

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique

Présenté par : BOUSRIH Charaf-Eddine

Thème

**Conception d'un modèle d'exosquelette
de rééducation au niveau des jambes**

Soutenu publiquement, le 14 / 07 / 2021 , devant le jury composé de :

M. BOUKLI Fouad	M.C.A	ESSA. Tlemcen	Président
M. BENSALAH Choukri	M.C.B	UAB. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. ABDI Sidi Mohemed	M.A.A	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. MOKHTARI Réda	M.C.B	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M. ARICHI Fayçal	M.C.B	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2020 /2021

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais et de m'avoir donné la santé et le pouvoir dont je nécessitais pour accomplir toute réussite dans ma vie.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes très chers parents, mes sœurs et toute ma famille qui m'ont toujours entouré d'affection et de soutien.

J'adresse aussi toute ma gratitude au directeur du mémoire monsieur BENSALAH Choukri pour son engagement, son aide et ses précieux conseils qu'il a sus me transmettre tout au long de ce mémoire.

En outre, je remercie le prof M. BOUKLI Fouad président du jury, qui a accepté de présider l'honorable jury.

Également, je remercie les autres membres du jury M. MOKHTARI Reda et M.ARICHI Fayçal pour l'amélioration de la qualité de ce travail à travers leurs remarques judicieuses, qui vont permettre l'essor vers de nouvelles perspectives.

Je remercie aussi, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation du primaire à la poste graduation. J'aimerais aussi gratifier les efforts de M. ABDI Sidi Mohamed qui nous a toujours motivé et encouragé pour persister et persévérer.

Enfin, je ne peux pas oublier de remercier tous mes amis sans exception.

DÉDICACES

Je dédie ce travail

A l'être le plus chers de ma vie, ma mère

A celui qui a fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui, mon père

A mes chères sœurs Wissem et Wided

A la petite Lily

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire

A tous ceux qui me sont chers

B.Charaf-Eddine
Tlemcen, le 02/07/2021

RÉSUMÉ

Le travail présent dans ce mémoire consiste à établir un modèle qui caractérise la dynamique de la marche humanoïde bipède, afin de pouvoir contrôler les mouvements d'un exosquelette destiné à la rééducation neuromotrice des membres inférieurs. L'objectif est d'assurer le comportement correct du système et le suivi des trajectoires théoriques par les différentes lois de commandes des systèmes non linéaires. Le modèle utilisé pour décrire la marche bipède contient 3 modes de fonctionnement dont chaque une représente une partie du cycle de marche total, et où la dynamique est issue des trois modèles approximatifs de la marche bipède : modèle du pendule simple, modèle du pendule inversé et le modèle du double pendule. Pour la commande du système, On s'est orienté vers différentes approches, la première approche est basée sur l'utilisation d'une commande par la dynamique du système, alors que la deuxième est basée sur l'utilisation d'une commande PID.

Mots clés : Marche bipède, contrôle dynamique, exosquelette, commande par dynamique inverse, commande PID, suivi de trajectoire.

ABSTRACT

The present work consists in establishing a model that characterizes the dynamics of bipedal humanoid walking, in order to control the movements of an exoskeleton intended for neuromotor rehabilitation of the lower limbs. The objective is to ensure the correct behaviour of the system and the follow-up of the theoretical trajectories by the different control laws of nonlinear systems. The model used to describe the bipedal walk contains 3 modes of operation, each of which represents a part of the total walking cycle, and where the dynamics are derived from the three approximate models of biped walking: single pendulum model, inverted pendulum model and double pendulum model. For the control of the system, we have oriented towards different approaches, the first one is based on the use of a control by the dynamics of the system, while the second is based on the use of a PID command.

Key words: bipedal walking, dynamics control, exoskeleton, inverse dynamics, PID control, trajectory tracking

Liste Des Figures

1.1	Polygone de sustentation chez l'homme	18
1.2	Les modes de la marche humaine	20
1.3	Représentation du cycle de marche d'après veil 2000	21
1.4	Historique des robots	24
1.5	Architecture série	25
1.6	Architecture parallèle	25
1.7	Architecture hybride	26
1.8	Exemples de robots mobiles	27
1.9	Robots mobiles à roues	28
1.10	Robots mobiles à chenilles	28
1.11	Robots mobiles marcheurs	29
1.12	Autres robots mobiles	29
1.13	Synoptique de la sécurité	30
1.14	Robots industriels	31
1.15	Robot utilisé dans le domaine militaire	32
1.16	Robots d'assistance à la chirurgie	32
1.17	Robots de services domestiques	33
1.18	HULC™ de Lockheed Martin	35
1.19	XOS2 de Raytheon et Sarcos	36
1.20	Ekso GT™ d'Ekso Bionics	37
1.21	Keeego™ de B-Temia	37
1.22	EKSO Suit d'EKSO BIONICS	39
1.23	ReWalk™ d'Argo Medical Technologies	40
1.24	REX de REX Bionics	40
2.1	Modèle Simplifié du Pendule Inversé	43
2.2	La trajectoire du ZMP lors de la marche	45
2.3	Modèle chariot sur la table	45
2.4	Modèle du pendule inversé linéaire	46
2.5	Schéma du modèle étudié	48
2.6	Les modes de fonctionnement du modèle	51
3.1	Schéma block de la commande PID	59
3.2	Schéma block de la commande par dynamique inverse	60
4.1	Schéma de simulation du bloc des trajectoires générées	62
4.2	Les positions du premier mode	63
4.3	La position θ	63

4.4	La position θ	64
4.5	Les positions du premier mode	64
4.6	La position θ	65
4.7	La position θ	65

Liste Des Abréviations

2MLIPM 2 Mass Linear Inverted Pendulum Model

CdM Centre de masse

CdP Centre de Pression

DDL Degré de Liberté

DP Double Pendule

IPM Inverted Pendulum Model

LIPM Linear Inverted Pendulum Model

MCD Modèle Cinématique Direct

MCI Modèle Cinématique Inverse

MDD Modèle Dynamique Direct

MDI Modèle Dynamique Inverse

MGD Modèle Géométrique Direct

MGI Modèle Géométrique Inverse

PI Pendule Inversé

PS Pendule Simple

ZMP Zero Moment Point

1	REVUE DE LA LITTÉRATURE	16
1.1	Marche	17
1.1.1	Définitions	17
1.1.2	Indicateurs de stabilité de la marche humanoïde	17
1.1.3	Caractéristiques	19
1.1.4	Modes de la marche humaine	19
1.1.5	Étapes de la marche humaine	21
1.2	Robots	22
1.2.1	Notions de base	22
1.2.2	Historique	23
1.2.3	Types de robots	25
1.2.4	Domaines d'application :	31
1.3	Exosquelettes :	34
1.3.1	Exosquelettes réalisés :	34
2	MODÉLISATION	41
2.1	Introduction	42
2.2	Planification de trajectoire	42
2.2.1	Introduction	42
2.2.2	Algorithme du ZMP (Zero Moment Point)	45
2.3	Contact avec le sol	47
2.4	Formalismes de la modélisation des robots :	48
2.4.1	Modélisation géométrique :	48
2.4.2	Modélisation cinématique :	49
2.4.3	Modélisation dynamique :	50
2.5	Modèle établi	51
2.5.1	Mode 1: Le modèle du double pendule :	53
2.5.2	Mode 2: Le modèle du pendule simple:	54
2.5.3	Mode 3: Le modèle du pendule inversé:	55
2.6	Conclusion	56
3	COMMANDE	57
3.1	Introduction	58
3.2	Régulation par un contrôleur PID	58
3.3	Contrôle par la dynamique inverse	60

4	RÉSULTATS DE LA SIMULATION	61
4.1	Génération des trajectoires	62
4.2	Commande par la dynamique inverse	63
4.3	Commande PID	64
4.4	Interprétations et Conclusion	66
5	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	67

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Tout au long de l'histoire de l'humanité, l'homme à toujours essayer de réduire les efforts qu'il applique pour accomplir une tâche. Souvent dépendant d'autrui, il à réussi à exploiter les êtres vivants qu'ils l'entouré ; l'esclavage et l'usage des animaux ont été très efficace pour faire face aux défis qu'il rencontrait. Puis l'homme a commencé d'inventer et de créer de outils et mécanismes plus efficaces qu'ils lui ont permis d'accomplir ses activités plus rapidement et d'une manière précise et répétitive.

L'évolution de ces mécanismes à travers les siècles a suscité en ce qu'on appelle aujourd'hui la robotique, qui désigne le fait qu'une machine peut réaliser, d'une façon autonome où avec l'intervention de l'être humain, des tâches que l'homme avec l'habitude d'accomplir d'une façon manuelle et avec des outils simples et passifs [1].

De nos jours, la robotique nous entoure de partout, et peut exister sous plusieurs formes et accomplit plusieurs tâches. Ce domaine de recherche est toujours de plus en plus en accroissement et en développement grâce à la très grande variété de ses modes d'exploitations. Effectivement, un très grand nombre d'applications industrielles, quotidiennes et beaucoup d'autres ont pu substituer la contribution de l'être humain par une autre qui est robotisée. Cette substitution nécessite la prise en considération des fonctions et caractéristiques qu'apportée l'homme. Et donc, il devenait nécessaire d'apporter les fonctionnalités humaines aux robots pour assurer un comportement assez semblable à celui de l'homme. Plusieurs chercheurs sont donc mis à étudier le comportement humain et sa fusion en celui du robot, en assimilant les mécanismes des mouvements et gestes que réalisait l'homme pour accomplir une tâche précise, jusqu'à ce qu'on ait abouti à reproduire la totalité des mouvements du corps humain tout entier, d'où né la robotique humanoïde et les robots anthropomorphes.

Les robots anthropomorphes sont prévus pour partager le même environnement que l'humain dans la vie de tous les jours, en leurs assurant tous les comportements nécessaires pour pouvoir s'intégrer conformément dans cet environnement, partager les fonctions et accomplir les tâches confiées. Ceci exige dans certain cas des fonctionnement assez complexes, comme la locomotion du robot.

La marche humanoïde a toujours été un lieu d'intérêt pour les chercheurs, la reproduction d'un tel processus complexe, que l'homme à pu perfectionner dès un très jeune âge, nécessite la prise en considération de plusieurs facteurs y compris la commande et la stabilisation du robot en marche, la gestion et l'économie de l'énergie, la désignation de la trajectoire à suivre ... etc. Ces objets d'étude sortent tous d'un but partagé par toutes les recherches menées sur la locomotion humaine ; c'est la reproduction de cette marche d'une manière la plus fidèle possible, en faisant face aux différentes contraintes environnementales.

L'intérêt versé dans l'étude de la marche humanoïde a pu ouvrir plusieurs portes à la résolution de certains problèmes liées aux limitations physiques du corps humain dues aux différents facteurs. Une de ces limitations est la paraplégie.

L'aspect médicale de l'utilisation des robots humanoïdes est leur pouvoir de bien servir comme étant des dispositifs d'assistance portables aux patients souffrant d'une blessure qui les a coutés à perdre la possibilité de marcher, ou à ceux qui ont besoin d'une rééducation neuromotrice pour réacquérir la possibilité de marcher indépendamment de toutes assistances externes.

Donc, pour cette étude, l'objectif est d'établir un modèle de robot permettant d'assister à la marche humanoïde, cela en simulant les membres inferieurs du corps humain (les deux pieds) et puis les commander à suivre une trajectoire spécifiée en assurant la stabilité de la structure et en respectant les différentes contraintes environnementales qui agissent sur le système.

La reproduction de la marche humanoïde pour un robot est un processus complexe qui comporte plusieurs aspects à gérer ; en effet, de nombreuses stratégies ont été mise en place pour permettre la réalisation d'un tel processus, et pour faire face à certains contraintes et problématiques. Ces stratégies sont les suivantes :

- L'étape majeure est l'établissement d'un modèle qui comprend les non-linéarités du système et qui décrit la structure du robot, tout en prenant compte des différents modes de la locomotion variante au long du cycle de la marche. Et puis décrire mathématiquement la dynamique de chaque mode de fonctionnement.
- Prendre en considération le modèle qui représente les contraintes environnementales agissant sur le robot, notamment les forces de réaction de l'impact du pied avec le sol.
- Déterminer les trajectoires désirées qu'on doit adapter au robot pour qu'il peut les suivre.
- On passe ensuite à écrire le programme informatique nous permettant la simulation et le calcul des efforts et des trajectoires générés par le modèle à l'aide du logiciel MATLAB.
- Appliquer les lois de commande développées à partir du modèle et les adaptés pour pouvoir atteindre certaines performances.
- Finalement, les résultats de simulation et le comportement du système peuvent être analysés.

1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Marche

1.1.1 Définitions

Le dictionnaire “ **le petit robert** ” définit la marche comme suit : “Se déplacer par mouvements et appuis successifs des jambes et des pieds sans quitter le sol”

Bipède : qui marche sur 2 pieds.

Donc, marcher consiste à effectuer un enchaînement d'appuis sur le sol, d'une manière à assurer qu'au moins un pied reste en contact avec le sol à tout moment. Cela se traduit par la création des forces propulsives générées par la distance entre le centre de pression (CdP) et le centre de gravité du marcheur (ou centre de masse CdM).

Par ce fait, on produit des suites de déséquilibres contrôlés qui permettent la progression en avant, d'où on peut dire que la marche est une “ succession de catastrophes évitées de justesse ” [2]

L'être humain est la meilleure créature utilisant la marche bipède, cela revient au fait que la marche humaine peut être caractérisée par trois critères clés : elle est robuste, dynamique et à faible consommation. La robustesse se traduit par le fait que l'être humain peut résister aux perturbations lors de la marche comme un glissement ou une poussée. . . .

D'autre part, courir, sauter au milieu d'une marche et faire des différents mouvements démontrent la dynamique de la marche, c'est-à-dire que l'homme peut effectuer de mouvements de marche rapides. Ceci est due au fait que la marche humaine est un processus de “ chute contrôlée ”.

1.1.2 Indicateurs de stabilité de la marche humanoïde

Pour marcher on a besoin de créer des distances entre certains points spécifiques sur le sol. Dans ce qui suit, on définit ces points, et on explique leur relation à la stabilité de la marche.

- **Centre de masse :**

Un Cdm d'un corps est un point théorique unique où on peut supposer que la masse entière de l'objet est concentrée. Il ne permet de visualiser le mouvement de l'objet tout entier, et se déplace avec le déplacement des parties de l'objet. Il est déterminé par la somme pondérée des centres de masse des segments d'un corps multi liaisons Pour un repère cartésien en 3 dimensions, pour on possède la formule suivante :

$$x = \sum_{i=1}^N \frac{m_i X_i}{M}; y = \sum_{i=1}^N \frac{m_i Y_i}{M}; z = \sum_{i=1}^N \frac{m_i Z_i}{M}; \quad (1.1.2.1)$$

Où X,Y et Z sont les coordonnées cartésiennes du CdM.

X_i, Y_i et Z_i sont les coordonnées cartésiennes du CdM de la ième liaison.

m_i est la masse de la ième liaison, M est la masse totale du corps, et N est le nombre totale des liaison du corps.

- **Zero moment point :**

Le point zéro moment est un concept très important dans la planification de mouvement pour les robots bipèdes. Il spécifie le point par rapport auquel la force de réaction du pied avec le sol ne produit aucun moment dans la direction horizontale, c'est-à-dire le point où le total des forces d'inertie et de gravité horizontales est égal à 0 (zéro). Il varie au cours du mouvement car il est sous l'influence de la position et l'inertie des liaison du corps (le robot). On peut calculer le ZMP par les formules suivantes

:

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(\ddot{z} + g)x_i - \sum_{i=1}^N m_i\ddot{x}_i z_i - \sum_{i=1}^N I_{iy}\ddot{\Omega}_{iy}}{\sum_{i=1}^N (\ddot{z}_i + g)m_i} \quad (1.1.2.2)$$

$$P_y = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(\ddot{z} + g)y_i - \sum_{i=1}^N m_i\ddot{y}_i z_i - \sum_{i=1}^N I_{ix}\ddot{\Omega}_{ix}}{\sum_{i=1}^N (\ddot{z}_i + g)m_i} \quad (1.1.2.3)$$

Où P_x et P_y sont la position du ZMP dans le domaine cartésien.

X_i, Y_i et Z_i sont les sommets CdM de la i ème liaison.

M_i est la masse de la i ème liaison.

g est la constante de gravitation.

I_{ix} et I_{iy} sont le moment d'inertie et le déplacement angulaire autour de l'axe X respectivement [4].

