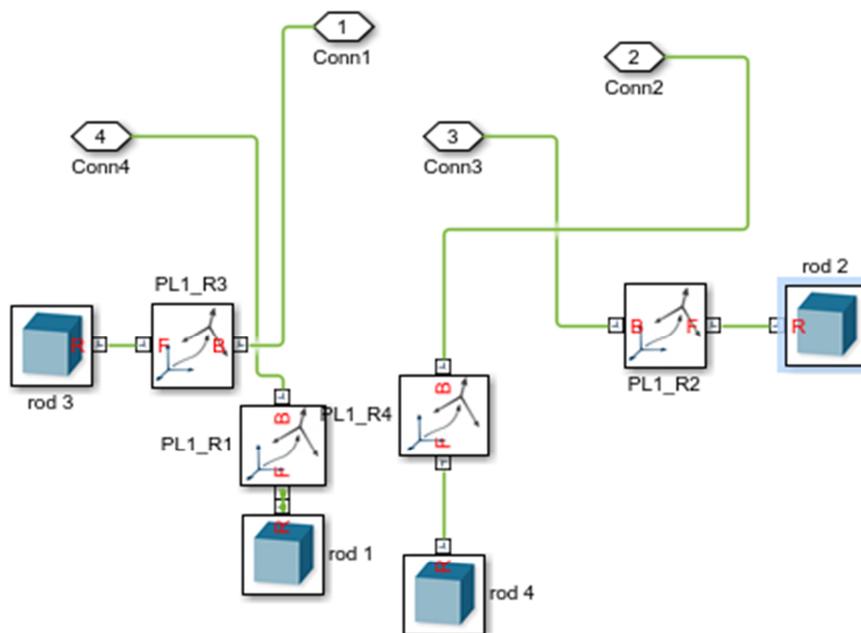


Figure II-7 schémas bloc de un sous-système « pillars ».

Les trois étages du châssis vont être attachés à l'aide des tiges comme illustre dans la Figure II-8.

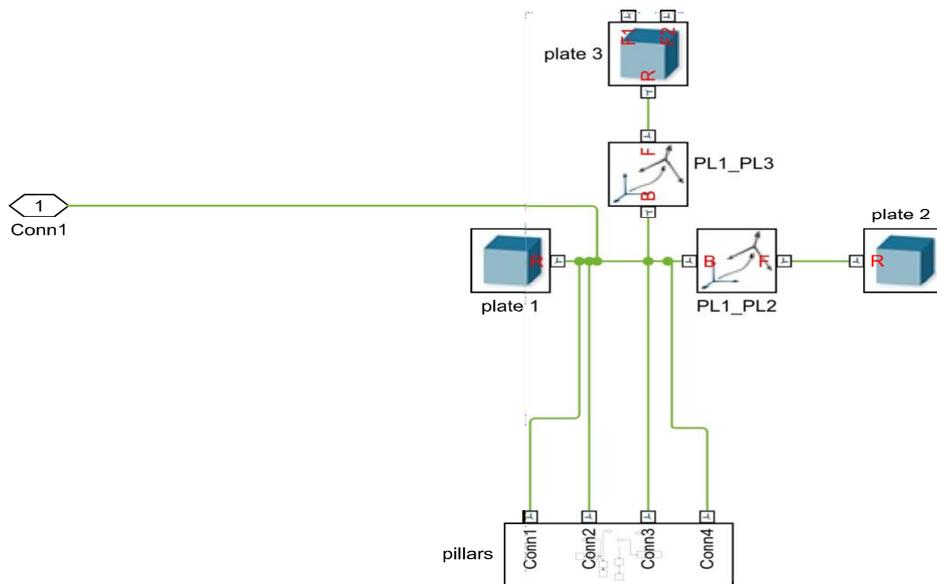


Figure II-8 schémas bloc de châssis sur Simscape.

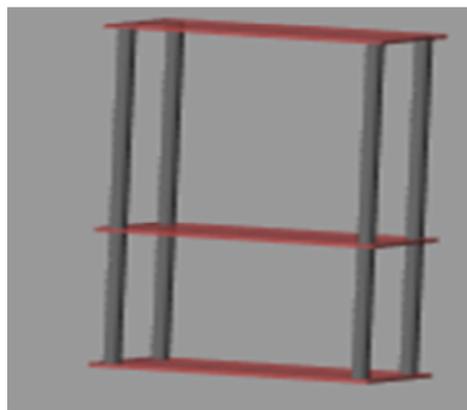


Figure II-9 le châssis en 3D sur Simscape.

II.7.3 Ensemble châssis-chariot

Le châssis est connecté à l'articulation tournant par une transformation rigide, avec un angle de 90 degrés autour de l'axe y et de 180 degrés autour de l'axe x, la rotation est défini selon la séquence y-x-z.

La transformation rigide est liés au cadre de l'articulation tournant qui conférera un degré de liberté au mouvement et permettra au châssis de se balancer comme un pendule, le chariot est liés la base.

L'ensemble châssis-chariot sont liés à l'articulation prismatique par une transformation rigide d'angle de 90 degrés autour de l'axe x et de 180 degrés autour de l'axe y, la rotation est défini selon la séquence x-y-x, cela permettra au chariot de se déplacer d'avant et en arrière.

La configuration de solveur, Le cadre mondial et La configuration du mécanisme sont liés ensemble et ils sont connectés au cadre de base de l'articulation prismatique.

L'axe x est considéré comme l'axe vertical, la gravité doit être orientée dans la direction moins x, comme spécifié dans le bloc de configuration du mécanisme.

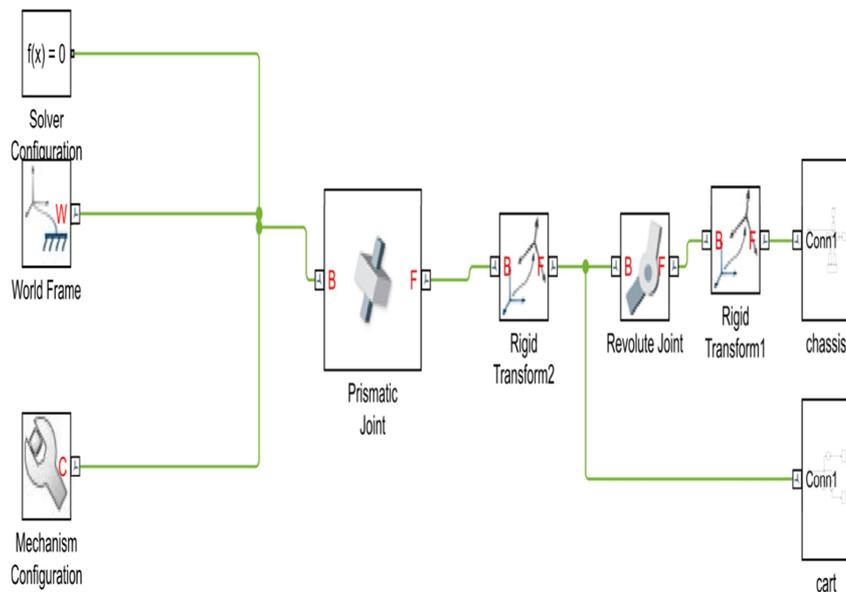


Figure II-10 schémas bloc de l'ensemble châssis-chariot sur Simscape



Figure II-11 l'ensemble châssis-chariot sur Simscape en 3D

	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Le rayon (mm)	La masse (Kg)
Interieur de la roue	/	/	12.5	30	0.05
Les pneus de la roue	/	/	12.5	32.5	0.05

Le rectangle	180	80	3	/	0.25
La tige	250	/	/	5	0.0625
L'arbre de la roue	10	10	200	/	0.1

Tableau II-1 les dimensions et les masses des pièces du robot

II.7 Conclusion:

Le chapitre sur le principe de fonctionnement d'un robot auto-équilibrant sur deux roues offre une compréhension approfondie de ce type de système dynamique. En étudiant la modélisation mathématique, les coordonnées spatiales et le modèle dynamique du robot, nous avons pu appréhender les concepts clés nécessaires à sa conception et à sa stabilité.

De plus, la réalisation pratique d'un tel robot sur MATLAB nous a permis de visualiser et de simuler son fonctionnement réel. En explorant ces aspects, nous avons acquis des connaissances essentielles pour concevoir et mettre en œuvre des robots auto-équilibrants sur deux roues. Le chapitre suivant approfondira davantage ces connaissances en abordant les aspects de la commande et du contrôle de ce type de robot.

CHAPITRE III

**Équilibration d'un robot avec un
régulateur PID et logique floue**

Chapitre III équilibration d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

III.1 Introduction

Le contrôle d'un robot auto-équilibrant à deux roues vise à maintenir son équilibre et sa stabilité dans une position verticale en utilisant des actions et des rétroactions appropriées. Ce chapitre se concentre sur l'objectif de commander un tel robot et explore deux approches de contrôle : le régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) et la logique floue. L'objectif fondamental est de maintenir le robot en équilibre, assurant ainsi sa stabilité, sa maniabilité, sa sécurité et son adaptation à différentes conditions. Le contrôleur PID utilise un algorithme classique pour réguler le système en fonction de l'erreur de mesure, tandis que la logique floue permet de prendre en compte les imprécisions et les incertitudes du raisonnement humain.

Ce chapitre explore les principes de fonctionnement de ces deux approches et compare les résultats obtenus en termes d'angle d'inclinaison, de vitesse angulaire et de forces générées par les moteurs.

III.2 L'objectif de commander un robot auto-équilibrer à deux roues

L'objectif de commander un robot auto-équilibrant à deux roues est de contrôler et maintenir l'équilibre du robot dans une position verticale en utilisant des actions et des rétroactions appropriées. Le contrôle du robot vise à stabiliser son centre de gravité sur une ligne verticale imaginaire en ajustant les vitesses des roues ou en appliquant des couples moteurs appropriés.

Les principaux objectifs de la commande d'un tel robot sont les suivants :

- **Stabilité et équilibre** : L'objectif fondamental est de maintenir le robot en équilibre dans une position verticale. Cela implique de détecter les inclinaisons du robot et de prendre des mesures pour les corriger en temps réel. Le contrôleur doit être capable de détecter les déséquilibres et de réagir rapidement pour les compenser.
- **Maniabilité et navigation** : Le robot doit être capable de se déplacer de manière fluide et précise. La commande doit permettre au robot de se déplacer dans différentes directions, de tourner et de s'arrêter de manière contrôlée. La maniabilité du robot est essentielle pour lui permettre d'effectuer des tâches spécifiques ou de se déplacer dans des environnements complexes.
- **Réponse rapide et robuste** : Le contrôleur doit être capable de réagir rapidement aux perturbations et aux changements dans l'environnement. Il doit être en mesure

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

d'ajuster les actions de contrôle en fonction des conditions en temps réel. La commande doit être robuste, c'est-à-dire capable de maintenir l'équilibre et la stabilité même en présence de perturbations externes telles que des vents latéraux ou des surfaces inégales.

