

DEA Imagerie, Vision et Robotique

Simulation d'un robot marcheur et génération de démarches paramétrées

INRIA Rhône-Alpes
Projet BIP

Responsables:

Bernard Espiau, Christine Azevedo, Hervé Mathieu

Fabien Lydoire

2000 - 2001

Table des matières

Remerciements	1
1 Introduction	2
1.1 Les robots à pattes	2
1.1.1 Pourquoi un robot à pattes ?	2
1.1.2 Les robots bipèdes	3
1.1.3 La locomotion bipède	3
1.1.4 Les types de marche	6
1.1.5 Les lois de commandes	6
1.2 Quelques robots bipèdes actuels	7
1.3 Le robot bipède BIP	8
1.3.1 Mouvements	9
1.3.2 Actionneurs et transmissions	10
1.3.3 Capteurs	11
1.4 Outils de développement	11
1.4.1 Simulateur	11
1.4.2 Contrôleur	12
1.5 Problématique	12
1.5.1 Historique	13
1.5.2 Problème traité	13
2 Génération de démarches paramétrées	14
2.1 Présentation	14
2.2 Le simulateur du robot BIP	14
2.2.1 La génération de postures	16
2.2.2 Génération de mouvement par interpolation polynômiale	17
2.3 Méthode de génération de mouvement proposée	17
2.3.1 Posture initiale	17
2.3.2 Phase de simple support	17
2.3.3 Phase de double support	20
2.4 Résultats obtenus	21
3 Conclusion & Perspectives	28
A Liens Internet	29
B Paramètres de la fonction fsqp sous scilab	30
Bibliographie	31

Table des figures

1.1	Robot à roues et robot bipède face à un trou dans le sol	2
1.2	Robot à pattes dans l'incapacité de poursuivre son chemin	3
1.3	Robot Honda en situation par rapport aux objets de la maison	3
1.4	Le polygone de sustentation en simple et double support	4
1.5	Marche en compas, [9]	4
1.6	Phases d'un cycle de marche, [9]	5
1.7	Les plans du corps humain	5
1.8	Le compas de McGeer, [6]	6
1.9	Quelques robots bipèdes	7
1.10	Le robot bipède BIP et ses degrés de liberté	8
1.11	Mouvements du robot dans le plan sagittal	9
1.12	Mouvements du robot dans le plan horizontal	9
1.13	Mouvements du robot dans le plan frontal	10
1.14	Système de transmission du genou	11
1.15	Robots parallèles de la cheville	11
1.16	Premiers mouvements de type postural réalisés avec la version 15 articulations ac- tives du robot	13
2.1	L'espace de sortie	15
2.2	Posture initiale pour un pas de longueur 30 centimètres et de hauteur 5 centimètres	18
2.3	Description de la parabole de marche	18
2.4	Points caractéristiques du robot BIP (tags)	20
2.5	l'évolution entre les différentes postures de la différence d'altitude entre les tags 11 et 12 (extérieur et intérieur avant du pied gauche)	22
2.6	Trajectoire suivie par la cheville de vol pour un pas de longueur 30 centimètres et de hauteur 5 centimètres	23
2.7	Trajectoire suivie par la projection du CDM pendant un pas (voir détail 2.9) . . .	23
2.8	Trajectoire de la projection du CDM en double support	24
2.9	Détail de la figure 2.7, phase de double support	24
2.10	Différentes démarches obtenues (longueur 30cm, hauteur 5cm / longueur 15cm, hauteur 5cm / longueur 70cm, hauteur 10cm)	25
2.11	Cycle de marche du robot BIP	26
2.12	Courbes représentant la trajectoire des chevilles de vol pour des pas de longueur 15 centimètres et de hauteur 5 centimètres puis de longueur 70 centimètres et de hauteur 10 centimètres	27

Liste des tableaux

1.1	Numérotation des articulations et notation des positions articulaires associées . . .	10
B.1	Paramètres de la fonction <code>fsqp</code> de <code>scilab</code>	30
B.2	Composantes du vecteur <i>ipar</i> paramètre de <code>fsqp</code>	30
B.3	Composantes du vecteur <i>rpar</i> paramètre de <code>fsqp</code>	30

Remerciements

Je tiens à remercier mes responsables de stage et plus particulièrement Christine Azevedo pour tout le temps et l'attention qu'elle a bien voulu me consacrer. Je remercie aussi Pierre-Brice Wieber qui s'est penché sur mon travail et y a posé un regard critique et très constructif.

Je souhaite aussi remercier mes camarades stagiaires chez BIP pour la bonne ambiance et la camaraderie qui ont régné au sein de cette équipe.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les robots à pattes

1.1.1 Pourquoi un robot à pattes ?

- Pourquoi construire des robots à pattes, alors que la majorité de nos véhicules terrestres sont sur roues (bicyclette, automobile, train, ...) ou à chenilles ?
- Parce que les robots à pattes ont une plus grande capacité à s'adapter à un environnement varié.

En effet, là où un véhicule à roues a besoin de la continuité du sol, un robot à pattes peut enjamber les éventuels *trous* dans le sol (figure 1.1) [11]. Un véhicule disposant de plusieurs roues

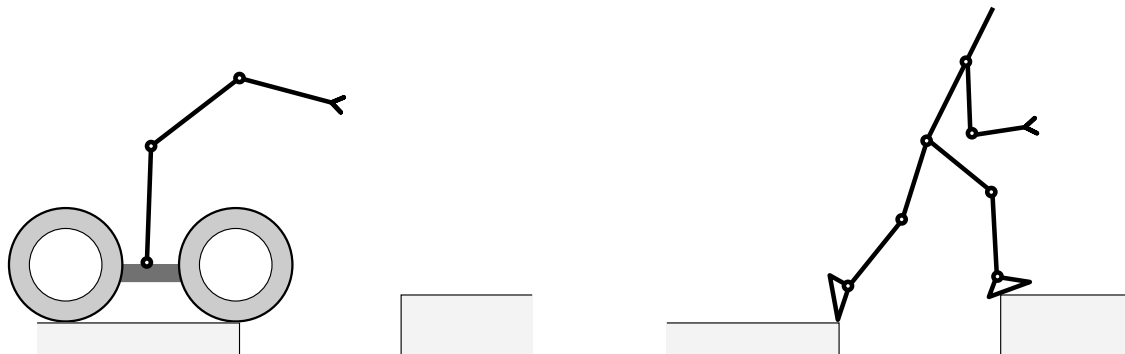


FIG. 1.1 – Robot à roues et robot bipède face à un trou dans le sol

ou de chenilles pourrait franchir ce type d'obstacles mais se pose alors le problème des obstacles de type *pierre*. Un robot à pattes peut exploiter le temps de vol de ses pattes pour franchir un tel obstacle, sans même le toucher [11].

Cependant, les robots à pattes impliquent une mécanique plus complexe et de nouvelles difficultés dans la commande, comme les problèmes de collisions entre les pattes et surtout la gestion de l'équilibre, les pattes n'étant pas en contact permanent avec le sol.

Malgré tout, un robot qu'il soit muni de roues, de chenilles ou de plus de deux pattes se montrera, de part sa longueur, incapable de franchir un couloir étroit tournant à angle droit (figure 1.2).

