

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Automatique
Spécialité Automatique et Informatique Industrielle

présenté par

HALITIM Ali Mounir

Stabilisation d'un pendule inversé mobile à deux roues

Proposé par : Pr GUESSOUM Abderrezak

Année Universitaire 2018-2019

Remerciements

Avant de vous convier à la présentation de ce travail, l'opportunité m'est donnée de témoigner mon gratitude à dieu tout puissant et ma reconnaissance à toutes les personnes qui par leur aide et leurs encouragements m'ont permis de réaliser ce mémoire.

*Je tiens à présenter mon plus profonde gratitude en premier lieu à mon encadreur le **Pr GUESSOUM Abderrezak**, qui a dirigé ce travail et a assuré son suivi avec une disponibilité et une écoute qui ont largement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.*

Mes remerciements vont également à tous les enseignants et responsables du département d'électronique au sein de l'université Saad Dahlab de Blida.

Un grand Merci à tous les enseignants que j'ai pu avoir durant tout mon cursus, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible.

ملخص:

العمل المنجز يهدف إلى تصميم نظام البندول المقلوب المتنقل ذي العجلتين وتثبيتته حول موقعه العمودي. يمكن تقسيم العمل المنجز إلى قسمين: القسم الأول يتطرق إلى انجاز جهاز استشعار متكون من أجهزة لقياس التسارع و سرعة الدوران لتقدير إمالة البندول المقلوب، بالإضافة إلى سرعته الزاوية. القسم الثاني يتناول النمذجة الديناميكية للهيكل، وتقديم صنفين من أصناف التحكم.

المفاتيح:

البندول المقلوب المتنقل، مرشح كالمان ، جهاز قياس التسارع، جهاز قياس سرعة الدوران

Résumé :

Le travail effectué vise à concevoir un système de pendule inversé mobile à deux roues et à le stabiliser autour de sa position verticale. Le travail accompli peut être décomposé en deux parties : La première partie concerne l'implémentation d'un capteur, constitué d'un accéléromètre et d'un gyromètre, pour l'estimation de l'inclinaison du pendule inversé, ainsi que sa vitesse angulaire. La deuxième partie traite de la modélisation dynamique de la structure, et de la présentation de deux types de commandes.

Mots-clés :

Pendule inversé mobile, filtre de Kalman, accéléromètre, gyromètre.

Abstract :

This work aims at designing a two-wheeled inverted pendulum system and stabilizing it around its vertical position. The carried out work can be broken down into two parts: The first part concerns the implementation of a sensor for estimating the tilt of the inverted pendulum, as well as its angular velocity, consisting of an accelerometer and a gyrometer. The second part deals with the dynamic modeling of the structure, and the presentation of two types of commands.

Keywords :

Mobile inverted pendulum, Kalman filter, accelerometer, gyrometer.

Listes des acronymes et abréviations

PID : Proportionnel, Intégral, Dérivatif

LQR : Linear Quadratic Regulation

ZMP : Zero Moment Point

I-PENTAR : Inverted PENDulum Type Assistant Robot

VTOL : Vertical Take-Off and Landing

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

3D : Trois Dimensions

IMU : Inertial Measurement Unit

MARG : Magnetic Angular Rate and Gravity sensor module

DDL : Degré De Liberté

ZRO : Zero Rate Output

EKF : Extended Kalman Filter

LIPO : Lithium Polymère

GPS : Global Positionning System

GPIO : General Purpose Input and Output

E/S : Entrées/Sorties

PWM : Pulse Width Modulation

I2C : Inter IC Communication

SPI : Serial Peripheral Interface

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART	3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 APPLICATIONS DU PENDULE INVERSE MOBILE A DEUX ROUES	3
1.2.1 <i>Systèmes de transport personnel</i>	4
1.2.2 <i>Fauteuils roulants robotisés</i>	6
1.2.3 <i>Système de transport de bagages</i>	7
1.2.4 <i>Etude et analyse des mouvements des animaux</i>	7
1.2.5 <i>Conception de robots bipèdes</i>	8
1.2.6 <i>Lancement de fusées</i>	9
1.2.7 <i>Contrôle du décollage et atterrissage verticaux (VTOL) d'un aéronef</i>	9
1.2.8 <i>Jeux de boxe pour robots</i>	10
1.3 FUSION DE DONNEES.....	10
1.4 FILTRE DE KALMAN	11
1.5 CAPTEURS DE MOUVEMENT.....	12
1.5.1 <i>Capteurs mécaniques</i>	13
1.5.2 <i>Capteurs électromagnétiques</i>	13
1.5.3 <i>Capteurs acoustiques</i>	14
1.5.4 <i>Capteurs optiques</i>	14
1.6 SYSTEMES DE CONTROLE	15
1.7 CONCLUSION	16
CHAPITRE 2 ESTIMATION DE L'INCLINAISON:	
PRINCIPES THEORIQUES ET SIMULATION	17
2.1 INTRODUCTION	17
2.2 SYSTEMES DE MESURES DE L'ATTITUDE.....	18
2.2.1 <i>Gyroscope</i>	18
2.2.2 <i>IMU (Inertial Measurement Unit)</i>	19
2.2.3 <i>MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)</i>	19
2.3 ESTIMATION DE L'INCLINAISON DU PENDULE INVERSE	21
2.3.1 <i>Estimation de l'inclinaison en utilisant l'accéléromètre</i>	21
2.3.2 <i>Estimation de l'inclinaison en utilisant le gyromètre</i>	22
2.3.3 <i>Estimation de l'inclinaison par fusion de données</i>	23

2.3.4	<i>Algorithme du filtre de Kalman étendu pour l'estimation de l'inclinaison du pendule inversé</i>	27
2.4	CONCLUSION	29
CHAPITRE 3 MODELISATION ET COMMANDE DU PENDULE INVERSE		
MOBILE A DEUX ROUES 30		
3.1	INTRODUCTION	30
3.2	MODELISATION DYNAMIQUE	31
3.2.1	<i>Généralités</i>	31
3.2.2	<i>Modélisation dynamique du pendule inversé mobile à deux roues</i>	32
3.3	CONTROLE DU PENDULE INVERSE MOBILE A DEUX ROUES	35
3.3.1	<i>Commande PID</i>	35
3.3.2	<i>Commande LQR</i>	39
3.3.3	<i>Analyse des résultats</i>	42
3.4	CONCLUSION	43
CHAPITRE 4 ARCHITECTURE MATERIELLE ET IMPLEMENTATION		
LOGICIELLE. 44		
4.1	INTRODUCTION	44
4.2	VUE D'ENSEMBLE DU SYSTEME	44
4.3	COMPOSITION DU SYSTEME	45
4.3.1	<i>Unité de mesure inertielle (IMU) à 9ddl MPU-9250</i>	46
4.3.2	<i>Ordinateur miniature Raspberry Pi 3 modèle B+</i>	48
4.3.3	<i>Moteurs à courant continu GM37-545</i>	52
4.3.4	<i>Double pont en H L298n</i>	53
4.3.5	<i>Batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P Lipo</i>	54
4.4	IMPLEMENTATION DE L'ALGORITHME D'ESTIMATION DE L'INCLINAISON	55
4.4.1	<i>Acquisition des données</i>	56
4.4.2	<i>Implémentation du filtre de Kalman étendu</i>	58
4.5	CONTROLE DES MOTEURS	60
4.6	ANALYSE DES PERFORMANCES	62
4.7	CONCLUSION	65
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....66		

Liste des figures

Figure 1-1 Prototype d'un système de transport personnel à base d'un pendule inversé mobile..	4
Figure 1-2 Robot TransBOT	5
Figure 1-3 modèle Segway X2 SE	5
Figure 1-4 Etapes permettant à un fauteuil roulant de monter une marche.....	6
Figure 1-5 Modèle iBot 4000	6
Figure 1-6 Prototype d'un système de transport de bagages	7
Figure 1-7 Modélisation des mouvements des animaux à l'aide de pendule inversé	8
Figure 1-8 Modélisation des mouvements d'un robot bipède à l'aide de pendule inversé	8
Figure 1-9 Robot humanoïde I-PENTAR	9
Figure 1-10 Control d'un décollage vertical d'un drone	10
Figure 1-11 Combat entre deux Boxingbots	10
Figure 1-12 Exemples de capteurs mécaniques (Accéléromètre, Inclinomètre, Gyromètres) ...	13
Figure 1-13 Exemples de capteurs électromagnétiques	13
Figure 1-14 Exemples de capteurs optiques.....	14
Figure 2-1 Gyroscopie moderne.....	18
Figure 2-2 Exemple d'un IMU (MEMSENSE IMU 3030)	19
Figure 2-3 Exemple d'une centrale inertielle à base de MEMS	19
Figure 2-4 Principe de fonctionnement d'un accéléromètre	20
Figure 2-5 Utilisation de l'accéléromètre pour le calcul de l'inclinaison du pendule	21
Figure 2-6 Calcul de l'inclinaison du pendule en utilisant l'accéléromètre	22
Figure 2-7 Calcul de l'inclinaison du pendule en utilisant le gyromètre	23
Figure 2-8 Principe de fonctionnement du filtre de Kalman.....	25
Figure 2-9 Algorithme du filtre de Kalman étendu	28
Figure 2-10 Calcul de l'inclinaison du pendule avec le filtre de Kalman étendu	29
Figure 3-1 Description géométrique du système.....	32
Figure 3-2 Réponse du modèle dynamique sans forces externes	34
Figure 3-3 Schéma classique d'une commande PID.....	36
Figure 3-4 Réponse du modèle dynamique avec un contrôleur PD	38
Figure 3-5 Schéma classique d'une commande LQR	39
Figure 3-6 Réponse du modèle dynamique avec un contrôleur LQR	41
Figure 4-1 Vue d'ensemble du système du pendule inversé à deux roues.....	45
Figure 4-2 Capteurs, actionneurs et interfaces électroniques utilisés.....	46

Figure 4-3 MPU-9250	46
Figure 4-4 Orientation des axes de l'accéléromètre, du gyroscope (gauche) et du magnétomètre (droite).....	48
Figure 4-5 Raspberry Pi 3 modèle B+.....	49
Figure 4-6 Moteur GM37-545.....	52
Figure 4-7 Double pont en H l298n	53
Figure 4-8 Principe de la modulation de largeur d'impulsion (PWM)	53
Figure 4-9 Principe du pont en H.....	54
Figure 4-10 Batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P Lipo	55
Figure 4-11 Schéma bloc d'estimation de l'inclinaison	56
Figure 4-12 Connexions physiques entre le Raspberry Pi et le MPU-9250.....	57
Figure 4-13 Organigramme de l'acquisition des données du MPU-9250.....	58
Figure 4-14 Organigramme de l'implémentation du filtre de Kalman étendu.....	59
Figure 4-15 Schéma bloc du contrôle des moteurs	60
Figure 4-16 Connexions physiques entre le Raspberry Pi, le l298n et les moteurs	60
Figure 4-17 Organigramme du contrôle des moteurs à courant continu	61
Figure 4-18 Flux d'informations entre les différents composants du système	62
Figure 4-19 Système réalisé	62
Figure 4-20 Réponse du système en absence d'une perturbation externe.....	63
Figure 4-21 Réponse du système en présence d'une perturbation externe	64
Figure 4-22 Réponse du système en présence d'une perturbation externe	64

Liste des tableaux

Tableau 4-1 Principales caractéristiques du capteur MPU-9250	48
Tableau 4-2 Tableau comparatif entre Arduino Uno rev3 et le Raspberry pi 3.....	50
Tableau 4-3 Principales caractéristiques du moteur GM37-545.....	52
Tableau 4-4 Principales caractéristiques de la batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P..	55

Introduction générale

Le caractère unique du système à pendule inversé a suscité l'intérêt de nombreuses recherches en raison de sa nature instable. L'idée d'un robot mobile à deux roues à base de pendule inversé est apparue ces dernières années et a été développée par des chercheurs en systèmes de contrôle à travers le monde entier.

Ces robots sont caractérisés par une mobilité avancée qui leur facilite la navigation sur différents terrains, leur offre la possibilité d'opérer dans des espaces étroits et de tourner des virages serrés. Ces capacités ont le potentiel de résoudre un certain nombre de défis dans l'industrie et la société. Par exemple, un fauteuil roulant motorisé utilisant cette technologie donnerait à l'opérateur une plus grande mobilité et donc un accès aux endroits qui étaient inaccessible auparavant. Les robots construits à l'aide de cette technologie permettent aux humains de parcourir de courtes distances dans une zone limitée ou dans des usines, au lieu d'utiliser des voitures qui sont plus polluants et beaucoup plus gourmands en énergie.

La plate-forme de robot pendule inversé à deux roues s'est révélée être un excellent banc d'essai pour la fusion de capteurs utilisant le filtre de Kalman. Une configuration de filtre de Kalman étendu combinant un gyroscope et un accéléromètre est mise en œuvre pour obtenir une estimation précise de l'angle d'inclinaison et de sa dérivée.

L'instabilité des systèmes à pendule inversé a toujours été un excellent banc d'essai pour les expérimentations sur la théorie du contrôle. Par conséquent, le but de ce travail est également d'étudier la pertinence et les performances de différents systèmes de contrôle, en l'occurrence un contrôleur PD et un contrôleur LQR dans le but de stabiliser le système.

Le présent mémoire décrit la méthodologie suivie pour l'achèvement de notre travail, il est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de différentes applications concernant ce système. Il détaille l'utilisation d'un bon nombre d'algorithmes dédiés à la fusion de données notamment le filtre de Kalman. Il fournit aussi une introduction à la technologie existante pour l'estimation de l'inclinaison du pendule.

Le deuxième chapitre traite la base théorique nécessaire au calcul de l'inclinaison, ce calcul nécessite l'utilisation de différents capteurs, à savoir un accéléromètre à trois axes et un gyromètre à trois axes. La fusion des données provenant de ces différents capteurs permet de remonter à l'inclinaison recherchée, ainsi que la discussion des performances de l'algorithme proposé.

Le troisième chapitre donne une description de la structure du système du pendule inversé mobile à deux roues, ainsi que la méthodologie suivie pour l'établissement du modèle dynamique du système. En ce qui concerne la commande de la structure, les résultats de l'implémentation de deux types de commandes seront présentés.

Le dernier chapitre est consacré à l'assemblage de toutes les constituantes du système et à l'évaluation des performances obtenues.

Chapitre 1 Etat de l'art

1.1 Introduction

Les recherches traitant le sujet d'équilibrage d'un robot mobile à deux roues basé sur le modèle du pendule inversé ont pris de l'ampleur au cours des dix dernières années dans plusieurs laboratoires de robotique du monde entier, cela est dû à la dynamique instable du système.

Il est essentiel de procéder à une recherche bibliographique avant d'entreprendre des projets de recherche, car cela fournira les informations indispensables sur les technologies disponibles et les méthodologies utilisées par d'autres chercheurs à travers le globe entier sur le sujet. Cette recherche bibliographique permettra au chercheur d'identifier les sources de données, de comparer et situer ses travaux et de contribuer à l'enrichissement de ce domaine de recherche.

Ce chapitre fournit un résumé condensé de revues et d'ouvrages sur des sujets clés liés à l'équilibrage d'un pendule inversé mobile à deux roues.

1.2 Applications du pendule inversé mobile à deux roues

Le problème du pendule inversé a suscité l'intérêt de plusieurs ingénieurs dans le domaine du contrôle. Le caractère unique et la large application de la technologie dérivée de ce système instable ont suscité l'intérêt de nombreuses recherches et passionnés de robotique à travers le monde. Au cours des dernières années, les chercheurs ont appliqué l'idée d'un modèle de pendule inversé mobile à divers problèmes, tels que la conception d'allures de marche pour robots humanoïdes, étude et analyse des mouvements de quelques animaux, conception de fauteuils roulants et de

systèmes de transport, etc. Certaines applications du pendule inversé sont présentées dans ce qui suit:

1.2.1 Systèmes de transport personnel

On parle beaucoup de voitures électriques ces derniers temps et de leurs bienfaits sur l'environnement, ces derniers sont entrain de remplacer progressivement les voitures avec moteur à combustion. Les principaux constructeurs automobiles investissent de plus en plus dans les véhicules électriques et savent pertinemment que les véhicules électriques représentent le futur de l'automobile [1].

Dans la robotique, les robots mobiles peuvent être considérés comme un véhicule électrique s'ils transportent des êtres humains. Les robots mobiles ont le potentiel de transporter des objets ou des êtres humains. La plupart des recherches sur les robots mobiles ont porté sur les technologies autonomes (sans conducteur) afin de servir dans de nombreux domaines tels que la livraison, missions de recherche et de sauvetage, exploration de lieux extrêmes, etc.

Des chercheurs du laboratoire d'électronique industrielle à l'Institut fédéral suisse de technologie ont pu construire un prototype réduit d'un système de transport pour individu basé le principe du pendule inversé mobile où un poids est attaché au système afin de simuler le poids du conducteur humain [2].

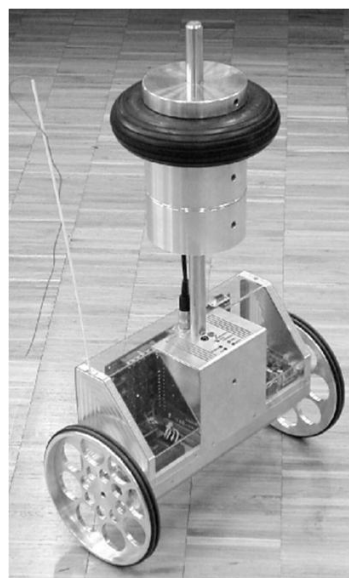


Figure 1-1 Prototype d'un système de transport personnel à base d'un pendule inversé mobile

Des chercheurs du laboratoire systèmes intelligents et ingénierie émotionnelle à l'université nationale de Chungnam en Corée du sud ont mené une étude de la faisabilité d'un système pouvant transporter un humain assis. A l'issu de cette étude, Un nouveau robot mobile TransBOT semblable à une voiture est conçu, contrôlé et testé [3].



Figure 1-2 Robot TransBOT

Inventé par l'ingénieur Dean Kamen et développé par la firme américaine Segway Inc, le système de transport Segway est le nouveau mode de transport motorisé le plus écologique et le plus économique par personne et par kilomètre [4]. Ce dernier mesure l'inclinaison du conducteur, grâce à des gyromètres et des accéléromètres, qui relèvent l'inclinaison du conducteur vis-à-vis de la verticale une centaine de fois par seconde. Le véhicule remet alors le conducteur en équilibre en exerçant sur le sol des forces qui propulseront la machine dans la direction du penchement. Le gyropode Segway peut se déplacer dans des endroits où ni voiture ni vélo ne pourront aller, par exemple, dans des boutiques, des bureaux, des commerces, des aéroports, des ascenseurs ou des trains.



Figure 1-3 modèle Segway X2 SE

1.2.2 Fauteuils roulants robotisés

L'augmentation rapide du pourcentage de la population âgée dans des pays comme le Japon a incité les chercheurs à développer des fauteuils roulants robotisés pour aider les handicapés à se déplacer et à manœuvrer des petites marches ou des bordures de routes. Un fauteuil roulant robotisé se basant sur le contrôle du pendule inversé a été proposé de telle sorte qu'une personne en fauteuil roulant peut grimper une marche [5]. Le fauteuil roulant proposé se déplace sur un sol plat à l'aide de quatre roues afin de maintenir la stabilité. Quand le fauteuil roulant se déplace juste devant une marche, le fauteuil roulant lève les roues avant, et maintient le contrôle du pendule inversé. La personne occupant le fauteuil peut aller en avant ou en arrière en inclinant son corps.