- **Centre de pression :**

Le centre de pression (CdP) indique la distribution moyenne de la pression sur une surface. C'est aussi le point sur le sol où la force de réaction du sol agit. Il peut être calculé par la formule suivante :

$$OP = \frac{\sum_{i=1}^N q_i F_{ni}}{\sum_{i=1}^N F_{ni}} \quad (1.1.2.4)$$

Où OP est le vecteur allons de l'origine du domaine des coordonnées O vers le point de centre de pression P .

q_i est le vecteur au point où la force F_{ni} agit perpendiculairement sur la surface.

Donc, si le corps est équilibré le CdP et le ZMP seront identiques.

- **Polygone de sustentation :**

Un polygone de sustentation est la surface englobant l'ensemble des points dans un plan horizontal où le corps repose. C'est donc une enveloppe convexe qui contient les points couverts par les pieds dans la phase de support lors d'une marche.

La stabilité du corps sera donc analysée en fonction de la distance d'un point à la limite de la zone de sustentation. De plus, la taille de cette zone est proportionnelle à la stabilité du corps (ou robot).

Est donc, la projection orthogonale du centre de gravité d'un corps sur le sol doit se trouver à l'intérieur de cette surface pour garantir l'équilibre.

Chez l'humain, le polygone de sustentation est sous la forme suivante :

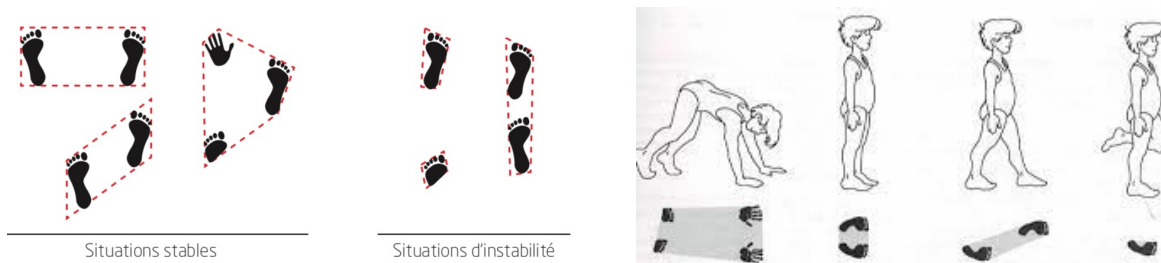


Figure 1.1: Polygone de sustentation chez l'homme

1.1.3 Caractéristiques

Toute l'étude faite dans notre travail concerne l'analyse et la modélisation de la marche des adultes, cela est dû au fait qu'un enfant possède un type de marche différent, car il est encore en période d'apprentissage.

La marche (adulte) se caractérise par 5 paramètres ;

La longueur du pas, la cadence, la vitesse de marche, la durée de l'appui sur une jambe et le rapport longueur du bassin – écartement des talons.

- La longueur du pas : c'est la distance entre les deux jambes lorsqu'elles sont les deux sur le sol. Cette longueur varie entre l'homme et la femme, et aussi elle varie avec d'autres facteurs tel que : la longueur des membres inférieurs, la vitesse de marche, la taille de chaque personne, la position des pieds par rapport à la ligne de marche... [5].

- La cadence : aussi appelé le rythme de marche, est le nombre de pas par unité de temps.

- La vitesse de marche : elle exprime la distance parcourue par unité de temps, souvent donnée par m/s ou km/h. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\text{Vitesse} = (\text{longueur moyenne du pas en m}) \times \text{la cadence (ou la fréquence en Hz)} / 60$$

- La durée de l'appui sur une jambe dépend très souvent de la vitesse et la cadence de la marche ; quand la personne accélère, la durée d'un pas diminue, c'est-à-dire que le temps d'appui sur une jambe diminue.

1.1.4 Modes de la marche humaine

En termes de la marche robotique, on distingue trois types de marches, qui sont directement relatives à la stabilité du corps lors du déplacement : la marche statique, quasi-statique et la marche dynamique.

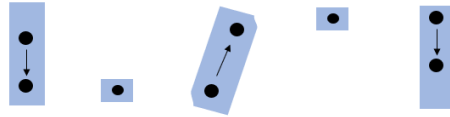
La différence entre les trois concerne d'une manière directe la position du CdM par rapport au polygone de sustentation.

- La marche statique : la projection verticale du CdM du corps sur le sol se trouve toujours à l'intérieur du polygone de sustentation. Cela se traduit par le fait que le corps (ou robot) restera en position stable en cas d'arrêt du mouvement.

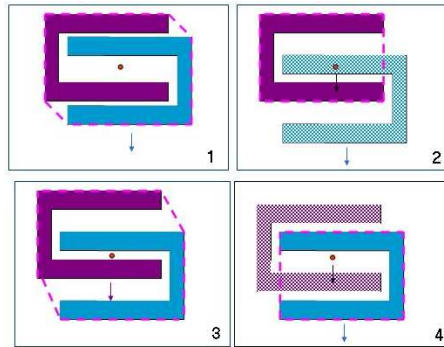
- La marche quasi statique : on cherche à garder le CdM dans le polygone de sustentation, pour cela cette marche consiste à encadrer la zone centrale du robot en utilisant des pieds en forme de U. cette méthode présente des limites en termes de mobilité du robot (changement de direction).

- La marche dynamique : quant à la marche humaine, elle est le plus caractérisée par la marche dynamique. Ce type de marche modélise la phase de déséquilibre dans la marche, cela s'exprime par le fait que le CdM peut se projeter localement en dehors du polygone de sustentation.

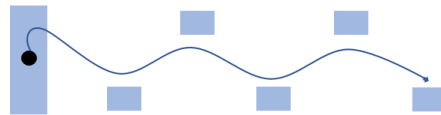
Les figures suivantes illustrent les 3 types de marche :



(a) marche statique vue de dessus : CdM (cercle) projeté sur le polygone de sustentation



(b) marche quasi-statique : vue de dessus.



(c) marche dynamique : position des pieds et la trajectoire du CdM

Figure 1.2: Les modes de la marche humaine

1.1.5 Étapes de la marche humaine

La marche humaine peut être considérée comme un phénomène cyclique décomposable en 2 phases différentes qui se répètent sous forme d'un enchaînement successif de pas, tout en gardant la stabilité et le balancement du corps.

Cette suite continue de phases peut être gardée tout au long de la marche en considérant qu'on se déplace sur un terrain plat et en absence de perturbations.

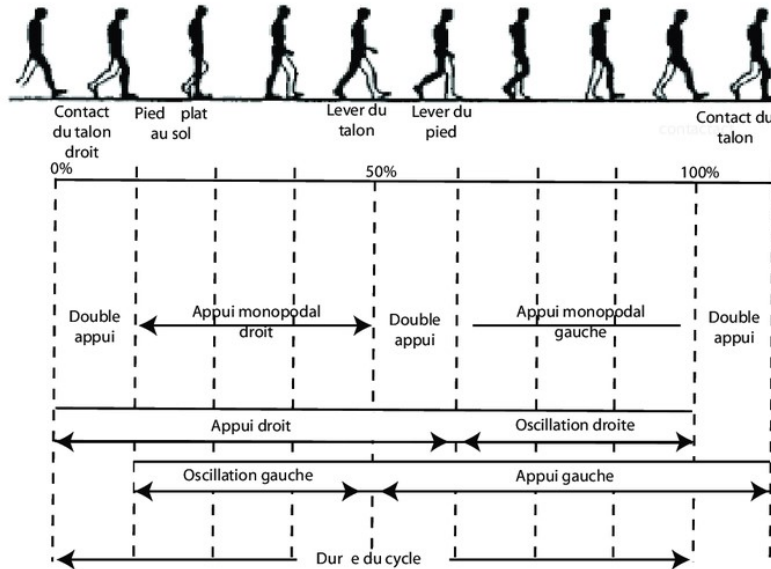


Figure 1.3: Représentation du cycle de marche d'après veil 2000

Pendant la marche, on observe une alternance du mouvement des jambes, créant deux phases :

- Phase du double support : ou phase bipodale :

Elle correspond aux instants où les deux pieds touchent le sol simultanément ; c'est-à-dire au moment du repos (avec les jambes écartées) et aussi au moment de la permutation qui se produit à la fin de chaque pas. Durant cette phase on remarque deux actions qui s'enchaînent en deux périodes consécutives :

Une période de support : c'est le moment du contact du talon avec le sol, jusqu'à ce que le pied devient plat, et puis une période de poussée : c'est la levée du talon et puis les orteils [6].

- Phase du simple support : appelée aussi phase du simple appui ou monopodale :

Le contact avec le sol est fait à travers une seule jambe, c'est lors du passage de la deuxième jambe de balancement de la position arrière vers l'avant. Cette phase est la plus difficile à contrôler, à cause du fait de l'instabilité sur une seule jambe.

1.2 Robots

1.2.1 Notions de base

- **Origine** : Le terme robot, d'origine provenant des années 1920 du terme " robota " de la pièce théâtrale R.U.R par Karel Čapek, qui signifie un travail, ou un boulot de routine ou forcée.

- **Définition** :

- En fait, le terme " robot " peut être défini en plusieurs façons ; Son étendu dans plusieurs domaines lui donne des définitions conventionnelles spécifiques à chaque un d'eux.

En point de vue scientifique, on peut définir le terme robot comme suit : une machine qui permet d'exécuter des opérations, manipuler des objets et accomplir des tâches afin de rendre tous les services qu'un homme avait l'habitude de les accomplir lui-même, par des outils manuels simples. Cette mission est réalisée soit par une manière complètement autonome (sans aucune intervention de l'homme), soit en collaboration avec l'homme.

Pour accomplir ses tâches, le robot se compose de plusieurs éléments qui lui permettent d'interagir avec son environnement, effectuer des actions, acquérir et partager de l'information. Les différentes composantes d'une cellule robotisée sont :

1. **Le mécanisme** : ceci étant le plus proche d'un bras humain, un robot consiste de d'un ensemble d'articulations liées entre elles par des jonctions rigides.
Il y on a deux types d'articulation : rotoïde et prismatique.
2. **Les capteurs** : leur fonction est d'assurer la perception du robot envers son environnement. On distingue deux types :
 - Des capteurs proprioceptifs : servent à connaître la position et vitesse de chaque articulation, les forces (et/ou les moments) des actionneurs ... (l'état interne du robot).
 - Des capteurs extéroceptifs : ils renvoient les informations de l'environnement extérieur du robot, tel que : la mesure des distances des objets l'entourant, la détection de leur présence, les caméras, les capteurs acoustiques... etc.
3. **Les actionneurs** : ils agissent sur les articulations, donc ils peuvent être soit linéaire ou rotationnel, de nature électrique, hydraulique ou pneumatique.
4. **Le contrôle** : synthétiser un asservissement par une unité de commande qui sert à commander le robot à partir des ordres humains et des informations acquises par les capteurs, en agissant sur les actionneurs.
5. **L'interface de l'utilisateur** : une plateforme de communication homme-machine qui permet de programmer les tâches à accomplir, obtenir les informations nécessaires ...
6. **Le poste de travail** : qui est constitué l'espace de fonctionnement du robot, ainsi que tous les dispositifs auxiliaires lui permettant d'effectuer des tâches diverses.

La robotique est donc l'ensemble des domaines industriels et scientifiques en relation avec la conception des robots. Son évolution est ainsi liée au développement des différents robots dans plusieurs domaines ; il s'agit des types des tâches à confier au robot. On est passé de tâches épuisantes pour l'homme et répétitives, fix et préprogrammé, à des tâches très sophistiquées et complexes, ayant des données relativement inconnues à l'avance, qui exige au robot de s'adapter de façon continue, permanente et immédiate.

Ceci sollicite la présence des capacités physiques et sensorielles complexes, en plus des méthodes de calculs, d'analyse et d'approche de plus en plus rapides, adaptatives et précises.

Autrement dit, on cherche à ce que le robot permet d'effectuer ses tâches d'une manière de plus en plus proche de celle de l'homme. Cela va ensuite susciter un usage assez utile et assez pratique dans l'environnement où le robot est intégré, spécifiquement lors de l'interaction avec l'homme.

- Quelques caractéristiques :

A fin de fonctionner d'une façon correcte et juste, le robot doit être bien choisi en fonction de la tâche qu'on cherche à accomplir. Le choix se fait en tenant compte de l'environnement dans le quel le robot va interagir, ses capacités et sa conception physiques, et la nature de travail à lui affecter.

Pour ce faire, voici quelques paramètres à prendre en compte lors du choix du robot :

- A partir de la nature de la tâche, on choisit l'architecture mécanique appropriée.
- La charge maximale qu'il doit supporter.
- L'espace de travail, et le volume atteignable.
- La vitesse de fonctionnement.
- Les caractéristiques physiques du robot : masse, taille, volume,
- Le cout du robot.

1.2.2 Historique

L'évolution de la robotique au cours de l'histoire de l'humanité été enrichit par l'évolution dans plusieurs autre domaines (l'électronique, l'informatique. . .), ceci lui a permis de progresser pas à pas à travers l'addition et l'intégration de nouvelle technologies.

Voici quelques évènements qui ont contribué à construire le monde des robots :

1921 : le mot "robot" apparaît pour la première fois, dans le livre R.U.R (Robots Universels de Rossum).

1941 : la création des Trois Lois de La Robotique par l'écrivain de science-fiction isaac Asimov :

- Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.
- Un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la première loi.
- Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

1954 : George Devol et Joseph Engelberger ont conçu le premier bras manipulateur, et par ceci ils sont considérés comme étant les pionniers de la robotique universelles [7].

1962 : le robot Unimate est utilisé pour la première fois sur les lignes d'assemblage de General Motors, développer à partir du bras manipulateur de Devol et Engelberger, et considéré comme étant le premier robot industriel [8].

1970 : le robot lunaire Lunokhod 1, été envoyé par l'Union soviétique pour récolter des informations et des images. Ce qui lança la porte au développement des " space rovers "

1973 : l'université de Waseda développa l'un des premiers robots humanoïdes WABOT.

1994 : Dante II, un robot développé par l'université de Carnégie a été envoyé pour collecter des échantillons volcaniques du volcan alaskan.

1999 :

AIBO : le chien robotique été lancé par SONY.

R100 : un robot en forme d'œuf lancé par le groupe japonais NEC, capable de la reconnaissance faciale.

Les années 2000 : au début du 21ème siècle le monde de la robotique a vécu beaucoup de nouvelles innovations, par exemple :

- Les animats : ou bioloïdes ce sont des Animaux artificiels, dont l'objectif est de copier les mécanismes du vivant. Leur développement commença bien avant les années 2000, mais ils ont été bien reconnus grâce aux succès des robots reproduisant le brachiation du Gibbon et Le canard de Vaucanson. Aussi Le robot serpent de Miller (1994-2005), le stickybot (2006), et plusieurs autre, qui ont fait naissance au monde de la reproduction des dynamiques des animaux en robotique.
- Les humanoïdes : le succès de plusieurs robots au cours de ces années comme : Asimo de HONDA (2000), NAO de ALDEBARAN Robotics (2006),. . . etc
- Les exosquelettes : le premier exosquelette véritablement chirurgical, nommé Da Vinci à été lancé et approuvé par la FDA (Food and Drug Administration) pendant l'année 2000.