Améliorer, pour un robot, les capacités de surveillance, maintenance, secours en milieu hostile et/ou accidenté, c'est améliorer sa capacité de déplacement dans un environnement le plus souvent

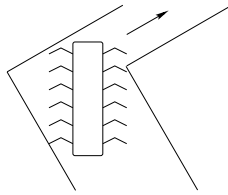


FIG. 1.2 – Robot à pattes dans l'incapacité de poursuivre son chemin

conçu par et pour l'homme. S'impose alors le concept du robot bipède.

1.1.2 Les robots bipèdes

L'homme modèle son environnement à sa convenance, c'est à dire pour un bipède humain. Les difficultés à se déplacer en chaise roulante au sein des infrastructures urbaines pour une personne handicapée en sont hélas une parfaite illustration. L'accès aux bâtiments en chaise roulante nécessite de nombreux aménagements.

Un robot bipède se déplacerait donc sans modification particulière des infrastructures. Il pourrait se mouvoir dans un appartement, accéder à tous les objets à hauteur d'homme (verre, chaise table, four, . . .), faire office d'assistant ménager à domicile. Les recherches au Japon sont d'ailleurs très actives puisque la population est vieillissante et qu'il n'existe pas de maisons de retraite. On peut voir figure 1.3 la dimension du robot Honda appelé Asimo par rapport aux objets qu'il aurait à manipuler lors de différentes tâches domestiques.

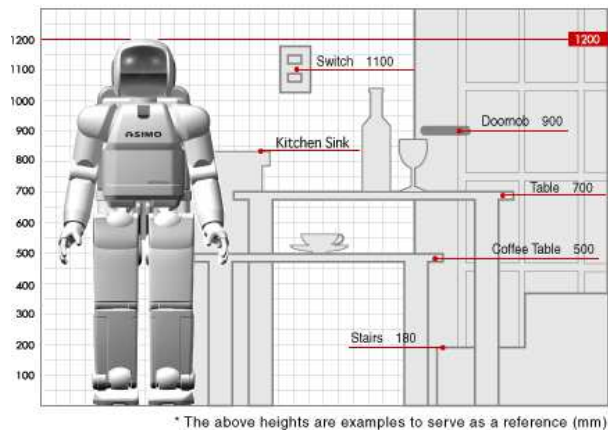


FIG. 1.3 – Robot Honda en situation par rapport aux objets de la maison

L'intérêt pour la bipédie artificielle est renforcé par les besoins de la biomécanique dans le cadre de la conception de prothèses, d'exosquellettes ou bien de la stimulation électrique fonctionnelle [4].

On peut ajouter que l'aspect humanoïde d'un robot assure un important impact psychologique, profitable notamment dans un but commercial (robot Honda).

1.1.3 La locomotion bipède

Tout d'abord quelques définitions de notions qui seront utilisées par la suite :

- le centre de masse (CDM) ou centre de gravité est le barycentre des éléments de volume pondérés par leur masse volumique

- le centre de pression (CDP) est le point où s'applique la résultante des forces de réaction au sol
- le « Zero Moment Point » (ZMP) est le point où le moment dynamique des forces normales d'appui est nul
- le polygone de sustentation est l'enveloppe convexe des points d'appuis au sol (figure 1.4)

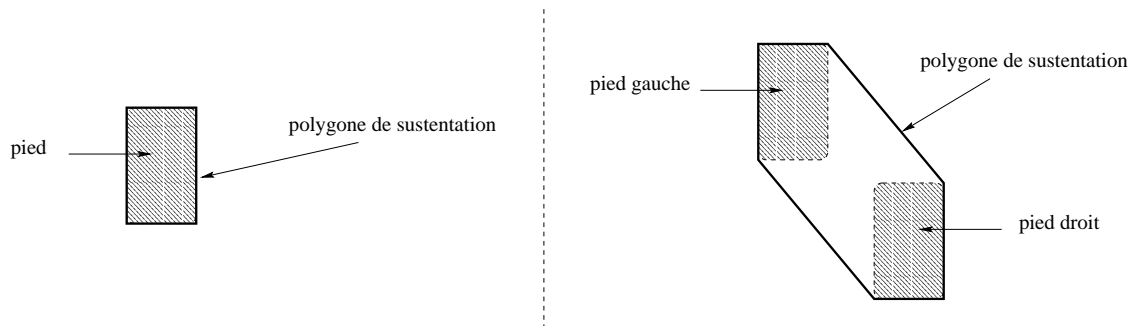


FIG. 1.4 – Le polygone de sustentation en simple et double support

La position du CDM est un critère important dans la locomotion bipède. Elle permet de décrire le déplacement global du corps. Le mouvement du centre de masse dans la marche du compas par exemple (les jambes sont réduites à deux axes reliés en leur sommet, (figure 1.5), est ample et comprend des changements brusques de direction. L'ajout d'articulations (genou, cheville, hanche) permet de réduire la variation de la position du centre de masse et la brutalité des impacts avec le sol [1].

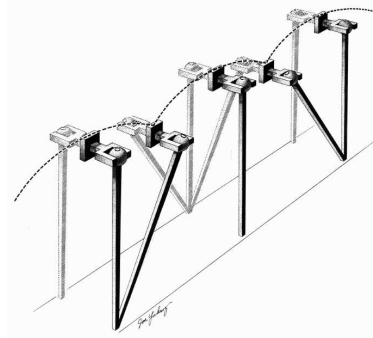


FIG. 1.5 – Marche en compas, [9]

La position du CDM joue aussi un rôle essentiel dans l'un des aspects les plus importants de la marche : l'équilibre. L'équilibre est réalisé lorsque la projection du CDM est située à l'intérieur du polygone de sustentation.

La marche est un phénomène cyclique (figure 1.6). Le corps est successivement supporté par une jambe puis l'autre. Pendant qu'une jambe supporte le corps, l'autre effectue un mouvement de balancier : c'est la phase de simple support. Lorsque la phase de balancement est terminée, le corps est supporté par les deux jambes : c'est la phase de double support.

Pour avoir des ordres de grandeur, introduisons des paramètres de la marche humaine. La locomotion met en jeu 29 degrés de liberté et 48 muscles par jambe. La vitesse moyenne de la marche est de 4 kilomètres par heure [3].

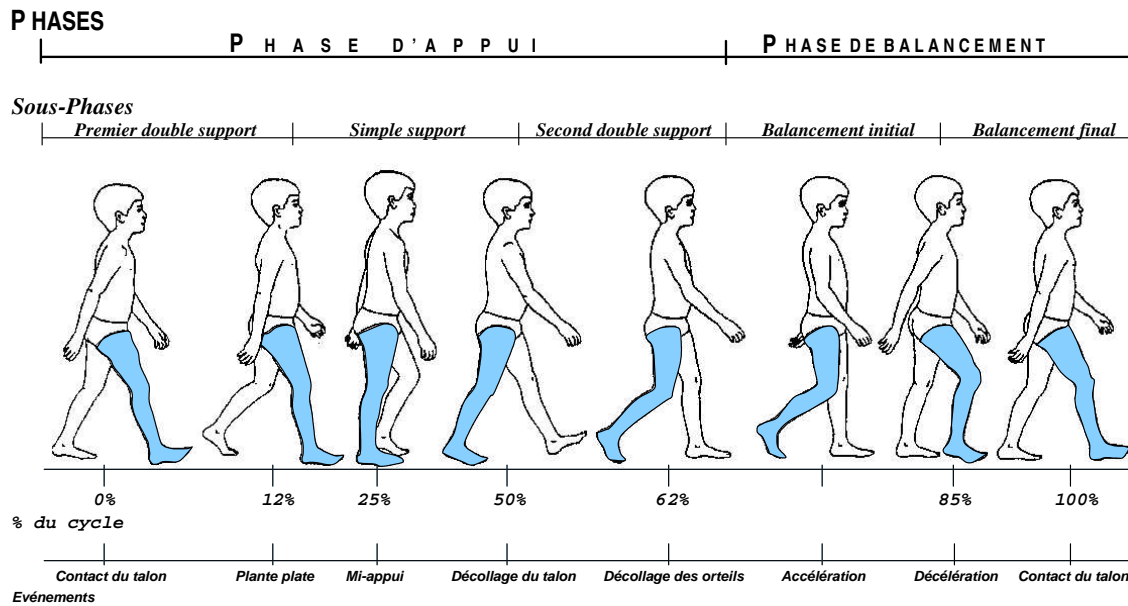


FIG. 1.6 – Phases d’un cycle de marche, [9]