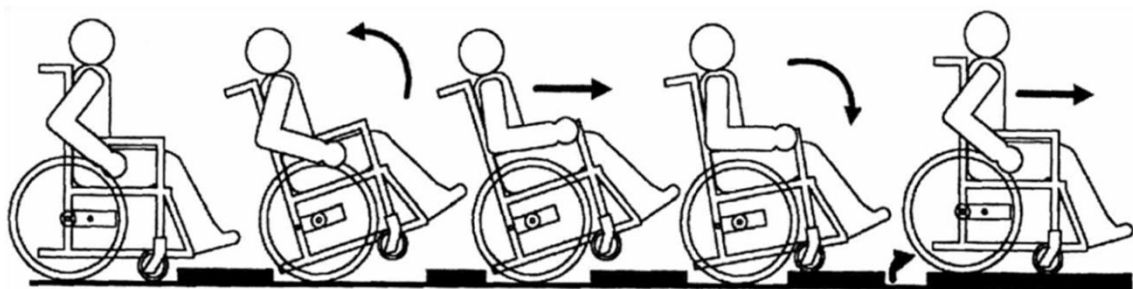


Figure 1-4 Etapes permettant à un fauteuil roulant de monter une marche

L'iBot est un exemple de fauteuil roulant robotisé. Il permet aux utilisateurs de monter sur les trottoirs et de monter et descendre les escaliers. Il peut également relever son siège pour permettre à l'utilisateur d'atteindre des endroits plus hauts.



Figure 1-5 Modèle iBot 4000

1.2.3 Système de transport de bagages

D'autres recherches ont été conduites permettant de concevoir un prototype de système de transport automatique de bagages par un robot type pendule inversé et de réaliser une fonction de navigation dans un environnement réel sans observateur externe ou capteurs alternatifs. Le système est constitué de deux sous-systèmes coopératifs: un sous-système de contrôle d'équilibrage et de déplacement et un sous-système de navigation [6].

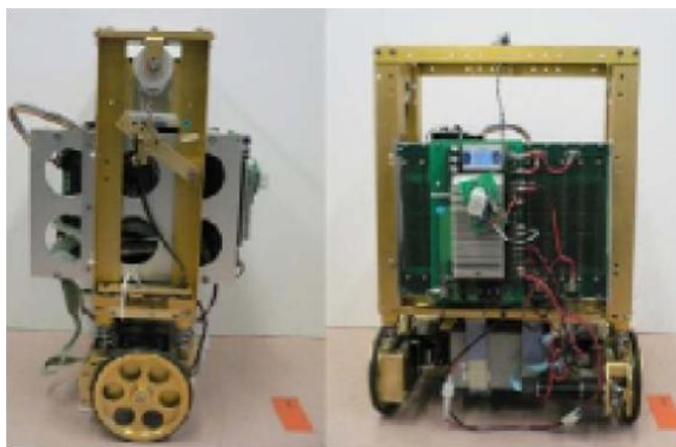


Figure 1-6 Prototype d'un système de transport de bagages

1.2.4 Etude et analyse des mouvements des animaux

Le mouvement des animaux est considéré comme l'une des principales sources d'inspiration pour la conception de robots à mobilité basée sur des jambes. Ces robots sont capables de naviguer dans des environnements à reliefs non uniformes ce qui leur permettraient d'accéder à des environnements inhospitaliers et hostiles [7,8].

Chez un animal qui marche avec ses jambes, le centre de la masse est analogue à un pendule inversé. À mi-parcours, le centre de masse atteint son point le plus élevé. Comme un pendule, les énergies potentielles et cinétiques du corps sont échangées de manière cyclique [9].

Chez un animal qui court, la jambe agit comme un ressort, se comprimant pendant la phase de freinage et reculant pendant la phase propulsive. À mi-course, le centre de masse atteint son point le plus bas. Comme un simple système masse-ressort,

les énergies potentielles et cinétique sont stockées sous forme d'énergie élastique pendant la phase de freinage et récupérées pendant la phase de propulsion [9].

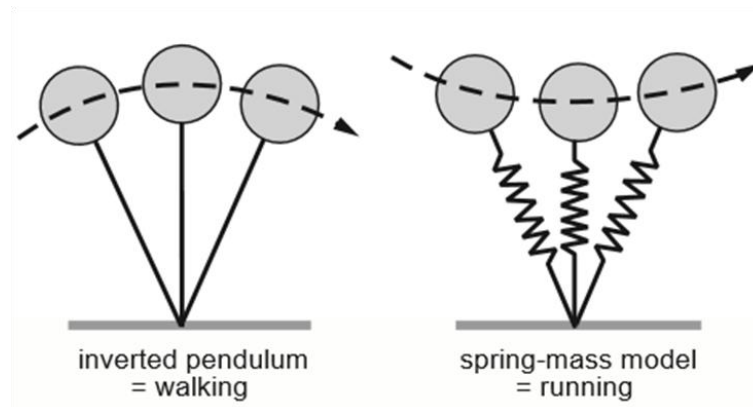


Figure 1-7 Modélisation des mouvements des animaux à l'aide de pendule inversé

1.2.5 Conception de robots bipèdes

Des chercheurs ont modélisé le mouvement de la marche d'un humain en tant que pendule inversé afin de concevoir une méthode de génération de mouvement en temps réel d'un robot humanoïde qui contrôle le centre de gravité par manipulation indirecte du Point à zéro moment (ZMP). La réponse en temps réel fournit aux robots humanoïdes une haute mobilité [10]. Pour cela, on suppose que le robot bipède a un point de masse dans la hanche et que le genou de soutien soit dans une position constante. Pour ces conditions, le modèle du pendule inversé peut être utilisé pour modéliser les mouvements dynamiques de la structure du robot bipède [11].

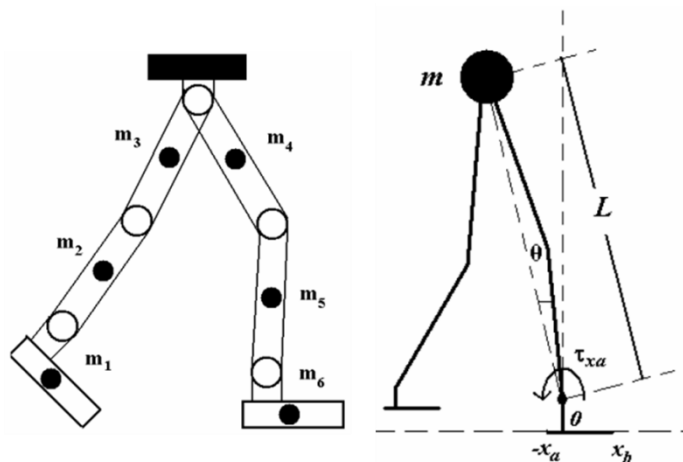


Figure 1-8 Modélisation des mouvements d'un robot bipède à l'aide de pendule inversé

Shuuji Kajita et Kazuo Tani ont effectués des expériences qui ont démontré que durant la phase d'appui du pied, la dynamique du robot est entièrement similaire à celle d'un pendule inversé [12].

I-PENTAR (Inverted PENDulum Type Assistant Robot) est un robot de type humanoïde composé d'un corps et de bras destiné pour la sécurité en milieu de travail conçu à base d'une plate forme mobile avec pendule inversé [13].

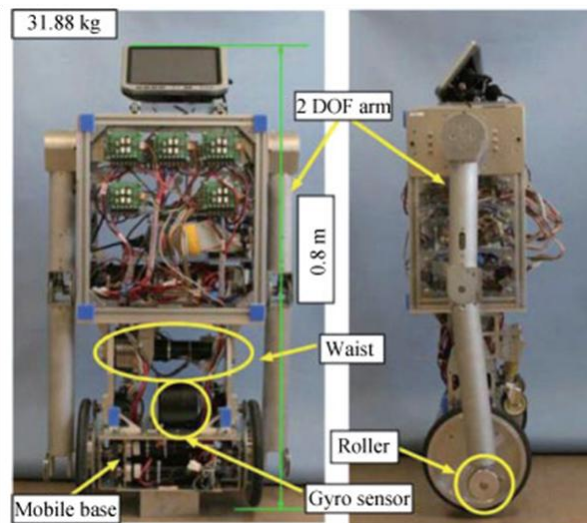


Figure 1-9 Robot humanoïde I-PENTAR

1.2.6 Lancement de fusées

Le modèle de contrôle du pendule inversé est similaire à celui du lancement d'une fusée [14]. Durant la phase du lancement de la fusée, le contrôle de cette dernière est équivalent à la stabilisation d'un pendule inversé.

1.2.7 Contrôle du décollage et atterrissage verticaux (VTOL) d'un aéronef

Des chercheurs à l'université de Tohoku au Japon ont pu contrôler un drone en vol stationnaire en implémentant une stratégie de contrôle basée sur le pendule inversé [15].



Figure 1-10 Control d'un décollage vertical d'un drone

1.2.8 Jeux de boxe pour robots

Boxingbot est un système de pendule inversé, il a été mis en œuvre, contrôlé et testé pour les jeux de boxe. Les boxingbots sont contrôlés à distance par un opérateur via une communication sans fil. Une technique de contrôle intelligente est appliquée aux Boxingbots pour avoir une robustesse contre les perturbations extérieures telles que les coups d'un adversaire boxingbot ou le frottement de surfaces irrégulières [16].

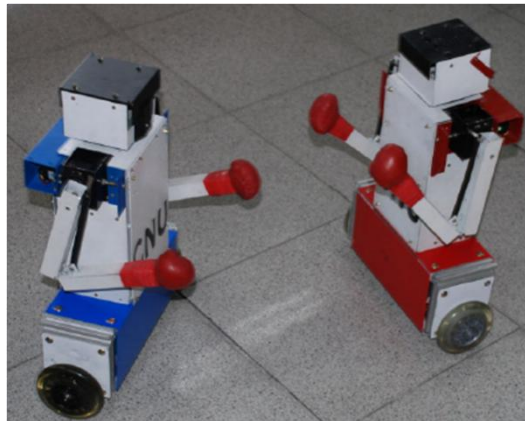


Figure 1-11 Combat entre deux Boxingbots

1.3 Fusion de données

Pour les robots mobiles, l'exactitude et la fiabilité des informations reçues sont plus que jamais essentielles car ces systèmes sont de plus en plus autonomes. Ces exigences imposent l'utilisation de capteurs très onéreux. La technologie de fusion de capteurs, où les données de plusieurs capteurs bas de gamme sont combinés pour

fournir une estimation précise est la solution largement utilisée pour surmonter la cherté des capteurs de précision. Les systèmes de fusion de données sont maintenant utilisés dans divers domaines tels que les réseaux de capteurs, la robotique, le traitement vidéo et image, et la conception de systèmes intelligents, etc.

Le travail de Barshan & Durrant-Whyte constitue le noyau de plusieurs recherches visant à utiliser la technologie de fusion de données pour des applications de robots mobiles. Ce travail évalue les performances de plusieurs capteurs utilisés dans un système de navigation inertielle et fournit un aperçu de la mise en œuvre d'un filtre de Kalman étendu pour de tels systèmes [17].

L'adaptabilité et la flexibilité de la technologie de fusion de données a inspiré son utilisation dans de nombreuses configurations. Par exemple, l'une des configurations consiste à combiner un gyromètre et un odomètre ('Gyrodometry') pour estimer la position d'un robot mobile, cette méthode réduit considérablement les erreurs d'odométrie qui se produisent généralement lorsque les roues du robot perdent leur adhérence au sol [18]. Une autre configuration utilise le filtre de Kalman pour combiner l'information de vitesse reçue d'un gyromètre à fibre optique et la position des roues obtenue à partir des encodeurs afin d'effectuer un contrôle optimal de trajectoire d'un robot mobile [19].

Le filtre de Kalman est utilisé dans un bon nombre de systèmes de fusion de données. Le filtre utilise les caractéristiques statistiques d'un modèle de mesure permettant de déterminer de manière récursive les estimations de la donnée recherchée. La nature récursive du filtre le rend adaptable à une utilisation dans des systèmes sans grandes capacités de stockage de données.

1.4 Filtre de Kalman

Une importante classe des problèmes théoriques et pratiques rencontrée en communication ou en contrôle sont de nature statistique, tel que la prédiction des signaux aléatoires, séparation des signaux aléatoire du bruit et détection des signaux de forme connu en présence de bruit. Dans son travail, Wiener a démontré que les problèmes cités auparavant conduisent à l'équation dite de Wiener-Hopf, il a également donné une méthode (factorisation spectrale) pour la solution de cette équation intégrale

[20]. Cette méthode est soumise à de nombreuses contraintes qui limitent sérieusement son utilité pratique [21].

En 1960, Kalman a publié un article intitulé "Une nouvelle approche du filtrage linéaire et des problèmes de prédiction" [21]. Les recherches de Kalman visaient à surmonter les limitations des filtres de Weiner-Hopf dans la résolution des problèmes de nature statistique. Le processus décrit ici est connu sous le nom du filtre de Kalman.

Le filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui fournit une solution efficace à la méthode des moindres carrés (Least Square Method) [22]. Le filtre est très puissant du fait qu'il fournit une estimation des états passés, présents et même futurs.

Un certain nombre de travaux ont été menés sur le filtrage de Kalman depuis la publication de l'article original. Une des complications pour comprendre la méthodologie suivie est le manque de notation standard et simplifiée pour les équations du filtre. Comme le sujet du filtrage de Kalman était relativement nouveau à cette époque, le manque de la continuité dans ces livres et la notation différente utilisée dans certains chapitres ont entravé la compréhension du travail présenté.

Des ouvrages ont suivi [23,24] permettant d'expliquer d'une manière pratique et simplifiée le principe du filtre proposé par Kalman. Bien que les deux livres mentionnés fournissent des aspects pratiques de la mise en œuvre du filtre de Kalman, le livre de Maybeck est beaucoup plus destiné aux ingénieurs car il couvre plus en profondeur les étapes permettant la mise en œuvre du filtre de Kalman. Le deuxième chapitre fournit un développement détaillé du filtre, Ce chapitre adopte la notation utilisée par Maybeck dans son livre. Le filtrage de Kalman permet une meilleure estimation de l'état futur d'un système malgré l'inexactitude de ses mesures et les changements imprévisibles dans ce système.

1.5 Capteurs de mouvement

Ce sont des interfaces motrices indispensables pour les techniques d'estimation de l'orientation. Parmi ces capteurs, nous pouvons citer :

1.5.1 Capteurs mécaniques

Les capteurs mécaniques sont des capteurs basés sur des principes mécaniques et qui fournissent une mesure à un degré de liberté. Pour réaliser des capteurs à plusieurs degrés de liberté, l'assemblage de plusieurs capteurs s'impose.

Les différents types de capteurs mécaniques utilisés sont les accéléromètres, les inclinomètres et les gyromètres.

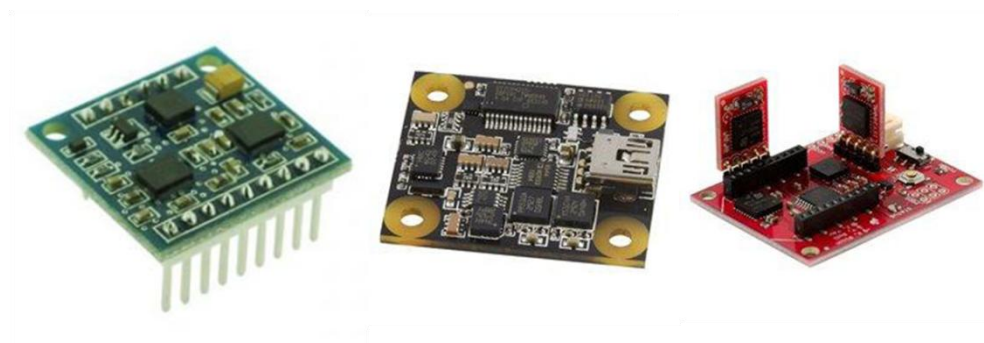


Figure 1-12 Exemples de capteurs mécaniques (Accéléromètre, Inclinomètre, Gyromètres)

1.5.2 Capteurs électromagnétiques

Les capteurs électromagnétiques les plus connus sont ceux à champ alternatif ou à champ impulsionnel. Ils présentent de bonnes performances quant à la précision des mesures. Ils ont pour principaux inconvénients, leur coût élevé, leurs liaisons filaires qui limitent la liberté de mouvement et surtout l'impossibilité de les employer dans un environnement métallique.



Figure 1-13 Exemples de capteurs électromagnétiques

Parmi les capteurs électromagnétiques les plus répandus, il existe ceux qu'on appelle compas, utilisant le champ magnétique terrestre pour déduire l'orientation par

rapport au nord magnétique. Combinés avec un accéléromètre et un gyroscope, ils donnent naissance à des capteurs d'orientation à technologie inertielle à trois degrés de liberté.

1.5.3 Capteurs acoustiques

Ce type de capteurs a pour principe la mesure de distances déterminées par des temps de propagation, il existe aussi des capteurs acoustiques basés sur la mesure du déphasage entre l'émission et la réception sonore.

Les capteurs à ultrasons font face à plusieurs inconvénients : ils sont influencés par la température ambiante, sont facilement bruités par tout appareil qui émet des ultrasons et par les échos sur les parois environnantes, et surtout leur émission est très directive, ce qui limite l'espace de mesure. En contrepartie, les capteurs à ultrasons ont pour avantages leur faible coût comparativement aux capteurs électromagnétiques et, évidemment, la possibilité de fonctionner dans un environnement métallique.

1.5.4 Capteurs optiques

Ces dernières années, les capteurs optiques ont pris le dessus sur les capteurs magnétiques dans les systèmes de mesure de l'orientation: d'un côté, la technologie des capteurs magnétiques n'a pas beaucoup progressé, leur coût n'a pas vraiment diminué et l'espace de travail est resté limité. Tandis que de l'autre côté, la technologie des capteurs optiques a progressé considérablement grâce au développement des algorithmes utilisés en vision par ordinateur.



Figure 1-14 Exemples de capteurs optiques

1.6 Systèmes de contrôle

Le développement du système de contrôle est essentiel pour garantir l'équilibrage du robot, alors qu'il existe une multitude de stratégies de contrôle pouvant être appliquées pour stabiliser le robot, l'objectif principal est de contrôler le système à moindre coût et efficacement sans sacrifier la robustesse et la fiabilité du contrôleur. La différence dans la stratégie de contrôle dépendra principalement de la façon dont le système est modélisé et comment l'information sur l'inclinaison est obtenue.

Les stratégies de contrôle pour un tel système peuvent être divisées en deux modèles distincts, à savoir, un modèle de contrôle linéaire ou un modèle de contrôleur non linéaire. Un contrôleur linéaire passe souvent par une linéarisation de la dynamique du système autour d'un point de fonctionnement. Cette méthode est généralement suffisante pour l'équilibrage du système. Un contrôleur non linéaire utilise le modèle dynamique non linéaire du système afin de concevoir un contrôleur.

Les réseaux de neurones peuvent être utilisés pour contrôler des systèmes non linéaires instables à l'image du pendule inversé [25,26]. D'autres travaux se sont intéressés à l'implémentation de contrôleur à logique floue pour la stabilisation du pendule inversé [27,28]. Le contrôle par mode glissant a suscité à son tour l'intérêt de plusieurs chercheurs [29,30].

La recherche documentaire que nous avons menée a révélé que la majorité des travaux qui concernaient la commande non linéaire s'est intéressée au problème de stabilisation du pendule inversé non mobile, cela est du principalement au fait que les contrôleurs non linéaires requièrent une grande puissance de calcul souvent indisponible sur des plateformes mobiles.

Bien que les méthodes de contrôle non linéaire fournissent une plus grande robustesse, la complexité et les difficultés de mise en œuvre de ce type de contrôleurs ont poussé la majorité des chercheurs à opter pour l'approche du contrôleur linéaire pour la stabilisation et le contrôle du pendule inversé mobile à deux roues.

Les contrôleurs linéaires, par leur simplicité et leur facilité d'implémentation, sont plus populaires parmi les chercheurs. Grace à la découverte de l'amplificateur opérationnel, le premier P.I.D. est commercialisé en 1930, puis à partir des années 1970

l'arrivée des circuits intégrés permet l'expansion de l'utilisation de la commande P.I.D numérique. Après près de 90 ans d'expérience, la commande PID reste la plus utilisée [2, 5,16].