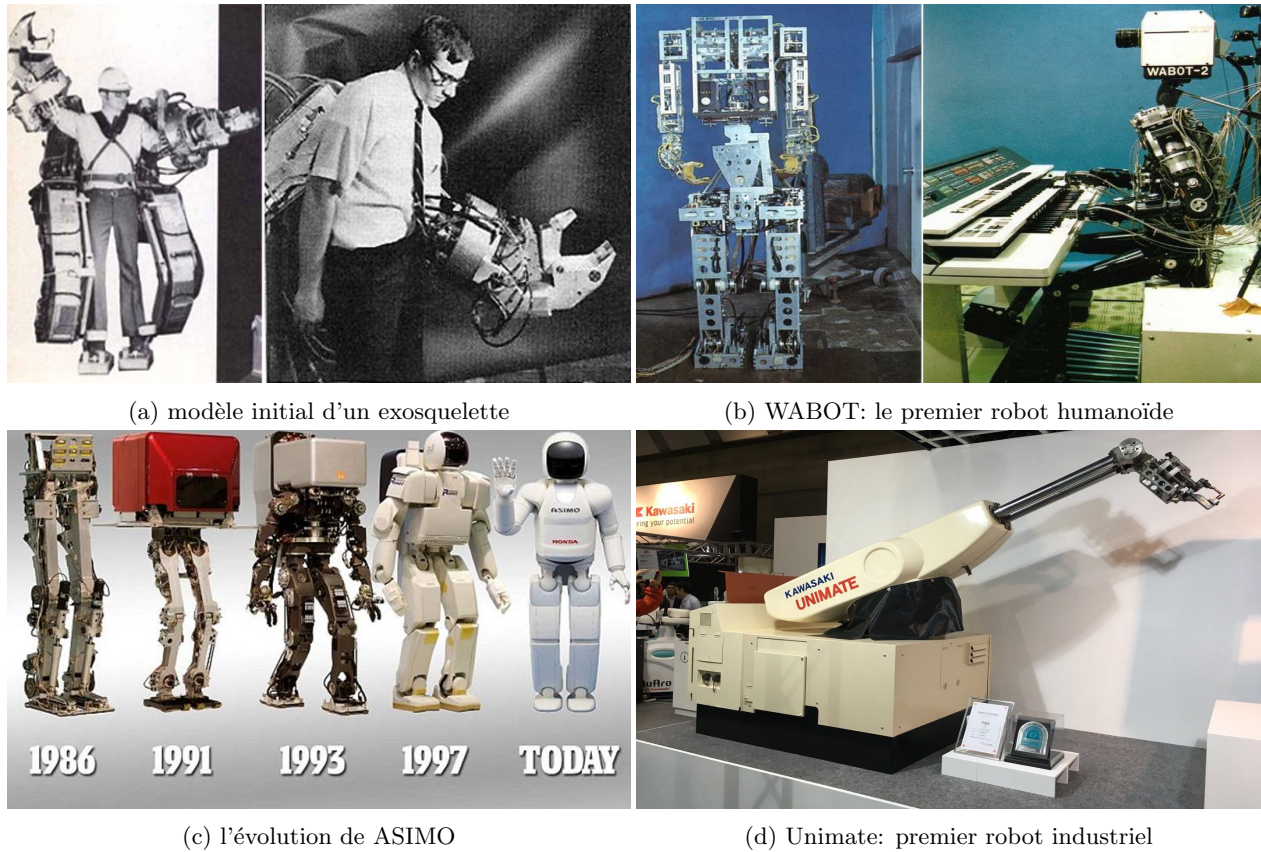


Figure 1.4: Historique des robots

Pour résumer l'évolution des robots, on peut deviser ces derniers en trois types différents (en vue de leurs historique d'évolution) :

- Premier type : Les automates sont les premiers types de machine que l'on peut considérer " robot ", un automate est un dispositif qui assure un enchaînement automatique et continu d'opérations. Leur début d'apparition était en 13ème siècle à travers les mouvements des horloges.
- Deuxième type : dans les années 50, le second type apparaît. Les robots de cette catégorie se caractérisent par l'intégration des capteurs qui leurs permettent de s'adapter à leur environnement.
- Troisième type : ce sont des robots dotés de l'intelligence artificielle. Conçu sur des modèles mathématiques complexe, leurs permettant de prendre des décisions, apprendre, s'améliorer...

1.2.3 Types de robots

Dans cette partie, on vise à classer les robots en fonction de leurs architectures, qui par conséquence, détermine leur utilité et mode de fonctionnement.

On distingue deux grandes familles de robots : les robots fixes et les robots mobiles.

Les robots fixes :

Aussi appelés manipulateurs.

La RIA (Robot Institute of America) c'est un manipulateur qui doit être reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou tout autre dispositif spécialisé au moyen d'une série de mouvements programmés et d'accomplir une variété d'autres tâches.

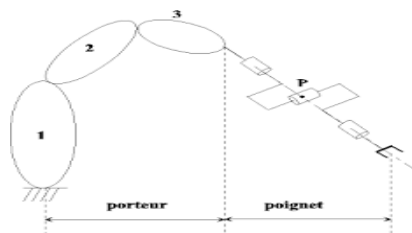
A l'extrémité d'un robot manipulateur on trouve un poignet, qui est destiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot.

Les tâches qu'un robot manipulateur doit accomplir sont d'une grande variété ; transfert d'objets, soudage, assemblage, peinture . . . Leur utilisation engendre l'amélioration de la productivité, l'accroissement de la qualité des produits fabriqués, ainsi que la réduction du coût du travail.

Ce type est très utilisé en industrie grâce au nombre élevé de tâches qu'ils puissent accomplir, mais aussi à cause du fait que l'espace de travail est limité, donc le robot doit généralement rester fixé.

Les robots fixes ont deux structures distinctes :

- **Architecture série (Les robots serials) :** c'est une chaîne ouverte constituée d'une succession d'articulations et de liaisons (porteur) et le poignet.



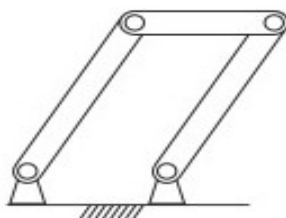
(a) Architecture série



(b) robot série

Figure 1.5: Architecture série

- **Architecture parallèle (Les robots parallèles) :** pour passer de la base fixe vers l'organe terminale il existe plusieurs chemins (ou chaînes cinématiques). On dit une cinématique bouclée.



(a) Architecture parallèle



(b) robot parallèle

Figure 1.6: Architecture parallèle

A partir de ces deux types immergés des robots où la structure est une combinaison des deux structures précédentes (architecture mixte), on les appelle des robots hybrides.

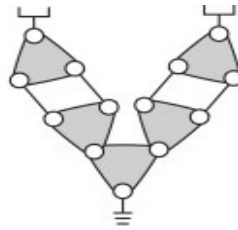


Figure 1.7: Architecture hybride

Les robots mobiles :

Comme son nom l'indique, un robot mobile peut se déplacer dans son espace de travail, lui permettant de réaliser plus de tâches et accéder à plusieurs lieux. Ceci implique que les activités confiées à ce robot vont augmenter vu sa capacité d'interagir plus avec son environnement. Donc il doit s'adapter à son entourage, prendre des décisions, planifier ses trajectoires. . . Ceci fait appel à des méthodes qui combinent l'ingénierie, l'informatique, et aussi les sciences cognitives, l'intelligence artificielle et bien d'autres disciplines pour faire face à la complexité de ce type de robot.

La mobilité du robot permet d'ouvrir de nouveaux horizons d'application, en assurant un espace de travail plus vaste. Les possibilités sont donc plus étendues, mais aussi les problèmes liés à la conception de ce type de robot, notamment :

- Assurer le type de mobilité adéquat :

Comment faire marcher, rouler sur lui-même, rouler sur des roues, glisser, ramper, grimper, flotter ou voler un système autonome ou semi-automatique ?

Ceci pose des nombreuses complexités mécaniques lors de la conception.

- La perception de l'environnement :

Fait appel à l'intégration de plus de capteurs.

- L'adaptation : La mobilité du robot lui impose des changements de situation non préprogrammés, donc comment assurer une adaptation correcte en assurant le bon fonctionnement.

- La navigation : La détermination du chemin optimal.

Les robots mobiles font l'objet de nombreuses études actuelles, se qui fait que plusieurs problématiques ont été résolues, et en voie d'optimisation.

Les robots mobiles sont une sorte d'évolution des robots fixes ; ils ont certaines similitudes de bases, mais aussi présentent quelques différences. Ils se caractérisent par certains paramètres additionnels qui font la fondation de la classification de ce type de robots, tel que :

Le système de perception, le degré d'autonomie, le système de locomotion, le type d'énergie utilisée. . . etc [9].

Contrairement aux robots fixes, un robot mobile n'a pas de vision prédéfinie et fixe de son entourage, d'où il est crucial d'avoir une perception plus évolutive et spontanée, c'est où se présente la diversité d'utilisation des différents capteurs, parmi lesquels sont :

- Les systèmes de vision globale (comme les caméras)
- Les scanneurs laser et ultrasons.
- Les capteurs soniques et infrarouges.
- Et d'autres technologies.

D'autre part, le degré d'autonomie d'un robot mobile peut être aperçue en plusieurs façons :

- Un robot télécommandé par un opérateur, en précisant chaque action à réaliser.

- Un robot télécommandé par un opérateur, en précisant la tâche, et le robot contrôle automatiquement ses actions.
- Un robot semi-autonome : l'opérateur n'intervient pas, mais les tâches à accomplir sont prédéfinies.
- Un robot autonome : qui réalise indépendamment des tâches semi définies.



Figure 1.8: Exemples de robots mobiles

L'architecture du robot détermine le mode de fonctionnement et les tâches à lui confier. Par la suite, on spécifie les éléments de l'architecture des robots mobiles.

Architecture des robots mobiles:

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments [10]

:

- La structure mécanique et la motricité
- Les organes de sécurité.
- Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- Le système de localisation.

1. La structure mécanique et la motricité :

On distingue 3 types différents : [9]

(a) Les robots mobiles à roues :

C'est une structure mécanique largement utilisées, elle peut assurer plusieurs types de déplacement, à des vitesses et accélérations variées. Il existe plusieurs classes de robots à roues déterminées, principalement, par la position et le nombre de roues utilisées (Robot unicycle, tricycle, voiture ou omnidirectionnel)

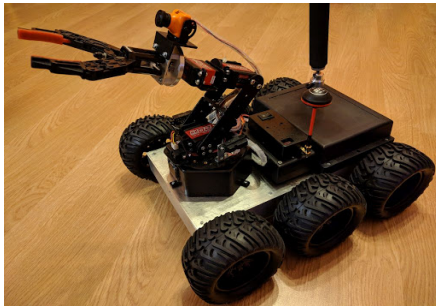


Figure 1.9: Robots mobiles à roues

(b) Les robots mobiles à chenilles :

Ce type est utilisable et avantageux dans le cas où les roues ne sont pas adéquates au terrain de déplacement. L'utilisation des chenilles présente d'avantage d'une bonne adhérence au sol et d'une faculté de franchissement d'obstacles. L'utilisation est orientée vers l'emploi sur sol accidenté ou de mauvaise qualité au niveau de l'adhérence (présence de boue, herbe,) [11]



Figure 1.10: Robots mobiles à chenilles

(c) **Les robots mobiles marcheurs :**

Ils sont destinés à réaliser des tâches où l'homme ne peut pas opérer, à cause de certaines limitations à l'accès à l'espace de travail (accès difficile, dangereux ou impossible).

On distingue les robots marcheurs à deux jambes (humanoïdes), à quatre pattes (type cheval), et à six pattes (type araignée) [11]. Généralement, plus le robot a de jambes, plus il est facile pour lui de rester en équilibre. Cependant, plus il a de jambes, plus il utilise d'énergie pour se déplacer, ce qui peut être un inconvénient.

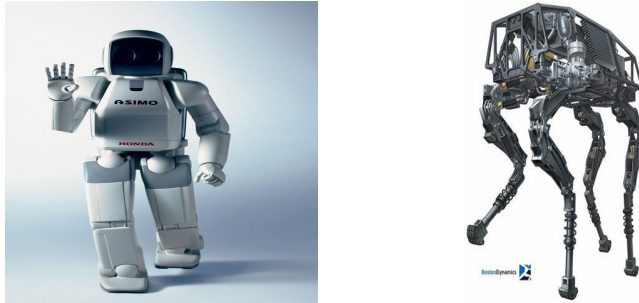


Figure 1.11: Robots mobiles marcheurs

Remarque: le déplacement des robots mobiles peut aussi se faire en d'autres façons que les trois mentionnées, par exemple les robots volants (drones), des robots sous-marins, des robots qui rampent... l'usage de ce genre de robots est souvent dédié à une application bien précise, est donc conçu pour cette tâche spécifique.

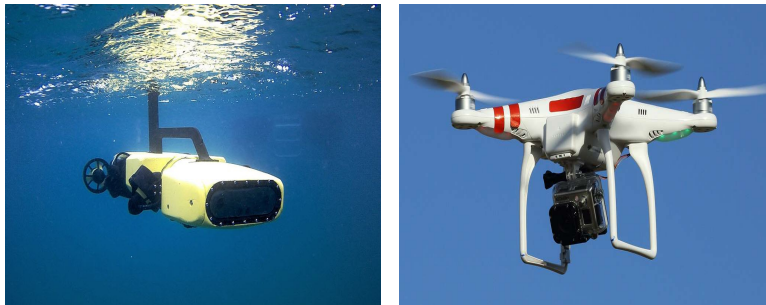


Figure 1.12: Autres robots mobiles

La motricité et l'énergie :

La locomotion mentionnée précédemment est assurée à travers les actionneurs des articulations ; les moteurs. Ces moteurs peuvent être de nature différente : électrique, thermique ou hydraulique, sauf que, la commande des moteurs électriques est très aisée par rapport aux autres types, d'où leur utilisation est la plus fréquente.

L'alimentation de ces robots peut se faire par plusieurs façons :

- Des batteries rechargeables.
- Des groupes électrogènes embarqués (la masse et le volume augmentent, ce qui peut poser des problèmes pour certaines applications).
- Et autres.

2. Les organes de sécurité :

En se déplaçant dans l'espace de travail, un robot mobile rencontre plusieurs personnels, plusieurs risques, de même il peut causer des dégâts au milieu où il se déplace (des collisions, des casses...). Donc, il doit être doté de certains organes de protection et de sécurité pour pouvoir détecter et éviter les obstacles.

On peut résumer l'organisation des organes de sécurité dans la figure suivante :

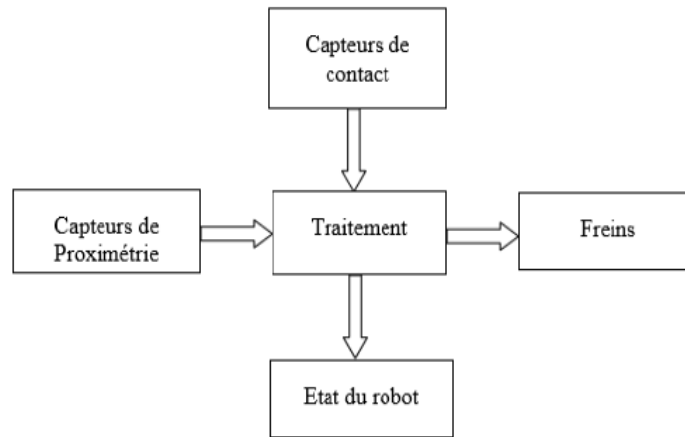


Figure 1.13: Synoptique de la sécurité

3. Traitement des informations et gestion des tâches:

C'est l'ensemble d'informations et données qui vont générer par suite la commande du robot. en d'autres termes, pour atteindre l'objectif de réaliser les tâches du robot, ce dernier doit identifier et activer les organes en accords avec l'objectif. La manière dont le robot se déplace joue un rôle important dans la définition et la génération du plan approprié pour accomplir les tâches. Ce plan repose sur :

- **La stratégie de navigation** : ça consiste à déterminer la trajectoire de déplacement en prenant compte de la localisation, les obstacles, le chemin adéquat... on réalise tout cela à l'aide des différents capteurs.
- **La modélisation de l'espace** : c'est une opération dynamique que le robot doit effectuer lui même afin de connaître son milieu d'évolution.
- **La planification** : après avoir établi un modèle de l'environnement, le robot peut procéder à planifier la trajectoire de son déplacement.

Pour cela, on peut soit intégrer un modèle déjà établi dans la mémoire du robot, lui permettant d'entamer la planification directement, ou bien le robot doit d'abords analyser son environnement, détecter sa position, et puis, les algorithmes de routage vont lui permettre de décider sa trajectoire.

4. Le système de localisation :

Connaitre la position du robot par rapport à son objectif est un des premiers pas de la planification, et c'est une étape très importante et très délicate.

Il existe deux types de localisation :

- **La localisation relative** : ou localisation à l'estime, les capteurs proprioceptifs fournies les informations de localisation du robot (position, orientation et vitesse) par rapport à son point de départ.
- **La localisation absolue** : le robot peut se repérer directement dans son milieu grâce aux capteurs extéroceptifs qui envoient les données en temps réel à tout moment.

1.2.4 Domaines d'application :

Les utilités des robots sont de vaste bénéfice ; un seul robot peut être conçu de sorte qu'il fait face aux différentes taches et fonctions qu'on lui attribue. De plus, ces capacités de résolution de problèmes, et d'intervention dans des situations intraitables par l'homme, ont poussées toutes discipline à trouver une manière de robotiser les différentes opérations dans leurs processus.

Pour cela, l'étendu de l'utilisation de la robotique est très vaste, on mentionne quelques domaines où la robotique a vécu des évolutions et innovations immenses.

1. Domaine industriel :

L'historique des robots montre que les robots industriels été les premiers types à se commercialiser et à être vendu en grandes quantités. Maintenant, presque aucun processus industriel n'est fait sans intervention des robots. Ils peuvent effectuer un très grand nombre de taches particulièrement sur les chaînes de montage, il y on a des robots soudeurs, de démolition, de nettoyage, d'emballage ou de surveillance...