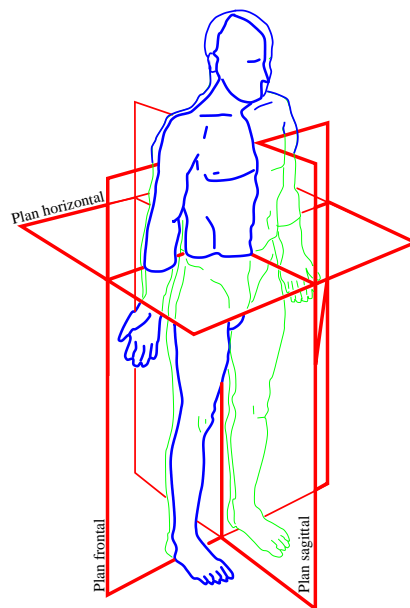


FIG. 1.7 – Les plans du corps humain

1.1.4 Les types de marche

On distingue deux types de marche : la marche statiquement stable et la marche dynamiquement stable. On peut se représenter la première comme un homme marchant lentement et de façon mal assurée (« sur des œufs »). L'homme marche statiquement en situation difficile (escaliers, terrain instable ...). La marche dynamique est la marche adoptée en situation « normale ».

Plus précisément, on parle de marche statique lorsque la projection du CDM sur le sol est située, à chaque instant, dans le polygone de sustentation.

La marche dynamique est une succession de déséquilibres en avant (le CDM sort du polygone de sustentation) rattrapés par la pose de la jambe de vol en avant (lorsque la jambe de vol est interrompue lors de son trajet, on trébuche et on tombe).

On peut noter que le centre de pression se superpose sur le centre de masse lors de la marche statique, ce qui n'est pas le cas dans la marche dynamique.

On distingue différents plans de projection dans l'étude de la marche (figure 1.7). Le sens de progression de la marche se fait dans le plan sagittal.

L'étude et la génération de la marche peuvent être simplifiées en se plaçant uniquement dans l'un de ces plans. Si les déplacements sont limités dans le plan sagittal, la recherche de stabilité se résume alors au positionnement de la projection du CDM sur un seul axe au lieu d'un polygone en deux dimensions.

1.1.5 Les lois de commandes

Différents principes sont utilisés pour commander les robots bipèdes.

Tout d'abord le plus simple. Le principe de la marche passive est le suivant : le robot n'est pas actionné et les oscillations de son mécanisme sous la seule action de la gravité et de conditions initiales particulières permettent de reproduire la marche sur un plan incliné. Le compas de McGeer constitué de deux segments reliés par une liaison (figure 1.8) est un exemple de mécanisme marchant passivement.

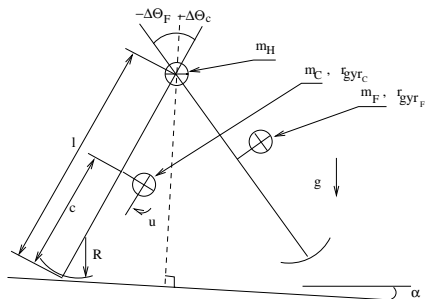


FIG. 1.8 – Le compas de McGeer, [6]

Abordons maintenant les autres principes de commande qui peuvent se classer en deux catégories selon que les trajectoires articulaires (positions des articulations au cours du temps) sont calculées en ligne (pendant le mouvement du robot) ou hors ligne (pré-calcul). L'avantage du hors ligne est que le temps de calcul importe peu. Il est donc permis d'effectuer des calculs plus complexes et donc plus coûteux en temps.

Dans le cas du calcul hors ligne, les trajectoires sont optimisées selon un ou plusieurs critères (énergétique, dynamique ...).

La contrainte commune aux lois de commande en marche statique est que le CDM doit rester dans le polygone de sustentation.

Dans le cas de la marche dynamique, les lois de commande consistent en général à conserver le ZMP dans le polygone de sustentation (principe introduit par Vukobratovic dans [10], mais toujours pas démontré)

Il existe aussi des approches de type robots « intelligents » qui consistent à calculer en ligne les trajectoires sur des techniques de type apprentissage, réseau de neurones, etc. . .

1.2 Quelques robots bipèdes actuels

Avant de présenter le robot bipède BIP, faisons un petit tour d'horizon de différentes réalisations dans le monde (figure 1.9).