Les contrôleurs linéaires d'espace d'état comme la méthode de placement des pôles et le régulateur linéaire quadratique (LQR) sont parmi les contrôleurs les plus utilisés [2, 5, 31, 32]. Une étude visant à stabiliser un pendule inversé monté sur un bras robotique [33] a montré que la méthode LQR donne de meilleurs résultats que la méthode de placement des pôles. En effet, le contrôleur LQR offre un contrôle optimal en prenant en considération l'état du système et la commande d'entrée. A l'inverse de la commande LQR, la méthode de placement de pôles effectuent un placement arbitraire des pôles du système ce qui risque de rendre la réponse du système très sensible aux perturbations.

1.7 Conclusion

A travers ce premier chapitre, on a montré différents domaines d'utilisation du principe du pendule inversé ainsi que les tendances technologiques se basant sur le contrôle de ce dernier afin d'apporter des solutions innovantes à des problématiques déjà connues telles que le transport personnel dans des espaces réduits, problème d'accessibilité des personnes en état d'handicap, etc.

Des thématiques clés liées à l'équilibrage d'un pendule inversé mobile à deux roues, tirées de l'ensemble des publications et des revues consultées, en l'occurrence; la fusion de données émanant de plusieurs capteurs, le filtre de Kalman et les systèmes de contrôle ont été présentés.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du système d'estimation de l'angle d'inclinaison du pendule, celui-ci jouera le rôle de retour d'état pour le système de contrôle.

Chapitre 2 Estimation de l'inclinaison:

Principes théoriques et simulation

2.1 Introduction

L'estimation de l'attitude (ou orientation) dans un espace à 3 dimensions est un sujet qui anime la communauté scientifique depuis plusieurs décennies (depuis au moins le milieu des années 60). Elle est utilisée dans des applications aussi variées que le contrôle en attitude des missiles, des satellites, des drones et des sous-marins, les applications médicales (rééducation et réhabilitation) ou bien encore les applications de divertissement et de formation utilisant les technologies de la réalité virtuelle. Il est donc nécessaire de concevoir des systèmes fiables, fournissant une estimation précise de l'orientation, peu encombrant, à faible coût, portable et autonome, donc peu gourmand en énergie.

Ces contraintes ont conduit les chercheurs et les concepteurs de ces systèmes de mesure de l'attitude à se tourner généralement vers des dispositifs utilisant des capteurs inertiels miniatures de type MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), ces systèmes de mesure intègrent traditionnellement un accéléromètre à trois axes, un magnétomètre à trois axes et un gyromètre à trois axes. L'accéléromètre mesure la gravité et les accélérations propres du corps rigide, le magnétomètre mesure le champ magnétique terrestre ainsi que les perturbations magnétiques, tandis que le gyromètre mesure la vitesse de rotation du corps rigide. La fusion de toutes ces données permet de remonter à l'attitude du corps rigide dans l'espace à 3 dimensions.

Dans ce travail, on s'intéresse à l'estimation de l'angle d'inclinaison du pendule inversé ainsi que sa vitesse angulaire. Selon cette estimation, un asservissement de la

position angulaire du pendule inversé est réalisé, ceci dans le but de ramener ce dernier à une position de stabilité verticale.

A travers ce chapitre, nous allons présenter les systèmes de mesure d'attitude les plus utilisés, ainsi que l'algorithme de fusion de données et le filtre utilisés dans ce projet permettant l'estimation de l'inclinaison du pendule inversé ainsi que sa vitesse angulaire.

2.2 Systèmes de mesures de l'attitude

Depuis les années 50 il existe plusieurs applications des centrales d'attitude dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'aérospatial, la commande et la robotique. Ces applications nécessitent généralement l'estimation de l'attitude d'un corps rigide, il existe plusieurs systèmes d'estimation d'attitude [34]. Chaque système ayant ses avantages et ses inconvénients, et étant dédié à un domaine d'application, on présentera les systèmes les plus utilisés.

2.2.1 Gyroscopie

Le gyroscope a été l'instrument le plus utilisé pour mesurer le mouvement angulaire et en conséquence l'attitude. Le gyroscope, du grec 'qui regarde la rotation' est un appareil qui utilise le principe de conservation du moment angulaire. Son invention est attribuée au physicien français Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868).

Le principe du dispositif est une roue tournant sur un axe, qui, une fois lancée tend à résister aux changements de son orientation. Cependant, les systèmes à gyroscope sont lourds, encombrants, extrêmement coûteux et gourmands en énergie.



Figure 2-1 Gyroscopie moderne

2.2.2 IMU (Inertial Measurement Unit)

Les capteurs IMU (Inertial Measurement Unit) ou MARG (Magnetic Angular Rate and Gravity sensor module) sont conçus pour mesurer des orientations à trois degrés de liberté (3DOF) en temps réel sans singularités. Un capteur IMU contient un accéléromètre à trois axes, un magnétomètre à trois axes et un gyromètre à trois axes en plus d'un microcontrôleur intégrés pour le traitement des données [35]. De tels systèmes ont fait leur preuve dans diverses applications, mais leurs prix reste exorbitant et demeurent propres à quelques applications spécifiques.



Figure 2-2 Exemple d'un IMU (MEMSENSE IMU 3030)

2.2.3 MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)

En conséquence aux contraintes imposées par ces deux systèmes (IMUs et Gyroscopes), d'autres solutions ont émergées fournissant une information précise sur l'attitude avec un poids plus faible, un plus faible coût et un encombrement diminué.

Depuis quelques années, de nouveaux composants intégrés sur silicium ont été développés ; les MEMS [36]. Ils permettent de réaliser en grande quantité des capteurs performants, de dimensions micrométriques et de faible coût. Les informations fournies par ces capteurs doivent être traitées afin de créer des systèmes inertiels d'attitude bas coût et peu encombrants.



Figure 2-3 Exemple d'une centrale inertielle à base de MEMS

Concrètement, le calcul de l'attitude d'un corps rigide en utilisant les capteurs inertiels MEMS, part du principe qu'en combinant les données issues d'un accéléromètre, d'un gyromètre et d'un magnétomètre, il est possible de fournir une estimation de cette attitude. On s'intéresse ici à une IMU qui contient différentes modalités de mesures, typiquement, des accéléromètres, des magnétomètres, et des gyromètres.

a Accéléromètre

Un accéléromètre est un capteur qui, fixé sur un mobile, permet de mesurer l'accélération de ce dernier. Dans son principe physique, un accéléromètre peut être vu comme une masse M attachée à un ressort qui est lui-même attaché à un repère fixe [37].

Les principaux paramètres d'un accéléromètre sont l'étendue de mesure donnée en g , la bande passante (Hz), la sensibilité (mV/g), la précision, la masse du capteur, le nombre d'axes (1 à 3 axes).

Le principe de tout accéléromètre est le suivant : $F = m * a = -k * x$, où F est la force, m la masse d'épreuve et a l'accélération. Ce qui permet de déduire l'accélération à partir de la mesure de x , $a = -k * x/m$.

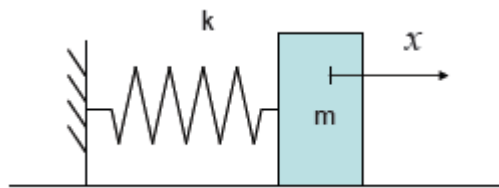


Figure 2-4 Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

Différents accéléromètres sont disponibles sur le marché. Leurs caractéristiques dépendent de leur technologie et du procédé de leur fabrication. Les transducteurs généralement utilisés pour la construction des accéléromètres sont à détection piézoélectrique, à détection capacitive, à jauges de contrainte, à poutres vibrantes, à ondes de surface et à détection optique.

C'est la mesure des projections du vecteur gravité qui va conduire à l'estimation de l'angle d'inclinaison du pendule inversé comme on le verra par la suite.

b Gyromètre

Un gyromètre est un capteur qui permet d'effectuer une mesure de la vitesse angulaire, les phénomènes physiques utilisés pour réaliser ce type de capteur sont essentiellement les propriétés inertielles de la matière [37]. Les principales caractéristiques d'un gyromètre sont la résolution, le biais, la sortie à vitesse nulle ZRO (Zero-Rate-Output) et le facteur d'échelle.

c Magnétomètre

Parmi les instruments de navigation qui permettent de s'orienter par rapport à un système de référence absolu, nous trouvons le compas magnétique. Celui-ci utilise le champ magnétique terrestre comme référence, en conséquence il permet de suivre le cap [37]. Pour atteindre l'objectif fixé de ce travail, la connaissance de l'angle de lacet ne s'avère pas nécessaire, en conséquence on n'étalera pas ici toutes les caractéristiques du Magnétomètre.

Dans ce projet, et afin d'avoir un coût "raisonnable" de réalisation et optimiser l'utilisation du volume disponible, on a opté pour l'utilisation de capteurs MEMS pour le calcul de l'angle et la vitesse angulaire du pendule inversé mobile.

2.3 Estimation de l'inclinaison du pendule inversé

2.3.1 Estimation de l'inclinaison en utilisant l'accéléromètre

Une utilisation des données fournies par l'accéléromètre, à savoir les projections du vecteur accélération sur les trois axes reliés au corps du pendule inversé, permet de calculer d'une manière directe l'angle d'inclinaison du pendule.

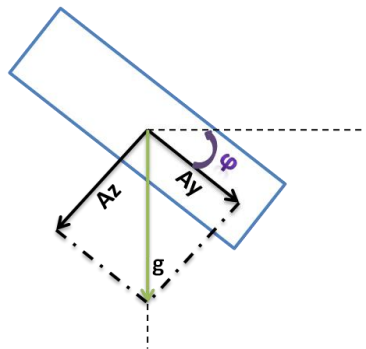


Figure 2-5 Utilisation de l'accéléromètre pour le calcul de l'inclinaison du pendule

On peut déduire que l'angle d'inclinaison ϕ peut s'écrire comme suit:

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_y}{A_z}\right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Une implémentation de l'équation (2.1) sur deux sets de données réelles fournies par l'accéléromètre contenu dans le capteur MPU-9250 donne les résultats suivants :

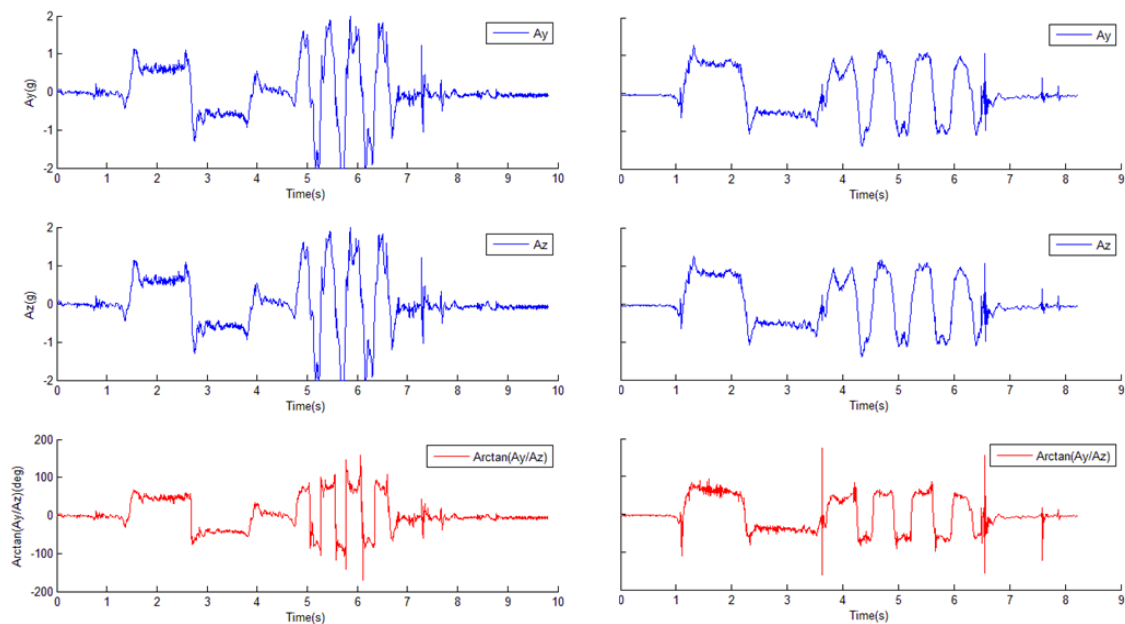


Figure 2-6 Calcul de l'inclinaison du pendule en utilisant l'accéléromètre

On note que les mesures données par l'accéléromètre sont fortement entachées de bruit, ce dernier affecte considérablement le calcul de l'angle d'inclinaison et donne des résultats biaisés.

2.3.2 Estimation de l'inclinaison en utilisant le gyromètre

Le gyromètre fournit les vitesses angulaires sur les trois axes, on pourrait penser qu'une intégration directe de la vitesse angulaire selon l'axe de rotation du pendule permettra de donner la position angulaire de ce dernier.

Une intégration de la vitesse angulaire selon l'axe X pour deux sets de données réelles fournies par le gyromètre contenu dans le capteur MPU-9250 donne les résultats suivants :

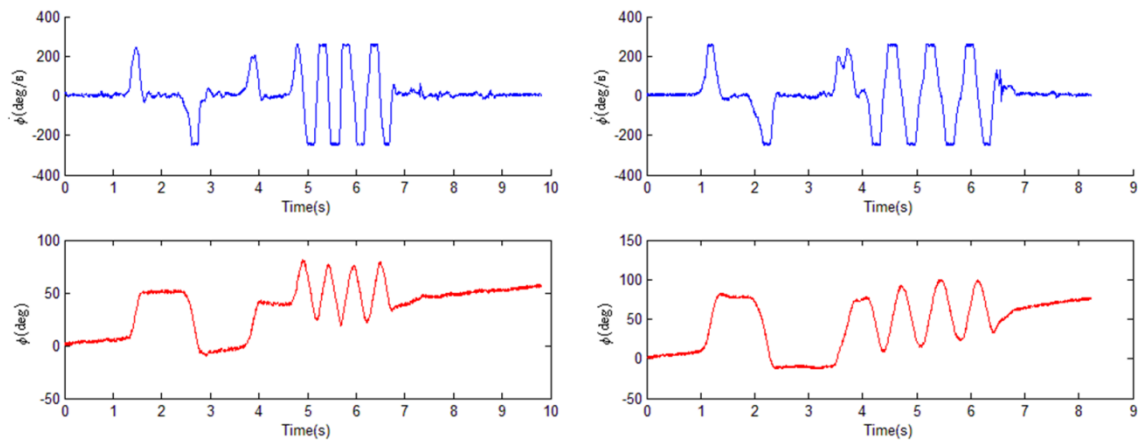


Figure 2-7 Calcul de l'inclinaison du pendule en utilisant le gyromètre

On note que les mesures données par le gyromètre sont fortement entachées de bruit, ce dernier s'accroît considérablement après intégration et s'accroît au fur et à mesure que le temps passe ce qui donne des résultats biaisés.

2.3.3 Estimation de l'inclinaison par fusion de données

A travers les deux sections précédentes, on a pu constater que l'accéléromètre et le gyromètre, chacun seul, ne sont pas capables de fournir une estimation fiable de l'inclinaison du pendule, arrivant à la conclusion que la combinaison des deux capteurs est indispensable pour aboutir au résultat souhaité. Des algorithmes de fusion de données existent dans la littérature permettant d'atténuer ou d'éliminer considérablement le bruit tout en préservant l'information utile.

Développé à l'origine pour des applications de navigation de vaisseaux spatiaux, le filtre de Kalman s'avère être efficace dans plusieurs applications, il est principalement utilisé pour estimer l'état du système en se basant sur plusieurs données entachées de bruit et ayant un lien avec l'état du système.

Le filtre de Kalman est un outil qui peut être utilisé pour estimer les états de plusieurs processus dans plusieurs domaines. Le filtre de Kalman a prouvé son efficacité non seulement dans la pratique, mais aussi théoriquement ou il est possible de prouver que parmi tous les filtres existants, c'est le filtre de Kalman qui minimise la variance de l'erreur d'estimation. Les filtres de Kalman sont souvent implémentés dans

des systèmes de control embarqués, où afin de contrôler un processus, il est indispensable d'avoir une estimation plus au moins correcte de l'état du système.

Théoriquement, le filtre de Kalman est un estimateur pour ce qu'on appelle le problème quadratique linéaire qui est le problème d'estimation de l'état instantané d'un système dynamique linéaire perturbé par un bruit blanc. Cet estimateur est statistiquement optimal vis à vis n'importe quelle fonction quadratique de l'erreur d'estimation.

Pratiquement, le filtre de Kalman est l'une des plus grandes découvertes dans le domaine d'estimation statistique. Il a permis à l'humanité d'accomplir plusieurs tâches qui étaient impossible auparavant tel que les procédés de fabrication, la localisation, la navigation, etc. Pour contrôler un système dynamique, il est indispensable d'estimer son état et le filtre de Kalman offre cette possibilité en se basant sur des mesures indirectes et biaisées. Il est aussi utilisé dans des applications de prédiction.

La problématique est donc la suivante, ayant le modèle du système et en se basant sur plusieurs mesures bruitées, comment estimer l'inclinaison du pendule tout en empêchant les mesures erronées d'affecter notre estimation.

a Filtre de Kalman linéaire

On définit :

- Le vecteur état X contenant les variables d'intérêt qu'on cherche à estimer.
- Le vecteur des mesures Z contenant les quantités qu'on peut observer et qui ont un lien direct ou indirect avec les variables du vecteur X .

La représentation linéaire discrète du système s'écrit comme suit :

$$X_{k+1} = A * X_k + B * U_k \dots \dots \dots (2.2)$$

U représente toute commande extérieure indépendante de X

La représentation linéaire discrète du vecteur des mesures s'écrit comme suit

$$Z_k = C * X_k \dots \dots \dots (2.3)$$

Les deux vecteurs X et Z contiennent du bruit, le vecteur d'état X est bruité car le modèle linéaire ne peut pas capturer toutes les interactions physiques réelles, le vecteur Z contient à son tour du bruit car les capteurs incluent du bruit dans leurs mesures.

En se basant sur les modèles dynamiques, on peut construire un graphe résumant le fonctionnement du filtre avant de détailler son algorithme.