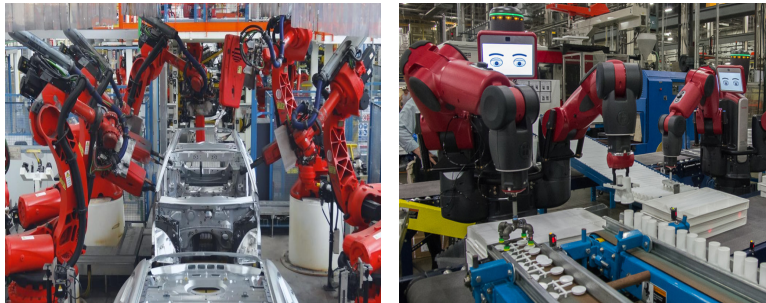


Figure 1.14: Robots industriels

2. Domaine militaire :

L'utilisation militaire des robots a contribué énormément dans leur évolution. Evidemment, le secteur militaire a les moyens et les capacités de créer, tester, et développer des robots selon le besoin.

L'espionnage, l'armement, même remplacer les soldats et aller à la guerre, les robots peuvent faire tous grâce à l'avancement de la technologie, notamment de l'électronique qui a permis de miniaturiser la taille des capteurs à intégrer dans le robot.



Figure 1.15: Robot utilisé dans le domaine militaire

3. Domaine médical :

La médecine à son tour, a vécu une révolution grâce à l'intégration des robots chirurgicaux, qui sont dotés d'une précision immense, et d'autres robots qui assistent les médecins et qui offrent des services où il y avait des difficultés précédemment.

Les robots chirurgicaux sont une autre branche des robots industriels. Ils fonctionnent souvent selon le même principe, c'est-à-dire qu'ils se présentent sous forme de bras mécaniques couplés à un ordinateur ou par des bras articulés qui sont actionnés par le chirurgien et dont les mouvements sont reproduits par le robot en temps réel.



Figure 1.16: Robots d'assistance à la chirurgie

4. **Domaine domestique :**

Les robots domestiques servent à assister l'homme dans ses tâches quotidiennes, aider les gens qui ont besoin d'une présence humaine ou simplement divertir.

Certains robots sont comme une femme de ménage robotisée qui saurait faire la vaisselle, aspirer, laver le sol, changer les draps et faire la lecture aux petits...

D'autres sont dotés d'une intelligence artificielle qui leur permet de communiquer avec leur possesseur, ce qui fait améliorer l'interaction entre l'homme et la machine.



Figure 1.17: Robots de services domestiques

Il existe encore une vaste liste d'utilisation des robots, particulièrement l'agriculture, l'exploration, un grand nombre de services ... etc.

Un des types de robots ayant reçu une grande popularité récemment et un grand nombre d'étude et développement, ce sont les exosquelettes, qui se sont intégrés dans plusieurs domaines d'utilisation y compris la médecine, l'industrie, les services d'assistance, le domaine militaire. ...

1.3 Exosquelettes :

L'exosquelette est un type de robot mobile qui se porte sur le corps de son utilisateur. Cette technologie émergente a débuté en cherchant à améliorer les performances physiques de son utilisateur [12] [13]. Ils peuvent être conçus pour les membres supérieurs, les membres inférieurs ou le corps entier. Au début, l'exosquelette été très utilisé dans le domaine militaire et dans l'industrie pour transporter des lourdes charges sur des grandes distances.

L'évolution technologique a permis d'étendre les applications des exosquelettes vers plusieurs domaines, y inclus le domaine thérapeutique, qui présente l'exosquelette comme une technologie d'assistance aux gens ayant des difficultés physiques. Par exemple, les exosquelettes des membres inférieurs permettent à des personnes qui ne possèdent pas la pleine mobilité de leurs jambes de marcher à nouveau dans leur quotidien [14].

L'exosquelette accomplit l'effort musculaire à la place de l'humain, et peut donc être utilisé pour accomplir un grand nombre de tâches. Lors de la conception d'un exosquelette, il est nécessaire de déterminer le type d'utilisation visé, afin de créer un modèle exact et obtenir un résultat fonctionnel. La recherche en exosquelettes ne cesse d'évoluer ces dernières années. Evidemment, de nombreux prototypes sont réalisés par le monde et les tâches effectuées par ceux-ci sont de plus en plus complexes. Ceci engendre l'existence de plusieurs types d'exosquelettes.

Notre étude se concentre sur les exosquelettes des membres inférieurs, dédié à la rééducation des différents types de dysfonctionnements et troubles moteurs chez l'homme (par exemple : l'arthrose, accident vasculaire cérébral, paralysie cérébrale ou la paraplégie).

On note que chaque utilisateur de l'exosquelette, ou patient, a un diagnostic spécifique, ceci signifie que le fonctionnement de l'exosquelette varie d'un patient à un autre, tout dépend de la nature du handicap physique. L' "ASIA " ou l' "American Spinal Cord Injury Association " décrit les types d'utilisateurs par une grille d'évaluation dite (ISNCSCI), "International Standards for Neurological Classification of Spinal Cord Injury "

Néanmoins, cette différence se présente dans quelques détails d'optimisation de l'utilisation de l'exosquelette. Ainsi, on peut modéliser et étudier ce système d'une manière globale, en vue de la modélisation de la locomotion et le contrôle.

1.3.1 Exosquelettes réalisés :

La variété immense des utilités des exosquelettes a attiré l'attention des chercheurs, l'est incitant au développement de ce domaine. Or, un très grand nombre d'études est porté sur les exosquelettes, leurs fonctions et leurs utilisations, chaque une spécifie un usage bien précis de ce dispositif. Parmi ces emplois, les exosquelettes thérapeutiques sont d'une grande importance et sous-développement et optimisation continues.

Les exosquelettes thérapeutiques sont catégorisés comme robots portables d'assistance à la marche (W2ARs) par l'*International Organization for Standardization* (ISO) [15].

Les W2ARs sont distingués des machines industrielles et autres types d'exosquelettes par les points suivants :

- L'utilisateur et le robot se déplacent d'une façon monolithique, c'est-à-dire que leur mouvement respectif est indissociable.
- L'utilisateur et le robot sont également en contrôle de la cinématique.
- La puissance des actionneurs est équivalente ou inférieure à la puissance observée chez l'humain dans la vie de tous les jours [16].

On ce qui suit, on présente le progrès réalisé au domaine des exosquelettes, en exposant la technologie existante correspondant aux différents types d'exosquelettes.

Exosquelettes de réduction d'inertie :

Ce type d'exosquelette permet de réduire la masse apparente liée à un travail donné. Ceci peut se faire, en analysant les forces auxquelles l'exosquelette est soumis. Ces derniers traduisent l'intention de l'utilisateur vers l'ordinateur de bord (le système de commande de l'exosquelette). Une fois l'effort détecté, les actionneurs utilisent leur puissance pour réduire l'effort que l'utilisateur doit exercer.

Cette approche a un important inconvénient. Le système de contrôle fait amplifier les petits mouvements de l'utilisateur, donc, lorsque la masse apparente est réduite de plus de 50 % , il y a les risques d'instabilité qui augmentent [17].

Parmi les modèles qui utilisent cette notion on a :

1. HULC™ de Lockheed Martin :

L'acronyme fait référence à *Human Universal Load Carrier* (HULC™) commercialisé par *Lockheed Martin* [18]. Le développement a été fait par l'équipe de chercheurs du *Berkeley Robotics And Human Engineering Laboratory* qui a fondé la compagnie *Ekso Bionics*.

Le projet été initialement lancé et financé en 2000 par (*DARPA*) : *Defense Advanced Research Project Agency*.

Sa fonction est de rendre le soldat capable de soulever jusqu'à 90 kg sur son dos lors de ses déplacements.

Cet exosquelette possède 40 capteurs proprioceptifs qui se trouve uniquement sur la structure de l'exosquelette, permettant de détecter l'intention de l'utilisateur et de mesurer l'état interne du système [19]. Aucun de ces capteurs n'est positionné sur l'utilisateur ou entre l'utilisateur et l'exosquelette.



Figure 1.18: HULC™ de Lockheed Martin

2. XOS2 de Raytheon et Sarcos:

Ce modèle permet d'augmenter la force de son utilisateur au niveau de quatre membres, ce que lui permet d'obtenir un facteur de multiplication de la force d'environ 17x [20].

Une des propriétés du XOS2 est la diminution de la consommation énergétique à chaque génération développée, en visant à obtenir une autonomie d'environ 8 heures. De plus, ses concepteurs visent à augmenter le facteur de multiplication au-delà de 17x. Il est fort probable qu'un tel niveau d'augmentation n'est possible qu'à de très faibles vitesses.

Les aspects techniques de ce projet ne sont pas publiés.



Figure 1.19: XOS2 de Raytheon et Sarcos

3. Ekso GT™ d'Ekso Bionics:

L'Ekso GT™ est la seconde génération d'exosquelette thérapeutique d'Ekso Bionics. Il est le premier exosquelette à recevoir l'approbation de "la Food and Drug Administration (FDA)" [21]

Cet exosquelette est conçu pour permettre à certains utilisateurs ayant (ASIA de type D) de marcher à nouveau, en offrant plusieurs opérations pour leur faciliter la réadaptation [22].

Il comporte plusieurs modules ayant des fonctions spécifiques, par exemple:

Le module *PreGait™*, qui permet de préparer l'utilisateur à la marche en lui faisant faire des différents exercices pour maîtriser les habiletés nécessaires à la marche.

Le module *FreeGait™* permet de développer les aptitudes à la marche avec des exercices comme le balancement de jambe libre bilatéral [22].

Cet exosquelette fonctionne en deux modes : le premier ayant une trajectoire prédéfinie, générée par l'exosquelette, le deuxième permet à l'utilisateur de contrôler sa trajectoire, une fois il devient plus habile à la marche. L'objectif final est donc de permettre au patient de se déplacer sans aucune assistance extérieure [22].

4. Keeogo™ de B-Temia:

Un exosquelette d'assistance à la marche dans la vie quotidienne. Il est aussi destiné aux patients classés ASIA de type D, mais qui ont aussi un certain degré de contrôle et une capacité de marcher sur de courtes distances [23].

Ce type est destiné à un usage domicile quotidien, assistant l'utilisateur à accomplir des activités



Figure 1.20: Ekso GT™ d'Ekso Bionics

d'une façon plus aisée, à travers la détection des mouvements assurée par des capteurs positionnés aux hanches et aux genoux. De plus, cet exosquelette est doté des batteries offrant une autonomie jusqu'à 4h.

Le degré d'assistance peut être réglé en fonction des besoins de l'utilisateur pour conserver la capacité musculaire existante.

Les tâches pouvant être exécutées sont les suivantes :

- Marcher.
- Courir.
- Monter et descendre les escaliers.
- S'asseoir et se relever.
- Se tenir debout pour de longues périodes de temps.

L'assistance se fait de quatre façons en fonction de la phase de marche observée : [23]

- Lorsque le talon touche le sol, le système résiste au mouvement pour soutenir le poids aux articulations.
- Lorsque propulsé vers l'avant, il pousse dans la même direction.
- Lorsque le pied quitte le sol, il plie le genou pour rendre la jambe plus légère.
- Lorsque le pied est balancé vers l'avant, il aide le mouvement pour allonger la distance de chaque pas.



Figure 1.21: Keeogo™ de B-Temia

Exosquelettes contrôlés par électromyogrammes :

Ce type d'exosquelette utilise des électromyogrammes (EMGs) pour permettre à l'utilisateur de le contrôler. Un électromyogramme (EMG) est un examen qui permet d'enregistrer l'activité électrique des nerfs et des muscles, et donc d'évaluer leur fonctionnement. Il consiste à appliquer un faible courant électrique au niveau des fibres nerveuses, sensibles ou motrices, du système nerveux périphérique.

1. HAL® de Cyberdyne :

L'exosquelette Hybrid Assistive Limb (HAL®) développés par l'entreprise Cyberdyne et l'Université Tsukuba au Japon, est le résultat des études ayant comme but d'établir la corrélation entre les signaux myoélectriques et le mouvement du corps humain, et puis synchroniser entre les deux pour obtenir un mouvement fluide.

De ce principe, l'exosquelette HAL a un étendu d'utilisation très vaste, allant d'un usage médical (utilisateurs ayant des symptômes d'incapacité ambulatoire musculosquelettique) à l'assistance au travail dans des environnement hostiles.

L'exosquelette HAL® for Medical Use. Est destiné à assister les patients souffrant d'incapacité de mouvement. Une télécommande supplémentaire permet à l'opérateur d'ajuster en cours d'utilisation les paramètres de performances de l'exosquelette et d'utiliser les fonctions d'aide spécialisée pour des mouvements plus complexes [24].

L'exosquelette HAL® for Living Support (Lower Limb Type), est destiné à une utilisation en clinique à fin d'améliorer le fonctionnement des jambes. Il possède une console logicielle permettant aux thérapeutes d'ajuster les différents paramètres de l'exosquelette [25].

L'exosquelette HAL® for Living Support (Single Joint Type), permet d'assister le mouvement d'un genou ou un coude, pour faire entraîner le patient par exemple [26].

L'exosquelette HAL® for Care Support (Lumbar), fait réduire la charge sur le bas du dos, en lui offrant une assistance mécanique [27].

L'exosquelette HAL® for Whole Body, est conçu pour augmenter la force des quatre membres, permettant d'exercer plus de force pour le même effort de la part de l'utilisateur [28].

Donc, ce type a un très grand nombre d'utilisation, et offre la capacité de synchroniser les signaux neurones avec le mouvement du robot. Mais il a certains inconvénients techniques ; par exemple Il faut s'assurer de placer les électrodes correctement et de calibrer le système de contrôle à chaque utilisation pour assurer son bon rendement [28], et en plus, ça peut prendre un certain temps pour l'installer sur son utilisateur.

Exosquelettes thérapeutiques par contrôle externe :

Ce type est conçu pour les patients ASIA de type A et B qui ont un certain degré de mobilité aux jambes, et donc doivent utiliser cette capacité pour contrôler l'exosquelette, en minimisant l'intervention par l'exosquelette, qui peut se faire à travers une interface externe de contrôle.

Voici quelques modèles utilisant cette technologie :

1. Ekso Suit d'Ekso Bionics :

L'Ekso Suit est la première génération d'exosquelette thérapeutique d'Ekso Bionics.

Il permet un utilisateur de type A de marcher à nouveau à l'aide des cannes pour maintenir l'équilibre.

Il possède trois modes d'opération permettant de suivre l'évolution de l'utilisateur dans sa réadaptation :

FirstStep™ : le patient se familiarise avec le produit, le thérapeute déclenche les mouvements d'une façon sécuritaire.

ActiveStep™ : permet à l'utilisateur de déclencher lui-même le mouvement de ses jambes à l'aide de boutons installés sur ses cannes.

ProStep™ : permet à l'exosquelette de gérer le déclenchement du mouvement des jambes lorsqu'il détecte que la position est stable et que l'utilisateur est prêt à marcher.



Figure 1.22: EKSO Suit d'EKSO BIONICS

2. ReWalk™ d'Argo Medical Technologies :

Il a le même principe que “ l'ekso suit ”, et il permet à l'utilisateur de réaliser plusieurs mouvements tel que :

- Se lever et s'asseoir sur une chaise.
- Monter et descendre un escalier.
- Marcher

Il exige l'utilisation des cannes.



Figure 1.23: ReWalk™ d'Argo Medical Technologies

3. REX de REX Bionics:

Ce modèle n'exige pas au patient l'utilisation des cannes, en effet, l'exosquelette gère entièrement l'équilibre, ce qui permet à l'utilisateur de se libérer les deux mains pour faire des tâches dans une position debout.

Le modèle REX P est conçu sur mesure pour son utilisateur, afin qu'il puisse l'utiliser au travail et à la maison [29].



Figure 1.24: REX de REX Bionics

2

MODÉLISATION

2.1 Introduction

Afin de pouvoir étudier les systèmes, analyser leurs comportements et les commander, on a besoin d'établir le modèle qui décrit ce système d'une façon précise.

Dans ce chapitre, l'étude théorique globale de la modélisation des robots sera présentée. Ceci est un processus applicable à n'importe quel type de robot à fin d'obtenir le modèle lui représentant. De plus, certaines applications de la robotique nécessitent un suivi d'une trajectoire prédéfinie, et pour la marche il y a certaines approches pour déterminer ces allures y compris la méthode du ZMP détaillée dans ce chapitre.

D'un autre côté, le système est aussi influencé par l'environnement où il fonctionne, c'est donc très important de prendre en considération les facteurs environnementaux agissant sur le système. Ce chapitre entame une des notions très importantes de la locomotion bipède faisant partie des facteurs externes qui agissent directement sur la dynamique du robot, c'est le concept du contact avec le sol.