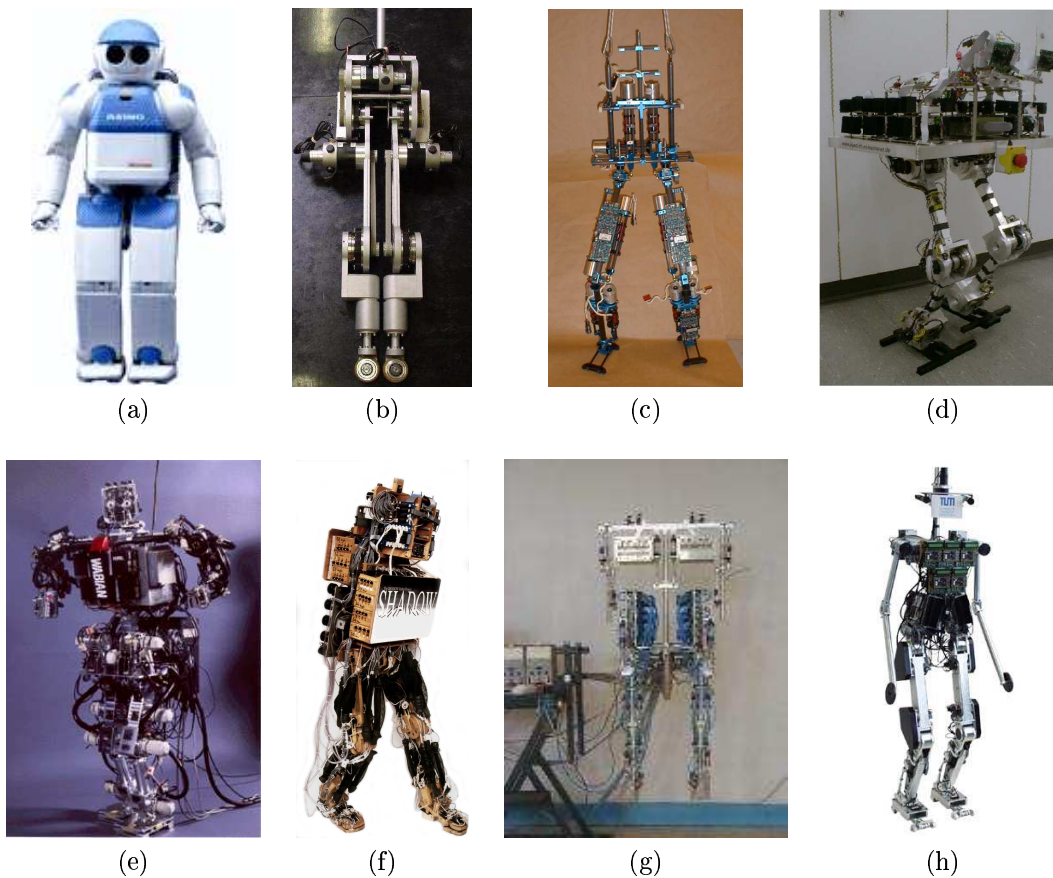


FIG. 1.9 – Quelques robots bipèdes

- (a) le plus connu, Asimo de la firme Honda. Successeur des modèles P2 et P3. Poids 43 kilogrammes, taille 1,20 mètres, 12 degrés de liberté pour la locomotion. Peut marcher dynamiquement et se déplacer jusqu'à 1.6 kilomètres par heure. Humanoïde.
- (b) le robot rabbit du LAG¹. Poids 40 kilogrammes, taille 1,43 mètres, 7 degrés de liberté. A été conçu pour courir dans un plan. Anthropomorphe.

¹Laboratoire d'Automatique de Grenoble

- (c) le robot M2 du Leg Laboratory du MIT. 12 degrés de liberté. Est conçu pour marcher dynamiquement à 1 mètre par secondes (3,6 kilomètres par heure). Anthropomorphe.
- (d) BART-UH (Bipedal Autonomous Robot - Universität Hannover). 6 ddl, marche statique et dynamique dans le plan. Non anthropomorphe.
- (e) le robot WABIAN (WAseda BIpedal humANoid) du Humanoid Robotics Institute de la Waseda University. Poids 127 kilogrammes, taille 1,83 mètres.
- (f) le Shadow robot au Royaume-Uni. Muscles pneumatiques.
- (g) BipMan, en France. Muscles Pneumatiques.
- (h) Johnnie, en Allemagne - The TUM Biped Walking Robot. Anthropomorphe.

1.3 Le robot bipède BIP

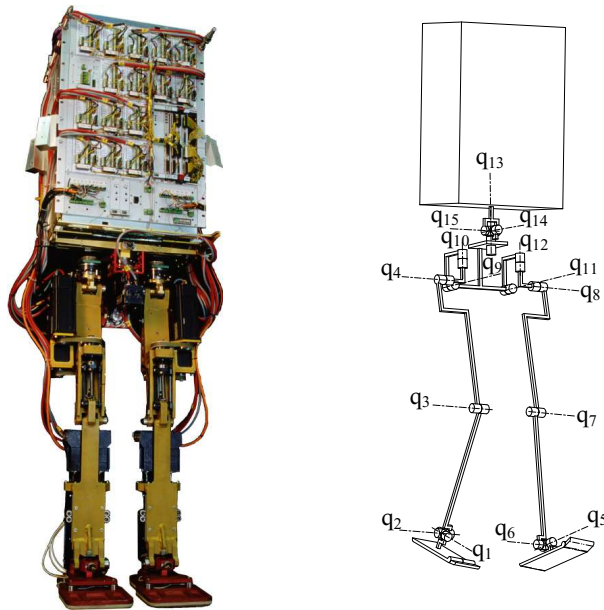


FIG. 1.10 – Le robot bipède BIP et ses degrés de liberté

Le robot a été conçu et dimensionné pour la marche dynamique en 3 dimensions et pour la montée et la descente d'escalier [2].

Il peut se déplacer dans le plan grâce à la rotation de ses chevilles, genoux et hanches qui permettent la flexion/extension dans le plan sagittal. Les changements de direction sont possibles par la rotation interne/externe des tronc, bassin et hanches. La rotation des chevilles, hanches et vertèbre lombaire permettent l'abduction/adduction dans le plan frontal et ainsi le maintien de l'équilibre latéral. Un degré de liberté supplémentaire entre le tronc et le bassin rend les systèmes de déplacement et d'équilibre indépendants.

BIP (figure 1.10) mesure 180 cm pour 105 kg. Les longueurs, masses, position des centres de

masse et moments d'inertie des segments sont proches de ceux de l'être humain (robot anthropomorphe).

1.3.1 Mouvements

On distingue trois types de mouvements, les mouvements dans le plan sagittal, les mouvements dans le plan vertical et les mouvements dans le plan frontal.

Mouvements sagittaux

Le robot peut se déplacer dans le plan grâce à la rotation de ses deux chevilles, deux genoux et deux hanches qui permettent la flexion/extension dans le plan sagittal (figure 1.11).

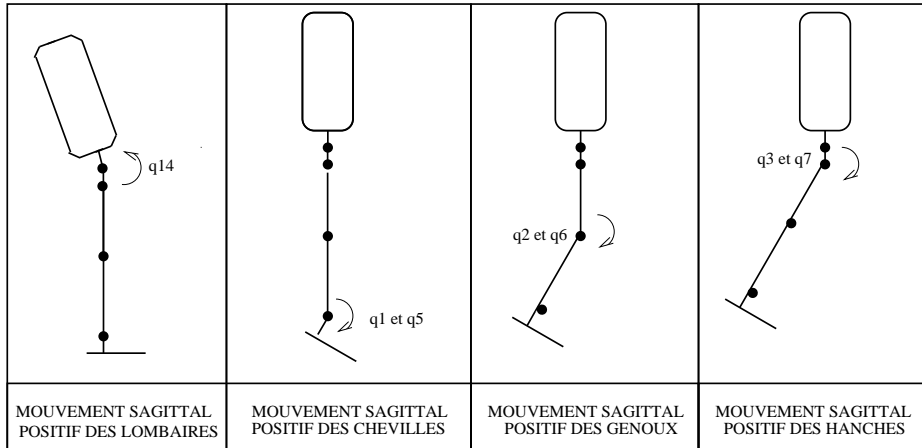


FIG. 1.11 – Mouvements du robot dans le plan sagittal

Mouvements verticaux

Au cours de la marche, les changements de direction sont possibles par la rotation interne/externe des tronc, bassin et hanches (figure 1.12).

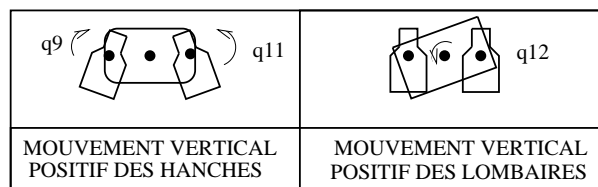


FIG. 1.12 – Mouvements du robot dans le plan horizontal

Mouvements frontaux

La rotation des chevilles, hanches et vertèbre lombaire permettent l'abduction/adduction dans le plan frontal et ainsi le maintien de l'équilibre latéral (figure 1.13). Un degré de liberté (ddl) supplémentaire entre le tronc et le bassin rend les systèmes de déplacement et d'équilibre indépendants.

Il y a un moteur par articulation, sauf dans le cas des chevilles et du tronc où les mouvements frontal/sagittal sont dus aux effets du mouvement combiné de deux moteurs montés en parallèle. Ces moteurs sont saturés en tension.