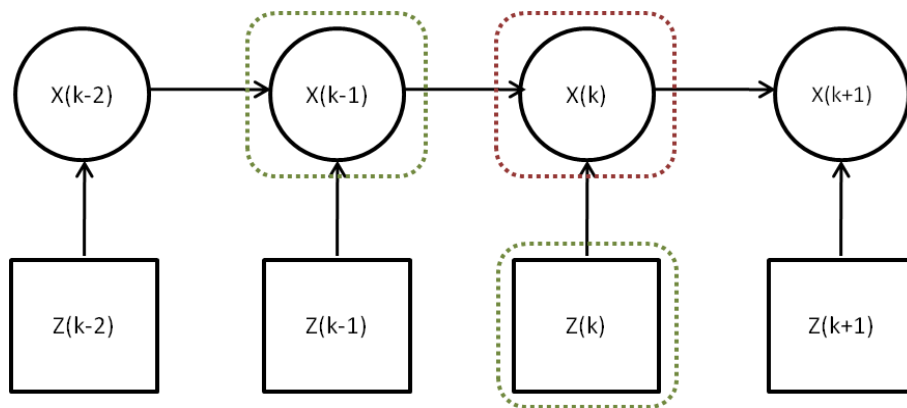


Figure 2-8 Principe de fonctionnement du filtre de Kalman

A un instant t , on connaît l'état précédent X_{k-1} estimée dans l'étape précédente et les mesures Z_k , à partir de ces deux données on peut estimer le vecteur d'état X_k

On définit les distributions de probabilités suivantes:

$p(X_k|X_{k-1})$: Prédiction de l'état future sachant l'état actuel ;

$p(Z_k|X_k)$: Probabilité de la mesure sachant l'état actuel ;

On suppose une distribution gaussienne pour représenter l'état du système X avec une moyenne μ et une covariance P.

$$p(X_k) = N(\bar{x}_k, P_k) \dots \dots \dots (2.4)$$

En se basant sur les représentations dynamiques linéaires (2.2) et (2.3), et en ajoutant du bruit représenté par des distributions gaussiennes avec une moyenne nulle, on obtient :

$$p(X_k|X_{k-1}) = A * N(\bar{x}_{k-1}, P_{k-1}) + N(0, \Sigma_m) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$p(Z_k|X_k) = C * N(\bar{z}_k, P_k) + N(0, \Sigma_o) \dots \dots \dots (2.6)$$

Avec:

Σ_m : Matrice de covariance du bruit du modèle dynamique

Σ_o : Matrice de covariance du bruit des mesures

En utilisant les propriétés des distributions gaussiennes, et après simplification, on obtient :

$$p(X_k|X_{k-1}) = \mathcal{N}(A * X_{k-1}, A * P_{k-1} * A^T + \Sigma_m) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$p(Z_k|X_k) = \mathcal{N}(C * X_k, C * P_k * C^T + \Sigma_o) \dots \dots \dots (2.8)$$

En appliquant la loi de Bayes : $p(A|B) = \frac{p(B|A)*p(A)}{p(B)}$, on obtient :

$$p(X_k|Z_k, X_{k-1}) = \frac{p(Z_k|X_k, X_{k-1}) * p(X_k|X_{k-1})}{p(Z_k)} \dots \dots \dots (2.9)$$

On utilise maintenant la méthode d'estimation du maximum à posteriori qui offre une estimation optimal du vecteur d'état \hat{X}_k

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \underset{X_k}{\operatorname{argmax}} (p(X_k|Z_k, X_{k-1})) \\ &= \underset{X_k}{\operatorname{argmax}} (\mathcal{N}(C * X_k, C * P_k * C^T + \Sigma_o) * \mathcal{N}(A * X_{k-1}, A * P_{k-1} * A^T + \Sigma_m)). \end{aligned} (2.10)$$

On définit

$$\begin{aligned} P &= A * P_{k-1} * A^T + \Sigma_m \\ R &= C * P * C^T + \Sigma_o \end{aligned} \dots \dots \dots (2.11)$$

On transforme le problème de maximisation en un problème de minimisation en utilisant le logarithme, on obtient :

$$\hat{X}_k = \underset{X_k}{\operatorname{argmin}} [(Z_k - CX_k) * R^{-1} * (Z_k - CX_k) + (X_k - AX_{k-1}) * P^{-1} * (X_k - AX_{k-1})] \dots (2.12)$$

En dérivant par rapport à X_k , et en égalant l'expression à 0, on obtient :

$$\boxed{\hat{X}_k = A * X_{k-1} + K * (Z_k - C * A * X_{k-1})} \dots \dots \dots (2.13)$$

Avec
$$\begin{cases} K = P * C^T * R^{-1} - K * C * P * C^T * R^{-1} \\ \hat{P}_k = P - K * C * P \end{cases} \dots \dots \dots (2.14) : \text{Gain du filtre de}$$

Kalman

b Filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman définit précédemment se limite à des systèmes linéaires, hors qu'on sait pertinemment que la majorité des systèmes existants comportent des non-linéarités émanant de la dynamique du système et/ou des capteurs.

Pour remédier à ce problème un filtre de Kalman étendu (Extended Kalman Filter) a été défini pour traiter les cas de non-linéarités de l'état et des mesures.

La représentation d'état et du vecteur des mesures s'écrit comme suit:

$$\begin{cases} X_k = f(X_{k-1}) \\ X_Z = h(X_k) \end{cases} \dots \dots \dots (2.15)$$

La solution consiste à linéariser la non linéarité autour du point de fonctionnement du systèmes en calculant les Jacobéens $\frac{\partial f}{\partial x}$ et $\frac{\partial h}{\partial x}$, on obtient alors :

$$p(X_k | X_{k-1}) = N \left(f(X_{k-1}), \frac{\partial f}{\partial X} * P_{k-1} * \frac{\partial f^T}{\partial X} + \Sigma_m \right) \dots \dots \dots (2.16)$$

$$K = P * \frac{\partial h^T}{\partial x} * (\Sigma_o + \frac{\partial h}{\partial x} * P * \frac{\partial h^T}{\partial x})^{-1} \dots \dots \dots (2.17)$$

$$\hat{X}_k = f(X_{k-1}) + K * (Z_k - h(X_{k-1})) \dots \dots \dots (2.18)$$

$$\hat{P}_k = P - K * \frac{\partial h}{\partial x} * P \dots \dots \dots (2.19)$$

2.3.4 Algorithme du filtre de Kalman étendu pour l'estimation de l'inclinaison du pendule inversé

Dans le cas du pendule inversé mobile à deux roues, on s'intéresse à l'angle d'inclinaison de ce dernier ainsi que sa vitesse angulaire, le vecteur d'état X est défini donc comme suit :

$$X_k = \begin{bmatrix} \phi_k \\ \dot{\phi}_k \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.20)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Avec l'hypothèse } \ddot{\phi} = 0 \dots \dots \dots (2.21)$$

Le vecteur des mesures fournies par le MPU-9250 et auquel on s'intéresse pour le calcul de l'inclinaison du pendule s'écrit :

$$X_k = \begin{bmatrix} A_y \\ A_z \\ \dot{\phi}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi_k) \\ \cos(\phi_k) \\ \dot{\phi}_k \end{bmatrix} = h(X_k) \dots \dots \dots (2.22)$$

Il est important de noter ici que la fonction des mesures h est une fonction non linéaire de l'état X_k , donc un filtre de Kalman ordinaire n'est pas applicable dans cette situation, et il faudra aller vers le filtre de Kalman étendu.

La linéarisation de la fonction h autour de l'état X_k se présente sous la forme :

$$h(X_{k+1}) \approx h(X_k) + H(X_k) * (X_{k+1} - X_k) \dots \dots \dots (2.23)$$

Le fonctionnement du filtre de Kalman étendu peut être résumé come suit ::

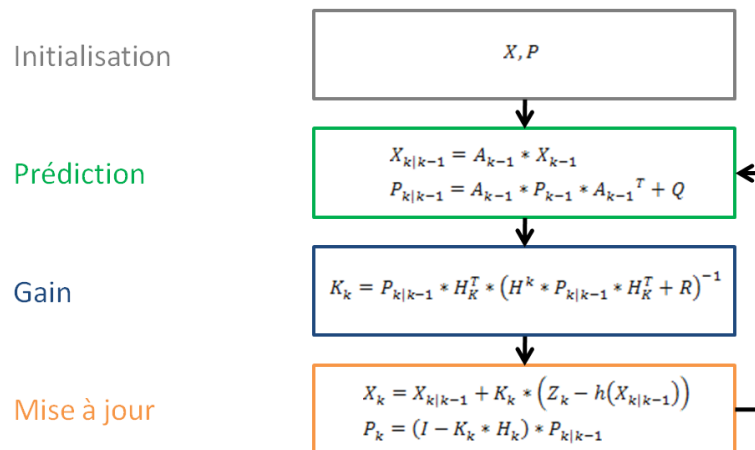


Figure 2-9 Algorithme du filtre de Kalman étendu

Les matrices Q et R représentent respectivement Σ_m et Σ_o (Matrices de covariance du bruit). Intuitivement, si R est grand cela veut dire qu'on est méfiant vis-à-vis les mesures fournies par le MPU-9250 et dans ce cas on aura une estimation douce basée sur l'hypothèse $\ddot{\phi} = 0$. A l'opposé, si R est faible cela implique que le filtre fait

confiance aux mesures fournies par le MPU-9250 et on aura une estimation qui suit plus au moins les mesures et qui sera probablement entachée de bruits.

L'implémentation du filtre de Kalman étendu sur les deux sets de données réelles fournies par le capteur MPU-9250 avec $Q = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}$ et $R = \begin{pmatrix} 0.009 & 0 & 0 \\ 0 & 0.009 & 0 \\ 0 & 0 & 0.009 \end{pmatrix}$ donne les résultats suivants :

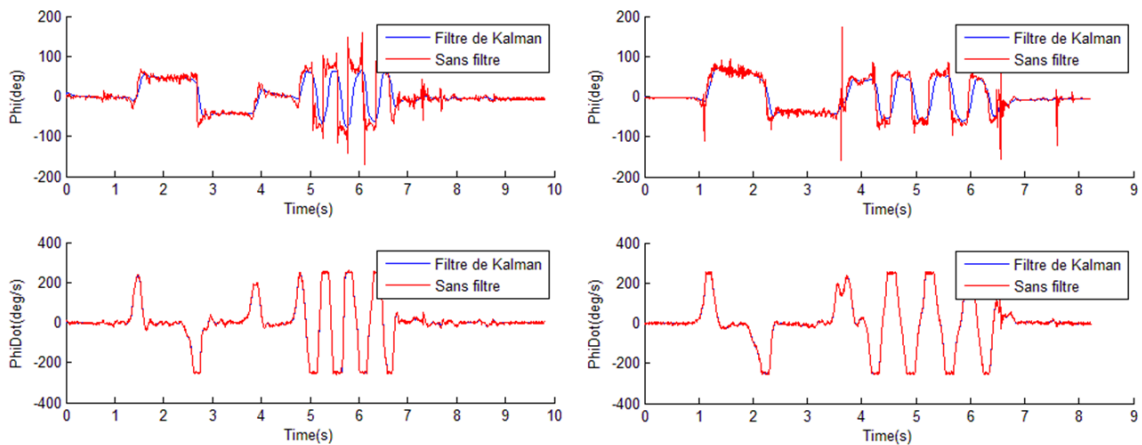


Figure 2-10 Calcul de l'inclinaison du pendule avec le filtre de Kalman étendu

On peut voir clairement que le filtre de Kalman étendu donne des résultats satisfaisants et permet d'estimer l'angle d'inclinaison ainsi que la vitesse angulaire du pendule inversé de façon plus au moins fiable tout en réduisant considérablement les bruits qui entachent les mesures.

2.4 Conclusion

Le présent chapitre a porté sur la méthodologie suivie dans ce travail pour déterminer l'angle d'inclinaison du pendule inversé ainsi que sa vitesse angulaire.

L'estimation de l'inclinaison du pendule inversé s'est faite en premier lieu par la sélection des capteurs adaptés à notre application. Par la suite, nous avons expliqué pourquoi on doit avoir recours aux techniques de fusion de données. En dernier, l'algorithme détaillé du filtre de Kalman étendu a été présenté.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et le contrôle du système du pendule inversé mobile à deux roues en s'appuyant sur l'estimation de l'inclinaison obtenue.

Chapitre 3 Modélisation et commande du pendule inversé mobile à deux roues

3.1 Introduction

À travers ce chapitre, nous allons présenter la méthodologie suivie pour la modélisation et la commande d'une structure motorisée. Cette structure mécatronique représente un système de pendule inversé mobile à deux roues.

Ce dernier est une plateforme robotique avec deux roues motorisées indépendamment l'une de l'autre, permettant au système de non seulement se maintenir debout mais aussi d'accomplir des mouvements arbitraires. La mise en œuvre d'une telle structure nécessite des connaissances pluridisciplinaires.

Afin de mieux commander ce système, qui peut être considéré comme un robot à 2 degrés de liberté, ou pour simuler son comportement, on doit disposer de modèles. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs, les contraintes de la tâche et les performances recherchées : modèles géométriques, cinématiques et dynamiques. Ces modèles, qu'ils soient utilisés pour la simulation ou pour la commande, doivent représenter le comportement du robot de façon réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des procédures efficaces de modélisation.

Pour évaluer les performances de la structure réalisée, deux types de commande ont été choisies. Les arguments qui ont motivé ces choix ainsi qu'une comparaison des deux commandes seront présentés.

3.2 Modélisation dynamique

3.2.1 Généralités

La modélisation dynamique d'un système se fait généralement en se basant sur les lois de Newton appris au début du cycle d'ingénieur qui stipulent que le comportement d'un système mécanique est régi par une équation différentielle du deuxième ordre. Les lois de Newton permettent d'exprimer l'accélération du robot en fonction de sa vitesse, de sa position et des forces externes.

Pour plusieurs systèmes, écrire toutes les composantes des forces exercées sur le système peut être fastidieux et peut induire en erreur. Pour de tels systèmes, exprimer l'énergie est beaucoup plus simple que détailler toutes les forces.

Il existe un autre moyen pour formuler les équations de mouvement d'un système en se basant sur son énergie sans passer par les forces, cette méthode s'appelle la méthode de Lagrange qui consiste à prendre l'énergie cinétique du système, lui soustraire l'énergie potentielle, appliquer un opérateur spécial appelé l'opérateur d'Euler-Lagrange et égaliser le tout à la force externe qui s'applique au système.

L'énergie η d'un système mécanique peut être exprimée comme suit :

$$\eta(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) + V(q) \dots \dots \dots (3.1)$$

$T(q, \dot{q})$: représente l'énergie cinétique

$V(q)$: représente l'énergie potentielle

Le Lagrangien s'écrit :

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \dots \dots \dots (3.2)$$

L'opérateur d'Euler-Lagrange dans le cas où il n'y a pas de forces externes s'écrit :

$$\Delta_{(q, \dot{q})}(L) = \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} \right) = 0 \dots \dots \dots (3.3)$$

Dans le cas où il existe une force externe qui agit sur le système, l'opérateur d'Euler-Lagrange s'écrit :

$$\Delta_{(q,\dot{q})}(L) = \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} \right) = \tau \dots \dots \dots (3.4)$$

τ : Forces externes appliquées sur le système

3.2.2 Modélisation dynamique du pendule inversé mobile à deux roues

On s'intéresse à présent à modéliser le pendule inversé à deux roues en se basant sur la méthode de Lagrange.

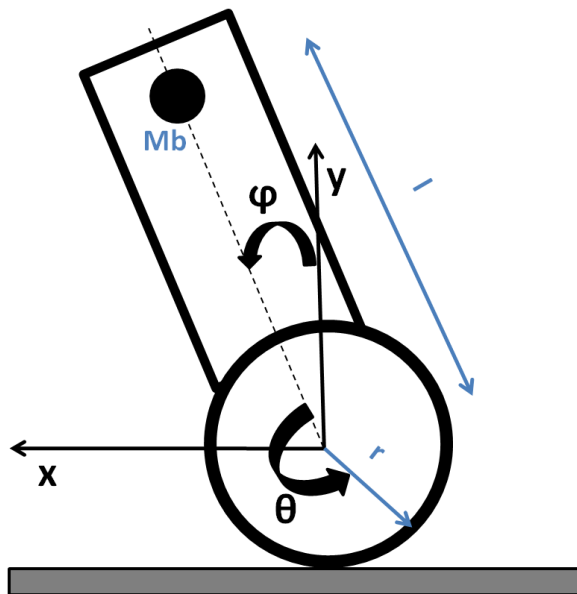


Figure 3-1 Description géométrique du système

On définit le vecteur des coordonnées généralisées $q : q = \begin{pmatrix} \theta \\ \varphi \end{pmatrix}$

θ : Angle de rotation des roues par rapport au pendule

φ : Angle d'inclinaison du pendule

On assume que les forces de frottement sont négligeables, les roues ne glissent pas par rapport au sol, et qu'elles ne quittent en aucun moment le sol, leur position s'écrit :

$$X = (\theta + \varphi) * r \dots \dots \dots (3.5)$$

On assume aussi que les roues sont sans masse

Le corps du pendule a une masse m_b et une inertie i_b

La position du centre de masse p par rapport au repère dessiné s'écrit :

$$p = \begin{pmatrix} r * (\theta + \varphi) + l * \sin(\varphi) \\ l * \cos(\varphi) \end{pmatrix} \dots \dots \dots (3.6)$$

La vitesse du centre de masse s'écrit donc :

$$\dot{p} = \begin{pmatrix} r * (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + l * \dot{\varphi} * \cos(\varphi) \\ -l * \dot{\varphi} * \sin(\varphi) \end{pmatrix} \dots \dots \dots (3.7)$$

L'énergie cinétique du système s'écrit :

$$T = \frac{1}{2} * m_b * \dot{p}^T * \dot{p} + \frac{1}{2} * i_b * \dot{\varphi}^2 \dots \dots \dots (3.8)$$

$$T = \frac{1}{2} * m_b * [r^2 * (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 + 2 * r * l * \dot{\varphi} * (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) * \cos(\varphi) + l^2 * \dot{\varphi}^2] + \frac{1}{2} * i_b * \dot{\varphi}^2 \dots (3.9)$$

L'énergie potentielle du système s'écrit :

$$V = m_b * g * l * \cos(\varphi) \dots \dots \dots (3.10)$$

$$L = T - V = \frac{1}{2} * m_b * [r^2 * (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 + 2 * r * l * \dot{\varphi} * (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) * \cos(\varphi) + l^2 * \dot{\varphi}^2] + \frac{1}{2} * i_b * \dot{\varphi}^2 - m_b * g * l * \cos(\varphi) \dots \dots \dots (3.11)$$

Appliquant à présent l'opérateur d'Euler-Lagrange

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m_b * [r^2 * (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + r * l * \dot{\varphi} * \cos(\varphi)] \dots \dots \dots (3.12)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m_b * r * [r * \ddot{\theta} + (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\varphi} - l * \sin(\varphi) * \dot{\varphi}^2] \dots \dots \dots (3.13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \dots \dots \dots (3.14)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = u \dots \dots \dots (3.15)$$

$$m_b * r^2 * \ddot{\theta} + m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\varphi} = m_b * r * l * \sin(\varphi) * \dot{\varphi}^2 + u \dots \dots \dots (3.16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = m_b * [r^2 * (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + r * l * (\dot{\theta} + 2 * \dot{\varphi}) * \cos(\varphi) + l^2 * \dot{\varphi}] + i_b * \dot{\varphi} \dots (3.17)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\theta} + [i_b + m_b * r * (r + 2 * l * \cos(\varphi)) + l^2] * \ddot{\varphi} - m_b * r * l * \dot{\varphi} * (\dot{\theta} + 2 * \dot{\varphi}) * \sin(\varphi) \dots \dots \dots (3.18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = m * g * l * \dot{\varphi} * \sin(\varphi) \dots \dots \dots (3.19)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \dots \dots \dots (3.20)$$

$$m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\theta} + [i_b + m_b * r * (r + 2 * l * \cos(\varphi)) + l^2] * \ddot{\varphi} = m_b * l * \sin(\varphi) * (r * \dot{\varphi}^2 + g) \dots \dots \dots (3.21)$$

En utilisant l'environnement de développement MATLAB, on a implémenté les deux équations différentielles (3.16) et (3.21). Les graphes obtenus sont montrés ci-dessous :

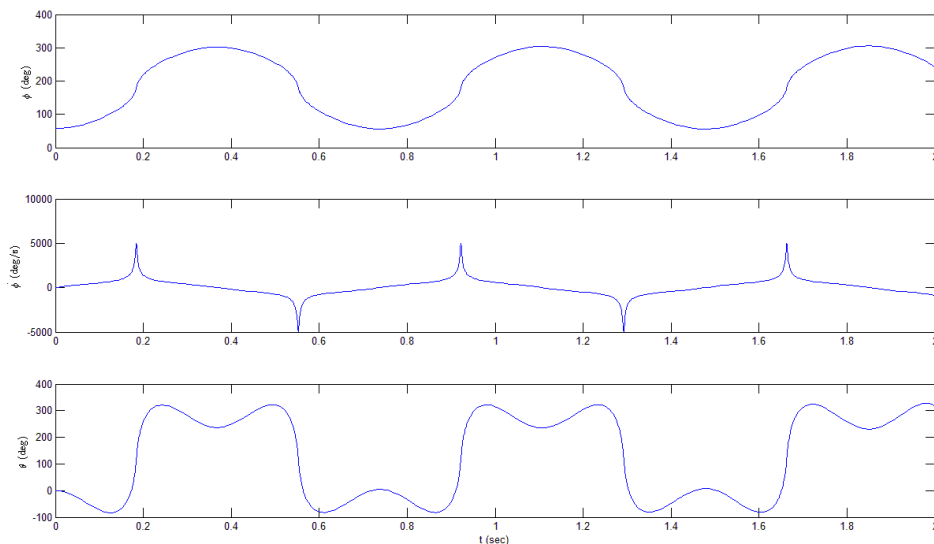


Figure 3-2 Réponse du modèle dynamique sans forces externes

Les graphes obtenus sont cohérents avec le comportement normal présumé du pendule inversé à deux roues à savoir le fait qu'à partir d'une position initiale proche du

point d'équilibre instable ($\varphi = 0^\circ$), le pendule se met à osciller autour de son point d'équilibre stable ($\varphi = 180^\circ$) jusqu'à amortir son inertie initiale et se stabiliser autour du point d'équilibre stable.