- **Sécurité** : L'objectif est de garantir la sécurité du robot et de son environnement. Le contrôleur doit être conçu de manière à éviter les chutes ou les collisions potentiellement dangereuses. Il doit être capable de détecter les obstacles et de prendre des mesures pour les éviter ou les contourner.
- **Adaptabilité** : La commande doit être adaptative aux différentes conditions et situations auxquelles le robot peut être confronté. Elle doit être capable de s'ajuster aux changements de charge, de terrain ou d'autres variables qui pourraient affecter l'équilibre et la stabilité du robot.

III.3 Le Régulateur PID

Le PID (Proportionnel Intégral Dérivé) est un algorithme de commande couramment utilisé pour réguler un système en fonction d'une erreur de mesure. Il vise à minimiser cette erreur en ajustant les signaux de commande du système.

C'est le type de régulateur le plus utilisé dans le monde de l'industrie et particulièrement dans le monde de la robotique, qui permet de contrôler un grand nombre de procédés.

III.4 Principe de fonctionnement de la commande PID

Le principe de la commande PID repose sur trois termes principaux :

- **Terme proportionnel (P)** : Ce terme est proportionnel à l'erreur actuelle du système, qui est la différence entre la valeur de référence et la valeur mesurée. Il amplifie l'erreur et génère une action de commande proportionnelle à cette erreur. Le terme proportionnel permet de réagir rapidement aux erreurs, mais il peut également entraîner un dépassement ou une instabilité si utilisé seul.
- **Terme intégral (I)** : Ce terme est proportionnel à la somme cumulative des erreurs passées du système. Il permet de corriger les erreurs de long terme et d'éliminer le biais statique. Le terme intégral agit lentement pour réduire l'erreur persistante et améliorer la précision du système.
- **Terme dérivé (D)** : Ce terme est proportionnel à la variation instantanée de l'erreur du système. Il est utilisé pour prévoir le comportement futur du système en se basant sur

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

la pente de l'erreur. Le terme dérivé permet d'améliorer la stabilité du système en anticipant les changements rapides de l'erreur et en réduisant le temps de réponse.

En combinant ces trois termes, la commande PID calcule une action de commande globale qui est appliquée au système. Les coefficients P, I et D sont ajustés pour obtenir le meilleur compromis entre la réponse rapide, la précision et la stabilité du système.

L'algorithme PID est itératif, ce qui signifie qu'il est exécuté en boucle continue, recalculant les actions de commande à chaque itération en fonction de l'erreur actuelle et des erreurs passées.

III.5 L'utilisation du contrôleur PID pour équilibrer un robot

Le régulateur PID ajuste l'angle d'inclinaison mesurée dans le capteur de l'articulation tournante du robot pour maintenir son l'équilibre (zéro selon l'axe vertical). Le signal de sortie de PID est connectée à l'entrée "f" de l'articulation prismatique qui représente la force appliqué au roues pour maintenir l'équilibre du robot en présence.

- **Le réglage des paramètres de PID avec Autotune**

L'Autotune dans le régulateur PID sur Simscape est une fonctionnalité qui permet d'ajuster automatiquement les paramètres du régulateur PID en analysant les réponses du système. Elle simplifie le processus de réglage en évitant les réglages manuels fastidieux et en optimisant automatiquement la performance du système de contrôle.

Le réglage de l'Autotune se fait par :

- Définir le temps de réponse à [0.3338 s] : c'est la durée pendant laquelle l'Autotune observe la réponse du système pour analyser les performances et ajuster les paramètres du régulateur.
- Définir le comportement transitoire à [0.6 s] : pour que l'Autotune soit capable à ajuster les paramètres du régulateur de manière à obtenir une réponse transitoire optimale lors de perturbations ou de changements de consigne.
- La sortie f de PID dans l'intervalle suivant [29] : [-10 10] N.

Le réglage de l'Autotune donne les valeurs suivantes de la PID :

- P= 0.575277701339281.
- I= 1.49745245260866.
- D= 0.0429533311526365.

Chapitre III équilibration d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

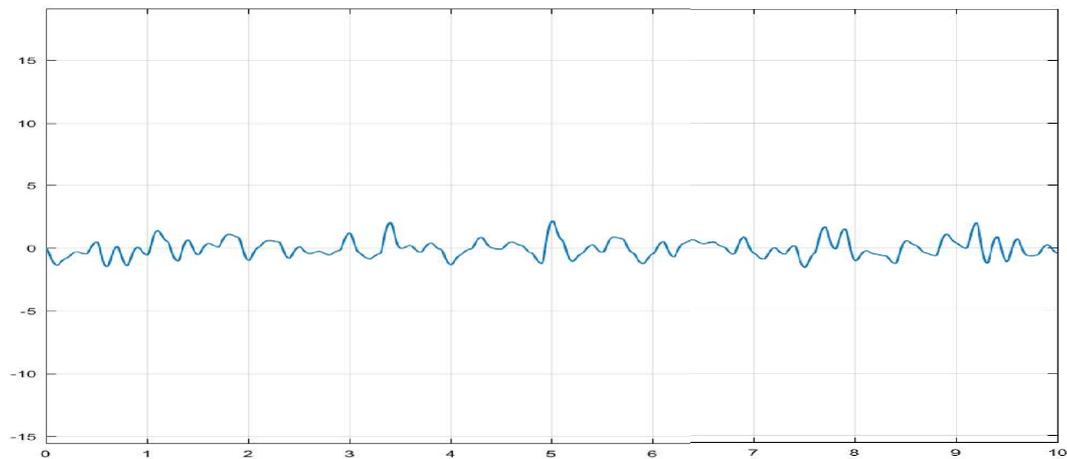


Figure III.1 Signal d'angle d'inclinaison.

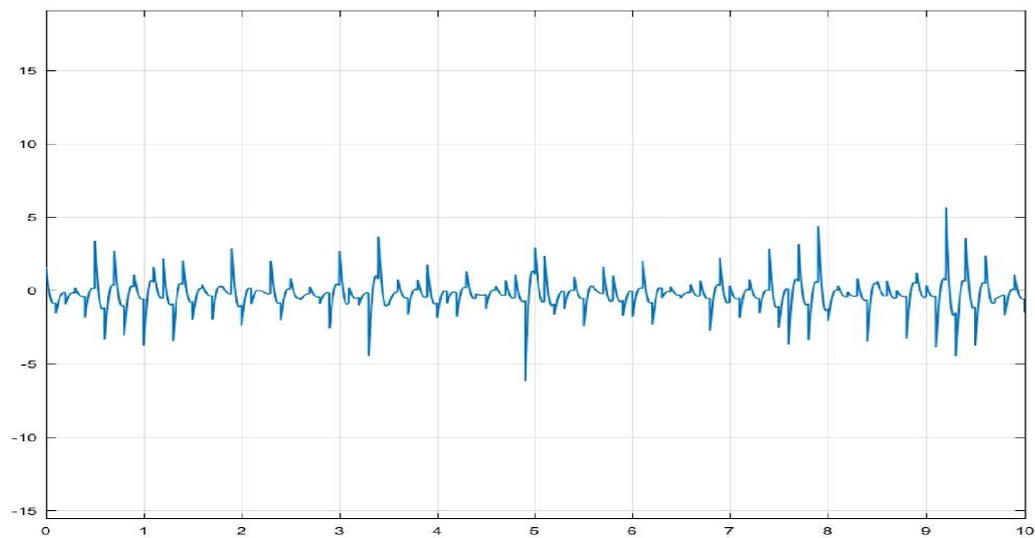


Figure III.2 Signal de force générée.

L'angle mesuré atteint la consigne rapidement par la génération des grandes forces du régulateur PID.

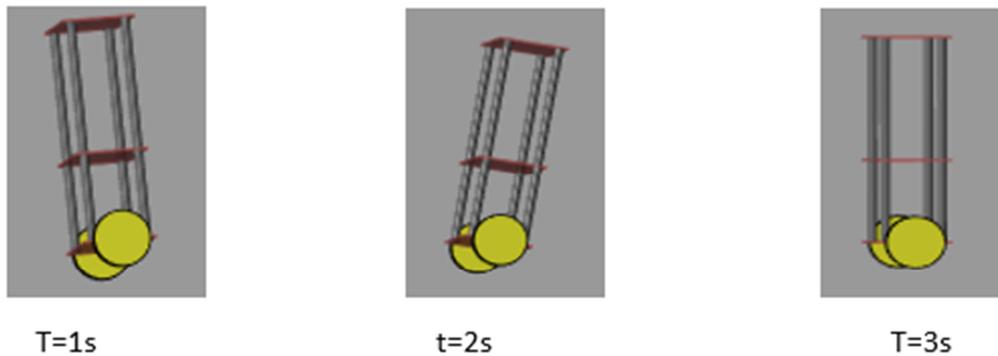


Figure III.3 visualisation de la stabilité de model 3D du robot.

- **Discussion des résultats**

- Le régulateur PID est utilisé pour l'équilibrage d'un robot, son objectif est de maintenir l'angle d'inclinaison du robot aussi proche que possible de zéro. Pour y parvenir, le régulateur peut générer des forces importantes pour contrebalancer les forces perturbatrices et restaurer l'équilibre.
- La génération de grandes forces peut avoir des limites physiques et techniques. Il est essentiel de concevoir et de configurer le système de manière appropriée pour garantir la sécurité et la stabilité du robot dans des conditions réelles.
- L'erreur de poursuite peut être réduite en ajustant correctement les paramètres PID. Les coefficients PID bien réglés permettront de minimiser ces erreurs.

III.6 La robustesse du contrôleur PID

Pour vérifier la robustesse de la PID il est important d'ajouter de nouvelles perturbations.

- **Première essai** : Application d'une perturbation avec une variance de 1.