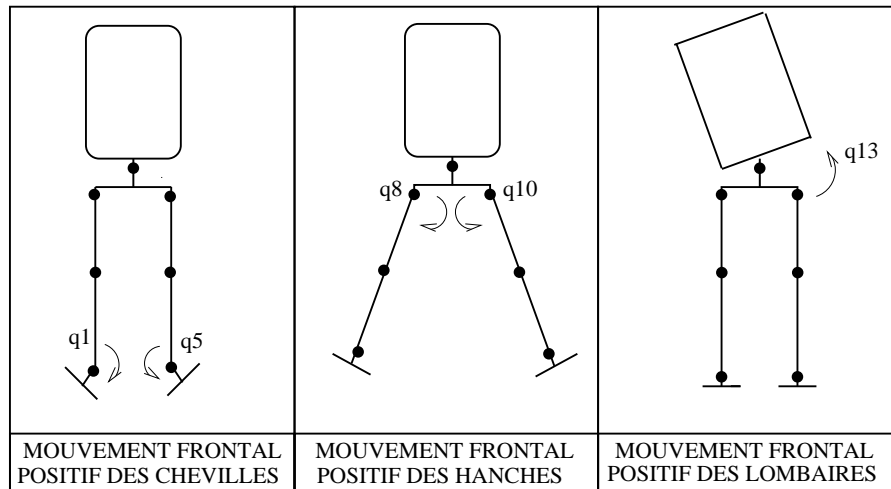


FIG. 1.13 – Mouvements du robot dans le plan frontal

	Articulation	Situation	Position
0	Cheville axe frontal	jambe droite	q[0]
1	Cheville axe sagittal	jambe droite	q[1]
2	Genou axe sagittal	jambe droite	q[2]
3	Hanche axe sagittal	jambe droite	q[3]
4	Cheville axe frontal	jambe gauche	q[4]
5	Cheville axe sagittal	jambe gauche	q[5]
6	Genou axe sagittal	jambe gauche	q[6]
7	Hanche axe sagittal	jambe gauche	q[7]
8	Hanche axe vertical	jambe droite	q[8]
9	Hanche axe frontal	jambe droite	q[9]
10	Hanche axe vertical	jambe gauche	q[10]
11	Hanche axe frontal	jambe gauche	q[11]
12	Tronc axe vertical	bassin	q[12]
13	Tronc axe frontal	lombaires	q[13]
14	Tronc axe sagittal	lombaires	q[14]

TAB. 1.1 – Numérotation des articulations et notation des positions articulaires associées

Le mouvement des moteurs est transformé en mouvement des articulations grâce aux systèmes de transmission.

Les mouvements des articulations sont limités d'un point de vue mécanique, au delà d'un certain débattement l'articulation amène les segments qu'elle relie en contact. Une sécurité électrique a été rajoutée pour arrêter le mouvement avant le choc.

1.3.2 Actionneurs et transmissions

Les actionneurs sont des moteurs à courant continu sans balais. Cinq articulations sont équipées de réducteurs *harmonic-drives* (rapport de réduction constant). Les autres transmissions sont des systèmes de vis-écrou à rouleaux satellites avec biellettes (figure 1.14). Le rapport de réduction de ces transmissions dépend de la position articulaire.

Les chevilles (figure 1.15) du robot et la liaison tronc/bassin sont constituées de deux en-



FIG. 1.14 – Système de transmission du genou

sembles moteur-transmission en parallèle. Ces ensembles bougent simultanément pour donner un mouvement sagittal ou/et frontal.

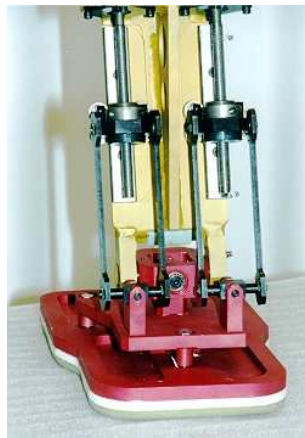


FIG. 1.15 – Robots parallèles de la cheville

1.3.3 Capteurs

Les codeurs des moteurs-variateurs fournissent la position angulaire relative des axes moteurs. Des potentiomètres placés à chaque articulation fournissent la position absolue des articulations. Trois capteurs d'effort placés sur chaque pied permettent de mesurer la composante verticale de la force de réaction du sol (force de pression), les deux composantes du moment de cette force dans le plan horizontal et la position du centre de pression.

1.4 Outils de développement

Plusieurs outils ont été développés et utilisés pour la simulation et la commande du robot BIP.

1.4.1 Simulateur

Modèle du robot

D'un point de vue mécanique, le robot en phase de locomotion est un système mécanique de corps rigides soumis à des contraintes unilatérales. Ces contraintes sont des inégalités qui tra-

duisent la non-interpénétrabilité des corps rigides en présence de frottements secs. Classiquement en robotique, l'équation de la dynamique du robot peut s'exprimer sous la forme Lagrangienne :

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = T(q) u + \Gamma_e \quad (1.1)$$

où :

- q est l'ensemble des positions articulaires,
- $M(q)$ est la matrice d'inertie,
- $C(q, \dot{q})$ est le vecteur de Coriolis et des forces centrifuges,
- $G(q)$ est le vecteur de gravité,
- $T(q) u$ est le vecteur des couples articulaires,
- Γ_e correspond aux efforts extérieurs.

Chaque terme de l'équation (1.1) a été calculé par un outil de génération automatique des dynamiques de Lagrange de robots arborescents flottants rigides avec référence variable : `ROBOTDYN` qui s'appuie sur les logiciels `SCILAB`² et `MAPLE`. Cet outil a été développé par F. Génot et modifié par P.B. Wieber [11]. Cet outil utilise la représentation de Khalil-Kleinfinger et génère automatiquement son modèle dynamique.

Génération de postures

Le simulateur permet de générer de manière intuitive des postures statiquement stables. Le simulateur inclue les contraintes de saturation des moteurs, les rapports de réduction variables et les limites articulaires. Nous développerons la technique de génération de postures ultérieurement.

1.4.2 Contrôleur

Plusieurs expérimentations ont été effectuées sur les prototypes. Un contrôleur a été développé et testé à cette occasion.

Drivers

Les drivers du robot ont été écrits. Il est possible de commander les moteurs directement par des consignes en tension.

Orccad

Pour programmer des missions robotiques on dispose du logiciel `ORCCAD`³ (**O**pen **R**obot **C**ontroller **C**omputer **A**ided **D**esign). Il s'agit d'un environnement logiciel qui permet de concevoir et de mettre en œuvre le contrôle et la commande d'un système robotique complexe. Il permet également de spécifier et valider des missions robotiques à réaliser par le système. Cet outil a été développé à l'*INRIA Rhône-Alpes* [8].

Plusieurs procédures ont déjà été implémentées et testées.

1.5 Problématique

Le projet Bip s'intéresse à l'étude de la marche bipède qu'elle soit humaine ou robotique. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté ici.

²<http://www-rocq.inria.fr/scilab>

³<http://www.inrialpes.fr/iramr/Orccad/orccad-fra.html>

1.5.1 Historique

Marche statique plane

Le premier prototype comportait 8 articulations actives. Un système mécanique permettait de le maintenir bloqué dans le plan sagittal. Ont été réalisées des expérimentations de suivi de trajectoire de marche statique.