3.3 Contrôle du pendule inversé mobile à deux roues

L'équilibrage d'un tel système est un excellent banc d'essai pour la théorie du contrôle, car il présente une dynamique de système instable et non linéaire. Les objectifs de contrôle pour ces systèmes sont toujours difficiles à atteindre, car l'état complet du système n'est souvent pas complètement connu.

Étant donné que le système est instable, une entrée d'impulsion appliquée au système en boucle ouverte entraînera une divergence de la position du système.

L'objectif principal de ce projet est de maintenir la structure du pendule inversé mobile debout ($\varphi = 0^\circ$), pour se faire deux types de commande sont implémentés.

3.3.1 Commande PID

Les correcteurs PID (à action proportionnelle, intégrale et dérivée) reproduisent les actions que l'opérateur humain effectue instinctivement lors d'un pilotage manuel [38] :

- Réaction immédiate par correction proportionnelle aux écarts.
- Anticipation par prise en compte de la tendance (la dérivée de l'écart).
- Incrémentation de l'action jusqu'à l'annulation de l'écart (intégration).

Cette commande est relativement simple et intelligible, sauf que pour beaucoup de processus (souvent non linéaires), elle ne peut fonctionner qu'autour d'un point de fonctionnement [39, 40]. Pourtant pour une commande classique, qui est celle de la plupart des robots industriels, le mécanisme est considéré comme un système linéaire et chacune de ses articulations est asservie par une commande décentralisée de type PID à gains constants :

- Une action Proportionnelle (P) : Caractérisée par une constante K_p qui doit être maximisée lors du réglage pour la réduction de l'erreur statique et l'annulation rapide de l'erreur.

- Une action Intégrale (I) : Caractérisée par une constante de temps T_i , cette action force la commande à évoluer tant que l'erreur n'est pas nulle. La diminution de T_i pousse l'action intégrale à agir énergétiquement parfois même trop énergétiquement, ce qui peut entraîner des dépassements et des oscillations.
- Une action Dérivée (D) : Les retards et temps de réaction d'un processus peuvent être compensés en anticipant les variations de l'erreur grâce à une extrapolation sur un certain horizon T_d .

Ce type de correcteur effectue un traitement sur l'erreur de la manière suivante :

$$u(t) = K_p * e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d * \frac{de(t)}{dt} \dots \dots \dots (3.22)$$

$$\text{Avec } e(t) = x_d(t) - x(t) \dots \dots \dots (3.23)$$

Ou : $x_d(t)$ et $x(t)$ représentent respectivement la sortie désirée et la sortie mesurée

Ses avantages sont la facilité d'implémentation et le faible coût de calcul. En contrepartie, les performances de la réponse temporelle varient en fonction de sa configuration. On constate des dépassements et des erreurs statiques non négligeables pour des mouvements rapides. Dans beaucoup d'applications, une telle commande est réalisée comme suit :

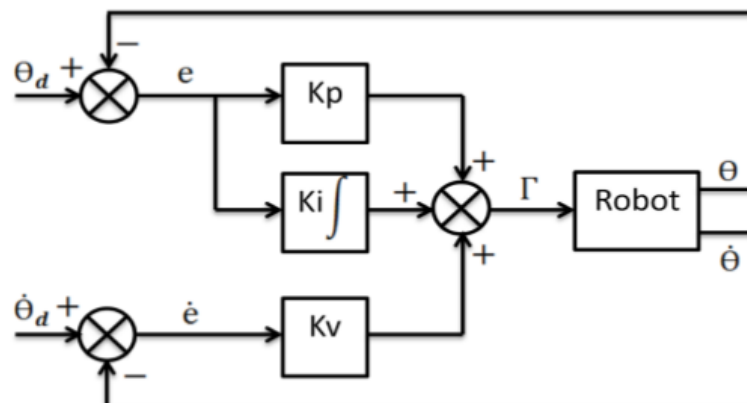


Figure 3-3 Schéma classique d'une commande PID

A la différence de l'être vivant qui à la capacité d'auto-adapter ses propres capacités de réaction, un PID demande que lui soit spécifié les coefficients du

régulateur (K_p , K_i et K_d). Parmi les méthodes de synthèse existantes, la méthode de Ziegler-Nicols [39] est la plus connue.

En pratique, les actions du correcteur PID sont souvent limitées à deux : PD ou PI. L'action dérivée est parfois indispensable, c'est souvent dans un contexte où le comportement du processus s'apparente à celui d'un double intégrateur, et où la commande du régime permanent est nulle ou quasi nulle. Dans ce cas, l'action intégrale devient sans utilité, et son effet déstabilisateur sur un système déjà instable est à éviter [40].

Après avoir introduit la théorie de base de la commande PID, on va maintenant l'appliquer pour la commande de notre système. Le modèle dynamique du pendule inversé mobile à 2 roues est décrit par un système d'équations différentielles non linéaires couplées du second ordre.

$$\begin{cases} m_b * r^2 * \ddot{\theta} + m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\varphi} = m_b * r * l * \sin(\varphi) * \dot{\varphi}^2 + u \\ m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\theta} + [i_b + m_b * r * (r + 2 * l * \cos(\varphi)) + l^2] * \ddot{\varphi} = m_b * l * \sin(\varphi) * (r * \dot{\varphi}^2 + g) \end{cases}$$

Pour assurer l'équilibrage du pendule inversé, on s'intéresse à présent à l'angle d'inclinaison du pendule φ . Ainsi, sans prendre en considération l'angle de rotation des roues, les équations différentielles du système s'écrivent :

$$\begin{aligned} m_b * r * (r + l * \cos(\varphi)) * \ddot{\varphi} &= m_b * r * l * \sin(\varphi) * \dot{\varphi}^2 + u \\ [i_b + m_b * r * (r + 2 * l * \cos(\varphi)) + l^2] * \ddot{\varphi} &= m_b * l * \sin(\varphi) * (r * \dot{\varphi}^2 + g) \end{aligned}$$

La soustraction des deux équations permet d'écrire :

$$[i_b + m_b * r * l * \cos(\varphi) + l^2] \ddot{\varphi} = m_b * l * g * \sin(\varphi) - u \dots \dots \dots (3.24)$$

Donc :

$$\ddot{\varphi} = \frac{m_b * l * g * \sin(\varphi)}{i_b + m_b * r * l * \cos(\varphi) + l^2} - \frac{1}{i_b + m_b * r * l * \cos(\varphi) + l^2} u \dots \dots \dots (3.25)$$

L'équation (3.24) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\ddot{\varphi} = f(\varphi, \dot{\varphi}) + g(\varphi, \dot{\varphi}) * u \dots \dots \dots (3.26)$$

Une linéarisation de cette équation autour du point d'équilibre instable autour duquel nous cherchons à stabiliser le système ($\varphi = 0, \dot{\varphi} = 0$) permet d'avoir :

$$f(\varphi, \dot{\varphi}) \rightarrow 0 \text{ Et } g(\varphi, \dot{\varphi}) = \alpha \dots \dots \dots (3.27)$$

$$\ddot{\varphi}|_{\varphi=0, \dot{\varphi}=0} = \alpha * u \dots \dots \dots (3.28)$$

On peut clairement noter qu'il s'agit d'un système double intégrateur, pour lequel il est possible de prouver qu'un contrôleur PD est capable de stabiliser le système.

Les paramètres K_p , K_d sont fixés en se basant sur la méthode de Ziegler-Nicols, quelques ajustements ont été opérés pour arriver à une réponse optimale. On montre la réponse du modèle mathématique élaboré avec un contrôleur PD pour les gain $K_p = 32$, $K_d = 2$ pour différentes conditions initiales :

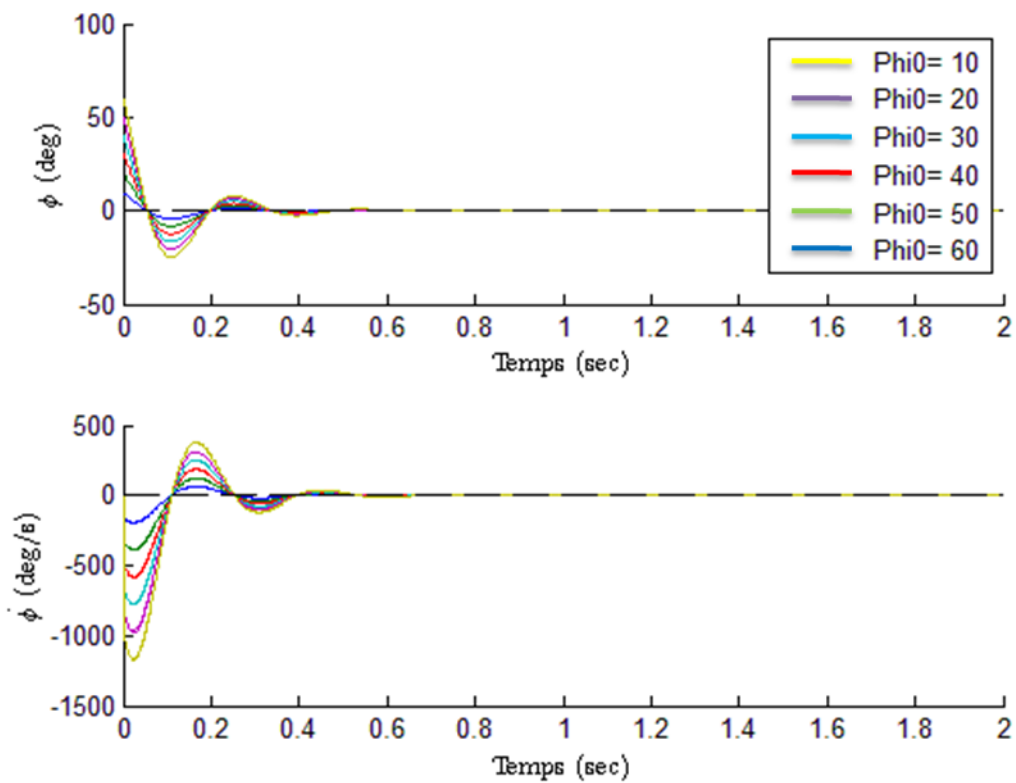


Figure 3-4 Réponse du modèle dynamique avec un contrôleur PD

D'après les figures obtenues, le correcteur PD proposé permet théoriquement de ramener le pendule inversé à la position verticale ($\varphi = 0$) au bout d'un temps ne dépassant pas les 400 ms avec des dépassements qui varient selon les conditions

initiales du système. Les performances obtenues répondent aux exigences fixées du système.

3.3.2 Commande LQR

L'idée principale de la commande LQR est de trouver une commande u qui permet de minimiser la fonction de quadratique coût $J = \sum_{n=0}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u)$.

En effet un coût quadratique est souvent très naturel dans un problème, par exemple lorsqu'on veut minimiser l'écart au carré par rapport à une trajectoire nominale (problème de poursuite). Par ailleurs, même si les processus à contrôler comportent souvent des linéarités, on est très souvent amené à linéariser le système autour d'un ou plusieurs points de fonctionnement. Une telle commande pour un système linéaire

$\begin{cases} \dot{x} = A * x + B * u \\ y = C * x \end{cases}$ est réalisée comme suit :

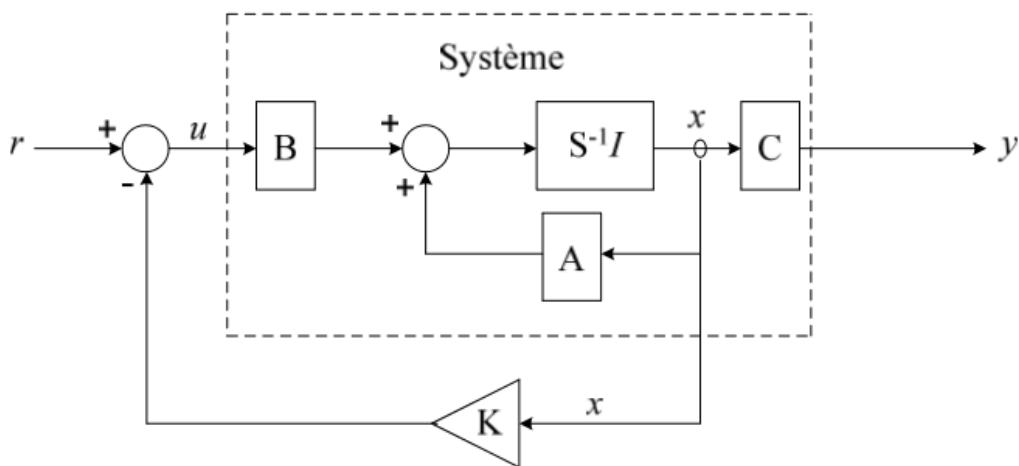


Figure 3-5 Schéma classique d'une commande LQR

Le développement de la solution de l'équation algébrique de Riccati permet d'écrire la commande optimale [41] :

$$u_{opt}(t) = -k * x(t)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} k = -R^{-1} B^T P \\ \dot{P} + PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \dots \dots \dots (3.29) \end{cases}$$

Il s'avère qu'indépendamment des valeurs choisies pour Q et R, la fonction coût possède un minimum global unique qui peut être obtenu à travers la résolution de

l'équation algébrique de Riccati. Les matrices Q et R peuvent être utilisées comme paramètres de conception afin de pénaliser les variables d'état et/ou les signaux de commande. En d'autres termes, une grande valeur de R implique qu'on veut stabiliser le système avec le moins d'énergie. D'autre part, une faible valeur de R implique qu'on ne pénalise pas le signal de control. Similairement, une grande valeur de Q implique qu'on veut stabiliser le système avec le moins de changements de l'état, à l'inverse une faible valeur de Q ne pénalise pas l'état du système et permet des changements brusques de l'état du système. Puisqu'il y a un compromis entre Q et R, on peut équaler la matrice Q à la matrice identité et varier R afin d'optimiser la fonction coût J.

Après avoir introduit la théorie de base de la commande LQR, on va à présent l'appliquer pour la commande de notre système. Pour implémenter la commande LQR au système du pendule inversé mobile, on définit le vecteur d'état :

$$x = \begin{pmatrix} \theta \\ \varphi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} \rightarrow \dot{x} = f(x, u)$$

Une linéarisation autour du point $\bar{x} = 0$ et on note $\tilde{x} = x - \bar{x}$ permet d'écrire :

$$\dot{\tilde{x}} = D_x f(\bar{x}, 0)\tilde{x} + D_u f(\bar{x}, 0)u = A * \tilde{x} + B * u \dots \dots \dots (3.30)$$

L'utilisation du 'Symbolic Toolbox' sous Matlab permet d'obtenir les matrices A et B :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -14715 & 0 & 0 \\ 0 & 2452.5 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ Et } B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 370000 \\ -60000 \end{pmatrix}$$

Une vérification de la contrôlabilité du système s'impose, pour cela la matrice de contrôlabilité $Co = [B \ AB \ A^2B \ A^3B]$ doit avoir un rang égal à l'ordre du système. Pour le calcul de cette dernière, on utilise la fonction `ctrb`

$$Co = \text{ctrb}(A, B) = \begin{pmatrix} 0 & 370000 & 0 & 882900000 \\ 0 & -60000 & 0 & -147150000 \\ 370000 & 0 & 882900000 & 0 \\ -60000 & 0 & -147150000 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{rank}(Co) = 4$$

On déduit donc que le système est contrôlable malgré le fait que le système a deux degrés de liberté et ne possède d'actionneurs que sur un seul degré.

La matrice de retour $K = lqr(A, B, Q, R)$

Les matrices Q et R permettant de minimiser la fonction coût sont $Q = I_{4 \times 4}$ et $R = 1000$.

On obtient donc : $K = [-0.0316 \quad -3.6207 \quad -0.0394 \quad -0.4409]$

Le signal de commande : $u = -k * x$

On montre la réponse du modèle dynamique élaboré avec un contrôleur LQR pour différentes conditions initiales :

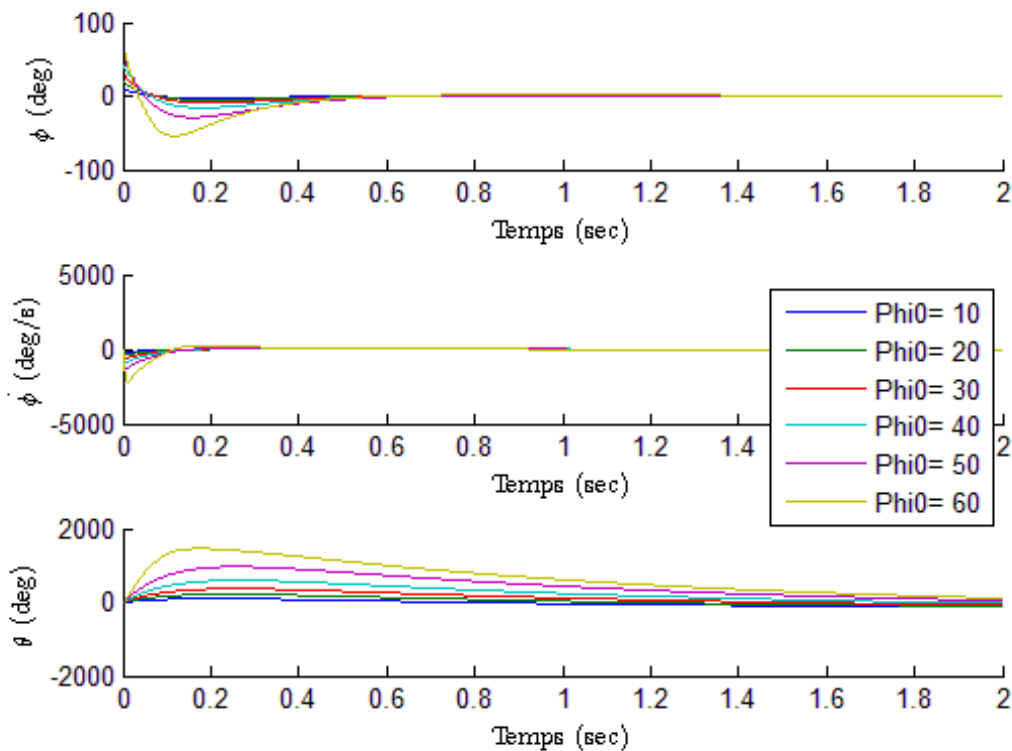


Figure 3-6 Réponse du modèle dynamique avec un contrôleur LQR

D'après les courbes obtenues, un correcteur LQR permet théoriquement de stabiliser le pendule inversé à la position verticale ($\varphi = 0$) au bout d'un temps ne dépassant pas les 500 ms tout en ramenant le système à sa position initiale ($\theta = 0$).

3.3.3 Analyse des résultats

Les deux commandes proposées donnent des résultats satisfaisants en termes de temps de réponse et de dépassements.

a Commande PD

La commande PD a l'avantage de pouvoir stabiliser le système autour de la position verticale sans avoir recours à un capteur de position des roues.

L'augmentation du gain proportionnel peut rendre le système instable. En effet, les modes transitoires du signal de commande sont d'autant plus forts que ce gain est grand, au point de provoquer des amplitudes inadmissibles lors des variations rapides de l'inclinaison du pendule. Ceci nous a conduits à introduire des saturations de commande pour ne pas risquer de dégrader le système.