2.2 Planification de trajectoire

2.2.1 Introduction

Afin de faire marcher un robot, on doit lui fournir des trajectoires de référence qu'il faut suivre en temps réel. La génération des trajectoires est donc de grande importance, car cette trajectoire détermine l'allure de la démarche, la vitesse du robot et sa stabilité.

L'ensemble de ces trajectoires est appelé modèle de marche.

La génération des trajectoires de marche humanoïde se base sur 2 méthodes principales, ces méthodes sont classées en plusieurs catégories selon l'approche de base.

Pour obtenir une trajectoire de marche, deux méthodes existent : prendre des relevés biométriques ou concevoir des trajectoires théoriques.

1. Relevés biométriques :

Cette approche consiste à imiter les mouvements de la marche de l'être humain effectué par une personne qui transmettra les données soit par mesure directe ou par imagerie. La mesure directe consiste à installer des capteurs directement sur la personne pour reconstituer les trajectoires. (Des capteurs d'angle sont placés sur les articulations et des accéléromètres sont placés à des endroits stratégiques pour mesurer les mouvements.) [30]

D'autre part, l'imagerie consiste à capturer des images de la marche à des différents intervalles de temps, et puis reconstruire les trajectoires à partir de l'analyse de ces images. Cela est fait par rapport à des points de repère marqués sur le marcheur. Il existe plusieurs types de systèmes pouvant utiliser une ou plusieurs caméras et ayant des marqueurs réfléchissants, lumineux ou infrarouges. Aussi, des systèmes optiques complexes de grandes précisions peuvent être utilisés pour recueillir les données [30].

Cette méthode fournit des trajectoires de marche aussi proches, similaires et identiques de celle de l'être humain. Par contre, il est important de mentionner qu'une démarche d'allure humaine n'est pas nécessairement la meilleure démarche pour un robot [30].

2. Les trajectoires théoriques :

Cette méthode fait générer des trajectoires de marche théoriques par calcul ou par simulation. En effet, plusieurs types de générateurs de trajectoires ont été proposés. Cependant, ceux qui assurent une stabilité a priori de la marche sont souvent basés sur l'un des principaux critères de stabilisation suivants :

- le COM (Center Of Mass),
- le ZMP (Zero Moment Point),
- le FRI (Foot Rotation Indicator) [31].

On peut classer les méthodes utilisées pour cette approche en :

- Méthodes basées sur des modèles simplifiés,
- Méthodes basées sur les oscillateurs,
- Méthodes basées sur les B-Spline,
- Autres méthodes.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à l'approche de génération de trajectoires théorique.

• Méthodes basées sur des modèles simplifiés :

Cette méthode consiste à approximer le robot en un modèle simplifié qu'on peut facilement étudier le mouvement. Parmi les modèles les plus utilisés sont les modèles du pendule inversé avec une, deux ou trois masses.

Plusieurs études ont été portées sur ce modèle, notamment les suivants :

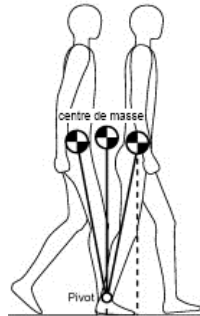


Figure 2.1: Modèle Simplifié du Pendule Inversé

- Kajita et al ont établi dans [32] le modèle de pendule inversé linéaire 3D permettant d'approximer la dynamique d'un robot marcheur bipède à travers l'analyse de la dynamique des mouvements d'un pendule inversé sur un plan arbitraire.

- Hong et al proposent une méthode omni-directionnelle, Le module de mesure proposé utilise à la fois le principe des caractéristiques de périodicités et la méthode des moindres carrés afin de réduire la marge de fluctuation de la trajectoire du ZMP, la trajectoire désirée du ZMP est conçue avec des polynômes quadratiques [33].

- Tang et al utilisent un modèle du pendule inversé (Inverted Pendulum Model : IPM) dans [34]. Le comportement du ZMP du robot est analysé depuis le mouvement du ZMP du pendule inversé. De plus, le centre de gravité du robot est approximé à partir de celui du pendule inversé, et sa trajectoire est déterminée par le mouvement de ce dernier.

- Ferreira et al utilisent les mouvements humains pour générer les trajectoires du ZMP dans un plan sagittal, en se basant sur un modèle du pendule inversé linéaire (LIPM) [35].

- Albert et al. dans [36] proposent un algorithme de génération de trajectoires pour les robots bipèdes

sans tronc, utilisant un modèle de pendule inversé linéaire à deux masses (A 2 Mass Linear Inverted Pendulum Model : 2MLIPM). Cette méthode a résulté en des performances de stabilité de la marche meilleures de celle d'un modèle du pendule inversé.

- Takenaka et al. proposent dans [37] un modèle de pendule inversé à trois masses afin d'approximer la dynamique d'un robot humanoïde.

Et plusieurs autres études qui se basent sur des modèles approchés permettant la génération en temps réel de trajectoires de marche humanoïde avec de bonnes marges des limites du polygone de sustentation.

- **Méthodes basées sur les oscillateurs :**

Trois catégories de méthodes majeures peuvent être aperçues :

La méthode de Ven Der Paul, les sinusoïdaux et la FFT (Fast Fourier Transform).

- Une étude menée par Zhao et al. consiste à générer des trajectoires en 3D basées sur la stabilité de cycle limite et inspiré de la marche dynamique passive [38].

- Un contrôleur est proposé par Katoh et al réalise une marche dynamique stable en utilisant un modèle dynamique à cycle limite stable. Son principe de base consiste à utiliser un générateur de trajectoires qui repose sur le concept de bifurcation d'un ensemble d'oscillateurs de Van Der-Pol couplés. Ces derniers sont des systèmes dynamiques disposant d'un cycle limite stable dans leur comportement [39].

- Yamaguchi et al. présentent le prototype d'un robot humanoïde à taille humaine à 35 d.d.l, doté d'un contrôleur pour l'asservissement du corps entier. Les trajectoires de référence sont générées en utilisant des transformations de fourrier rapides (FFT) [40].

Il existe encore plusieurs autres méthodes, comme les méthodes basées sur les fonctions B-Spline, ou celles utilisant les fonctions polynômiales ou les réseaux de neurones... [31]

Il faut noter que ces trajectoires et modèles de marche sont générées - en possédant un modèle précis ou approximatif du robot - pour un cas idéal, où le robot se déplace parfaitement selon la commande ou trajectoire définie souvent selon un plan parfaitement plat et horizontal. Ce qui n'est pas toujours le cas.

En effet, dans le cas réel, une tout petite irrégularité du plan de mouvement peut facilement générer un déséquilibre du robot.

Donc il est impératif d'implémenter une méthode de stabilisation du robot en mouvement, qui va modifier le modèle de marche en tenant compte des informations parvenant des différents capteurs du robot.

2.2.2 Algorithme du ZMP (Zero Moment Point)

L'objectif de cette méthode est principalement d'assurer et garder la stabilité du robot. La méthode du ZMP se base sur les équations de Newton-Euler [41], et permet de contrôler le balancement du robot en lui calculant une zone de sécurité lors de son balancement et donc pouvant effectuer des modifications. Cette méthode ne génère pas des trajectoires de référence pour la marche, mais indique si la trajectoire générée peut maintenir l'équilibre du robot ou non.

On commence par indiquer un point de référence situé sur le robot, ce point est indiqué généralement par

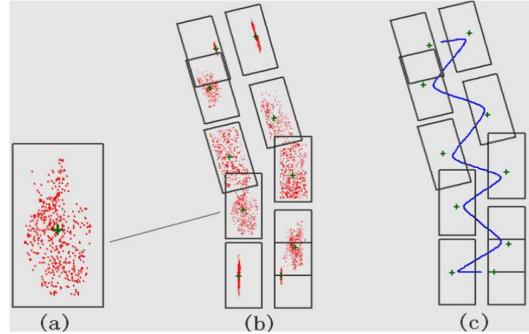


Figure 2.2: La trajectoire du ZMP lors de la marche

le CdM, et peut être calculé mathématiquement par les formules mentionnées antérieurement. L'évolution de la trajectoire de ce point est indiquée en Blue sur la figure (26).

On doit garder ce point dans une zone dite de sécurité, qui se situe à l'intérieur du polygone de sustentation. Cette zone doit aussi répondre aux critères imposés par le ZMP. Le plus important est que dans cette zone, le CdM a un moment inertiel qui est égal à zéro, ou il en est très prêt. Autrement dit, si le point de référence se situe hors de cette zone de sécurité, le robot va être déséquilibré, car le CdM aura une force trop grande [42].

A fin d'implémenter cette méthode, on tend à utiliser des modèles approximatifs concentrés en masse, comme le modèle à pendule inversé avec masse ponctuelle, et le modèle à chariot sur la table.

Modèle du chariot sur la table :

Ce modèle physique peut modéliser la marche humanoïde lors du simple appui par une relation mathématique entre le CdM et le ZMP, simplifiant la dynamique du robot.

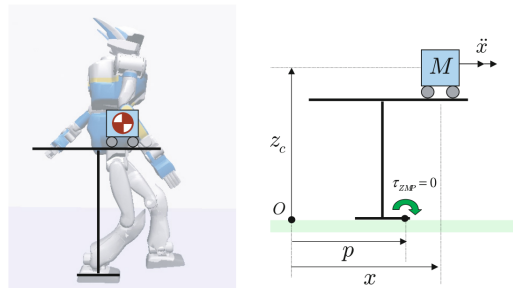


Figure 2.3: Modèle chariot sur la table

Où X et Z_c indiquent la position du CdM dans les deux plans X et Z .
 \ddot{x} est l'accélération du Cdm, qui est aussi soumis à une force de gravité sur l'axe Z .

τ_{zmp} est le moment de basculement autour du point P , et peut être calculé par l'équation suivante :

$$\tau_{zmp} = Mg(x - P) - M\ddot{x}Z_c \quad (2.2.2.1)$$

Par ce modèle, on considère que toute la masse du robot se concentre sur le chariot, et on néglige la masse de la jambe de support. Cette hypothèse ne reflète pas la réalité, mais fournit une bonne approximation, du fait que la généralité de la masse du robot se concentre sur le tronc et les jambes [44]. Pour assurer la stabilité, ce modèle fonctionne sur le principe de soutenir le centre de gravité du chariot, et le ZMP se déplace tout au long du pied (modélisé par le contact de la table avec le sol). Lors de la locomotion, le CdM se déplace sur les deux plans, et si sa position dépasse la zone prise en charge, un moment est créé sur l'axe horizontal, qui va faire basculer la table pour maintenir le CdM dans la zone prise en charge.

Pour assurer la stabilité, le critère de stabilité dynamique exige que le moment au ZMP doit être nul. Donc : $\tau_{zmp} = 0$. (D'où parviennent les équations (1.2.2) et (1.2.3))

Pour pouvoir décrire les mouvements du CdM sur un plan tridimensionnel, deux modèles à chariot sur table sont nécessaires. Mais ce modèle présente l'inconvénient de ne pas pouvoir apercevoir le changement du moment angulaire au niveau du CdM.

Modèle du pendule inversé linéaire :

On peut aussi approximer les mouvements du ZMP et du CdM par le mouvement d'un pendule inversé ; la stabilité du robot dépend de la position du ZMP par rapport au polygone de sustentation ; si le ZMP est à l'intérieur de ce dernier, le robot est donc stable, et si le ZMP atteint le bord du polygone de sustentation le robot commence à perdre son équilibre. Pour obtenir une trajectoire du ZMP souhaitée, on calcule celles du CdM réalisable.

Les oscillations du robot peuvent être modéliser par le pendule inversé.

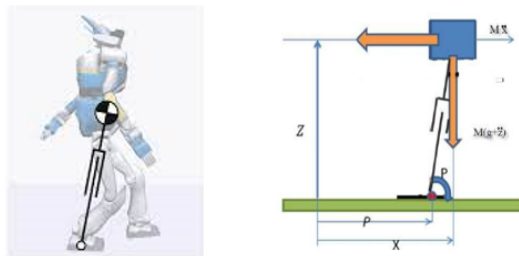


Figure 2.4: Modèle du pendule inversé linéaire

Ce modèle considère le robot autant qu'une masse unique, portée sur son CdM, et que la jambe est de masse négligeable.

De même, pour pouvoir décrire les mouvements du CdM sur un plan tridimensionnel, deux modèles du pendule inversé linéaire doivent être utilisés.

2.3 Contact avec le sol

Parmi les différents aspects faisant partie de l'étude des robots mobiles est leur interaction avec la plateforme où ils se mobilisent. Pour les robots mobiles à roues et à chenilles cette interaction (où contact) est faite d'une façon permanente et continue, par contre, les robots bipèdes effectuent un contact avec le sol commutatif entre les deux jambes tout au long le cycle de la marche.

Ceci signifie que le modèle de la marche est influencé par les forces exercées par le sol sur chaque une des jambes au moment où cette dernière soit en phase du simple appui, et sur les deux jambes lors du double appui. Donc, l'influence du sol doit être prise en considération lors de la modélisation du robot.

En ce propos les chercheurs ont établi deux approches permettant de prendre en compte l'influence du sol ; la première vise à la modélisation entière du sol [45], or que la deuxième prend en charge l'effet de l'impact du robot avec le sol [46] [47].

Notre étude s'intéresse par la deuxième approche consistant à modéliser l'effet de l'impact avec le sol.

On peut résumer les différentes formules adaptées par les chercheurs dans le tableau [48].

Le modèle qu'on peut attribuer à ce contact se constitue de l'ensemble des forces verticales et horizontales (forces de frottement) générées par l'impact du pied avec le sol.

Il est sous forme d'un système constitué de l'ensemble d'un ressort et un amortisseur, et exprimé par la formule suivante:

$$\begin{aligned} F_N &= Kd + C\dot{d} \\ F_S &= K_x x + C_x \dot{x} \end{aligned} \tag{2.3.0.1}$$

Où F_N et F_S sont les forces de réaction verticale et celle de frottement respectivement.

Et d représente la pénétration verticale au sol. Pour notre cas cette distance est proche du zéro ($d \simeq 0$).

$$\text{avec } K = 2.5 \times 10^4, \quad C = 5 \times 10^2, \quad K_x = 5 \times 10^3, \quad C_x = 1 \times 10^2 \tag{2.3.0.2}$$

Les K sont les coefficients de raideur, et les C sont les coefficients d'amortissement. Est donc, le terme décrivant la forces réactives du sol est donné par:

$$F_R = F_N + F_S = F_S; \tag{2.3.0.3}$$

2.4 Formalismes de la modélisation des robots :

La conception d'un robot nécessite l'utilisation des modèles mathématiques, pour la commande et la simulation. Ces modèles ont pour but de représenter mieux le robot dans son environnement refléter ses caractéristiques de point de vue de sa géométrie et son comportement cinématique et dynamique.

La modélisation se fait sur plusieurs niveaux, tout dépend l'objectif désiré, les contraintes imposées et les performances recherchées.

La modélisation de système poly-articulé (robot) a pour but de représenter au mieux le robot dans son environnement pour ensuite lui programmer les trajectoires avec la planification de mouvement.

Le robot marcheur bipède étudié, représenté sur la figure (29) est constitué de deux jambes liées par une masse au niveau du CdM(M_{com}). Chaque jambe comporte deux jonctions liées entre elles par deux segments (corps rigides de longueur l_1 et l_2) et ayant une masse (m) situé au niveau de la jonction du genou.

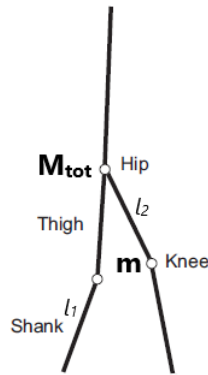


Figure 2.5: Schéma du modèle étudié

2.4.1 Modélisation géométrique :

Ce modèle permet d'exprimer la position cartésienne en relation avec les variables angulaire des articulations. Pour y faire, on commence d'abord par déterminer le nombre de degrés de liberté (DDL) que le bipède doit posséder. Les DDL d'un système sont les paramètres indépendants qui permettent de définir la position et l'orientation de chaque corps du système.

La marche humaine comporte des dizaines de DDL répartis sur le corps, mais ce nombre doit être minimiser pour pouvoir simplifier l'étude et la modélisation du bipède ; plus le nombre est élevé, le modèle devient de plus en plus complexe. Cette diminution est contrainte de l'agilité que le robot doit préserver lui assurant la stabilité nécessaire pour son fonctionnement.

On distingue deux types de modélisation géométrique : directe et inverse.