Mouvements posturaux

Le second prototype (disponible actuellement) comporte 15 articulations actives. Ont été réalisées des expérimentations de suivi de trajectoire pour le robot en simple support (1.16).

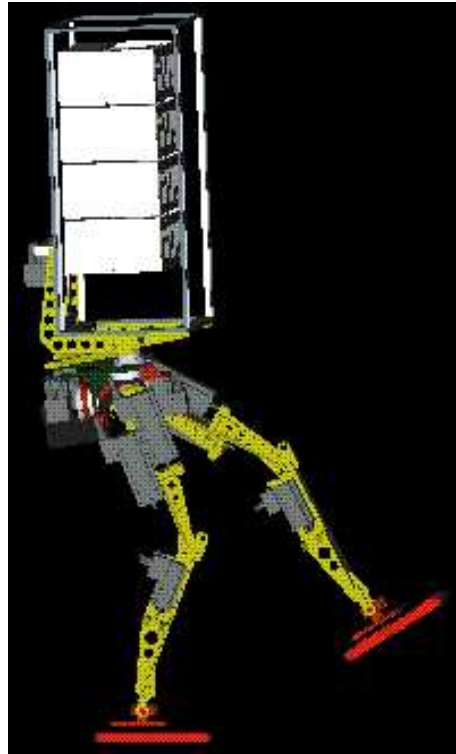


FIG. 1.16 – Premiers mouvements de type postural réalisés avec la version 15 articulations actives du robot

Les trajectoires pour ces deux applications étaient générées hors ligne à partir du simulateur de manière à garantir la stabilité statique. La commande utilisée (PD avec compensation de gravité et de frottements) permettait de suivre efficacement ces trajectoires.

1.5.2 Problème traité

Le problème traité dans le cadre de ce stage est la génération de démarches paramétrées pour le robot. La paramétrisation de ces démarches devant être la plus aisée possible. Cela implique une bonne maîtrise et compréhension du simulateur.

Chapitre 2

Génération de démarches paramétrées

2.1 Présentation

L'objectif du projet Bip est l'étude de la marche bipède humaine et robotique. Une façon de définir la marche est de décrire l'évolution des coordonnées articulaires au cours du temps. C'est la définition que nous utiliserons dans ce document.

Le but est de reproduire une marche fluide, s'inspirant de la marche humaine. Il est en effet possible d'effectuer des relevés biomécaniques sur un humain puis de faire correspondre les trajectoires obtenues sur un robot bipède par des similitudes (rotation, translation, homothéties). Cependant les démarches ainsi obtenues ne prennent pas en compte la dynamique du robot. Selon nous, la démarche humaine est bien trop complexe pour appliquer de telles trajectoires sur un robot bipède. La démarche humaine est néanmoins une source d'inspiration très riche à exploiter.

Une autre approche est de générer des démarches optimales selon un critère énergétique. En effet, dans des conditions normales, lorsque il n'est pas soumis à une contrainte de vitesse, l'homme adopte une démarche de confort qui minimise ses dépenses énergétiques. La génération de démarches optimales en énergie a un double intérêt. Le premier est que de cette façon, la démarche du robot (anthropomorphe) se rapproche de la démarche humaine. Le second est lié à l'autonomie énergétique souhaitée pour un robot mobile.

Nous nous appliquerons donc à générer ce type de trajectoires. Contrairement à d'autres approches (Roussel [7]) qui aboutissent à la génération de trajectoires par utilisation d'une commande optimale avec critère énergétique mettant en jeu la dynamique, nous ne nous intéresseront qu'à la partie géométrique de la démarche. La discrétisation de la démarche conduira à la génération d'une suite de postures que nous contraindrons à être suffisamment proches pour laisser le maximum de liberté (au niveau dynamique) à la commande chargée de suivre ces trajectoires.

2.2 Le simulateur du robot BIP

Avant de parler de la génération de trajectoires pour le robot BIP, nous présentons l'outil principal à la mise en œuvre de ces trajectoires.

Le simulateur du robot BIP écrit par P.B Wieber au cours de sa thèse de doctorat intègre le modèle du robot déjà présenté dans la section 1.4.1.

Afin de générer des trajectoires, il nous faut générer des postures et donc pouvoir aisément manipuler le robot. Pour cela, nous nous plaçons dans un espace de sortie où les 21 degrés de liberté du robot seront représentés de manière plus intuitive que dans l'espace articulaire. Nous pouvons

ensuite nous replacer dans l'espace des coordonnées articulaires par inversion de la fonction de sortie. Les composantes de la fonction de sortie sont (figure 2.1, les éléments symétriques cheville droite/cheville gauche n'apparaissent pas afin de ne pas alourdir la figure) :

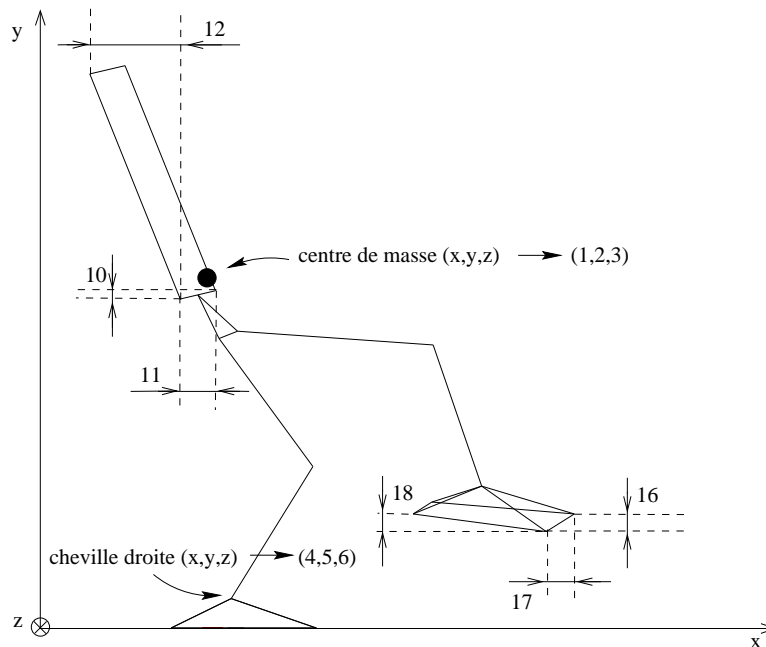


FIG. 2.1 – L'espace de sortie

1. la position du centre de masse selon l'axe x
2. la position du centre de masse selon l'axe y
3. la position du centre de masse selon l'axe z
4. la position de la cheville droite selon l'axe x
5. la position de la cheville droite selon l'axe y
6. la position de la cheville droite selon l'axe z
7. la position de la cheville gauche selon l'axe x
8. la position de la cheville gauche selon l'axe y
9. la position de la cheville gauche selon l'axe z
10. la différence en y entre l'angle en bas à gauche et l'angle en bas à droite du tronc
11. la différence en x entre l'angle en bas à gauche et l'angle en bas à droite du tronc
12. la différence en x entre l'angle en haut à droite et l'angle en bas à droite du tronc
13. la différence en y entre l'intérieur et l'extérieur avant du pied droit
14. la différence en x entre l'intérieur et l'extérieur avant du pied droit
15. la différence en y entre l'arrière intérieur et l'avant intérieur du pied droit
16. la différence en y entre l'intérieur et l'extérieur avant du pied gauche
17. la différence en x entre l'intérieur et l'extérieur avant du pied gauche
18. la différence en y entre l'arrière intérieur et l'avant intérieur du pied gauche
19. coordonnée articulaire q_{13}
20. coordonnée articulaire q_{14}
21. coordonnée articulaire q_{15}

On notera $sortie(q)$ la fonction permettant de passer dans l'espace de sortie, et $sortie_i(q)$ sa $i^{\text{ème}}$ composante. L'espace de sortie permet de manipuler facilement le robot. Il nous faut maintenant obtenir des postures optimales selon un critère énergétique.