L'action dérivée permet de rendre la réponse plus rapide et d'anticiper la réponse du processus sans être obligé d'avoir des gains trop élevés. Nous pouvons conclure qu'un contrôleur classique de type PD est suffisant pour la commande du système.

b Commande LQR

La commande LQR nécessite la connaissance de l'angle de rotation des roues, car dans le cas contraire la position du pendule inversé diverge, ce qui implique que pour implémenter la commande LQR proposée, des capteurs de position des roues sont indispensables.

Le choix des matrices de pondération Q et R est fondé sur le fait que le signal de commande du système ne doit pas dépasser une certaine limite au risque de dégrader le mécanisme, cette contrainte nous a conduit à choisir une grande valeur pour R .

Autre inconvénient, les valeurs choisies pour les gains sont grandes ce qui rend le contrôle du système très sensible vis-à-vis les bruits du système et des mesures.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a été réservé dans un premier temps à la modélisation du système du pendule inversé mobile à deux roues.

Dans un second temps, nous avons présenté l'étude théorique et les résultats de l'application de deux types de commande pour le contrôle de la structure. Pour finir, une analyse des résultats ainsi qu'une comparaison des deux commandes ont été effectuées.

Le chapitre suivant sera consacré à l'implémentation de l'algorithme pour la détermination de l'angle d'inclinaison présenté dans le chapitre 2 et à la réalisation du système du pendule inversé mobile à deux roues, ainsi que la mise en œuvre des stratégies de contrôle décrites dans ce chapitre.

Chapitre 4 Architecture Matérielle et implémentation logicielle

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu présenter la méthodologie suivie pour implémenter et réaliser le système d'estimation de l'angle d'inclinaison ainsi que la vitesse angulaire du pendule inversé en fusionnant les données émanant de plusieurs capteurs.

Ensuite, nous allons détailler la stratégie du control des deux moteurs en se basant sur les données issues de l'estimateur de l'inclinaison du pendule inversé.

Et en dernier, nous allons par la suite assembler les différentes parties du système et mesurer ses performances.

4.2 Vue d'ensemble du système

Afin de constituer le système du pendule inversé mobile à deux roues, on doit disposer de :

- Un dispositif de suivi du mouvement, qui va nous permettre de capter l'inclinaison du pendule inversé ;
- Un processeur doté d'une multitude de périphériques, pour le traitement des données ainsi que la communication avec d'autres dispositifs ;
- Deux moteurs pour faire avancer/reculer le mécanisme ;
- Un dispositif permettant au processeur cité auparavant de contrôler la vitesse et le sens de rotation des deux moteurs.

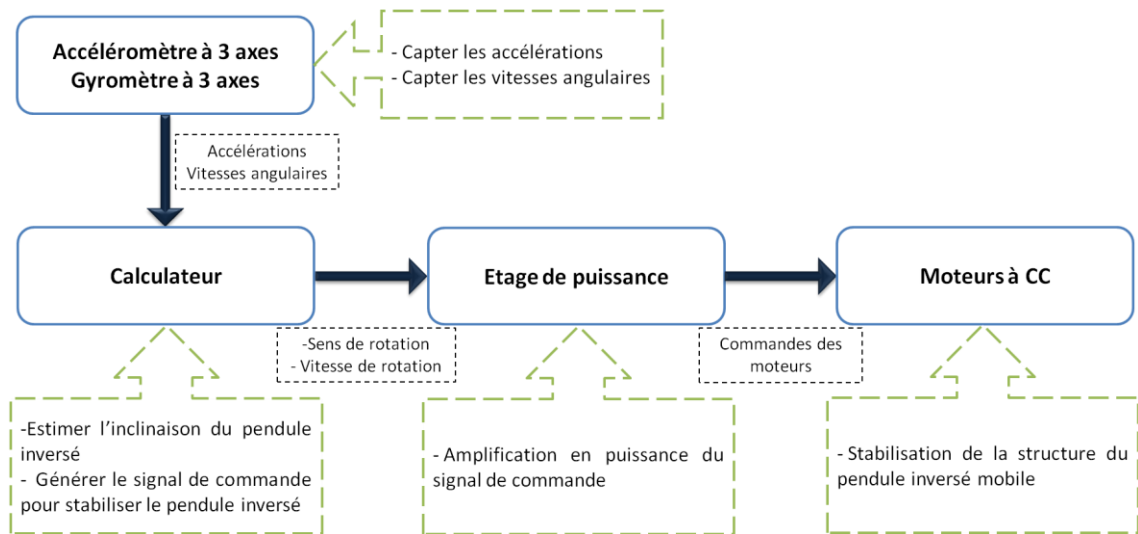


Figure 4-1 Vue d'ensemble du système du pendule inversé à deux roues

La figure ci-dessous permet d'avoir une vue d'ensemble sur le fonctionnement du système, qui comprend :

- Un accéléromètre à 3 axes et un gyromètre à 3 axes qui donnent les mesures des accélérations et des vitesses angulaires ;
- Ces derniers sont acheminés vers un calculateur, pour être filtrés, afin d'estimer l'angle d'inclinaison et la vitesse angulaire du pendule inversé ;
- En se basant sur l'inclinaison actuelle du pendule inversé, sur une stratégie de contrôle définie préalablement, le calculateur génère une consigne de commande permettant de contrôler la vitesse et le sens de rotation des deux moteurs en passant par un étage de puissance ;
- Une source d'énergie permettant d'alimenter les différentes parties du dispositif.

4.3 Composition du système

Les différentes parties constituant le système du pendule inversé mobile à deux roues ont été choisies comme suit :

- Pour le dispositif de suivi de mouvement, on a opté pour le **MPU-9250** ;
- Le **Raspberry Pi** est choisie comme processeur ;
- Le **L298n** est utilisé comme étage de puissance pour les deux moteurs ;
- Pour les moteurs continus, on a opté pour le moteur **GM37-545**.

- La batterie **Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P Lipo Batterie** est choisie pour alimenter le système.

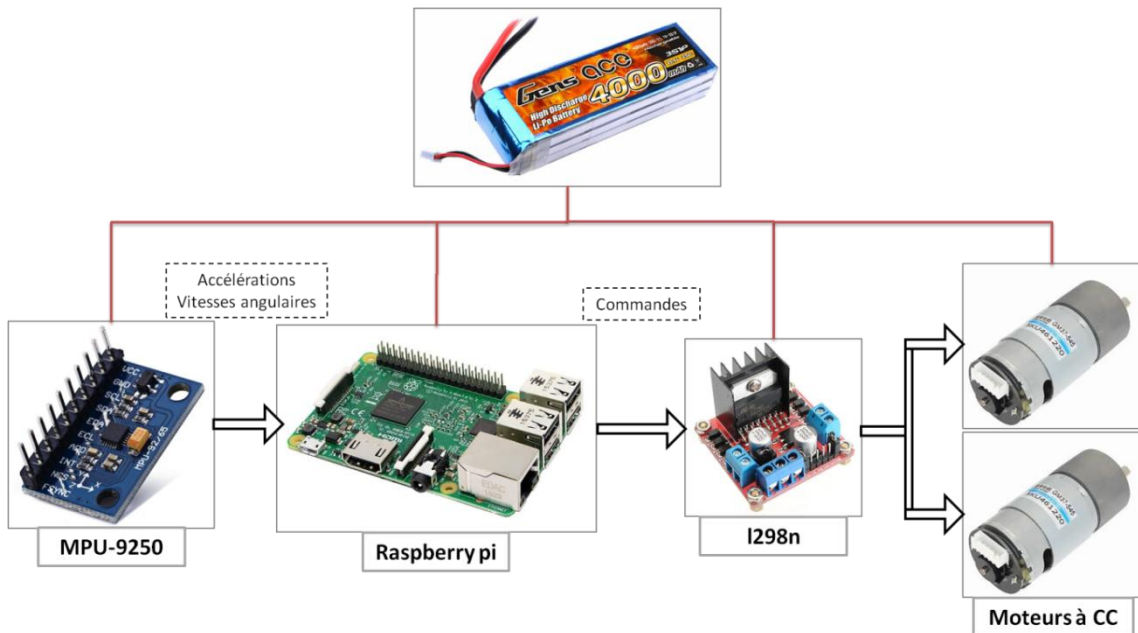


Figure 4-2 Capteurs, actionneurs et interfaces électroniques utilisés

4.3.1 Unité de mesure inertielle (IMU) à 9ddl MPU-9250

Le MPU-9250 est un dispositif de suivi du mouvement (MotionTracking) à 9 axes de deuxième génération d'InvenSense pour Smartphones, tablettes, capteurs corporels et autres marchés grand public. Le MPU-9250 est l'un des plus petits dispositifs de suivi du mouvement à 9 axes au monde, il intègre les dernières innovations technologiques, ce qui permet de réduire considérablement la taille de la puce et la consommation énergétique, tout en améliorant les performances et le coût.



Figure 4-3 MPU-9250

Le MPU-9250 est constitué de plusieurs circuits encapsulés dans un seul boîtier, il contient :

a un accéléromètre à 3 axes :

Les accéléromètres MEMS sont des systèmes micro-électromécaniques qui mesurent la force d'accélération statique et dynamique. La force statique fait référence à l'attraction gravitationnelle de la Terre. À la surface de la Terre, tous les objets tombent avec une accélération définie par un "g", ce qui correspond approximativement à 9,81 m/s². Assez souvent, le "g" est utilisé comme une unité d'accélération plutôt que d'exprimer une accélération en (m/s²). Des forces dynamiques se produisent lorsque des mouvements ou des vibrations sont appliqués à l'accéléromètre. Les accéléromètres permettent des fonctionnalités telles que l'orientation de l'écran, la protection des disques durs, la reconnaissance des gestes pour les jeux interactifs, etc.

b un gyroscope à 3 axes :

Les gyroscopes MEMS sont des systèmes micro-électromécaniques qui détectent le taux de rotation en degrés par seconde autour des trois axes (tangage, roulis et lacet). Les gyroscopes MEMS sont actuellement utilisés dans les appareils électroniques portables pour la stabilisation d'image, l'assistance GPS, etc.

c un magnétomètre à 3 axes

Les magnétomètres sont des capteurs qui détectent le champ magnétique terrestre selon plusieurs axes. Ce sont des capteurs qui fournissent des informations de cap (direction) absolues. Utilisés généralement en collaboration avec des accéléromètres et des gyroscopes, les capteurs magnétiques améliorent le GPS pour les services de localisation.

L'orientation des axes de l'accéléromètre, la polarité de rotation du gyroscope et l'orientation des axes du magnétomètre sont présentées dans la figure ci-dessous.

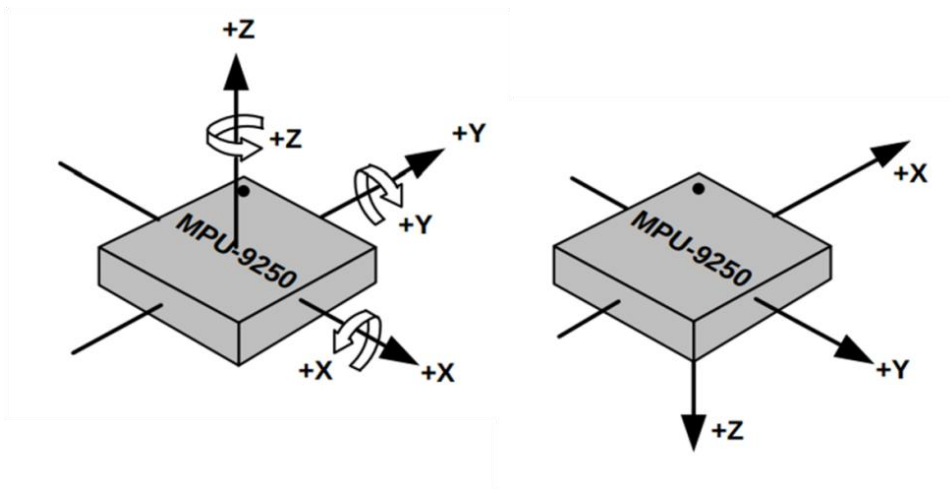


Figure 4-4 Orientation des axes de l'accéléromètre, du gyroscope (gauche) et du magnétomètre (droite)

Les principales caractéristiques du capteur MPU-9250 sont listées dans le tableau ci-dessous

Tableau 4-1 Principales caractéristiques du capteur MPU-9250

Accéléromètre à 3 axes	Gamme : $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$
	Sensibilité : jusqu'à 16384 LSB/g
Gyroscope à 3 axes	Gamme : $\pm 250 \ 500 \ 1000 \ 2000 \ ^\circ / s$
	Sensibilité : jusqu'à 131 LSB/ $^\circ$ /sec
Magnétomètre à 3 axes	Gamme : $\pm 4800 \ \mu T$
	Sensibilité : $0.6 \ \mu T/LSB$
Alimentation	3.3v ~ 6.5v
Interface	I2C/SPI
Dimension	25.5mm x 15.4mm
Poids	2.72g

4.3.2 Ordinateur miniature Raspberry Pi 3 modèle B+

Le Raspberry Pi 3 B+ est un ordinateur mono-carte pouvant se connecter à un moniteur, à un ensemble clavier/souris et disposant d'interfaces Wi-Fi et Bluetooth.

Le modèle Raspberry Pi3 B+ est basée sur un processeur ARM Cortex-A53 64 bits quatre cœurs à 1,4 GHz, il possède 1 GB de mémoire RAM, une interface

Wi-Fi, une interface Bluetooth, quatre ports USB, un port Ethernet, un port HDMI, un port micro-SD et un connecteur GPIO avec 40 broches d'E/S.



Figure 4-5 Raspberry Pi 3 modèle B+



Raspberry Pi et Arduino ont tous deux été initialement conçus pour être des outils pédagogiques, ce qui explique pourquoi ils sont devenus si populaires. Les deux dispositifs sont très faciles à apprendre comment les utiliser. En réalité, Arduino et Raspberry Pi sont deux plateformes complètement différentes. Pour commencer, les cartes type Raspberry Pi sont de la famille des « ordinateurs mono-carte », tandis que les cartes Arduino sont de la famille des microcontrôleurs. Voici une approche pour différencier Arduino et Raspberry Pi et déterminer laquelle des deux cartes électroniques correspond le mieux à nos besoins.

Raspberry Pi est originaire du Royaume-Uni. L'inventeur Eben Upton et ses collègues du Computer Laboratory de l'Université de Cambridge étaient frustrés de la baisse du nombre d'étudiants, et du manque de compétences de ceux qui intégraient le programme. Raspberry Pi a été conçu comme un micro-ordinateur à bas prix pour développer ses talents de bricoleur. L'équipe d'Upton a commencé à travailler sur des prototypes en 2006 et le premier lot de Pi a été achevé en avril 2012.

Arduino, de son côté, est né en Italie. Il porte le nom du bar où l'inventeur Massimo Banzi et ses cofondateurs ont mis l'idée au point. Banzi, professeur à l'Interaction Design Institute Ivrea, voulait un outil de prototypage matériel simple pour ses étudiants en design.

Voici un aperçu de quelques-unes des caractéristiques qui montrent les principales différences entre les deux :

Tableau 4-2 Tableau comparatif entre Arduino Uno rev3 et le Raspberry pi 3

		
Prix	env. 20 \$	env. 35 \$
Taille	7.6 x 1.9 x 6.4 cm	8.6 x 5.4 x 1.7 cm
Vitesse d'horloge	16 MHz	700 Mhz
Réseau	Aucun	Ethernet, Wifi, Bluetooth
Tension d'entrée	7 à 12 V	5 V
Mémoire flash	32 KB	Carte SD (2 à 256 Go)
USB	1, entrée uniquement	4
Système d'exploitation	Non	Oui (Plusieurs possibilités)

Le prix et la taille des deux dispositifs sont assez similaires ; nous savions déjà que Raspberry Pi et Arduino sont minuscules et peu onéreux. C'est ce qui se cache à l'intérieur qui les distingue.

Le Raspberry Pi est 40 fois plus rapide qu'un Arduino en ce qui concerne la vitesse d'horloge et possède 128.000 fois plus de RAM. C'est un ordinateur indépendant qui peut exécuter un système d'exploitation réel sous Linux ou sous autres systèmes d'opération. Il peut effectuer plusieurs tâches en parallèle, il dispose jusqu'à quatre ports USB et peut se connecter à Internet en wifi ou en filaire (pour les versions disposant d'une prise Ethernet). En bref, il est assez puissant pour fonctionner comme un ordinateur personnel.

On pourrait donc penser que Raspberry Pi est supérieur à Arduino, mais c'est seulement en ce qui concerne les applications logicielles. La simplicité d'Arduino en fait une meilleure solution pour des projets purement matériels.

L'Arduino est nettement plus facile à utiliser. Par exemple, si on veut écrire un programme pour faire clignoter une LED avec Raspberry Pi, on aura besoin d'installer un système d'exploitation et des bibliothèques de codes pour commencer. Sur Arduino, on peut obtenir une lumière LED clignotante avec seulement quelques lignes de code. Puisque Arduino n'est pas conçu pour exécuter un système d'exploitation ou un grand nombre de logiciels, il suffit de le brancher pour pouvoir commencer.

Pour ce projet, on a opté pour l'utilisation d'un Raspberry Pi avec le système d'exploitation Raspbian offrant la possibilité d'exécuter plusieurs tâches simultanément. De plus, d'autres améliorations sont prévues pour l'avenir comme continuité de ce projet (Caméra, Lidar, etc.), ces améliorations nécessitent une puissance de calcul et un espace mémoire importants, choses proposés déjà par le Raspberry Pi.

Le fait que le Raspberry Pi soit un ordinateur fonctionnant sous un système d'exploitation lui donne accès à tous les langages de programmation. Dans Raspberry Pi, le Pi c'est pour Python. Python est le langage "par défaut" choisi par les concepteurs du Raspberry Pi, il offre plusieurs avantages :

- Optimise la productivité des programmeurs en offrant des outils de haut niveau et une syntaxe simple à utiliser;
- Une syntaxe clairement séparée des mécanismes de bas niveau, permet une initiation aisée aux concepts de base de la programmation;
- Python est un langage qui peut s'utiliser dans de nombreux contextes et s'adapter à tout type d'utilisation grâce à d'innombrables bibliothèques.
- On l'utilise également comme langage de développement de prototype lorsqu'on a besoin d'une application fonctionnelle avant de l'optimiser avec un langage de plus bas niveau. Il est particulièrement répandu dans le monde scientifique, et possède de nombreuses extensions destinées aux applications numériques.

Toutes ces raisons nous ont amené à utiliser Python comme langage de programmation pour le Raspberry Pi dans le cadre de ce projet.

Un des grands avantages du Raspberry Pi est qu'il dispose d'un connecteur GPIO sur lequel on peut connecter du matériel, le Raspberry Pi dispose de 40 GPIO. En plus de fournir des sources d'alimentation (GND, 3.3V and 5V), toutes les broches GPIO peuvent être utilisées soit comme entrée, soit comme sortie digitale. Les broches nommées SCL et SDA peuvent être utilisées pour l'interface I2C. De plus, certaines broches peuvent être utilisées en PWM permettant le contrôle en puissance.

4.3.3 Moteurs à courant continu GM37-545

Le moteur choisi est le GM37-545 du fabricant CHIHAI Motors, doté d'un réducteur avec possibilité de choisir le rapport de réduction, doté aussi d'un encodeur permettant d'extraire la position et la vitesse angulaires de l'axe du moteur.



Figure 4-6 Moteur GM37-545

Les principales caractéristiques du moteur pour un rapport de réduction égal à 30 et une alimentation égale à 12V, sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4-3 Principales caractéristiques du moteur GM37-545

Caractéristiques	Valeur
Puissance (W)	18.0
Vitesse à vide (RPM)	190
Courant à vide (mA)	<360
Couple nominal (kg.cm)	3.0
Vitesse nominale (RPM)	160
Courant nominal (A)	<1.5
Couple maximal (kg.cm)	12.5
Courant maximal (A)	<8.0

4.3.4 Double pont en H L298n

Le L298N est un pilote de moteurs à double pont en H qui permet le contrôle de la vitesse et de la direction de deux moteurs à courant continu simultanément. Le module peut commander des moteurs à courant continu ayant des tensions comprises entre 5 et 35 V, avec un courant de pointe pouvant atteindre 2A.