Chapitre III équilibration d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

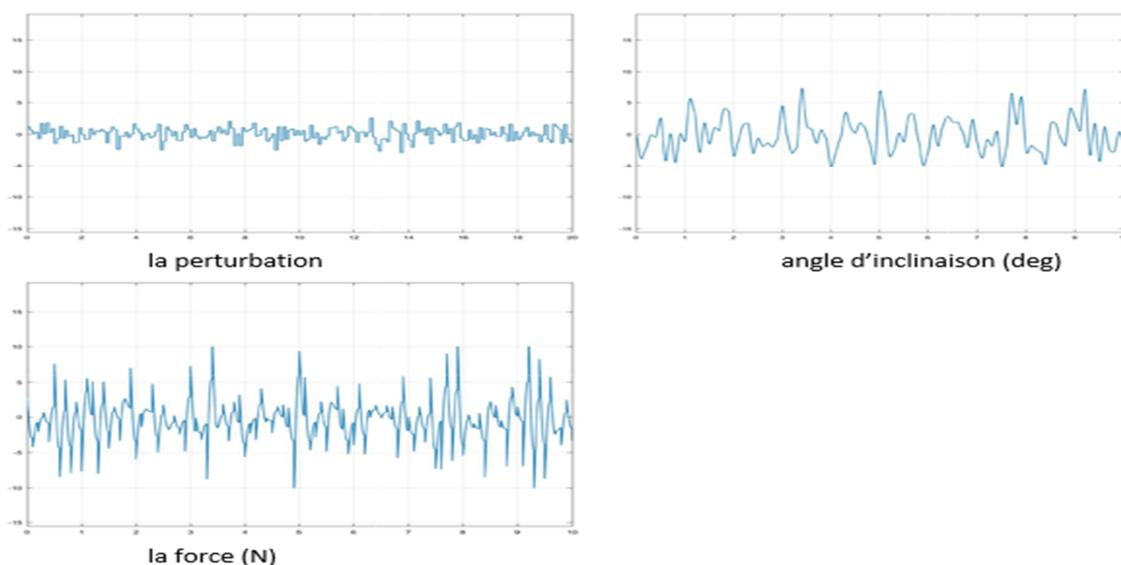


Figure III.4 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force

L'angle mesuré atteint la consigne désirée (0 degré) malgré la présence de perturbation de faible amplitude et elle se varier entre [8 -6] degré.

- **Deuxième essai** : Application d'une perturbation avec une variance de 5.

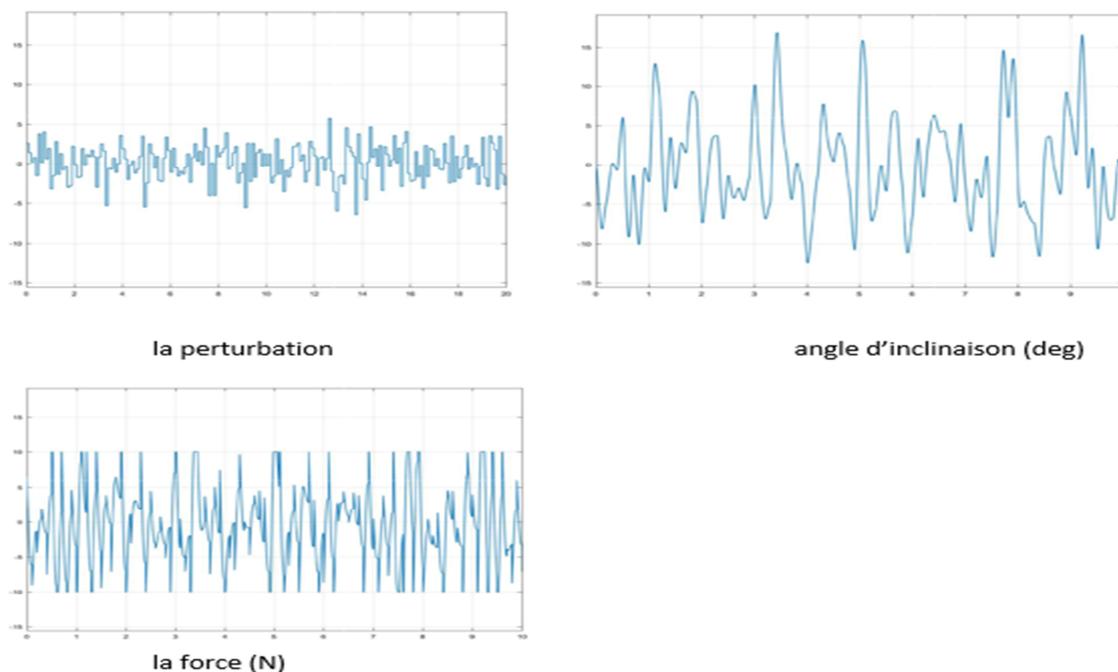


Figure III.5 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

L'application d'une perturbation élevée augmente l'oscillation du robot ainsi que la force et l'angle mesurée atteint la consigne et elle se varient entre [18 -16] degré.

- **Troisième essai** : Application d'une perturbation avec une variance de 10.

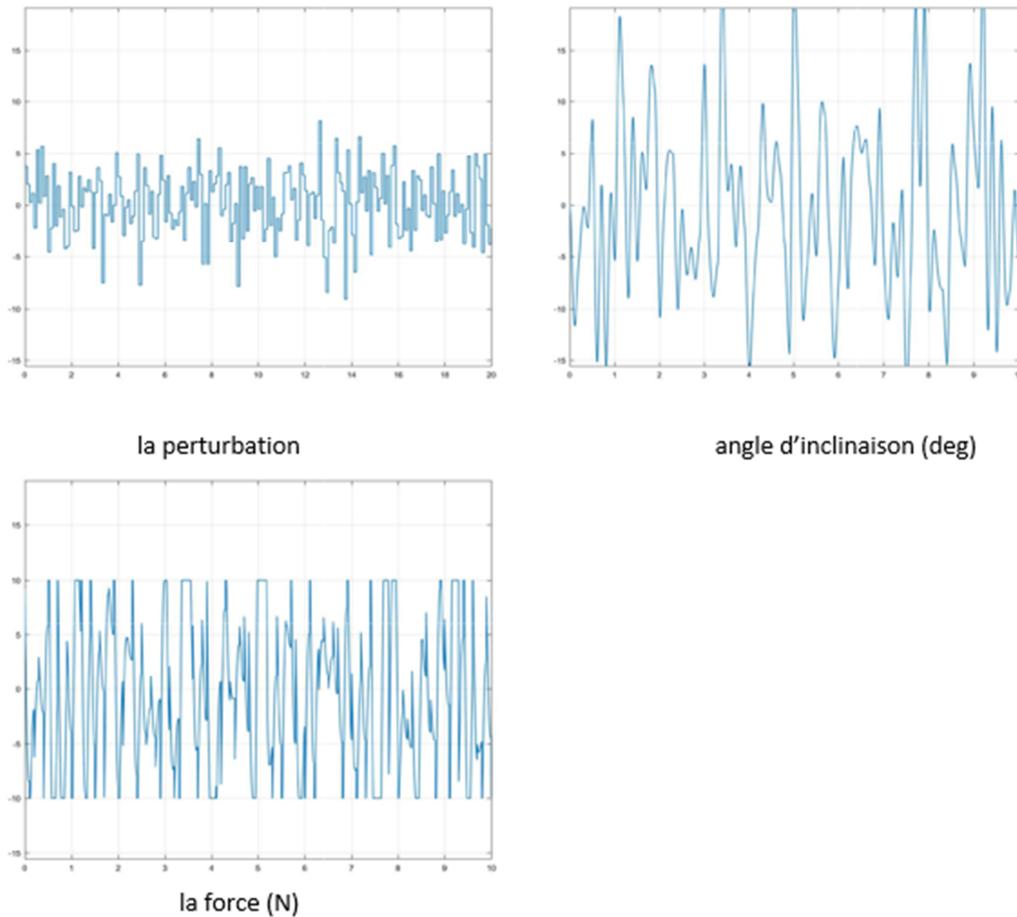


Figure III.6 les signaux de perturbation angle d'inclinaison et de force.

L'angle mesurée atteint la consigne et l'amplitude de signal augmente avec des grandes oscillations car le PID arrive à ça seuil, si on rajoute d'autres valeurs de perturbation le robot perd son équilibre et devient très difficile à contrôler.

- Le robot atteint toujours son équilibre, en utilisant la commande PID, le robot auto-équilibré à deux roues peut ajuster continuellement son action de contrôle en fonction des perturbations de force et d'angle d'inclinaison détectées.
- Cependant, il est important de noter que la configuration et le réglage précis des paramètres PID peuvent avoir un impact significatif sur la robustesse du système.

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

Des essais empiriques et des ajustements itératifs peuvent être nécessaires pour optimiser les performances et garantir une réponse robuste aux perturbations.

III.7 La commande floue

III.7.1 Définition

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, nous permettons à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux. La logique floue confère ainsi une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel [25].

III.7.2 Principe de fonctionnement

La structure de base d'un contrôleur floue est illustrée par la figure III.6. Pour la simplicité, on considère le cas général d'un système flou ayant 02 entrées et une sortie. La première étape dans la conception est le choix des variables linguistique d'entrée/sortie, ainsi que leurs valeurs linguistique A_i et B_j . La construction et structure de la base de règles floues dépend de l'ensemble de ces valeurs. Les valeurs souvent utilisés sont : PG (positif grand), PM (positif moyen), PP (positif petit), ZR (zéro), NP (négatif petit), NM (négatif moyen), NG (négatif grand).

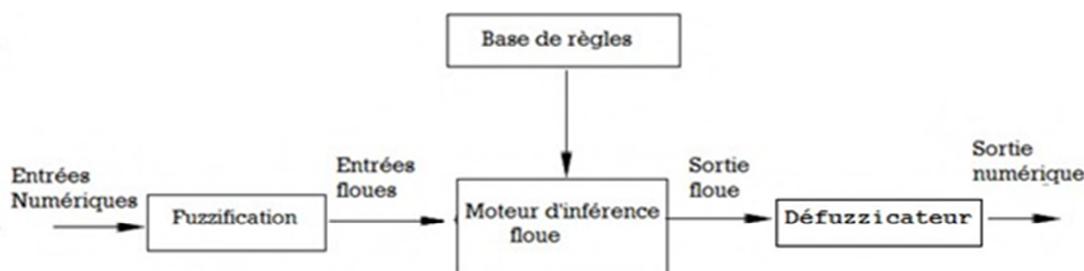


Figure III.7 Structure d'un système flou.

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

- **La base de règle**

On appelle base de règles, l'ensemble des règles reliant les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie à l'aide de différents opérateurs. Ces règles se présentent sous la forme : Si condition1 et condition2 (et...) alors action sur les sorties. Elles forment le noyau des systèmes d'inférence utilisés en commande et retracent le raisonnement que peut faire un être humain sur une connaissance imparfaitement définie [26].

- **Inférence floue**

Elle permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande et se fait par les opérations d'inférence floue et l'agrégation des règles. L'inférence floue repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication floue pour chaque règle à analyser. Cet opérateur quantifie la force de liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle [27].