2.2.1 La génération de postures

La version du simulateur qui était disponible comprenait un générateur de postures basé sur un algorithme d'optimisation (sqp) sous contraintes multicritères non linéaires (fsqp [5]). Cet algorithme permet de résoudre l'équation suivante :

$$\min \max_{i \in I^f} \{f_i(x)\} \text{ avec } x \in X$$

avec

$$I^f = \{1, \dots, \text{nb critères}\}$$

et X l'ensemble de points $x \in \mathbb{R}^n$ qui satisfont :

$$bl \leq x \leq bu$$

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, n_i$$

$$h_j(x) = 0, j = 1, \dots, n_e$$

avec

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

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

$$f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i = 1, \dots, n_f$$

$$g_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, j = 1 \dots n_i$$

$$h_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, j = 1 \dots n_e$$

Cet algorithme est utilisé dans le simulateur afin de générer des postures optimales en énergie. L'espace X est dans ce cas l'espace atteignable des coordonnées articulaires ($bl = q_{min}, bu = q_{max}$). L'unique critère choisi ($I^f = \{1\}$) est

$$f(q) = \frac{1}{2}u(q)^T u(q)$$

où $u(q)$ est le vecteur de dimension 15 des commandes en tension des moteurs. Ces tensions sont obtenues à partir des couples articulaires et des rapport de réduction des transmissions (les rapports de réduction sont variables et certaines articulations sont à structure parallèle). Les couples sont calculés à partir de la compensation de gravité et du modèle des contacts au sol.

$$u(q) = \Gamma(q) \times ratio(q)$$

$$\Gamma(q) = G(q) - \Gamma_e(q, \dot{q})$$

Les contraintes, non linéaires, portent sur les éléments de la fonction de sortie et sont des contraintes d'égalité ($n_i = 0$). On contraint plus ou moins le robot suivant les contraintes sur la posture que l'on souhaite générer ($n_e \in [1, 21]$) :

$$h_j(q) = sortie_k(q) - sortie_{désirée_k} \text{ avec } k \in [1, 21]$$

Dans le cadre de ce stage de DEA, nous proposons l'ajout de contraintes supplémentaires, afin de garantir la validité des tensions ($tension_{min} \leq u \leq tension_{max}$), ce qui s'écrit sous la forme ($n_i = 2 \times 15 = 30$) :

$$\begin{aligned} g_j &= \text{tension}_j(q) - \text{tension}_{max_j} && \text{pour } j = 1, \dots, 15 \\ g_j &= -\text{tension}_{j-15}(q) - \text{tension}_{min_{j-15}} && \text{pour } j = 16, \dots, 30 \end{aligned}$$

ou $tension_{<max/min>_j}$ sont les limites des tensions sur l'articulation j et $tension_j(q)$ est la tension sur le moteur j avec le robot dans la posture correspondant aux positions articulaires q .

2.2.2 Génération de mouvement par interpolation polynômiale

La méthode proposée avec le simulateur afin de générer des démarches était de générer des postures « clés » de la démarche puis de construire la démarche complète par interpolation polynômiale de degré 4 par morceaux. Cette technique a été utilisée pour générer des démarches pour le robot à 8 articulations actives et des postures pour le robot à 15 articulations actives. Cependant, elle présentait le désavantage de ne pas bien contrôler les trajectoires articulaires entre les positions « clés », ce qui motive la méthode présentée ci-dessous.

2.3 Méthode de génération de mouvement proposée

Nous proposons une méthode de génération de mouvement basée sur la génération d'une posture initiale optimale selon un critère énergétique, suivie d'une série de postures générées successivement à partir de la posture précédente et d'une optimisation d'un critère (énergie) sous contraintes (mouvement). Le travail présenté ci-après est le résultat de ce stage de DEA.

2.3.1 Posture initiale

La posture initiale correspond à la posture double support précédant le décollage du pied de vol.

Cette posture initiale doit donc respecter plusieurs contraintes :

- Les deux pieds doivent se trouver à plat sur le sol.
- Le futur pied de vol doit être placé à une distance derrière le pied d'appui correspondant à la demi-longueur de pas souhaitée afin de pouvoir réaliser une marche symétrique.
- La projection du CDM doit être placée sur la semelle du pied d'appui (celui qui ne sera pas le pied de vol) afin que le pied de vol puisse décoller immédiatement sans compromettre l'équilibre.

Pour générer cette posture (figure 2.2), nous nous plaçons dans l'espace de sortie. Nous contrainsons ensuite

- l'altitude des chevilles correspondant à un pied uniformément en contact avec le sol dans une posture horizontale
- la position relative des deux chevilles
- l'horizontalité des pieds
- la position du CDM selon les axes x et z

Cette posture sera générée selon la méthode présentée en 2.2.1. Nous laissons la liberté de paramétrer plus précisément la posture initiale (afin de générer ensuite une démarche particulière) dans la limite de la convergence de l'algorithme de génération de posture.

2.3.2 Phase de simple support

Cette phase doit permettre d'aboutir à partir de la posture initiale à une position du robot les deux pieds au sol avec la projection du CDM toujours placée sur le pied d'appui. La position des pieds à la fin de cette phase doit être la symétrique de la posture initiale.

Nous choisissons de contraindre le mouvement avec les contraintes suivantes :

- le pied de support ne doit pas bouger
- le pied de vol doit avancer en ligne droite
- le pied de vol doit parcourir une parabole en y (plan sagittal)
- le pied de vol doit rester horizontal
- la projection du CDM doit avancer

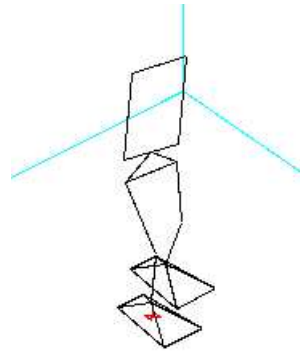


FIG. 2.2 – Posture initiale pour un pas de longueur 30 centimètres et de hauteur 5 centimètres

L'avancée du CDM doit être paramétrée de façon à ce qu'à la fin du pas, celui-ci se trouve toujours dans le polygone de sustentation. La parabole permet de paramétrer la longueur et la hauteur d'un pas (figure 2.3).