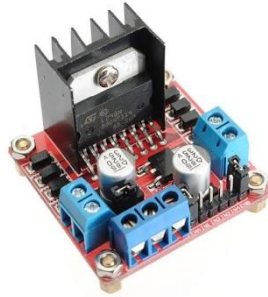


Figure 4-7 Double pont en H l298n

Dans le cadre de ce projet, deux moteurs sont contrôlés aussi bien en vitesse qu'en direction en utilisant le PWM et le double pont en H. Le PWM, ou modulation de largeur d'impulsion, est une technique qui permet d'ajuster la valeur moyenne de la tension transmise au dispositif électronique en allumant et éteignant rapidement l'alimentation. La tension moyenne dépend du rapport cyclique qui est la durée pendant laquelle le signal est activé par rapport à la durée d'une période.

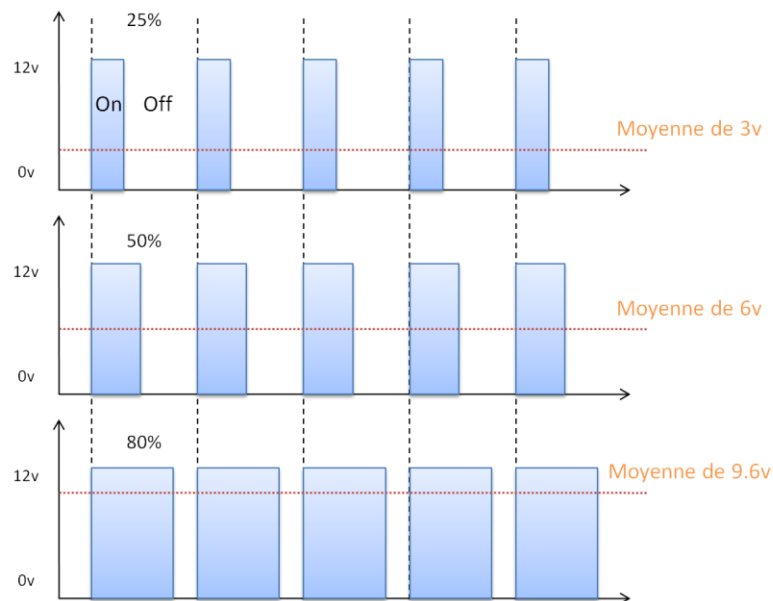


Figure 4-8 Principe de la modulation de largeur d'impulsion (PWM)

D'autre part, pour contrôler le sens de rotation, il suffit d'inverser le sens du courant dans le moteur. La méthode la plus courante consiste à utiliser un pont en H. Un circuit en pont en H contient quatre éléments de commutation, des transistors ou des MOSFET, avec le moteur au centre formant une configuration de type H. En activant simultanément deux interrupteurs opposés diagonalement, il est possible de changer le sens du courant et donc le sens de rotation du moteur.

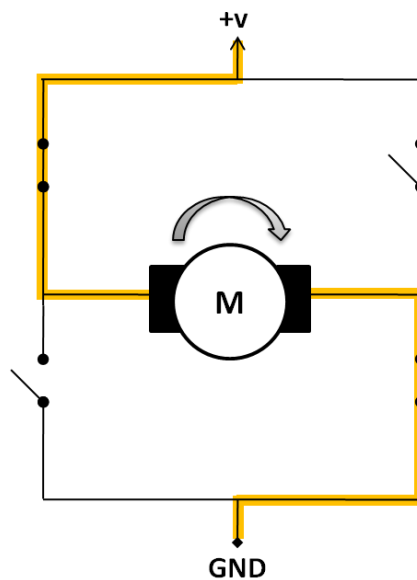


Figure 4-9 Principe du pont en H

Donc, en combinant ces deux méthodes, le PWM et le pont en H, on peut avoir un contrôle complet sur le moteur à courant continu.

4.3.5 Batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P Lipo

Les accumulateurs au Lithium Polymère (ou LiPo) présentent de nombreux avantages et constituent indéniablement un énorme progrès technologique dans le monde des batteries. On présente ci-dessous les principales caractéristiques de la batterie choisie:



Figure 4-10 Batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P Lipo

Les caractéristiques de la batterie choisie sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau 4-4 Principales caractéristiques de la batterie Gens ace 4000mAh 11.1V 25C 3S1P

Caractéristiques	Valeur
Capacité (mAh)	4000
Voltage (V)	11.1
Décharge continue max (C)	25
Poids (g)	328
Dimensions (mm)	137*43*29

4.4 Implémentation de l'algorithme d'estimation de l'inclinaison

Le schéma bloc montré ci-dessous explique la chaîne d'acquisition pour le traitement des données issues du capteur MPU-9250 et qui permet de fournir à son issue une estimation de l'angle d'inclinaison du pendule inversé, ainsi que sa vitesse angulaire.

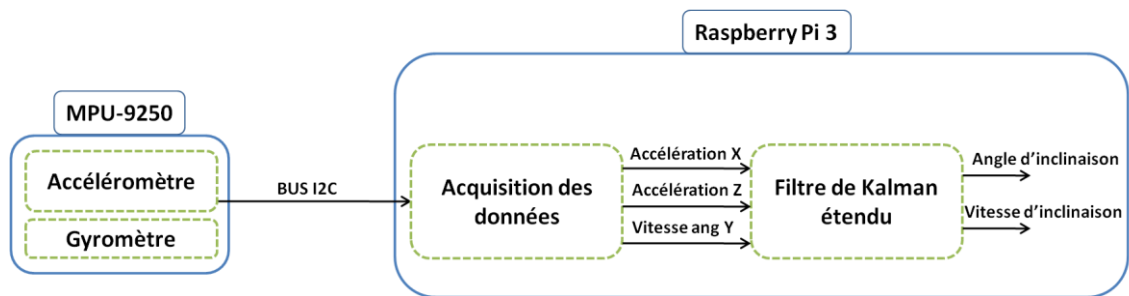


Figure 4-11 Schéma bloc d'estimation de l'inclinaison

4.4.1 Acquisition des données

La communication entre le MPU-9250 et le Raspberry Pi est assurée par un bus de communication I2C (IIC : Inter-IC-Communication). Ce dernier permet la connexion de circuits intégrés à proximité (1m). Les caractéristiques électriques et le protocole de communication ont été déposés par Philips, l'I2C est devenu un standard industriel utilisé par de très nombreux constructeurs. C'est un bus de communication série, synchrone, bidirectionnel et avec un protocole de reconnaissance. La fréquence de transfert est comprise entre 100KHz et 400KHz.

Le bus est piloté par un maître (MASTER) qui génère l'horloge de communication. (Il est possible de travailler en mode multi-maitres). Tous les autres circuits sont esclaves (SLAVES), ils reçoivent tous la même horloge issue du maître. Le bus est constitué de deux fils (en plus de l'alimentation) :

- SCL : Serial CLock qui est l'horloge de cadencement des communications (unidirectionnel)
- SDA : Serial DAta permet les échanges bidirectionnels entre le maître et un esclave.

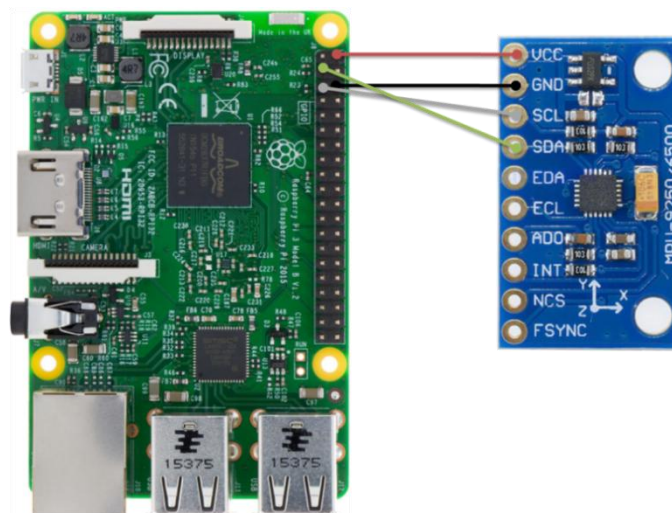


Figure 4-12 Connexions physiques entre le Raspberry Pi et le MPU-9250

Le Raspberry Pi acquiert les données à partir du MPU-9250 selon l'organigramme illustré dans la figure ci-dessous:

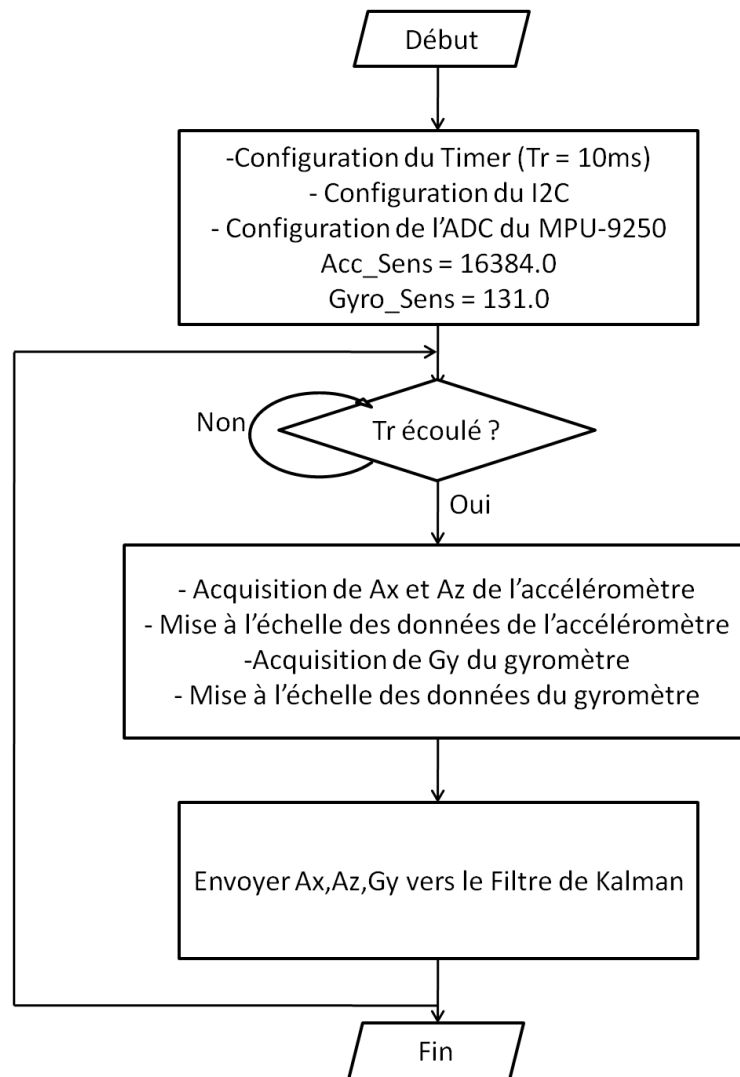


Figure 4-13 Organigramme de l'acquisition des données du MPU-9250

4.4.2 Implémentation du filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman étendu a été présenté dans le chapitre 2, son implémentation suit l'organigramme de la figure ci-dessous:

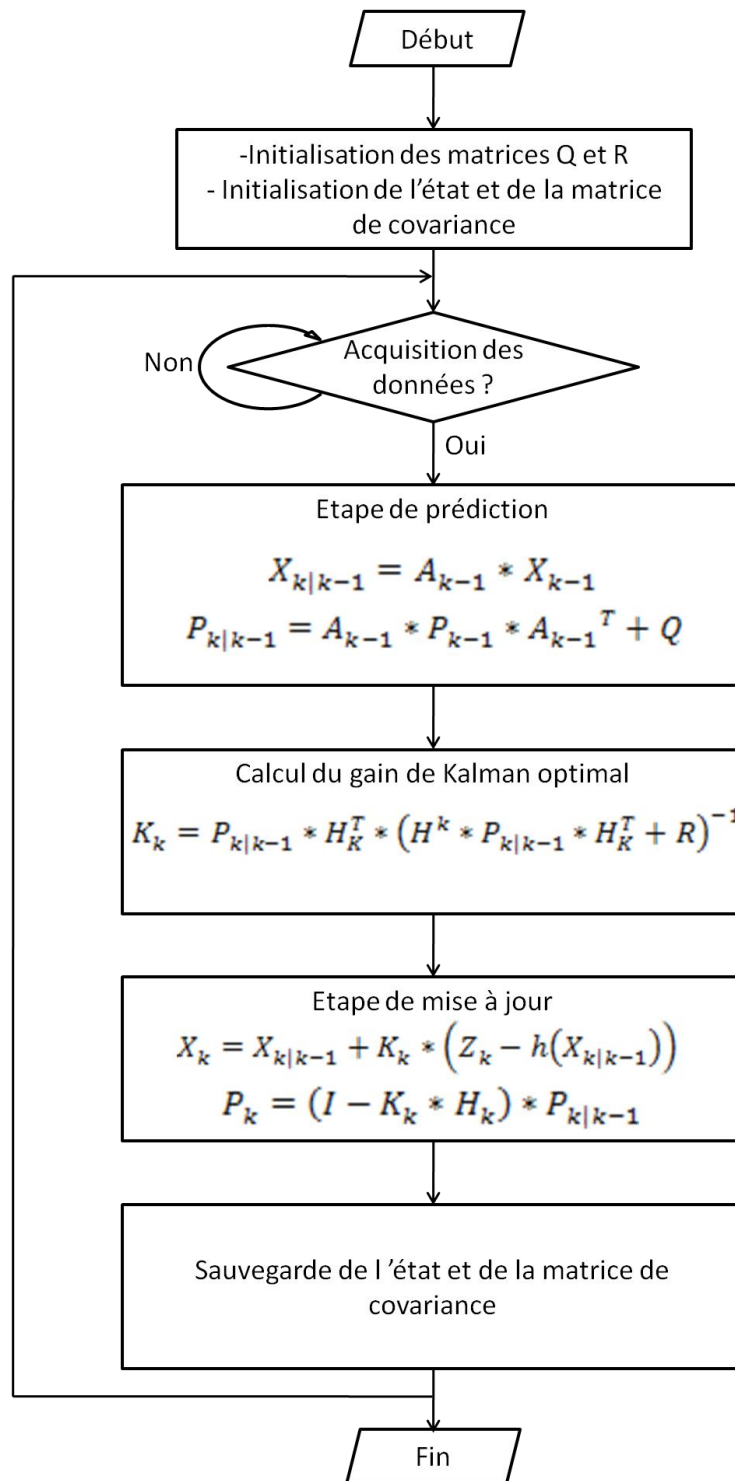


Figure 4-14 Organigramme de l'implémentation du filtre de Kalman étendu

Il est important de noter la présence d'une erreur de zéro (offset) et une erreur d'échelle (gain) lors du calcul de l'angle d'inclinaison. Pour cela, lors du premier démarrage du programme, une fonction de calibrage est sollicitée permettant de déterminer l'offset et le gain approprié.

4.5 Contrôle des moteurs

Dans le chapitre 3, deux commandes ont été présentées, en l'occurrence la commande PD et la commande optimale LQR. Cette dernière nécessite la connaissance de l'angle de rotation de l'axe du moteur, hors qu'en phase de test l'un des encodeurs des deux moteurs s'est avéré non fonctionnel. Pour cette raison, on se contente dans le cadre de ce projet d'implémenter la commande PD pour la stabilisation du système.

Le schéma bloc de la figure ci-dessous montre la chaîne de control permettant au Raspberry Pi, connaissant l'angle d'inclinaison et la vitesse angulaire du pendule inversé, de contrôler les deux moteurs à courant continu.

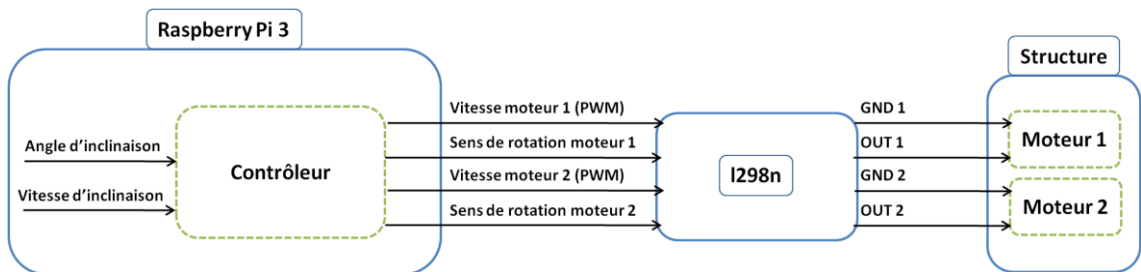


Figure 4-15 Schéma bloc du contrôle des moteurs

Le contrôle des deux moteurs se concrétise en utilisant le module l298n permettant de contrôler la direction et la vitesse de rotation de ces derniers.

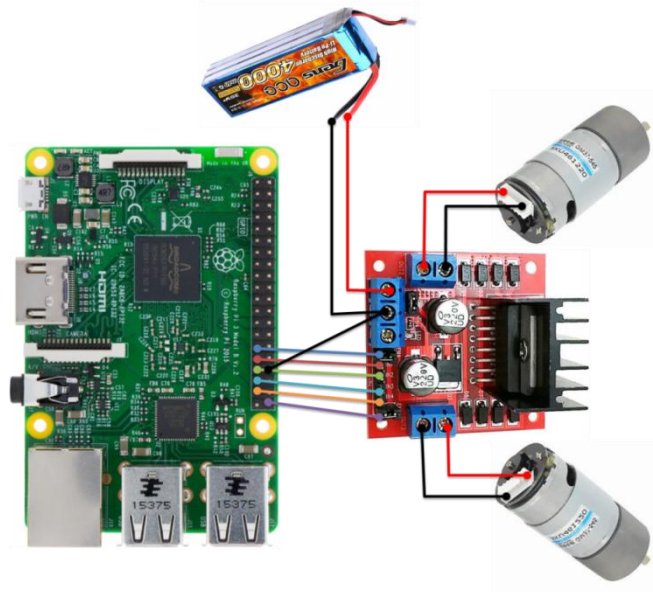


Figure 4-16 Connexions physiques entre le Raspberry Pi, le l298n et les moteurs

Le Raspberry Pi procède au contrôle des deux moteurs afin de stabiliser le pendule inversé selon l'organigramme suivant:

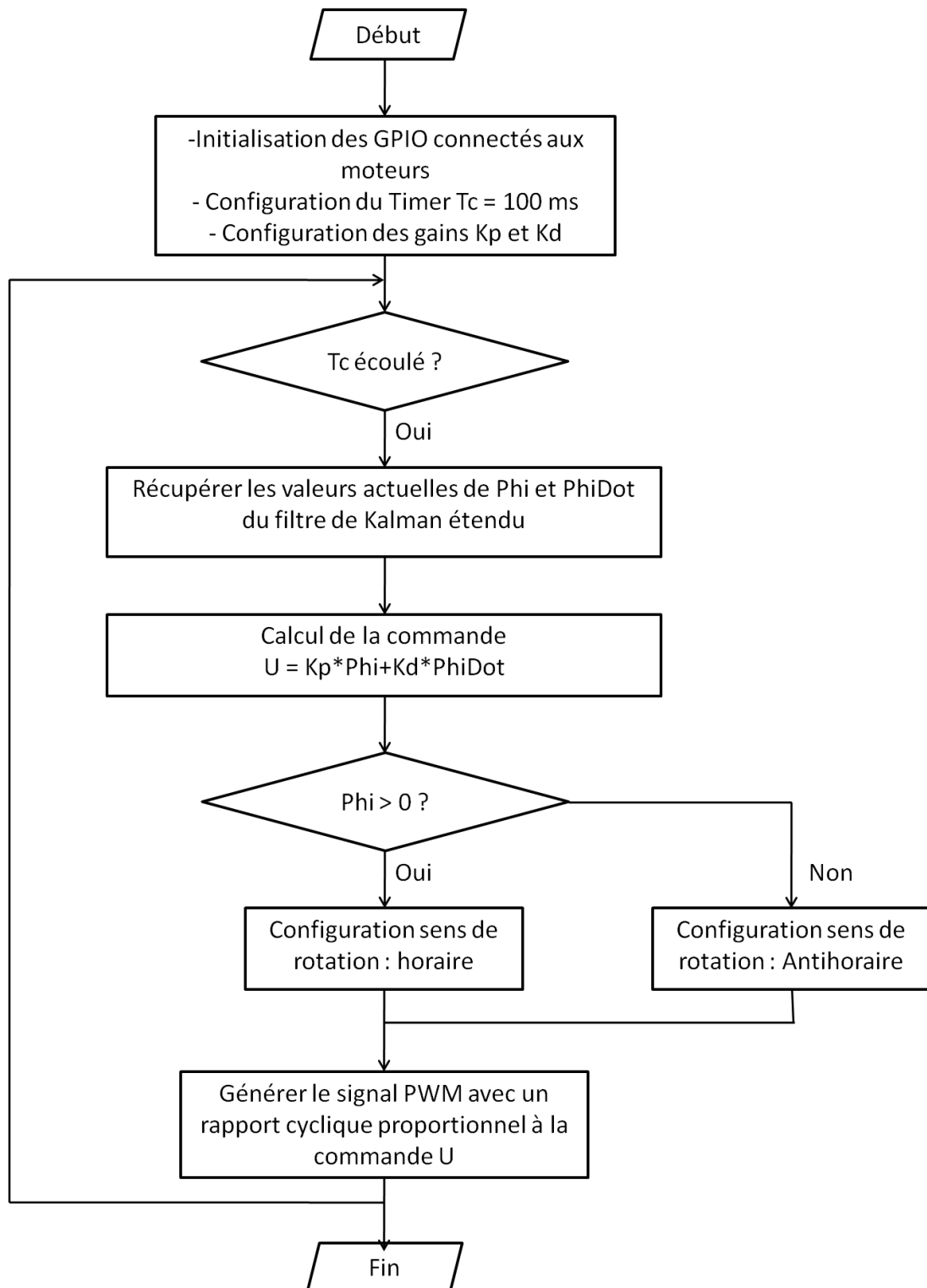


Figure 4-17 Organigramme du contrôle des moteurs à courant continu

4.6 Analyse des performances

Le schéma fonctionnel représentant le flux d'informations et l'interface entre les différents composants du robot est montré ci-dessous.