- **Le fuzzificateur**

Transforme les valeurs numériques d'entrée à des ensembles flous. Le fuzzificateur de type singleton est souvent utilisé [28].

- **Défuzzificateur**

Permet d'extraire de l'ensemble flou de sortie, la valeur numérique qui peut être considérée comme l'élément le plus représentatif de cet ensemble. Plusieurs méthodes de défuzzification peuvent être utilisées.

III.8L'utilisation du contrôleur flou pour équilibrer un robot sur Simscape

Deux entrées linguistiques, à savoir "thêta" et "thetapoint," ainsi qu'une sortie linguistique "force" ont été utilisées. Chacune de ces variables linguistiques est représentée par cinq valeurs linguistiques : NM, NP, N, PP, et PM.

Les variables linguistiques "thêta" et "thetapoint" sont représentées de la manière suivante :

- "thêta" est représenté par l'angle d'inclinaison du robot par rapport à la verticale mesurée dans le capteur de l'articulation tournante.
- "thetapoint" est représenté par la vitesse angulaire (la dérivée de l'angle) du robot mesurée dans le capteur de l'articulation tournante.
- La variable linguistique de sortie "force" est représentée par la force appliquée au robot pour le maintenir en équilibre.

Les valeurs linguistiques pour les variables "thêta" ,"thetapoint" et "force" sont les suivantes :

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

- NM: Angle d'inclinaison moyen négatif.
- NP : Angle d'inclinaison faible négatif.
- N: Angle d'inclinaison proche de zéro (équilibre).
- PP: Angle d'inclinaison faible positif.
- PM : Angle d'inclinaison moyen positif.

Pour équilibrer un robot par le contrôleur à logique floue sur Simscape, cela nécessite d'utiliser le bloc fuzzy logic, et de déclarer l'angle d'inclinaison du robot et la vitesse angulaire comme des entres et la force générée par le contrôleur comme une sortie.

Les valeurs des variables linguistiques et les bases de règles sont déclarées dans le bloc de fuzzy logic sur Simscape. Le réglage des valeurs linguistiques dans le bloc fuzzy logic est de type MAMDANI.

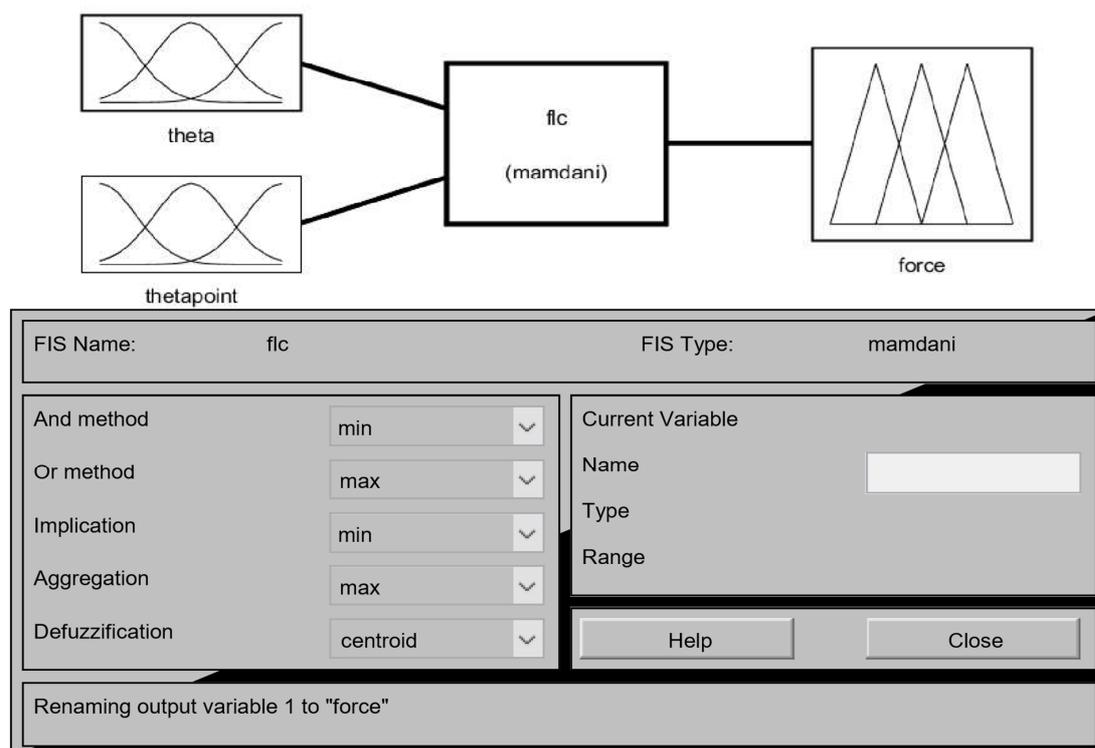


Figure III.8 Définition de la structure globale.

Les variables linguistiques et leurs intervalles [29] :

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

	NM	NP	N	PP	PM
Thêta (degré)	[-21.5 -14 -6.497]	[-14 -6.947 1]	[-6.509 1 8.5]	[1 8.5 1.6]	[8.5 16 23.5]
Thetapoint (degré/s)	[-18.51 -12 -5.508]	[-12 -5.508 1]	[-5.508 1 7.504]	[1 7.504 14]	[7.504 14 20.5]
Force (N)	[-8.51 -5 -1.503]	[-5 -1.503 2]	[-1.503 2 5.503]	[2 5.503 9]	[5.503 9 12.51]

Tableau III.1 Les fonction d'appartenance et leurs intervalles.

Les bases de règles de régulateurs logique floue :

thêta thetapoint	NM	NP	N	PP	PM
NM	NM	NM	PM	PM	PM
NP	NM	NP	PP	PP	PM
N	NM	NP	N	PP	PM
PP	NM	NP	NP	PP	PM
PM	NM	PM	NM	PM	PM

Tableau III.2 Base de règle de la commande floue.

- **Les résultats de la simulation :**

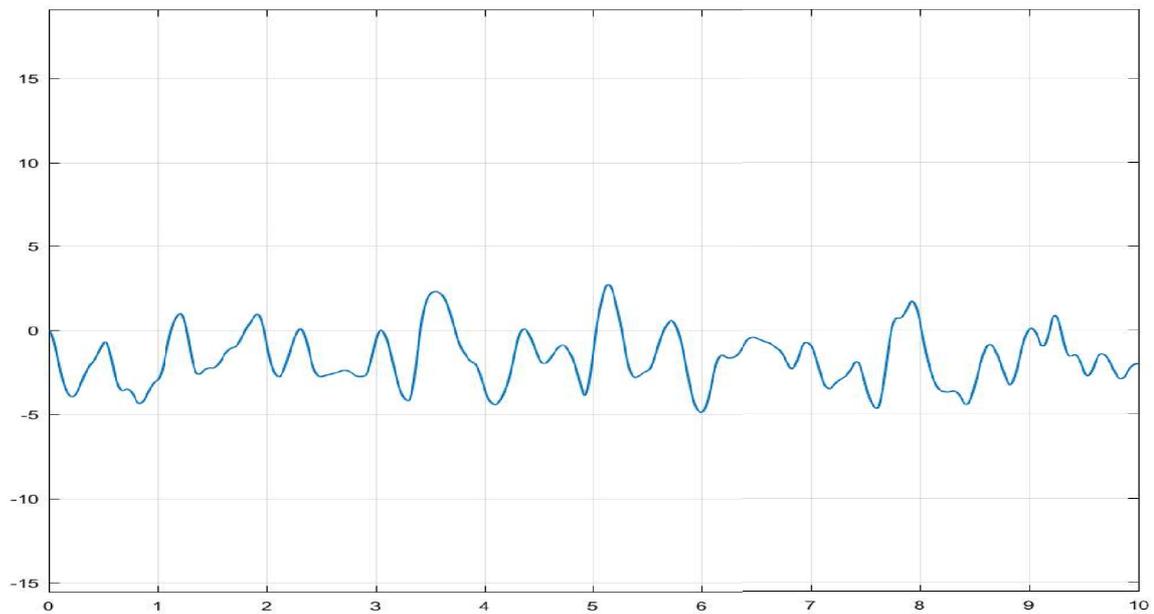


Figure III.9 Signal d'angle mesuré.

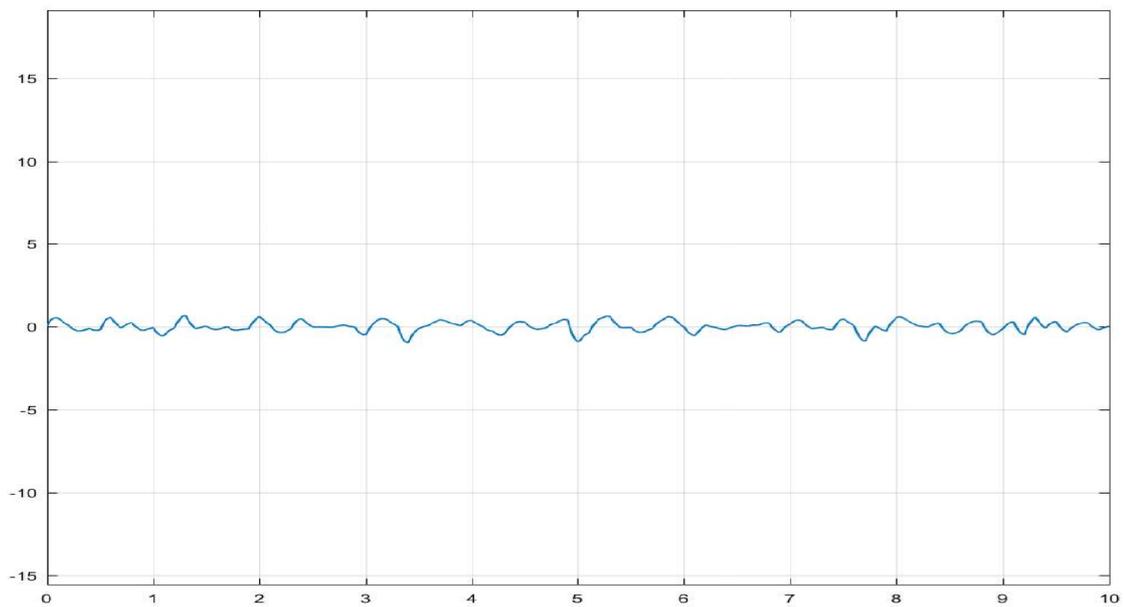


Figure III.10 Signal de La vitesse angulaire.