- **Modélisation géométrique directe :** Le modèle géométrique directe (MGD) est un formalisme mathématique nous permettant d'obtenir la position cartésienne à partir des variables angulaires des articulations. En d'autres termes, il relie l'espace articulaire associé aux différentes liaisons à l'espace opérationnel associé à la configuration de l'organe terminal [43].

On peut l'exprimer par la relation vectorielle suivante :

$$X = f(q); \tag{2.4.1.1}$$

où X exprime les coordonnées à l'espace opérationnel, les q sont les variables articulaires, et f est une fonction vectorielle, souvent non linéaire.

- **Modélisation géométrique inverse :** Comme son nom l'indique, le modèle géométrique inverse (MGI) est l'opération inverse du MGD, qui nous permet d'obtenir les positions articulaires en fonction des variables de l'espace opérationnel (la position et l'orientation). Il est exprimé par la relation suivante

$$q = f^{-1}(X) \quad (2.4.1.2)$$

Le calcul de ce modèle est souvent basé sur un formalisme dit Denavit-Hartenberg, qui est une méthode systématique qui permet de construire itérativement l'ensemble des transformations de la structure par la création d'une matrice de transformation décrivant les points d'une articulation par rapport à l'articulation qui la succède, en prenant en compte les mouvements effectués (rotation ou translation). La matrice de transformation globale, qui exprime la totalité des mouvements entre la première articulation et la dernière est obtenue par la multiplication de toutes les matrices de transformation entre chaque deux articulations successives.

2.4.2 Modélisation cinématique :

L'évolution du monde de la robotique a élargi le domaine de recherche et applications lié au développement des robots ; on cherche de plus en plus à étudier des fonctionnalités plus sophistiquées, et à effectuer des mouvements plus complexes. Cela, très souvent, nécessite des modèles d'études de complexité élevée, qu'on ne peut réaliser qu'à travers la cinématique robotique.

La cinématique robotique peut être défini en étant une application de la géométrie à l'étude des chaînes robotiques arbitraires [44].

Et donc on vise par la cinématique d'établir une transformation entre l'espace articulaire et l'espace cartésien des vitesses des différentes variables.

Ce modèle comporte aussi deux méthodes, dont l'une est l'inverse de l'autre ; ce sont la modélisation cinématique directe et la modélisation cinématique inverse.

- **Le modèle cinématique directe :** Le modèle cinématique directe (MCD) décrit les vitesses opérationnelles \dot{x} en fonction des vitesses articulaires \dot{q} ; le modèle peut donc être représenté par la formule suivante :

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.4.2.1)$$

où J est la matrice Jacobienne issue de la dérivation du MGD. Le jacobien est donné par la relation suivante:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1; \dots, m \quad (2.4.2.2)$$

- **Le modèle cinématique inverse :** Le MCI fait exprimer les vitesses articulaires à partir des vitesses opérationnelles, et peut être obtenu par la formule suivante :

$$\dot{q} = J(q)^+ \dot{x}. \quad (2.4.2.3)$$

Où $J(q)^+$ désigne la matrice pseudo-inverse de la matrice Jacobienne.

Ceci est due au fait que la matrice jacobienne n'est pas toujours carrée; en effet, elle l'est si le nombre des variables articulaires est égale au nombre des variables cartésiennes.

2.4.3 Modélisation dynamique :

Le modèle dynamique d'un robot permet d'établir la relation entre les accélérations et les vitesses angulaires avec les forces et moments nécessaires pour contrôler les articulations. C'est-à-dire que c'est une relation qui exprime les mouvements du robot en fonction des forces des actionneurs des articulations.

Cela va permettre la conception des modèles de simulation qu'on peut utiliser pour générer des algorithmes de contrôle et des techniques de planification de locomotion sans avoir nécessairement besoin d'accéder ou construire des systèmes physiques tout entiers.

La modélisation dynamique joue donc le rôle le plus important dans la simulation de la locomotion du robot, et la synthèse de ses contrôleurs.

Le modèle dynamique inverse (MDI) permet de déduire les forces (ou couples) à partir d'une connaissance antérieure des variables angulaire q, \dot{q} et \ddot{q} par la relation suivante :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + Fr \quad (2.4.3.1)$$

où:

τ est le vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique ;

M est la matrice ($n \times n$) de l'énergie cinétique (n étant le nombre d'articulations), appelée aussi matrice d'inertie du robot, qui est symétrique et définie positive. Ses éléments sont fonctions des variables articulaires q .

C est une matrice ($n \times n$) présentant les couples/forces de Coriolis et des forces centrifuges.

G est le vecteur ($n \times 1$) des couples / forces de gravité.

Et Fr est un vecteur représentant l'effort extérieur (force et moments) qu'exerce le robot sur l'environnement. Pour pouvoir déduire ce modèle, il est nécessaire de passer par les équations de mouvement du robot, obtenu par une des deux méthodes suivantes :

1. **Formalisme de Lagrange :** Cette méthode fournit les équations de mouvements du robot à l'aide du lagrangien du système, qui est une expression liant les différentes énergies du système.

On considère les variables q_i ($i = 1, \dots, n$) qui représentent les n-DDL du système, et dite les coordonnées généralisées.

Le lagrangien du système est donnée par l'expression suivante :

$$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{U} \quad (2.4.3.2)$$

Tel que: \mathcal{T} et \mathcal{U} sont les énergies cinétique et potentiel respectivement.

Les équations de Lagrange sont ensuite obtenues par :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = \xi_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4.3.3)$$

ξ_i est dit les forces généralisées des coordonnées généralisées.

2. **Formalisme de Newton-Euler :** C'est une méthode parvenant des théorèmes généraux de la mécanique, développé en une solution récursive itérative très adaptée à la commande dynamique en temps réel des robots à chaîne cinématique simple [49]. Elle se base sur une double récurrence ; la récurrence avant allons de la base du robot vers sont effecteur calculant les vitesses et les accélérations, et puis leur torseur dynamique. Puis la récurrence arrière de l'effecteur vers la base qui permet de calculer les couples des actionneurs.

En ce qui suit, l'approche de modélisation dynamique choisi est celle du formalisme de lagrange.

2.5 Modèle établi

Plusieurs recherches ont été menées pour établir un modèle qui exprime la dynamique d'un exosquelette parmi lesquelles on a mentionné dans (3.2). À partir de ces modèles, l'article [50] propose un modèle qui assemble 3 modes de fonctionnement de l'exosquelette tout au long le cycle de marche.

Chaque un de ces modes indique une phase du mouvement des pieds sur le cycle de la marche, qui est constitué d'une période de double appui, où les deux pieds touchent le sol, suivi par une phase de simple appui où seulement un pied est en contact avec le sol. Cette dernière période est caractérisée par deux mouvement districts du pied en déplacement ; le premier est le balancement de la position de départ (fin de la phase de double appui) jusqu'au deuxième mouvement dit "verrouillage du genou" qui précède le moment où le pied touche le sol.

Le phénomène du verrouillage du genou se produit lorsque l'angle du genou est égal à celle du bassin. Ce phénomène est un résultat de l'optimisation de la marche robotique en approximant la marche humaine le plus proche possible, cela en assurant des allures plus naturelles avec meilleure efficacité énergétique et stabilité de marche. En effet il à une grande influence sur l'efficacité énergétique [51].

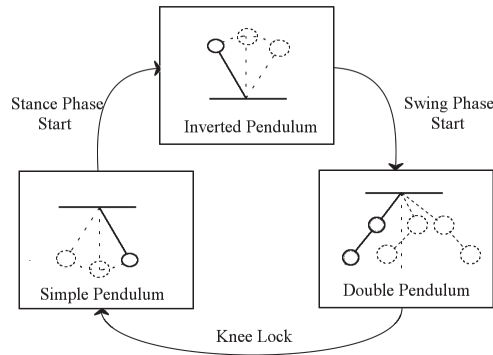


Figure 2.6: Les modes de fonctionnement du modèle

Et donc, pour modéliser ces trois modes on distingue : un modèle de double pendule , un autre d'un simple pendule et le dernier est un pendule inversé.

Dans ce qui suit :

X et y désigne les positions dans l'espace fonctionnel (coordonnées cartésiennes).

θ sont les angles par rapport à la verticale.

L est la somme des deux segments l_1 et l_2 reliant les deux masses M_{com} et m.

M_{tot} est la somme des deux masses M_{com} est m.

1. **Le pendule inversé :** ceci est un modèle très simple, mais autant efficace pour décrire le déplacement du CdMentre deux phases du double appui.

Les coordonnées cartésiennes sont données par :

$$\begin{aligned} x &= L \sin(\theta) \\ y &= L \cos(\theta) \end{aligned} \quad (5.0.0)$$

2. **Le double pendule :** ce modèle représente le déplacement d'un pied lorsque l'autre est en phase du simple appui.

Le balancement de ce pendule inversé est exprimé par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} y &= -l_1 \cos(\theta_1) - L_2 \cos(\theta_2) \\ x &= l_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (5.0.1)$$

3. **Le pendule simple :** ce modèle décrit l'intervalle entre le moment du verrouillage du genou et la fin de la phase du double pendule .
son mouvement est décrit par:

$$\begin{aligned} y &= -(l_1 + L_2) \cos(\theta_1) \\ x &= (l_1 + L_2) \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (5.0.2)$$

Pour rejoindre les trois modèles, on introduit la variable temporelle sur chaque un des modèles précédents, ceci va permettre de délimiter chaque phase sur le cycle de marche.

En remplaçant les valeurs désirées des angles θ , on obtient[50]:

- **Mode du pendule inversé:**

$$\theta(t) = \theta_i + \omega t \quad (5.0.3)$$

- **Mode du double pendule :**

$$\begin{aligned} \theta_1(t) &= \theta_i + (\theta_t - \theta_i) \left(1 - e^{-\frac{t}{a_1}}\right) \\ \theta_2(t) &= \theta_i + (\theta_t - \theta_i) \left(1 - e^{-a_2 t}\right) \end{aligned} \quad (5.0.4)$$

- **Mode du pendule simple:**

$$\theta(t) = \theta_t + \omega t \quad (5.0.5)$$

on définit les paramètres suivants:

S : Désigne le déplacement horizontale du CdM, qui est approximativement la moitié de la distance déplacée pendant le cycle tout entier.

V_{cm} : Désigne la vitesse du déplacement horizontale du CdM.

$t_f = \frac{S}{V_{cm}}$: Désigne la durée de la période du balancement.

$$t_{f1} = \alpha t_f$$

$$t_{f2} = (1 - \alpha)t_f$$

t_{f1} et t_{f2} précisent la période où le modèle se comporte comme un DP (phase de balancement) et celle où il se comporte comme un PS (le verrouillage du genou).

$\theta_i = -\arcsin\left(\frac{S}{2l}\right)$: l'angle initial.

$\theta_f = -\theta_i$: est l'angle final. Il est égale à l'inverse de l'angle initial par symétrie

$\theta_t = -\theta_i + \gamma(-\theta_i)$: est l'angle de commutation du DP vers PI, et on définit γ entre 0 et 1 de tel sorte qu'on délimite les intervalles de chaque mode.

$\omega = \frac{\theta_f - \theta_t}{t_{f2}}$: est la vitesse angulaire du CdM.

$$\theta = \theta_t + \omega t$$

$$a_1 = \frac{t_{f1}}{4}$$

$$a_2 = -\frac{1}{\tau_{f1}} \ln(2)$$

a_1 et a_2 représente la période du balancement pour chaque angle.

Après avoir conçu les trois modèles, et les rejoindre en fonction d'une seule variable temporelle, on passe à la modélisation dynamique du système, qui va nous permettre d'établir des lois de commande pour le système. L'approche choisi pour extraire la formule des couples (dynamique inverse) est celle du Lagrangien.

Un subdivise notre système en trois sous-systèmes :

Le premier, noté M1, désigne la phase de balancement, est donc c'est le modèle du DP, le deuxième M2 est le PS, et finalement, M3 le modèle du PI.

2.5.1 Mode 1: Le modèle du double pendule :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin(\theta_1) \\ -l_1 \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (5.1.0)$$

Donc:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \\ l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (5.1.1)$$

L'expression de l'énergie cinétique est donnée par:

$$\mathcal{K}_1 = \frac{1}{2} m (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) \quad (5.1.2)$$

En remplaçant \dot{x}_1 et \dot{y}_1 par leurs expressions on trouve:

$$\mathcal{K}_1 = (l_1 \dot{\theta}_1)^2 \quad (5.1.3)$$

l'énergie potentiel est donnée par:

$$\mathcal{P}_1 = -mgl_1 \cos(\theta_1) \quad (5.1.4)$$

Le Lagrangien est donc donné par:

$$\mathcal{L}_1 = \mathcal{K}_1 - \mathcal{P}_1 \quad (5.1.5)$$

On fait le même travail pour la masse M_{com} :

$$X = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) \\ -l_1 \cos(\theta_1) - l_2 \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (5.1.6)$$

Donc:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \\ l_1 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + l_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (5.1.7)$$

L'expression de l'énergie cinétique est donnée par:

$$\mathcal{K}_2 = \frac{1}{2} m (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (5.1.8)$$

En remplaçant \dot{x}_2 et \dot{y}_2 par leurs expressions on trouve:

$$\mathcal{K}_2 = \frac{M_{com}}{2} [(l_1 \dot{\theta}_1)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (5.1.9)$$

l'énergie potentiel est donnée par:

$$\mathcal{P}_2 = -M_{com}g(l_1\cos(\theta_1) + l_2\cos(\theta_2)) \quad (5.1.10)$$

Le Lagrangien est donc donné par:

$$\mathcal{L}_2 = \mathcal{K}_2 - \mathcal{P}_2 \quad (5.1.11)$$

Le Lagrangien totale est la somme des deux Lagrangiens \mathcal{L}_1 et \mathcal{L}_2 :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_2 \quad (5.1.12)$$

Finalement, on déduit l'expression des couples:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} \\ \tau_2 &= \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} \end{aligned} \quad (5.1.13)$$

On obtient l'équation (3.4.3.1), avec:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (5.1.14)$$

La matrice d'inertie M est donnée par:

$$M = \begin{bmatrix} l_1^2(m + M_{com}) & l_1 l_2 M_{com} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ l_1 l_2 M_{com} \cos(\theta_1 - \theta_2) & l_2^2 M_{com} \end{bmatrix} \quad (5.1.15)$$

La matrice C des forces de Coriolis est la suivante:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & l_1 l_2 M_{com} \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ -l_1 l_2 M_{com} \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1.16)$$

La matrice des forces de gravité G est définie comme suit:

$$G = \begin{bmatrix} gl_1 \sin(\theta_1)(M_{com} - m) \\ gl_2 \sin(\theta_2) M_{com} \end{bmatrix} \quad (5.1.17)$$

Le vecteur des forces externes Fr est donnée selon par l'équation(3.3.0.3).

2.5.2 Mode 2: Le modèle du pendule simple:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +L\sin(\theta) \\ -L\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.2.0)$$

Donc:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L\dot{\theta}\cos(\theta) \\ L\dot{\theta}\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.2.1)$$

L'expression de l'énergie cinétique est donnée par:

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2} M_{tot} (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) \quad (5.2.2)$$

En remplaçant \dot{x}_1 et \dot{y}_1 par leurs expressions on trouve:

$$\mathcal{K} = (L\dot{\theta})^2 \quad (5.2.3)$$

l'énergie potentiel est donnée par:

$$\mathcal{P} = -M_{tot}gL\cos(\theta) \quad (5.2.4)$$

Le Lagrangien est donc donné par:

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{P} \quad (5.2.5)$$

Finalement, l'expression des couples est donnée par :

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \quad (5.2.6)$$

On obtient l'équation (3.4.3.1) , avec:

La matrice d'inertie M est donnée par:

$$M = [M_{tot}L^2] \quad (5.2.7)$$

La matrice C des forces de Coriolis est nulle

La matrice des forces de gravité G est définie comme suit:

$$G = [M_{tot}gL\sin(\theta)] \quad (5.2.8)$$

Le vecteur des forces externes Fr est donnée selon par l'équation(3.3.0.3).