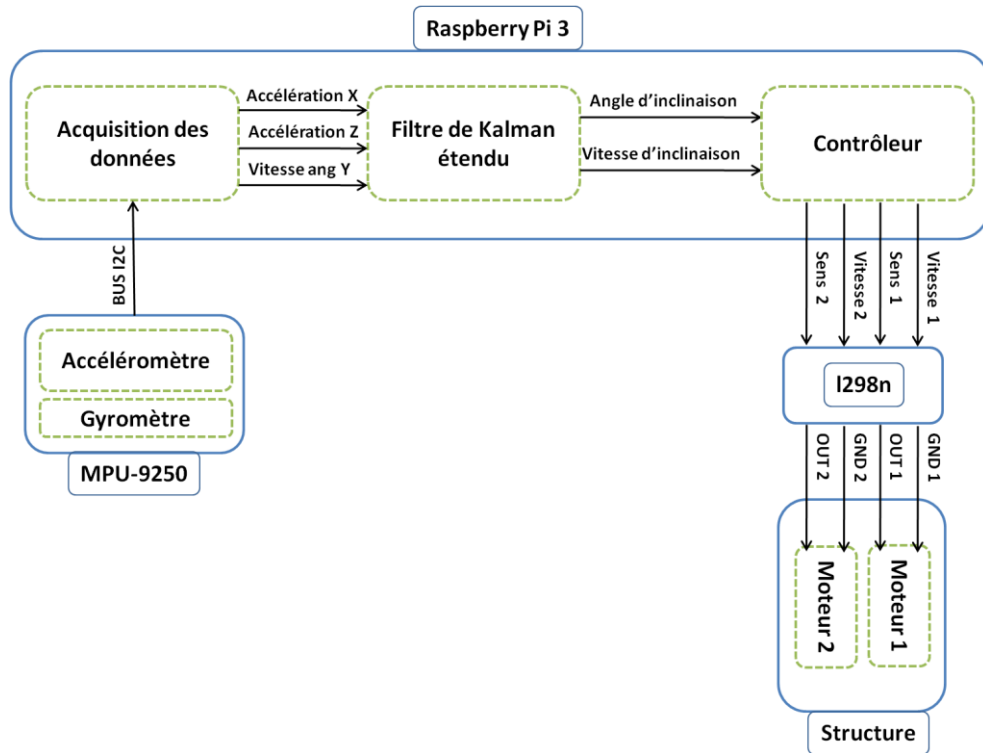


Figure 4-18 Flux d'informations entre les différents composants du système

Le système réalisé est montré dans la figure ci-dessous :



Figure 4-19 Système réalisé

L'étalonnage du filtre de Kalman est généralement effectué par une méthode statistique complexe nécessitant beaucoup de calcul. Dans ce travail, les valeurs sont définies par essai et correction, une bonne compréhension du processus est nécessaire pour déterminer rapidement les valeurs appropriées pour les matrices Q et R.

La mise en œuvre de la stratégie de contrôle des moteurs est basée sur la théorie et la simulation discutées dans le chapitre 3. Comme le modèle dynamique ne peut jamais refléter exactement le comportement réel d'un système, les gains obtenus par simulation ont servi comme base de départ et des ajustements plus fins ont été indispensables pour obtenir la réponse souhaitée.

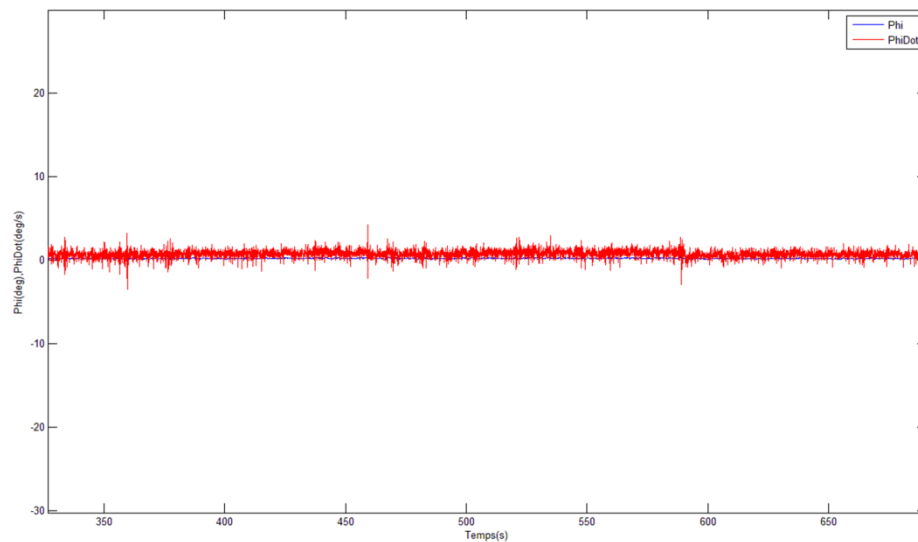


Figure 4-20 Réponse du système en absence d'une perturbation externe

En absence d'une perturbation externe, on voit que le contrôleur conçu est parfaitement capable de maintenir le pendule inversé en position verticale.

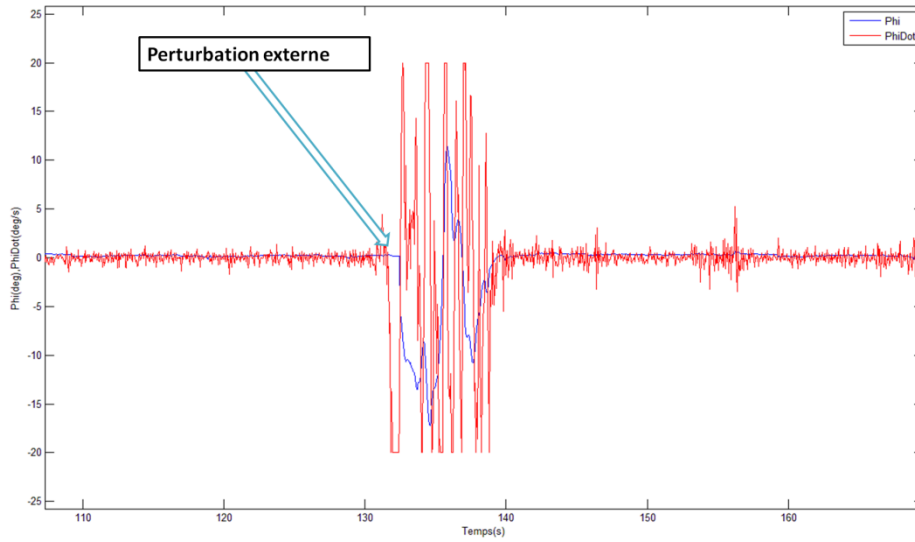


Figure 4-21 Réponse du système en présence d'une perturbation externe

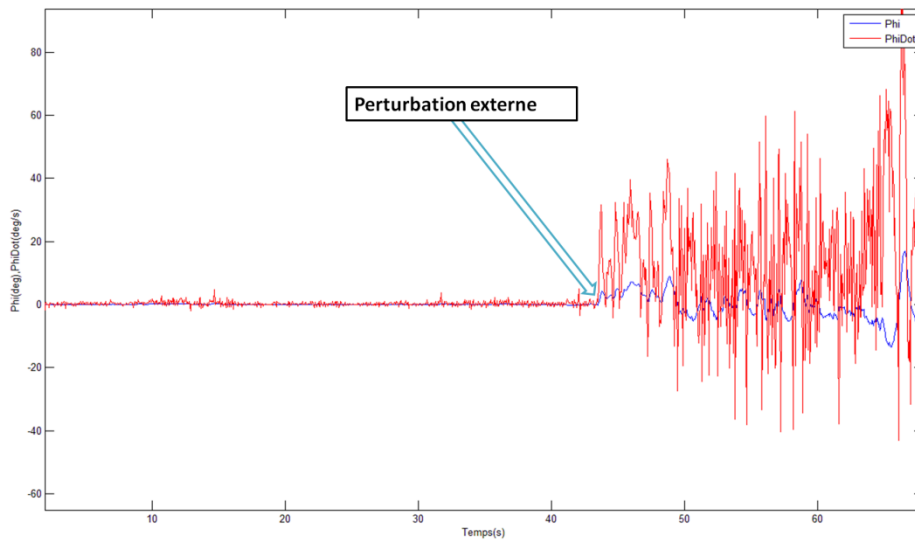


Figure 4-22 Réponse du système en présence d'une perturbation externe

En introduisant des perturbations externes, le contrôleur arrive à ramener le pendule à sa position verticale, mais aussitôt que ces perturbations dépassent un certain seuil, il lui est impossible de se maintenir debout.

L'hypothèse selon laquelle le système peut être contrôlé en utilisant un contrôleur linéaire tout en linéarisant le système autour du point d'équilibre vertical, s'est avérée ne pas être vraie dans toutes les situations.

Bien qu'il soit plus facile de développer une commande linéaire pour un tel système, l'effet des non linéarités sur le système ne doit pas être négligé afin de garantir une robustesse du système vis à vis des perturbations externes.

4.7 Conclusion

Ce dernier chapitre a permis de finaliser le prototype du pendule inversé mobile à deux roues.

Pour ce faire, on a commencé par présenter et argumenter le choix des différents capteurs, actionneurs et interfaces électroniques utilisés ainsi que le flux des données circulant entre ces derniers.

Par la suite, on a détaillé l'implémentation du filtre de Kalman ainsi que la génération des commandes des deux moteurs par le Raspberry Pi.

Finalement, une discussion autour des performances obtenues est présentée tout en appuyant sur les atouts du système et en mentionnant les imperfections rencontrées dans la phase des testes.

Conclusion générale et perspectives

Un robot mobile entraîné par deux roues basé sur le modèle à pendule inversé est considéré comme une excellente plateforme pour étudier l'utilisation d'algorithmes pour la fusion de données émanant de plusieurs capteurs. Le robot étant mécaniquement instable, il devient nécessaire d'explorer les possibilités de la mise en œuvre d'un système de contrôle pour maintenir le système en équilibre.

À travers ce modeste travail, nous avons pu concevoir et réaliser un prototype de système de pendule inversé mobile à deux roues. Celui-ci est constitué d'un système pour l'estimation de l'inclinaison (angle et vitesse angulaire) du pendule, et d'une structure motorisée avec deux moteurs indépendamment contrôlés.

Le travail effectué peut être décomposé en deux grandes parties principales ; la première partie consiste à estimer l'inclinaison du pendule en fusionnant les données émanant d'un accéléromètre et un gyromètre, tandis que la deuxième s'intéresse à la commande de la structure motorisée afin de la maintenir debout dans sa position verticale.

Le travail présenté n'est qu'une ébauche concernant les systèmes de pendule inversé mobile à deux roues, d'autres travaux peuvent être proposés pour son amélioration et son développement, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Implémenter une stratégie de contrôle permettant le suivi d'une trajectoire arbitraire ;
- Réalisation d'un système de transmission de données sans fil permettant le contrôle du système à distance et l'envoi des paramètres en temps réel ;
- Un contrôleur non linéaire est suggéré comme une amélioration future du système de contrôle actuel ;

- Implémenter une commande en boucle fermée des moteurs permettant le contrôle précis de leurs vitesses ;
- Doter le système avec d'autres capteurs qui lui permettent de recueillir plus d'informations sur son environnement et qui lui donnent une plus grande autonomie ;
- Implémenter d'autres algorithmes de fusion de données et faire une étude comparative avec l'algorithme réalisé dans le cadre de ce travail.

Bibliographie

- [1] Michael Sivak et Brandon Schoettle: 'Relative Costs of Driving Electric and Gasoline Vehicles in the Individual U.S. States', Université du Michigan, 2018.
- [2] Felix Grasser, Aldo D'Arrigo et Silvio Colombi : 'JOE: A Mobile, Inverted Pendulum', 'IEEE Transactions On Industrial Electronics', 2002.
- [3] Hyung lik Lee, Hyun Wook Kim et Seul lung : 'Development of a Mobile Inverted Pendulum Robot System as a Personal Transportation Vehicle with Two Driving Modes :TransBOT', Université Nationale de Chungnam.
- [4] <http://www.segway.com>.
- [5] Yoshihiko Takahashi, Nobutake Ishikawa et Toshihide Hagiwara : 'Inverse Pendulum Controlled Two Wheel Drive System ', Institut de technologie de Kanagawa.
- [6] Toshinobu Takei, Ryoko Imamura et Shin'ichi Yuta: 'Baggage Transportation and Navigation by a Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot', 'Ieee Transactions On Industrial Electronics', 2009.
- [7] K.Kleiner : 'Better robots could help save disaster victims', Newscientist.com, 05-jan-2006.
- [8] M.McKee: 'Mars rover spirit stuck in sand as winter approaches', Newscientist.com, 27-nov-2007.
- [9] Michael H. Dickinson, Claire T. Farley et Robert J. Full : 'How Animals Move: An Integrative View', 2000.

- [10] Kyung-Kon Nohl, Jin-Geol Kim² et Uk-Youl Huh : ' Stability Experiment of a Biped Walking Robot with Inverted Pendulum', 'The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society', 2004, Korea
- [11] Erik Cuevas, Daniel Zaldívar et Raúl Rojas : ' Walking trajectory control of a biped robot', Université de Berlin.
- [12] Shuuji Kajita et Kazuo Tani : ' Experimental study of biped dynamic Walking', 'IEEE', 1996.
- [13] Seonghee Jeong et Takayuki Takahashi : 'Wheeled inverted pendulum type assistant robot: design concept and mobile control', 'Intel Serv Robotics', 2008.
- [14] Ogata et Katsuhiko : ' Modern Control Engineering (4th Edition)'. Prentice Hall, 2002.
- [15] Takaaki Matsumoto, Koichi Kita et Ren Suzuki : 'A Hovering Control Strategy for a Tail-Sitter VTOL UAV that Increases Stability Against Large Disturbance', 'IEEE International Conference on Robotics and Automation', 2010.
- [16] G. H. Lee, H. J. Lee, H. J. Choi : 'Application of Mobile Inverted Pendulum Systems to Boxingbots for a Boxing Game', ' IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics', 2009
- [17] Billur Barshan et Hugh F. Durrant-Whyte : 'Inertial Navigation Systems for Mobile Robots', 'IEEE Transactions On Robotics And Automation', 1995.
- [18] J. Borenstein et L. Feng : 'Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots', ' Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation', 1996.
- [19] Kiyoshi KOMORIYA et Eiinei OYAMA : 'Position Estimation of a Mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope (OFG)', Mechanical Engineering Laboratory AIST, MITI.
- [20] N. Wiener : 'The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series' John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1949.

- [21] R. E. KALMAN : 'A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems', Research Institute for Advanced Study, Baltimore.
- [22] Steven J. Miller : 'The Method of Least Squares', Brown University .
- [23] Arthur Gelb : 'Applied Optimal Estimation', Massachusetts Institute of Technology
- [24] Peter S Maybeck : 'Stochastic model estimation and control 3 volumes', Air Force Institute of Technology, 1979
- [25] Victor WILLIAMS et Kiyotoshi MATSUOKA : 'Learning to balance the inverted pendulum using neural networks', Kyushu Institute of Technology.
- [26] Sung Su Kim et Sed Jug : 'Hardware Implementation of a Real Time Neural Network Controller with a DSP and an FPGA', Chungnam National University.
- [27] Ta-Hsiung Hung, Ming-Feng Yeh et Hung-Ching Lu : 'A PI-Like Fuzzy Controller Implementation for the Inverted Pendulum System', 'IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems', 1997.
- [28] Mario E. Magana et Frank Holzapfel : 'Fuzzy logic control of an IP with vision feedback', 'IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION', 1998.
- [29] YANG Yong, WANG Wei et ZHOU Tie: 'Sliding Mode Control Based on Three Sliding Surface for An Inverted Pendulum System', 'Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference', Chine.
- [30] Shi Hongjun et Zheng Yan : 'Multiple Layers Sliding Mode Control for Inverted Pendulum Systems', Northeastern University.
- [31] Ryo NAKAJIMA , Takashi TSUBOUCHI , Shin'ichi YUTA : 'A Development of a New Mechanism of an Autonomous Unicycle', University of Tsukuba.
- [32] Naoji SHIROMA : 'Cooperative Behavior of a Wheeled Inverted Pendulum for Object Transportation', University of Tsukuba.
- [33] KE XU et XU-DONG DUAN : 'Comparative Study Of Control Methods Of Single- Rotational Inverted Pendulum', University of Science and Technology of China.

- [34] Bernardino Benito Salmeron-Quiroz : 'Fusion de données multicateurs pour la capture de mouvement', Université Joseph-Fourier, 2007.
- [35] Eric R. Bachmann, Xiaoping Yun et Doug McKinney: ' Design and Implementation of MARG Sensors for 3-DOF Orientation Measurement of Rigid Bodies', 'Proceedings of the 2003 IEEE International Conference On Robotics & Automation', 2003.
- [36] Stephen Beeby et Graham Ensell : 'MEMS Mechanical Sensors', Artech House, Inc. Boston, London.
- [37] Fermi Guerrero Castellanos : 'Estimation de l'attitude et commande bornée en attitude d'un corps rigide: application à un mini hélicoptère à quatre rotors', Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2008.
- [38] K. NAILI et S. KHERCHI, 'Commande d'une plateforme a deux degré de liberté avec compensation de l'effet de la gravité et de friction', EMP, 2010.
- [39] D. Lequesne, 'Régulateur P.I.D', Lavoisier, 2006.
- [40] L. Philippe, 'Automatique appliquée', Lavoisier, 2007.
- [41] A. Guessoum, 'Cours de Commande Avancée', Université de Blida.