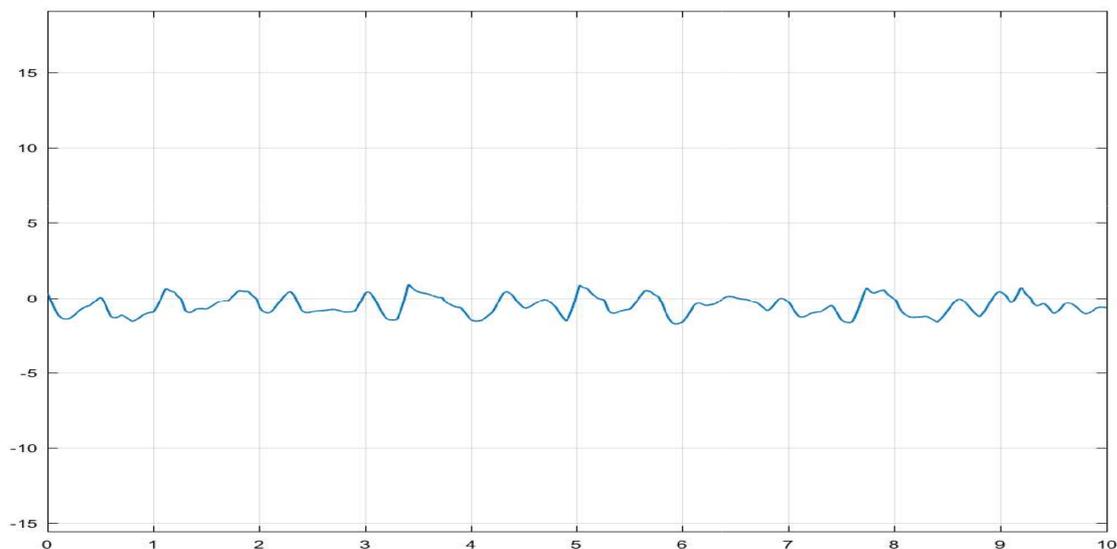


Figure III.11 Signal de force généré par le contrôleur.

L'angle du robot converge vers la position d'équilibre avec une vitesse angulaire très faible, cela permet au contrôleur de générer des petites forces pour maintenir la stabilité du robot.

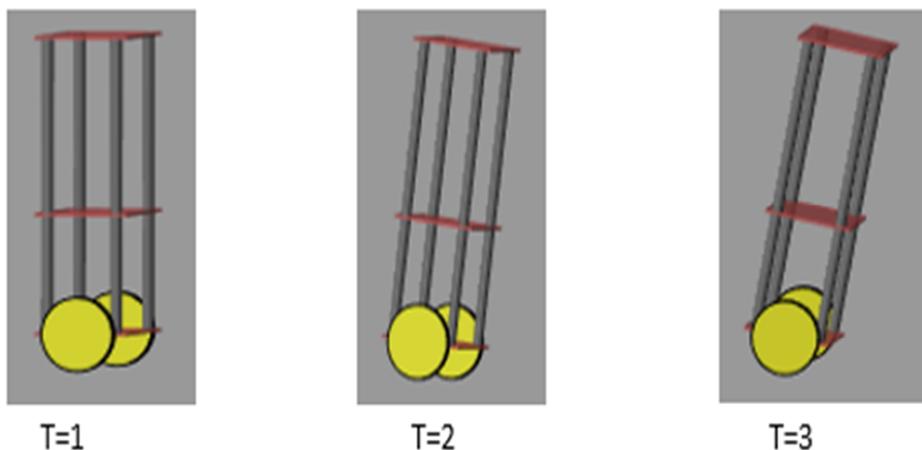


Figure III.12 visualisation robot en 3D.

Discussions sur les résultats

- En utilisant ces valeurs linguistiques et des règles de contrôle appropriées, un système de contrôle flou a été développé pour équilibrer le robot. Ce système prend en compte les valeurs d'angle d'inclinaison et de vitesse angulaire pour déterminer la force nécessaire pour garder le robot en équilibre.

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

- Le contrôleur flou offre une manière intuitive de gérer les incertitudes et les variations du système, ce qui en fait une approche efficace pour équilibrer le robot
- La commande floue utilise l'erreur de poursuite pour ajuster les paramètres internes et générer une force de sortie adaptée. Les règles floues définies dans le contrôleur flou déterminent comment l'erreur de poursuite est utilisée pour ajuster la force générée et réduire l'écart entre l'angle mesuré et l'angle souhaité.

III.9 La robustesse de la commande floue

Il est nécessaire d'ajouter une perturbation sur l'angle d'inclinaison pour vérifier la robustesse du robot par le contrôleur logique floue.

- **Première essai** : Application d'une perturbation avec une variance de 1.

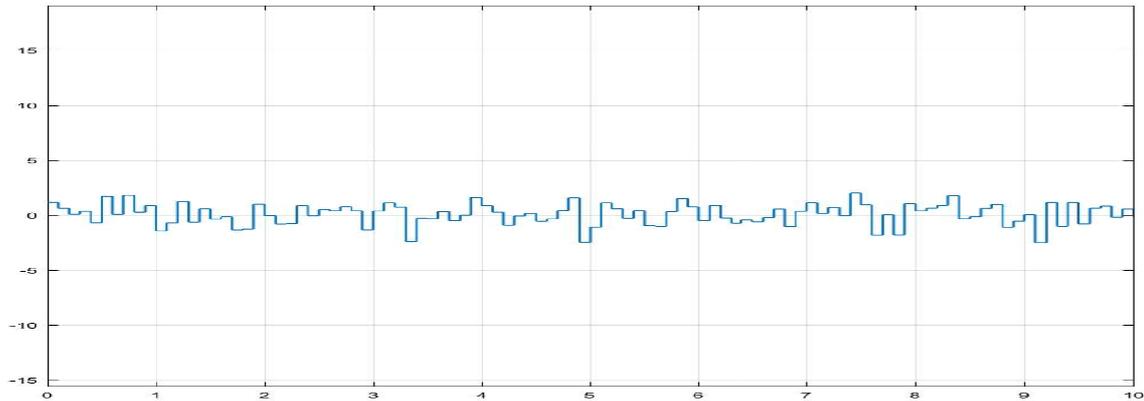


Figure III.13 Signal de perturbation d'une variance de 1.

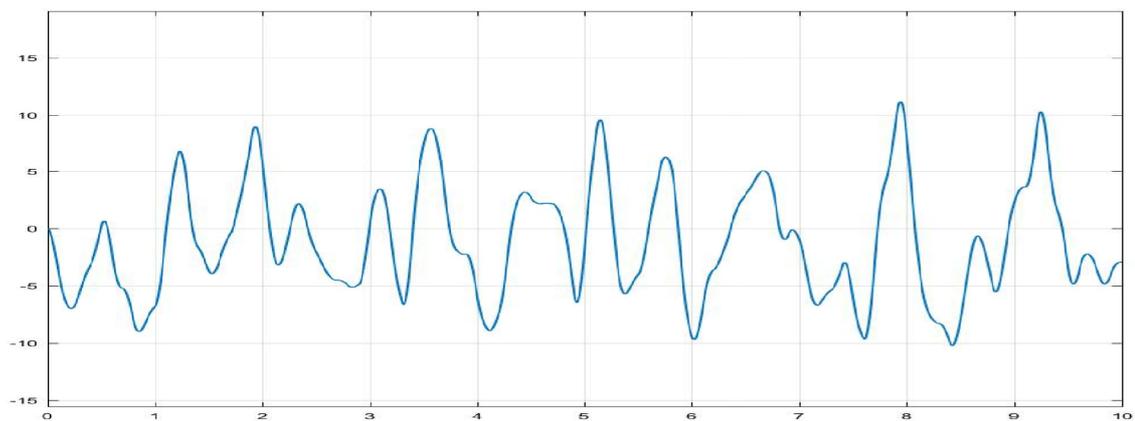


Figure III.14 Signal d'angle d'inclinaison.

Le robot atteint toujours son équilibre de manière satisfaisante malgré la présence des perturbations externe.

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

- **Deuxième essai** : Application d'une perturbation avec une variance de 3.

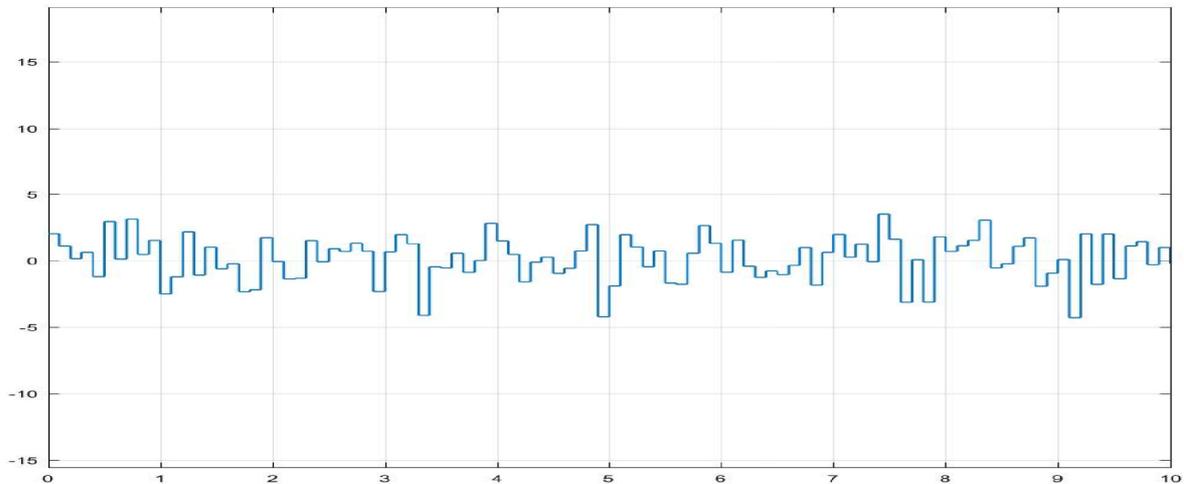


Figure III.15 Signal de perturbation d'une variance de 3.