2.5.3 Mode 3: Le modèle du pendule inversé:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L\sin(\theta) \\ -L\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.3.0)$$

Donc:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L\dot{\theta}\cos(\theta) \\ L\dot{\theta}\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.3.1)$$

L'expression de l'énergie cinétique est donnée par:

$$\mathcal{K} = \frac{1}{2}M_{tot}(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) \quad (5.3.2)$$

En remplaçant \dot{x}_1 et \dot{y}_1 par leurs expressions on trouve:

$$\mathcal{K} = (L\dot{\theta})^2 \quad (5.3.3)$$

l'énergie potentiel est donnée par:

$$\mathcal{P} = -M_{tot}gL\cos(\theta) \quad (5.3.4)$$

Le Lagrangien est donc donné par:

$$\mathcal{L} = \mathcal{K} - \mathcal{P} \quad (5.3.5)$$

Finalement, on applique l'expression des couples est donnée par:

$$\tau = \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} \quad (5.3.6)$$

On obtient l'équation (3.4.3.1) , avec:

La matrice d'inertie M est donnée par:

$$M = [M_{tot} L^2] \quad (5.3.7)$$

La matrice C des forces de Coriolis est nulle

La matrice des forces de gravité G est définie comme suit:

$$G = [M_{tot} g L \sin(\theta)] \quad (5.3.8)$$

Le vecteur des forces externes Fr est donnée selon par l'équation(3.3.0.3).

2.6 Conclusion

La modélisation est un aspect très important de la conception des robot humanoïdes. En effet, plusieurs modèle ont été proposé par les chercheurs visant à établir mathématiquement la structure et les mouvements des robots.

Parmi ces modèles, les modèles approximatifs font simplifier et approximer le vrai modèle de la locomotion humaine en des modèles simples et facile à étudier et implémenter.

Dans ce chapitre un modèle a été établit en prenant en considération les différents mouvements appliqués lors de la marche bipède humanoïde.

3

COMMANDE

3.1 Introduction

La formulation du contrôle d'un robot peut être vu en tant que la génération des forces et couples que doit exercer les actionneurs (placés sur les articulations) à fin d'exécuter des tâches dans l'espace opérationnel. Les mouvements générés par ces actions sont contraints par les conditions de l'environnement où le robot fonctionne.

Plusieurs recherches et approches ont été mise en place pour assurer la commande des robots, chaque une d'eux dépend principalement de la complexité de la structure du robot. En effet, parmi les difficultés de l'étude de la commande des robots est, d'un part, la complexité de leur dynamique due à la non linéarité et la nature du couplage entre les articulations, et d'un autre, les incertitudes que présente le modèle, qui résultent d'un manque de précision des paramètres du modèle lui-même, des dynamiques externes inconnues de l'environnement, des bruits de capteurs ou des forces de frottements. . .

Ces facteurs ont donné naissances à plusieurs types de contrôleurs implémentés pour commandes les différents types des robots, par exemple, au niveau industriel, une des méthodes les plus utilisée est une commande PID (proportionnelle, intégrale et dérivée) décentralisée, c'est-à-dire, que chaque DDL est contrôlé indépendamment. Un autre type de contrôle concerne directement la dynamique inverse du modelé dit computed torque control qui s'intéresse par fournir une commande qui converti un modèle de contrôle non linéaire en un simple modèle linéaire consistant de n sous-systèmes (n est le nombre des DDL du modèle). De plus, il existe d'autres types de contrôleurs qui s'intéresse principalement par la dynamique inverse du modèle, comme le tracking control qui comporte aussi plusieurs techniques développées comme le feedback linearization, passivity-based control et inverse dynamics control.

L'objet de notre étude présenté par ce chapitre est d'étudier les performances de notre robot, donné par le modèle présenté dans le chapitre précédent commandé par un contrôleur par dynamique inverse et puis une autre commande PID, afin de pouvoir examiner sa réponse envers chaque une de ces commandes.

Notons qu'avoir les trajectoires temporelles des variables articulaires nous permet de générer les trajectoires désirées sans avoir besoin de passer par les modèles cinématique et géométrique directe et inverse.

3.2 Régulation par un contrôleur PID

Le contrôleur PID est l'un des contrôleurs les plus connus et plus fréquemment utilisés, les effets et significations physiques qu'apporte chaque composante du contrôleur à rendu son utilisation plus simple, de plus de la facilité de son implémentation et son cout de calcul réduit.

Notons que notre commande s'effectue dans l'espace articulaire.

La loi de commande est donnée par l'expression du couple de chaque articulation est exprimée par la formule suivante :

$$\tau = \mathbf{K}_p (\theta^d - \theta) + \mathbf{K}_d (\dot{\theta}^d - \dot{\theta}) + \mathbf{K}_I \int_{t_0}^t (\theta^d - \theta) d\tau \quad (3.2)$$

θ^d est l'angle théorique désirée.

\mathbf{K}_p , \mathbf{K}_d et \mathbf{K}_I sont les gains proportionnels, dérivés et intégral respectivement.

La composante proportionnelle \mathbf{K}_p sert à minimiser l'erreur statique du système présentée par l'erreur entre l'angle désirée et l'angle issue du modèle. L'augmentation du gain proportionnelle fait tendre l'angle de l'articulation vers l'angle désirée, mais aussi fait augmenter les oscillations du système.

L'ajout d'un intégrateur au système lui permet d'annuler l'erreur statique, cette action est l'accumulation des informations précédente des états, par contre, elle aussi augmente les oscillations du système.

Finalement, l'ajout de l'action dérivée contribue à prédire les informations et les tendances futures du système, et fait diminuer les oscillations.

Et donc, on peut illustrer cette commande par le schéma suivant :

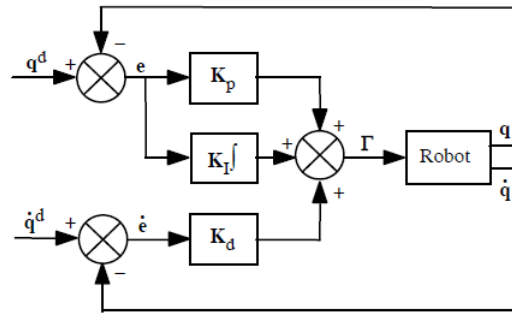


Figure 3.1: Schéma block de la commande PID

On applique cette commande sur chaque mode de fonctionnement de notre modèle.

3.3 Contrôle par la dynamique inverse

Dans certain cas d'application robotique, avoir une position objective dont le robot doit atteindre n'est pas suffisant, or il est nécessaire d'avoir un suivi de trajectoire tout au long de l'exécution de la tâche, soit à fin d'éviter certains obstacles dans l'espace opérationnel, ou à cause de la nature de la tâche elle-même, comme par exemple la soudure, le découpage... Dans ce cas, un correcteur PID ne fournira pas les performances optimales exigées par la tâche (le PID est très adéquat pour les problèmes de régulation "set-point"). En effet, si on cherche à suivre l'évolution de l'angle désirée de référence θ et sa vitesse $\dot{\theta}$ et accélération $\ddot{\theta}$, dit aussi "le tracking", on fait recourt à la commande par la dynamique inverse.

Cette méthode consiste à annuler les termes non linéaires et découpler la dynamique de chaque articulation, en ayant un modèle en ligne de la dynamique du robot, et tous les paramètres d'inertie et de frottement.

Le contrôleur est sous la forme suivante :

$$\tau = M(\theta)v + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + Fr \quad (3.3.1)$$

tel que:

$$v = \ddot{\theta} = \ddot{\theta}_d + K_V (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_P (\theta_d - \theta) \quad (3.3.2)$$

Et on définit le terme de l'erreur:

$$e_\theta = \theta_d - \theta$$

On obtien l'équation de l'erreur dynamique suivante:

$$\ddot{e}_\theta + K_V \dot{e}_\theta + K_P e_\theta = \mathbf{0} \quad (3.3.3)$$

Le schéma du contrôleur est donnée par la figure suivante:

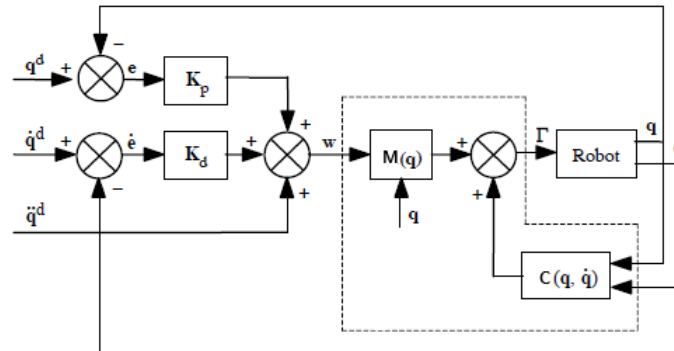


Figure 3.2: Schéma block de la commande par dynamique inverse

4

RÉSULTATS DE LA SIMULATION

En faisant entrer les paramètres de la modélisation sur le logiciel MATLAB, et on établissant le schéma des deux commandes sur les trois modes on a obtenu:

4.1 Génération des trajectoires

Afin de générer les trajectoires désirées de chaque modes, le schéma suivant est proposé :

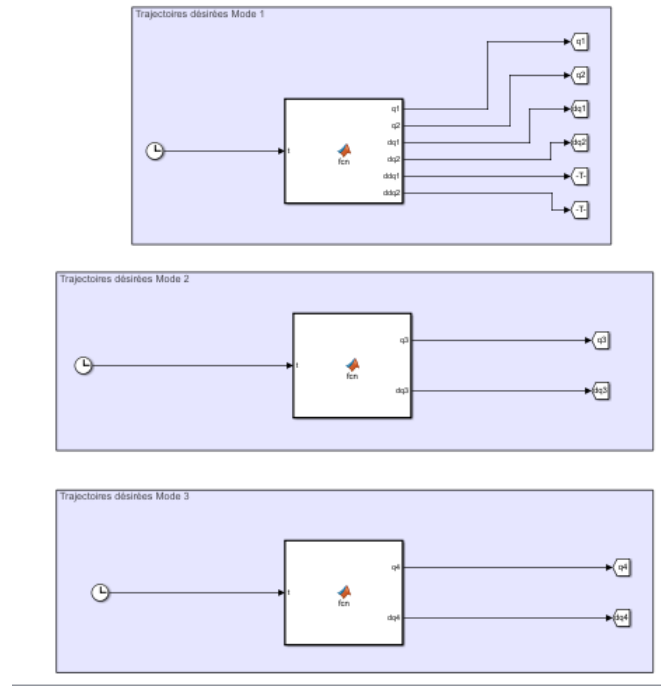


Figure 4.1: Schéma de simulation du bloc des trajectoires générées

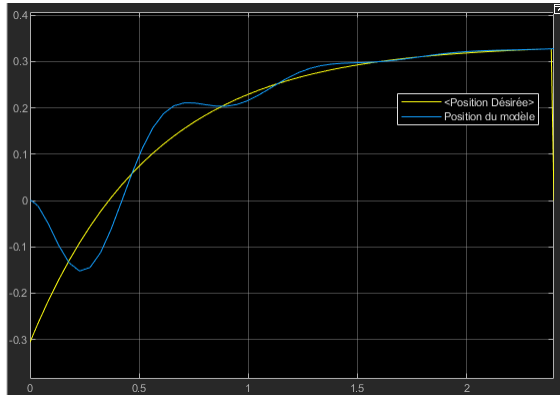
Les blocs de fonction contiennent les équations des variables articulaires désirées en fonction du temps, qui est fourni à l'entrée du bloc à l'aide d'un module "horloge". Le premier mode (DP) contient deux variables articulaires dans sa sortie: θ_1 et θ_2 , alors que les deux autres modes (PI et PS) ont seulement une seule variable de sortie. De plus, les vitesses et accélérations articulaires sont aussi calculées et fournies utilisant le même bloc de fonction.

Les trois modes sont distingués par rapport à un cycle de marche (noté T, qui est considéré égal à 5 secondes) par des pourcentages, tel que: le premier mode du DP est de durée de 48% du cycle de marche, le deuxième mode: PS est de 4% et le troisième mode: PI est aussi de 48% du cycle de marche.

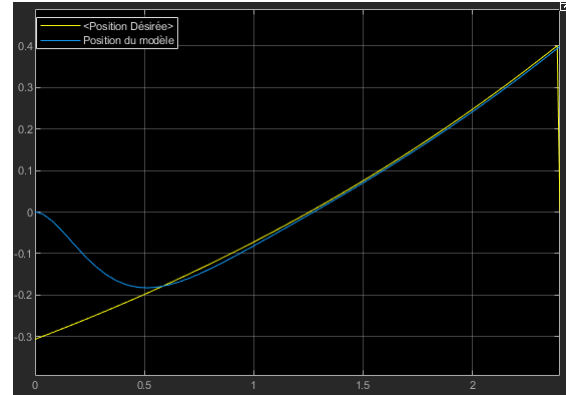
En ce qui suit, les allures des positions des variables articulaires θ sont montrées pour chaque mode indépendamment.

4.2 Commande par la dynamique inverse

Mode 1 DP:



(a) La position θ_1



(b) La position θ_2

Figure 4.2: Les positions du premier mode

Ce premier mode fonctionne sur l'intervalle compris entre l'origine et $0.48 \times$ le cycle de marche. Etant fixé la période du cycle de marche à 5 secondes, ce premier mode est de 2.4 secondes.

Mode 2 PS:

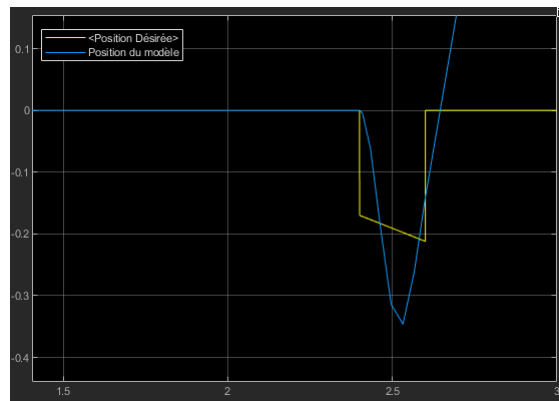


Figure 4.3: La position θ

Le deuxième mode a une durée très réduite, d'à peu près 0.2 secondes.

Mode 3 PI:

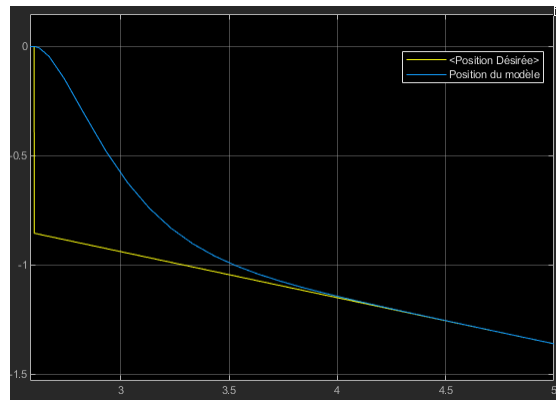
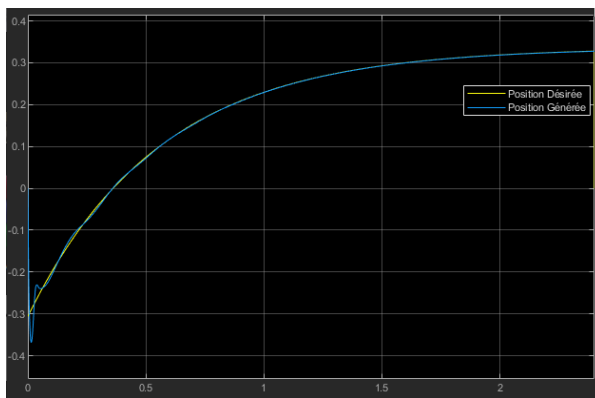


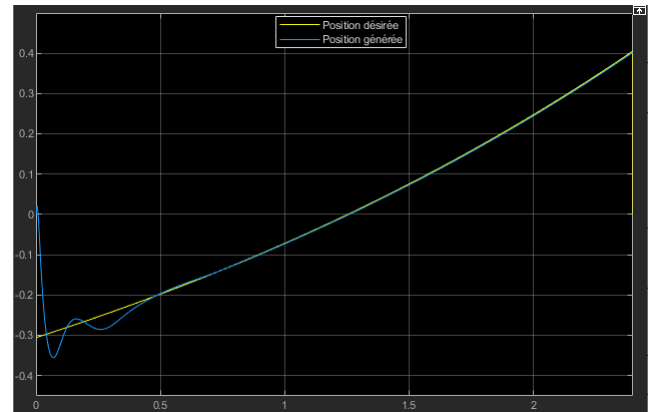
Figure 4.4: La position θ

4.3 Commande PID

Mode 1 DP:



(a) La position θ_1



(b) La position θ_2

Figure 4.5: Les positions du premier mode

Mode 2 PS:

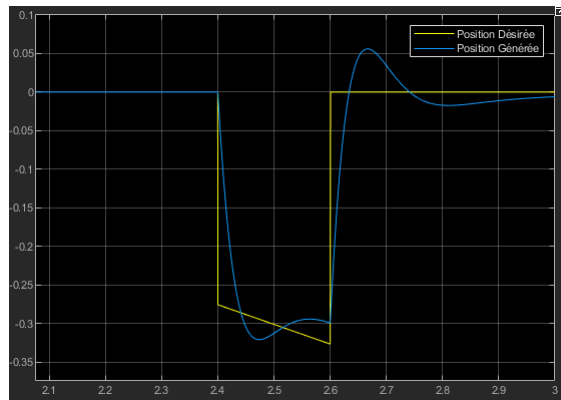


Figure 4.6: La position θ

Mode 3 PI:

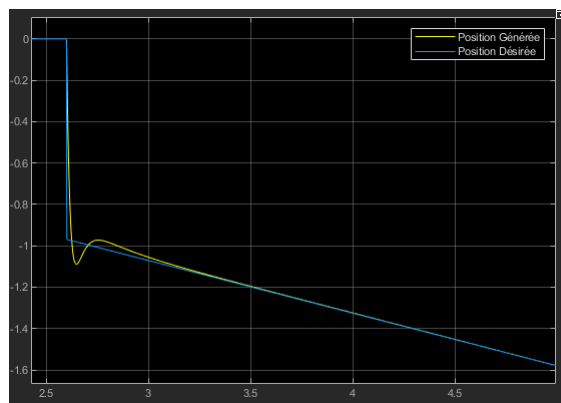


Figure 4.7: La position θ

4.4 Interprétations et Conclusion

En appliquant les deux commandes précédentes, il est clairement visible que les paramètres des contrôleurs PIDs ont été ajustés pour satisfaire des critères de rapidité pour faire tendre les trajectoires générées par le modèle à ceux souhaitées. Évidemment, pour un temps de simulation réduit (5 sec) et 3 modes de fonctionnement différents il est souhaitable d'avoir des réponses rapides pour le suivi de trajectoires.