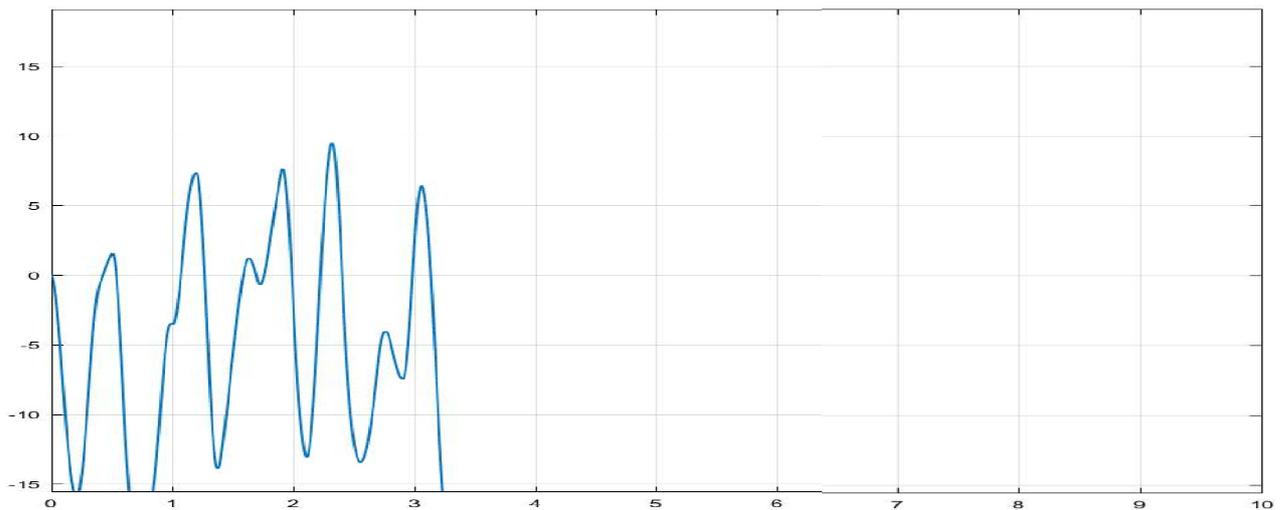


Figure III.16 Signal d'angle d'inclinaison.

L'application d'une perturbation élevée augmente l'oscillation du robot, le signal d'angle mesurée atteint la consigne, l'information de signal se perd à partir de 3.2 s car le régulateur flou atteint ce seuil.

La commande logique floue offre une certaine souplesse et tolérance aux incertitudes et variations des perturbations. Elle permet également d'exprimer des règles de contrôle basées sur l'expérience et l'expertise des concepteurs du système.

Cependant, il est important de noter que la conception et la configuration précise de la commande logique floue, y compris la définition des variables linguistiques, des fonctions

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

d'appartenance et des règles, peuvent nécessiter une expertise approfondie et des ajustements itératifs pour obtenir une performance optimale. Des tests et des réglages empiriques peuvent être nécessaires pour garantir la robustesse et la précision du système face aux perturbations.

III.10 Comparaison entre les résultats de contrôleurs PID et logique floue

L'angle d'inclinaison et la force générée par un régulateur PID et la logique floue pour équilibrer un robot auto-équilibrant sont deux aspects clés du contrôle de l'équilibre.

- **Régulateur** **PID**

Angle d'inclinaison : Le régulateur PID vise généralement à maintenir l'angle d'inclinaison du robot aussi proche que possible de la verticale, en ajustant continuellement la force appliquée pour corriger les écarts par rapport à cet angle. En conséquence, le robot peut maintenir un angle d'inclinaison très faible et donc rester équilibré avec précision.

Force générée : Le PID calcule la force nécessaire pour ramener le robot à l'équilibre en fonction de l'erreur angulaire actuelle, de l'intégrale de l'erreur et de la dérivée de l'erreur. Il ajuste constamment cette force pour minimiser l'erreur d'inclinaison.

Logique **floue**

Angle d'inclinaison : La logique floue peut utiliser des règles linguistiques pour déterminer comment réagir en fonction de l'angle d'inclinaison et de sa vitesse angulaire. Ces règles floues peuvent être moins précises que les calculs mathématiques du PID, ce qui peut entraîner des ajustements moins précis de l'angle d'inclinaison.

Force générée : La logique floue prend des décisions en fonction d'ensembles flous et de règles floues, ce qui peut entraîner une génération de force moins déterministe que le PID. La force peut être ajustée de manière adaptative en fonction de l'expérience passée et des règles linguistiques, mais cela peut entraîner une réponse moins précise à l'inclinaison.

III.11 La déférence le contrôleur PID et logique floue

- La commande PID repose sur un modèle mathématique précis du système à contrôler, tandis que la commande floue peut être utilisée même lorsque le modèle du système est complexe ou difficile à décrire avec précision.
- La commande PID est basée sur une rétroaction continue et utilise les erreurs actuelles et passées pour générer une commande de sortie, tandis que la commande floue peut

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

être utilisée même lorsque le modèle du système est complexe ou difficile à décrire avec précision.

- la commande floue est la plus robuste que la commande PID face à des conditions de fonctionnement variables ou à des perturbations externes.
- Réponse aux perturbations : Le PID est généralement efficace pour réagir rapidement aux perturbations, car il calcule une action corrective en temps réel en fonction de l'erreur actuelle. La logique floue peut être plus lente à réagir, car elle agrège des informations sur une période de temps plus longue.
- Les résultats de la logique floue peuvent être perçus comme limités par rapport au PID pour maintenir l'équilibre d'un robot auto-équilibrant dans certains cas en raison de plusieurs facteurs clés :
 1. Précision : La logique floue repose sur des règles linguistiques floues et des ensembles flous, ce qui peut entraîner une certaine imprécision dans la prise de décision. En comparaison, le PID utilise des calculs mathématiques rigoureux pour minimiser l'erreur, ce qui permet généralement une meilleure précision dans le maintien de l'équilibre.
 2. Réponse dynamique : Le PID est capable de réagir rapidement par rapport au logique floue

III.12 Conclusion

L'objectif de commander un robot auto-équilibrant à deux roues est crucial pour assurer sa stabilité, sa maniabilité, sa sécurité et son adaptation à différentes situations. Dans ce chapitre, nous avons examiné deux approches de contrôle : le régulateur PID et la logique floue. Le régulateur PID utilise des coefficients ajustables pour calculer une action de commande globale en se basant sur l'erreur actuelle, les erreurs passées et les variations instantanées de l'erreur. Il offre une réponse rapide, une précision et une stabilité du système, mais nécessite un réglage approprié des coefficients pour éviter les oscillations et les instabilités. D'autre part, la logique floue permet de traiter les incertitudes et les imprécisions en utilisant des variables linguistiques et des règles basées sur le raisonnement humain. Elle offre une flexibilité appréciable, mais nécessite également une construction soignée de la base de règles pour obtenir des résultats précis.

Les résultats des simulations ont montré que le contrôleur PID avec des coefficients ajustés correctement permet de maintenir l'équilibre du robot en atteignant rapidement la position verticale souhaitée, avec des petites vitesses angulaires et des forces générées par les moteurs modérées. Cependant, des coefficients mal réglés peuvent entraîner des oscillations, des instabilités ou une mauvaise réponse aux perturbations. En revanche, la logique floue a

Chapitre III équilibrage d'un robot avec un régulateur PID et logique floue

également permis de maintenir l'équilibre du robot, avec un angle d'inclinaison proche de la position verticale, une vitesse angulaire presque nulle et des forces générées par les moteurs adaptées. La logique floue offre une approche plus souple pour traiter les incertitudes et les imprécisions, mais nécessite une base de règles soigneusement construite et des méthodes de défuzzification appropriées pour obtenir des résultats fiables.

En conclusion, le contrôle d'un robot auto-équilibrant à deux roues est un défi complexe mais essentiel. Le régulateur PID et la logique floue sont deux approches de contrôle efficaces.

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a permis d'explorer le domaine de la modélisation et de la commande des robots auto-équilibrés à deux roues. Nous avons mis en évidence l'importance cruciale de maintenir l'équilibre de ces robots tout en leur permettant de se déplacer de manière stable et précise.

Dans un premier temps, nous avons étudié les principes fondamentaux du fonctionnement de ces robots, en soulignant la nécessité d'une modélisation précise de leur système physique. La modélisation mathématique réalisée sur Matlab a permis de représenter les composants physiques tels que le châssis, les roues et les capteurs, et ainsi de prédire leur mouvement et de concevoir des stratégies de commande adaptées.

Ensuite, nous avons exploré différentes approches de commande utilisées pour maintenir l'équilibre du robot. Nous avons examiné en détail des algorithmes de commande avancés tels que la commande PID et la logique floue, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites respectives. Ces approches offrent des solutions efficaces pour ajuster les actions de contrôle en fonction de l'erreur de position et des informations sensorielles, garantissant ainsi une stabilité optimale.

Ce mémoire contribue au développement de robots toujours plus autonomes, stables et capables de s'adapter à leur environnement. Cependant, il convient de noter que des améliorations pratiques peuvent être apportées à ce travail à l'avenir, par exemple en réalisant une mise en œuvre concrète des approches de commande étudiées.

En définitive, l'étude menée dans ce mémoire ouvre la voie à de nouvelles avancées dans le domaine des robots auto-équilibrés, avec le potentiel de transformer de nombreux secteurs tels que la robotique de service, la logistique ou encore la médecine.

1. Les perspectives pour les robots auto-équilibrés sont prometteuses et ouvrent la voie à de nombreuses possibilités d'amélioration et d'application. Voici quelques perspectives à considérer :
2. Amélioration des algorithmes de commande : Les algorithmes de commande existants tels que la commande PID et la logique floue peuvent être encore améliorés pour obtenir des performances plus robustes et précises. Des techniques avancées telles que le

Conclusion générale

contrôle prédictif ou le contrôle par apprentissage automatique pourraient être explorées pour optimiser le comportement du robot.