Néanmoins, le passage d'un mode à un autre dans un laps de temps court cause des perturbations et les accélérations peuvent atteindre de très grandes valeurs due aux changements brusques des vitesses qui accompagnent le passage entre les modes.

De plus, chaque contrôleur fonctionne seulement à l'intervalle lui est attribué, et donc en dehors de ce dernier les systèmes n'influencent pas l'un sur l'autre.

Le deuxième mode n'atteint pas toujours sa phase de stabilité, cela est dû au fait qu'il possède un intervalle de fonctionnement très très réduit. Le régulateur PID est donc choisi de tel sort à prendre en considération ce changement rapide.

Ce chapitre a traité l'implémentation des deux lois de commandes sur le modèle choisi, et l'analyse de la réaction et des performances du système. L'implémentation de ces contrôleurs requiert un calcul en temps réel de la dynamique du système, et suppose l'acquisition antérieure des positions et vitesses articulaires, lesquelles ont été définies dans le chapitre (2).

5

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La rééducation neuromotrice est un des domaines d'application de la robotique en interaction physique où on s'intéresse à concevoir des machines pouvant assister les mouvements de patients atteints de troubles neuromoteurs dans la réalisation d'exercices physiques. Un des enjeux importants est de pouvoir proposer des machines capables de maîtriser des efforts mécaniques distribués le long des membres du patient durant les mouvements.[54]

A travers cette étude, on a pu établir un modèle d'un robot marcheur bipède, constitué de deux jambes ayant 2 jonctions chaque une. Le mode de locomotion du robot été divisé en trois phases dont chaque une a un modèle la représentant. Les trois modèles obtenus reflètent un mouvement spécifique appliqué lors de la locomotion bipède.

Ces modèles ont ensuite servi pour la génération des allures de marche désirées, en plus ils ont été utiliser pour commander le système par les deux lois de commandes. Ces modèles ont fait presque tous un même objet d'étude, et servent comme des modèles approximatifs de la marche humanoïde. Le pendule inversé, le double pendule et le pendule simple sont parmi les modèles les plus utilisés pour la génération de marches des robots humanoïdes. En effet, ils présentent plusieurs avantages d'utilisation et d'implémentation notamment leurs caractéristiques simples aidant à la compréhension et la mise en œuvre, la rapidité des calculs à effectuer et donc la capacité à être utilisé en temps réel.

Dans le cadre de notre étude, cette modélisation a été établit par l'intermédiaire des équations de Lagrange, qui fournissent l'équation de la dynamique du système par une relation liant les accélérations articulaires aux couples nécessaires pour contrôler la structure.

Les lois de commande proposées été la commande PID et la commande par la dynamique du robot, où on fait tendre l'erreur entre les trajectoires générées par le modèle et les trajectoires désirées vers zéro, ceci montre l'importance d'avoir une modélisation précise des allures des trajectoires de référence.

En réalité, les robots sont dotés des capteurs très sensibles émettant les positions angulaires des jonctions, en plus des capteurs des vitesses articulaires. Ces derniers peuvent émettre des bruits différents, et donc on a tendance à générer des modèles de vitesse numériquement à partir des données de la position articulaire.

Le modèle et les commandes établit ne sont pas soumis à des hypothèses liées à un seul mode de locomotion et non plus un modèle spécifique des robots bipède, en effet, le travail mené engendre la globalité de la locomotion bipède d'un point de vue général du mouvement, et sa réalisation peut être effectuer par la variation par des paramètres de masse et des longueurs de la structure rigide du robot.

Le thème traitant la conception et la modélisation du mouvement humanoïde bipède est un des vastes domaines de la robotique. Effectivement, plusieurs aspects font partie de cette démarche, et plusieurs modèles peuvent être considérés. Chaque modèle choisi peut approximer où simplifier une partie de cette étude. Mais si on voulait réaliser cette structure on aurait besoin d'un modèle plus précis et fidèle, comprenant les différentes forces agissant sur le système, des modèles d'articulations plus identiques à celles de l'homme, des modes de marche plus complexes, variés et sur des terrains multiples...etc. Cela vient aux pris de la complexité des calculs et l'augmentation des temps d'exécution. Et donc les modèles approximatifs restent encore très efficaces et rapides pour la simulation de la locomotion bipède.

Perspectives

Cette étude porte des horizons de recherches et de réalisations divers en termes de fidélité et précision des modèles de simulation, et aussi en termes d'applications des lois de commandes sur les modèles en prenant en compte les non-linéarités complexes qu'on rencontre lors de l'augmentations du nombre des DDL de la structure.

En plus, il existe plus de modèles exprimant les forces réactives du sol et leur impact sur la dynamique du robot. Aussi, la modélisation des actionneurs liées aux jonctions peut contribuer à la précision du modèle global du robot.

Pareillement, l'augmentation du nombre des DDL de la structure permet un control plus adéquat de l'allure des trajectoires générer par la locomotion de la structure. Cela va engendrer l'utilisation des lois de commandes plus sophistiquées prenant en compte les non-linéarités de la dynamique du robot.

Et donc, plus on prend en considérations ces modèles, on peut aboutir à englober les facteurs environnementaux agissant sur le robot. Cela va nous guider à réaliser une structure fidèle imitant précisément la locomotion humanoïde bipède.

- [1] COIFFET, Philippe . robots IEEE/RSJ 1992. ICF. San diego.CA.USA.
- [2] STEINDLER, A., 1935. Mechanics of normal and pathological locomotion in man. Ch.C., Springfield.
- [3] Shafi,N., 2015. Development of an optimized omnidirectional walk engine for humanoid robots, PhD diss, university of Porto, Portugal.
- [4] Vandervael, F., 1966. Analyse des mouvements du corps humain, Liège 5ème édition. Edition Desoer.
- [5] Rigal,R., 1995. Motricité humaine : Fondements et applications pédagogique Tome 1 Neurophysiologie sensorimotrice , Québec, 2ème Edition, Presse de l'université de Québec .
- [6] Chantal, Leguay. Les Robots, 2005 p. 30, 31
- [7] Shimon Y. Nof, Handbook of Industrial Robotics, New York, John Wiley and Sons, 1999, 2e éd., 1378 p. (ISBN 978-0-471-17783-8, LCCN 98008017
- [8] BOUR Djilali and CHERIEF Makhoulf, 2016. Commande d'un robot mobile Khepera IV , université djilali BOUNAAMA, Khemis Miliana.
- [9] TAKHI, Hocine ,2014. Conception et réalisation d'un robot mobile à base d'arduino, Université Amar Telidji - Instrumentation .
- [10] Chaher BALI,2012. Réalisation d'un robot mobile avec évitement d'obstacle et trajectoire programmée. Mémoire Master. Mohamed Khider Biskra .
- [11] Shields, G. et Kovalsky, C. 2010. Raytheon unveils lighter, faster, stronger second generation exoskeleton robotic suit. Dans PR Newswire Association LLC, PR Newswire : Press Release Distribution, Targeting, Monitoring and Marketing.
- [12] Yang, S. 2004. UC Berkeley researchers developing robotic exoskeleton that can enhance human strength and endurance. Dans University of California–Berkeley media Relation, UC BerkeleyNews.
- [13] Ekso Bionics 2012. Ekso Bionics' Suit August 2012 Upgrade. Dans Ekso Bionics, Youtube.En ligne. <https://www.youtube.com/watch?v=pzRmNYA8LIY>
- [14] ISO 13482 (2012). Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Non- Industrial Robots – Non-Medical Personal Care Robot, 1re édition. International Organization for Standardization, 88 p.
- [15] GOSSELIN, Frédéric (2018). Conception d'un système de contrôle par impédance pour un exosquelette thérapeutique, Sherbrooke (Québec) Canada.
- [16] Buerger, S. P. et Hogan, N. (2005). Relaxing passivity for human-robot interaction.Dans Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. p. 4570–4575.

- [17] Lockheed Martin Corporation (2012). HULC® Exoskeletons Enhance Mobility and Increase Endurance. Dans Lockheed Martin Corporation, Lockheed Martin.
- [18] Yang, S. (2004). UC Berkeley researchers developing robotic exoskeleton that can enhance human strength and endurance. Dans University of California–Berkeley Media Relation, UC Berkeley News. <http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2004/03/03-exo.shtml>
- [19] Shields, G. et Kovalsky, C. (2010). Raytheon unveils lighter, faster, stronger second-generation exoskeleton robotic suit. Dans PR Newswire Association LLC, PR Newswire: Press Release Distribution, Targeting, Monitoring and Marketing. <http://multivu.prnewswire.com/mnr/raytheon/46273>
- [20] Ekso Bionics (2017). Patient Stories. Ekso Bionics. <http://eksobionics.com/eksohealth/patients>
- [21] Ekso Bionics (2017). Products. Ekso Bionics. <http://eksobionics.com/eksohealth/products/>
- [22] B-Temia Inc. (2017). Regain your autonomy. Dans B-Temia Inc., Keeogo™ restores and enhances autonomy in mobility. <http://www.keego.com/>
- [23] CYBERDYNE Inc. (2017). HAL® for Medical Use (Lower Limb Type). Dans CYBERDYNE Inc., Cyberdyne. <https://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb-medical.html>
- [24] CYBERDYNE Inc. (2017). HAL® for Living Support (Lower Limb Type). Dans CYBERDYNE Inc., Cyberdyne. <https://www.cyberdyne.jp/english/products/LowerLimb-nonmedical.html>
- [25] CYBERDYNE Inc. (2017). HAL® for Living Support (Single Joint Type). Dans CYBERDYNE Inc., Cyberdyne. <https://www.cyberdyne.jp/english/products/SingleJoint.html>
- [26] CYBERDYNE Inc. (2017). HAL® for Care Support (Lumbar). Dans CYBERDYNE Inc., Cyberdyne. <https://www.cyberdyne.jp/english/products/Lumbar-CareSupport.html>
- [27] Hayashi, T., Kawamoto, H. et Sankai, Y. (2005). Control method of robot suit HAL working as operator’s muscle using biological and dynamical information. Dans Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. p. 3063 – 3068.
- [28] Rex Bionics Ltd. (2017). Home use. Dans Rex Bionics Ltd., Rex Bionics. <http://www.rexbionics.com/rex-for-home-use/>
- [29] BEDARD, Sebastien, 2006. Modelisation et simulation dynamique d’un bipède plan à 9 DDL, Faculté des études supérieures, Université Laval, QUÉBEC.
- [30] BACHA, Souhila, 2010. Conception et développement d’un générateur de trajectoires pour des allures de marche dynamique stable en robotique humanoïde. Rapport de stage. Laboratoire d’Informatique de Robotique et de Microelectronics de Montpellier, Montpellier, FRANCE.
- [31] S. Kajita, F. Kanihero, K. Kaneko, and K. Wa. The 3d linear inverted pendulum mode : A simple modeling for a biped walking pattern generation. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS’01), pages 239–246, Hawaii, USA, 2001.
- [32] S. Hong, Y. Oh, Y. Chang, and B. You. An omni-directional walking pattern generation method for humanoid robots with quartic polynomials. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS’07), pages 4207–4213, San Diego, USA, 2007.
- [33] Z. Tang and M. Er. Humanoid 3d gait generation based on inverted pendulum model. In IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC’07), pages 339–344, Singapore, 2007.
- [34] J. Ferreira, M. Crisostomo, A. Coimbra, and K. Kaneko. ZMP trajectory reference for the sagittal plane control of a biped robot based on a human CoP and gait. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS’09), pages 1588–1593, St. Louis, USA, 2009.
- [35] A. Albert and W. Gerth. Analytic path planning algorithms for bipedal robots without a trunk. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 36 :109–127, 2003.

- [36] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike. Real time motion generation and control for biped robot-1st report : Walking gait pattern generation. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'09), pages 1084–1091, St. Louis, USA, 2009.
- [37] M. Zhao, J. Zhang, Y. Liu, H. Dong, L. Li, and X. Su. Humanoid robot gait generation based on limit cycle stability. In Proceeding of the RoboCup Symposium 2008, pages 403–413, Singapore, 2008.
- [38] R. Katoh and M. Mori. Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory. Bulletin of American Mathematical Society, 20(4) :405–414, 1984.
- [39] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue, and A. Takanishi. Development of a bipedal humanoid robot – control method of whole body cooperative dynamic biped walking. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'1999), pages 368–374, Detroit, Michigan, 1999.
- [40] M. H. P. Dekker, “ZERO-MOMENT POINT METHOD FOR STABLE BIPED WALKING,” p. 62, Jul. 2009.
- [41] FORTIN, Jonathan, 2020. Contrôle de la marche du robot bipède NAO utilisant le mode glissant avec retard pour l'estimation de la position. ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, QUÉBEC, CANADA.
- [42] Christophe DOIGNON.” Robotique et Recalage 3D”, Université de Strasbourg, France.
- [43] Nikolaos Kofinas. “Forward And Inverse Kinematics For The NAO Humanoid Robot”, Technical University Of Crete, Greece. Chania, July 2012.
- [44] ZHENG, Y. F.,HEMAMI, H (1985) Mathematical Modeling Of Robot Collision With Its Environment , Journal Of Robotics Systems, Vol.2, N°3.
- [45] TZAFESTAS, S. G., KRIKOKHORITIS, A. E. (1998) Robust Adaptative Gait Control Of 9-link Biped Robot, Journal Of Intelligent And Robotic Systems, Vol.31, N°4.
- [46] CAUX, S. (Septembre 1997) Modelisation Et Commande De La Marche Des Robots Bipèdes, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II Sciences Et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- [47] ABBAS Ehsaniseresht,MOGHADDAM Majid Mohammadi, 2015. A new ground contact model for the simulation of bipeds’ walking, running and jumping.RSI International Conference on Robotics and Mechatronics October 7-9, 2015, Tehran, Iran
- [48] Ali Hamlili. Contribution à la modélisation dynamique des systèmes articulés. Bases mathématiques et outils informatiques. Modélisation et simulation. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1993. Français. tel-00523121
- [49] Juan Carlos Arevalo, Daniel Sanz-Merodio, Manuel Cestari and Elena Garcia. Parameterized Inverted and Double Pendulum Model for Controlling Lower-limb Active Orthosis. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. December 11-14, 2012, Guangzhou, China
- [50] Sahab Omran. Génération de trajectoires de marche de robots humanoïdes établies sur les modèles pendulaires bio-inspirés de l’humain. Automatique / Robotique. Université de Nantes, 2013. Français. tel-01538626
- [51] Abdul Haq, Yannick Aoustin, Christine Chevallereau. Effects of Knee Locking and Passive Joint Stiffness on Energy Consumption of a Seven-Link Planar Biped. 2012. hal-00668808
- [52] Wisama Khalil. Modeling and Control of Manipulators - Part II: Dynamics and Control. Doctoral. GdR Robotics Winter School: Robotica Principia, Centre de recherche Inria Sophia Antipolis – Méditerranée, France. 2019. cel-02130022
- [53] Nathanaël Jarrassé Contributions à l’exploitation d’exosquelettes actifs pour la rééducation neuro-motrice ISIR - Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique 96164 - Université Pierre et Marie Curie - Paris 2010.