3. Intégration de capteurs avancés : L'intégration de capteurs avancés tels que des capteurs inertiels (accéléromètres, gyroscopes) ou des capteurs de vision pourrait permettre au robot d'obtenir des informations plus précises sur son environnement, améliorant ainsi sa capacité à se déplacer et à interagir avec son environnement.
4. Adaptation à des environnements variés : Les robots auto-équilibrés pourraient être développés pour s'adapter à différents types d'environnements et de terrains. Cela pourrait inclure des fonctionnalités de détection et d'adaptation automatiques aux surfaces inégales, aux pentes ou aux obstacles.
5. Intégration de l'intelligence artificielle : L'utilisation de techniques d'intelligence artificielle, telles que l'apprentissage profond, pourrait permettre aux robots auto-équilibrés d'apprendre et de s'adapter de manière autonome à de nouvelles situations ou de résoudre des problèmes complexes en temps réel.
6. Applications dans divers domaines : Les robots auto-équilibrés pourraient trouver des applications dans divers domaines tels que la logistique, l'industrie, l'assistance aux personnes âgées ou à mobilité réduite, la surveillance de l'environnement, et bien d'autres. Le développement de fonctionnalités spécifiques à chaque domaine ouvrirait de nouvelles opportunités d'utilisation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Le robot mobile "Séjourner" utilisé pour la mission pathfinder de la NASA, www.robocup2014.org, 2014.
- [2] Reignier, P., "Pilotage Réactif d'un Robot Mobile, Etude de Lien entre la Perception et l'Action", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994.
- [3] M. J. Aldon, "Capteurs et méthodes pour la localisation des robots mobiles," UMR CNRS, Université de Montpellier II.
- [4] G. Zidani, "Exécution de trajectoire pour robot mobile d'intérieur -réseaux de neurones-,"Mémoire de magister, université de Batna, Algérie, 2009.
- [5] C. Angchen, T. Hsengs.Li, Y. Chienhyeh and C. C. Chang, "Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots," Mechatronics 19, pp 156–166, 2009.
- [6] B. Thuilot, "Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles à roues," Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des Mines, Paris, 1995.
- [7] J. P. Laumond, "La robotique mobile," Edition Hermes Science Publication, Paris, 2001
- [8] B. Bayle, "Robotique mobile," Cours option ISAV, Télécom Physique Strasbourg 3A
- [9] Beaudry, E., "Planification de tâches pour un robot mobile autonome". Faculté des sciences, université de Sherbrooke, Canada, 2006.
- [10] Borenstein, J., Everett, H, R., Feng, L., "Where am I, Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning", University of Michigan, 1996.
- [11] Shuzhi, S, G., Lewis, F, L., "Autonomous Mobile Robots, Sensing, Control, Decision, Making and Applications", Taylor and Francis Group, 2006.
- [12] Filliat, D., "Robotique Mobile", Cours à l'école Nationale Supérieure des Techniques Avancées ENSTA, 2004.
- [13] Laurin, E., "Système Intelligent d'Assistance à la Perception dans la Conduite de Véhicule", Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke, 2000.
- [14] Large, F., "Navigation autonome d'un robot mobile en environnement dynamique et incertain", Thèse de doctorat, Institut National de recherche en informatique et automatique, Université de Savoie, 2003.

Bibliographie

- [15] Siegwart, R., Nourbakhsh, R., "Introduction to autonomous mobile robots", The MIT Press, 2004.
- [16] Avina J, G., "Navigation visuelle d'un robot mobile dans un environnement d'extérieur semi-structuré". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [17] Bayle, B., "Robotique mobile : note de cours", école Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2009.
- [18] Durieu C., "Algorithmes de localisation d'un robot mobiles dans un milieu balisé par mesure de distance ou d'angle de gisement", Thèse de Doctorat, Université de Paris sud, 1989.
- [19] Iutenligne, "Principe de robot auto-balancé," 18-Jan-2013. [Online]. Available : <http://public.iutenligne.net/etudes-etrealisations/nardi/Segway/Principe/index.html>. [Accessed : 06-Jan-2016].
- [20] Mémoire de fin d'étude : Modélisation et commande non linéaire d'un pendule inversé rotatif, Présenté par : RABEHI Mohammed Rida /BERKOUNE Ali Abdessetar
- [21] H. Benariba, "Commande d'un robot mobile sur deux roues", mémoire de Magister, Université de Telemcen 2013.
- [22] R. P. M. Chan, K. A. Stol, C. R. Halkyard, Review of modelling and control of two-wheeled robots, Annual Reviews in Control, Vol.37, No.1, 89-103, 2013. [27]
- [23] X. F. Li, Y. F. Cui, X. S. Gao, et al. Dynamic modeling and controller design for a small-pendular two-wheeled robot. Transactions of Beijing Institute of Technology, Vol.34, No.10, 1049-1053, 2014.
- [24] K. Andrew "Standup and stabilization of the inverted pendulum. Submitted to the department of mechanical engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science," Massachusetts Institute of Technology. June 1999.
- [25] Franck Dernoncourt, « Introduction à la logique floue », www.openclassrooms.com, 2012.
- [26] S. Benmeziane, K. Kouche, « Commande Géométrique et Dynamique de Bras manipulateur « IR50p » par logique Floue », Mémoire de fin d'études, Université A. Mira Bejaia, 2004.

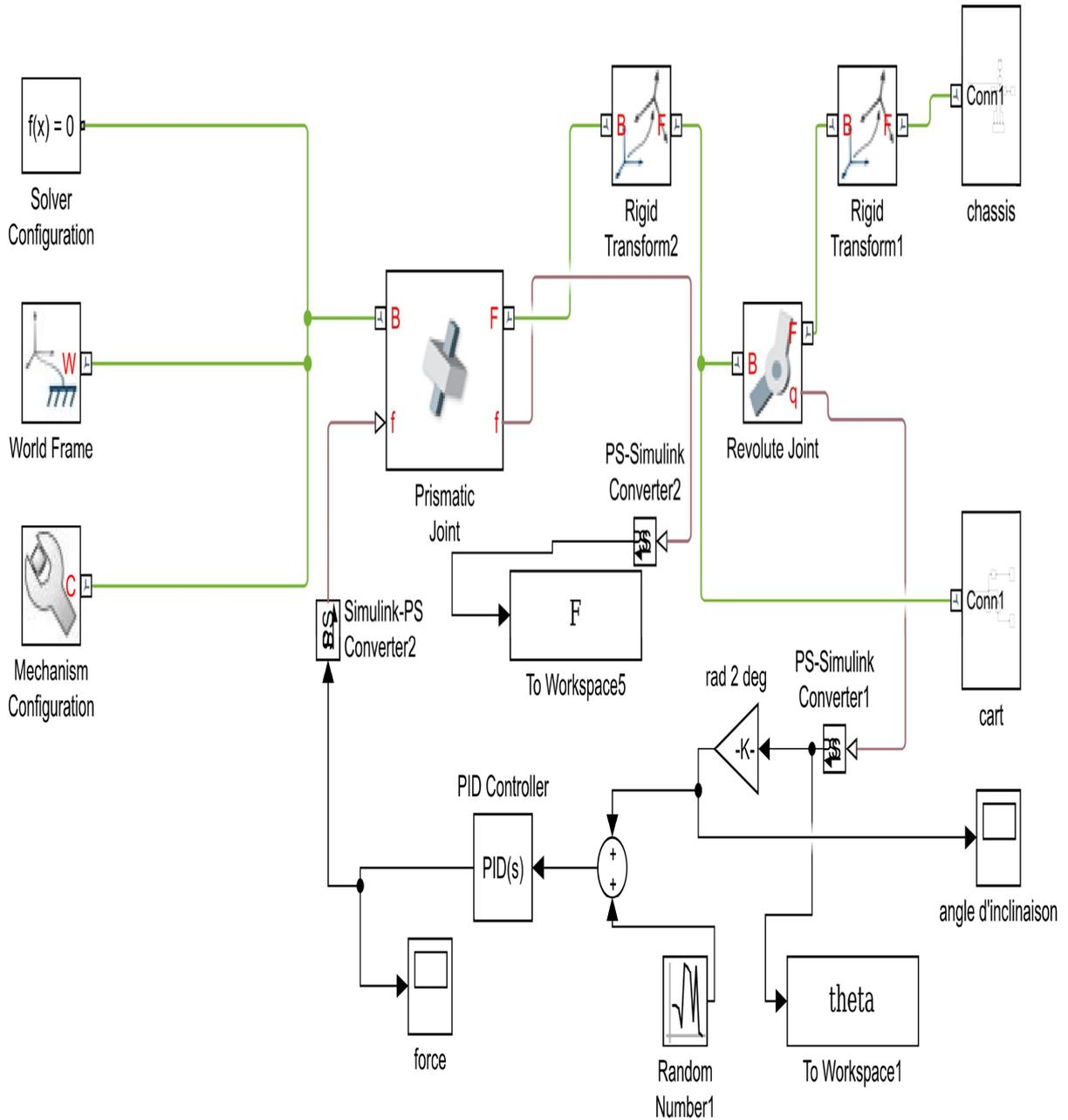
Bibliographie

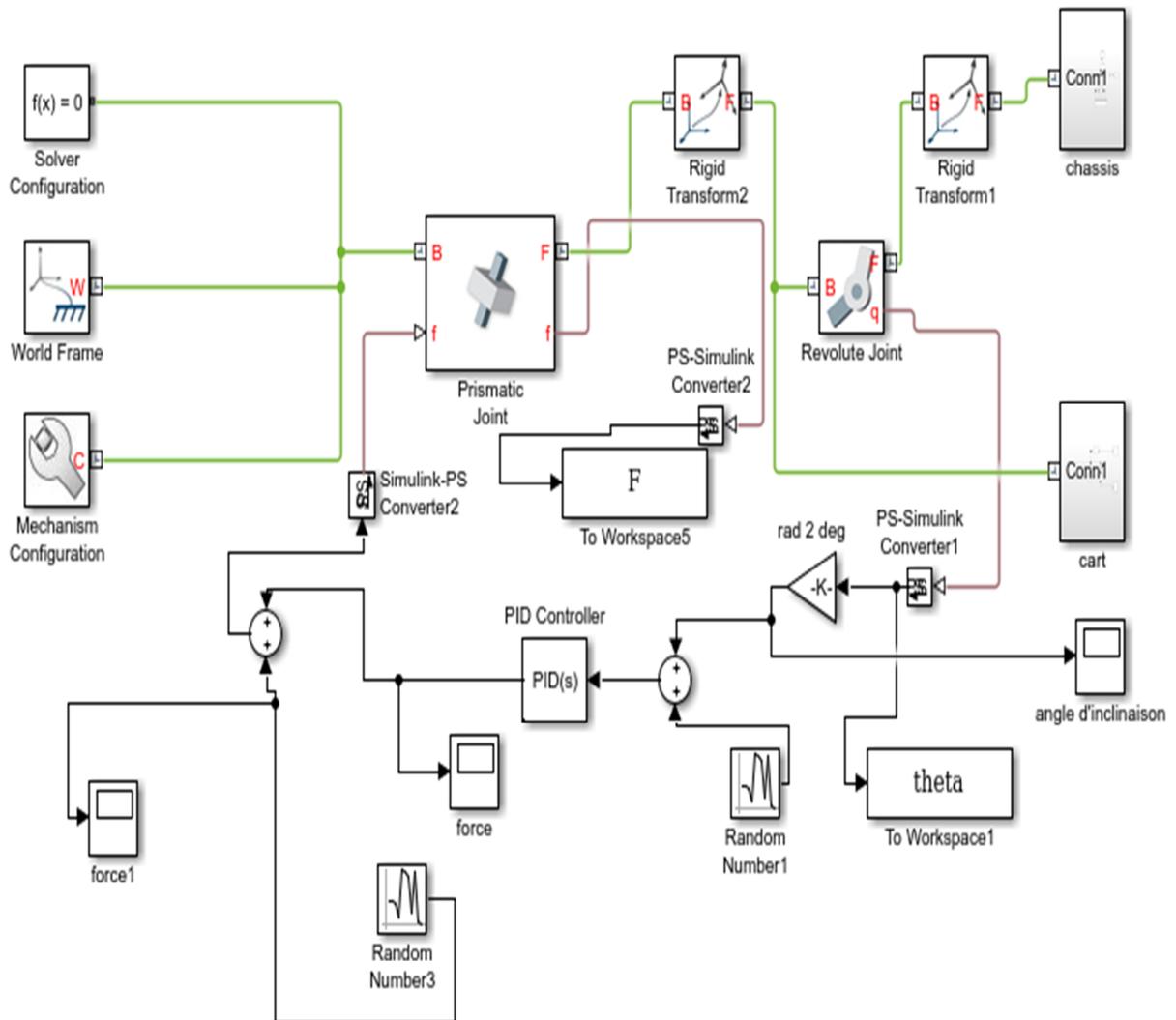
- [27] Moussaoui selma, « Commande floue d'un moteur a courant continu(MCC).
Comparaison avec la commande PID » Université de A. Mira de Bejaia, 2017.
- [28] B. Mendil, « Cours technique intelligence artificiel », », université A.mira de Bejaia,
2016.
- [29] Junfeng Wu, Wanying Zhang, and Shengda Wang “ A Two-Wheeled Self-Balancing
Robot with the Fuzzy PD Control Method, Hindawi Publishing Corporation
Mathematical Problems in Engineering Volume 2012.

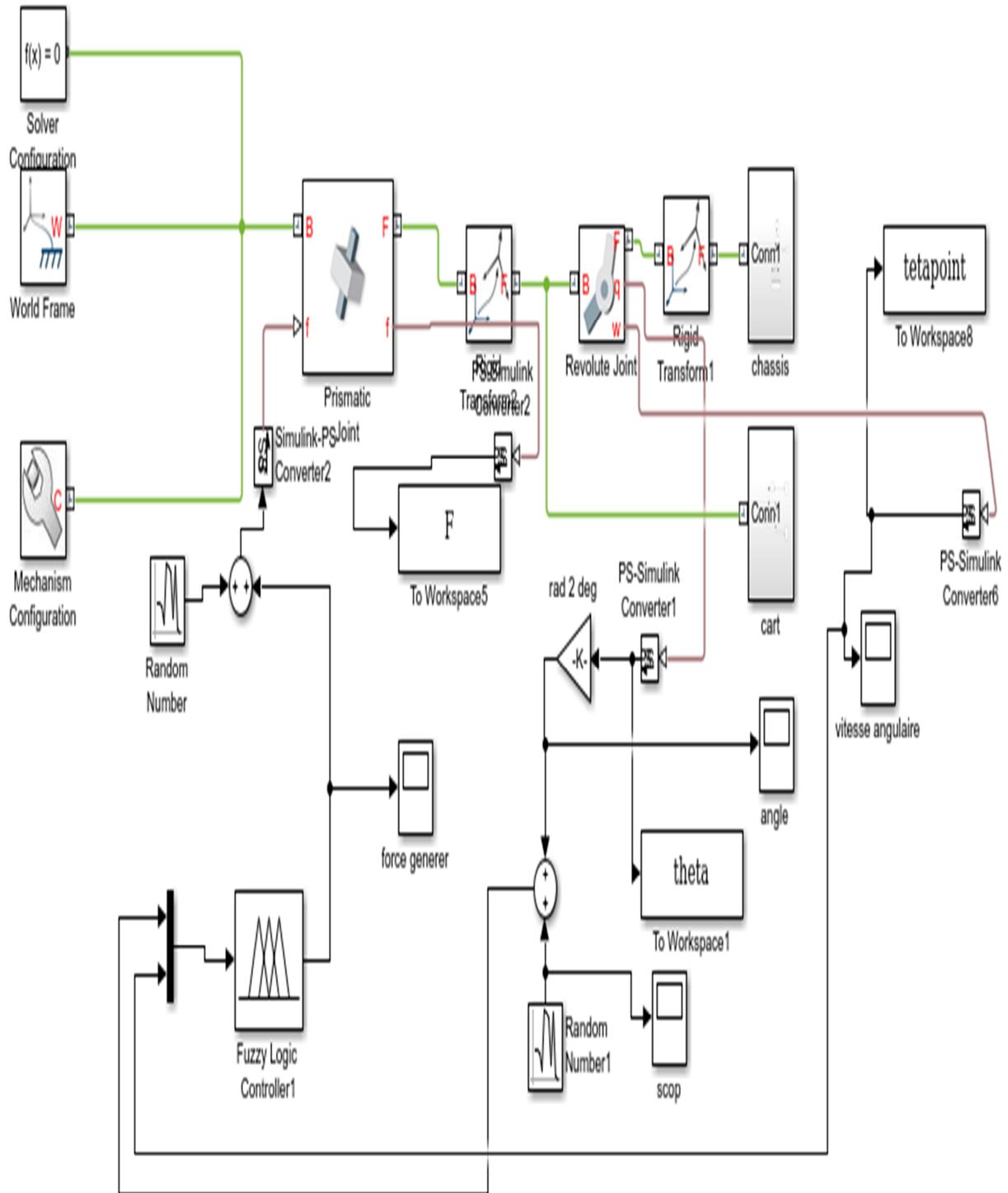
”

ANNEX

1 les schémas bloc du robot contrôlé par le régulateur PID







Résumé

Cette étude aborde le thème de la modélisation et de la commande d'un robot auto-équilibré à deux roues. L'objectif principal est d'améliorer la stabilité, l'agilité et l'adaptabilité de ces robots dans des environnements complexes.

Dans un premier temps, on à présenter le contexte et les enjeux liés aux robots auto-équilibrés à deux roues. Une problématique est posée, mettant en lumière les défis à relever pour optimiser la modélisation et la commande de ces robots.

Explorant ensuite les bases de fonctionnement de ce type de robot, en mettant l'accent sur sa modélisation mathématique, ses coordonnées spatiales et son modèle dynamique. Les différentes étapes de la réalisation pratique d'un robot auto-équilibré sur MATLAB sont également détaillées, notamment la construction des roues, du châssis et leur assemblage.

De plus, on à expliqués le principe de fonctionnement de la commande PID et la logique floue qui sont a leur tours présente deux approches couramment utilisées pour équilibrer un robot auto-équilibré. La commande PID utilise trois termes - proportionnel, intégral et dérivé - pour ajuster les actions de contrôle en fonction de l'erreur de position, la vitesse angulaire et la force générer par les moteurs. La logique floue, quant à elle, utilise des ensembles flous et des règles linguistiques pour prendre des décisions de contrôle adaptatives.

Un exemple pratique d'implémentation de ces approches sur des robots auto-équilibrés est présenté, en utilisant des outils et des simulations sur MATLAB. Les différentes stratégies de réglage des paramètres PID et les méthodes de conception des systèmes de logique floue sont également abordées pour optimiser la performance de l'équilibrage du robot.

Ce travail contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine de la robotique auto-équilibrée et ouvre des perspectives pour de futures recherches et développements dans ce domaine en constante évolution.

Abstract

This study addresses the topic of modeling and control of a two-wheeled self-balancing robot. The main objective is to improve the stability, agility, and adaptability of these robots in complex environments.

Firstly, the context and challenges related to two-wheeled self-balancing robots are presented. A problem statement is highlighted, emphasizing the challenges to be overcome in order to optimize the modeling and control of these robots.

Next, the basics of how these robots operate are explored, with a focus on their mathematical modeling, spatial coordinates, and dynamic model. The practical steps involved in building a self-balancing robot using MATLAB are also detailed, including the construction of wheels, chassis, and their assembly.

Furthermore, the working principles of both PID control and fuzzy logic are explained. These are two commonly used approaches for balancing a self-balancing robot. PID control utilizes three terms - proportional, integral, and derivative - to adjust control actions based on position error, angular velocity, and motor-generated force. On the other hand, fuzzy logic employs fuzzy sets and linguistic rules to make adaptive control decisions.

A practical example of implementing these approaches on self-balancing robots is presented, utilizing tools and simulations in MATLAB. Different strategies for tuning PID parameters and designing fuzzy logic systems are also discussed to optimize the balancing performance of the robot.

This work contributes to advancing knowledge in the field of self-balancing robotics and opens up prospects for future research and developments in this constantly evolving domain.

ملخص

تناقش هذه الدراسة موضوع نمذجة وتحكم الروبوت الموازن التلقائي ذو العجلتين. الهدف الرئيسي هو تحسين استقرار ورشاقة وقابلية التكيف لهذه الروبوتات في بيئات معقدة.

في البداية، يتم تقديم السياق والتحديات المتعلقة بالروبوتات الموازنة ذات العجلتين. يتم وضع مسألة، مسطرة الضوء على التحديات التي يجب التغلب عليها لتحسين نمذجة وتحكم هذه الروبوتات.

من ثم، يتم استكشاف أساسيات عمل هذا النوع من الروبوتات، مع التركيز على النمذجة الرياضية والإحداثيات الفضائية والنموذج الديناميكي الخاص بها. كما يتم تفصيل خطوات تنفيذ عملية لروبوت موازن ذاتي في بيئة ، بما في ذلك بناء العجلات والهيكل وتجميعها MATLAB.

والمنطق الضبابي، وهما نهجان يستخدمان بشكل شائع PID بالإضافة إلى ذلك، يتم شرح مبدأ عمل التحكم ثلاث مصطلحات - نسبي وتكاملي ومشتق - لضبط إجراءات PID لموازنة الروبوت الموازن التلقائي. يستخدم التحكم بناءً على خطأ الموضع وسرعة الدوران والقوة التي يولدها المحرك. أما المنطق الضبابي، فيستخدم مجموعات ضبابية وقواعد لغوية لاتخاذ قرارات تحكم متكيفة.

يتم تقديم مثال عملي لتنفيذ هذه النهجين على الروبوتات الموازنة التلقائية، باستخدام أدوات ومحاكاة في بيئة وأساليب تصميم أنظمة المنطق الضبابي PID يتم أيضاً مناقشة استراتيجيات مختلفة لضبط معاملات التحكم MATLAB. لتحسين أداء توازن الروبوت.

يساهم هذا العمل في تقدم المعرفة في مجال الروبوتات الموازنة التلقائية ويفتح آفاقاً للبحوث والتطوير المستقبلي في هذا المجال المتطور باستمرار.