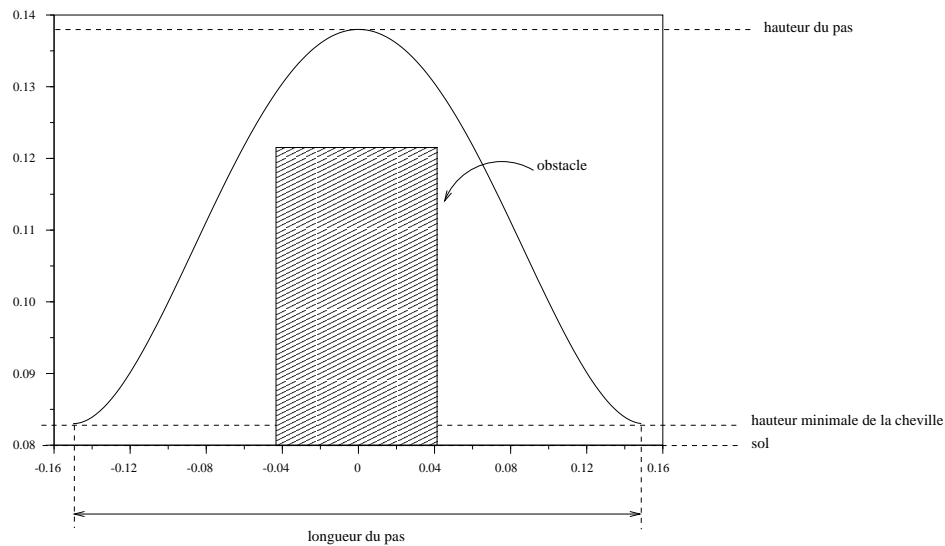


FIG. 2.3 – Description de la parabole de marche

Afin d'obtenir une succession de postures retraçant le mouvement décrit ci-dessus, on utilise la fonction d'optimisation sous contraintes **fsqp** déjà utilisée dans 2.2.1. Le critère choisi est le même que dans la génération de postures soit :

$$f(q) = \frac{1}{2}u(q)^T u(q)$$

où $u(q)$ est le vecteur des tensions nécessaires au maintien de la posture.

Les contraintes sont établies à partir des points caractéristiques (ou tags, figure 2.4) et des éléments de la fonction de sortie (position du centre de masse). Elles s'écrivent pour le simple support pied droit ($n_i = 0$) :

$$\begin{array}{ll}
g_j = \text{tag}(j, 2) & \text{pour } j = 1, \dots, 4 \\
g_j = \text{tag}(j - 4, 1) - \text{tagprec}(j - 4, 1) & \text{pour } j = 5, \dots, 8 \\
g_j = \text{tag}(j - 8, 3) - \text{tagprec}(j - 8, 3) & \text{pour } j = 9, \dots, 12 \\
g_j = \text{tag}(10, 3) - \text{tagprec}(10, 3) & \text{pour } j = 14 \\
g_j = \text{tag}(10, 1) - \text{tagprec}(10, 1) - \text{avance pied} & \text{pour } j = 15 \\
g_j = \text{tag}(10, 2) - p & \text{pour } j = 16 \\
g_j = \text{sortie}_{j-1}(q) & \text{pour } j = 17, \dots, 19 \\
g_j = \text{sortie}_1(q) - \text{sortie}_1(q_{\text{prec}}) - \text{avance cdm} & \text{pour } j = 20
\end{array}$$

où q est la posture courante, q_{prec} la posture précédente, $\text{tag}(tg, axe)$ est la coordonnée du tag tg selon l'axe axe , $\text{tagprec}(tg, axe)$ est la même coordonnée pour la posture q_{prec} , $\text{tagini}(tg, axe)$ est la même coordonnée pour la posture initiale.

p correspond à la parabole dont nous avons parlé précédemment :

$$p = a_0 + a_1 \times tg(10, 1) + a_2 \times tg(10, 1)^2 + a_3 \times tg(10, 1)^3 + a_4 \times tg(10, 1)^4 + \text{tagini}(10, 2)$$

Les coefficients de la parabole suivie par la cheville de vol sont :

$$xm = \text{tagini}(10, 1)$$

$$xM = xm + \text{longueur pas}$$

$$h = \text{hauteur pas}$$

$$a_0 = 16 \times \frac{xM^2 \times h \times xm^2}{xM^4 - 4 \times xM^3 \times xm + 6 \times xM^2 \times xm^2 - 4 \times xM \times xm^3 + xm^4}$$

$$a_1 = -32 \times \frac{xm \times h \times xM \times (xM + xm)}{(xM^3 - 3 \times xM^2 \times xm + 3 \times xM \times xm^2 - xm^3) \times (xM - xm)}$$

$$a_2 = 16 \times \frac{(xM^2 + 4 \times xM \times xm + xm^2) \times h}{(-2 \times xM \times xm + xM^2 + xm^2)^2}$$

$$a_3 = -32 \times \frac{(xM + xm) \times h}{(-2 \times xM \times xm + xM^2 + xm^2)^2}$$

$$a_4 = 16 \times \frac{h}{(-2 \times xM \times xm + xM^2 + xm^2)^2}$$

Les paramètres *longueur pas* et *hauteur pas* désirés pour la démarche sont donc directement la hauteur et la longueur de la parabole. Nous avons choisi de relier les paramètres *avance cdm* et *avance pied* en introduisant le paramètre $dCDMx$ qui représente la distance parcourue par le CDM selon l'axe x au cours d'un pas.

$$\text{avance cdm} = \frac{\text{avance pied}}{\text{longueur pas}} \times dCDMx$$

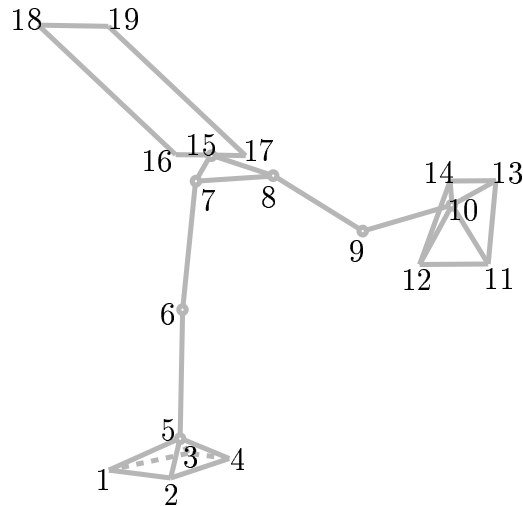


FIG. 2.4 – Points caractéristiques du robot BIP (tags)

Récapitulons

La méthode proposée génère une trajectoire de marche à partir des paramètres suivants :

- la longueur du pas, qui est la largeur de la parabole suivie par la cheville de vol
- la hauteur du pas, qui est la hauteur de la parabole suivie par la cheville de vol
- la distance parcourue dans le sens de la marche par le CDM
- la différence de distance selon l'axe x de la cheville de vol entre deux postures

D'un point de vue statique, l'équilibre est garanti par le positionnement pour chaque posture (chaque instant) du centre de masse à l'intérieur du polygone de sustentation. Dans le cas du simple support, le polygone de sustentation correspond à la semelle du pied d'appui. Il est donc nécessaire de choisir judicieusement le paramètre $dCDMx$. Le paramètre *avance pied* sera choisi suffisamment petit de façon à ce que la commande de suivi de trajectoire puisse gérer efficacement la dynamique du robot.

Notons que la seconde phase de simple support sera exactement la symétrique de la première, nous ne nous étendrons donc pas dessus.

2.3.3 Phase de double support

A la fin de la phase de double support, le robot doit être dans la position symétrique de la position initiale de la phase de simple support précédente. Rappelons que les pieds sont déjà positionnés correctement. Reste à déplacer le reste du corps, notamment la projection du CDM qui doit être transférée d'un pied à l'autre. Nous avons choisi de faire suivre à la projection du CDM une spline d'interpolation (2.8) discrète calculée par la fonction `smooth` de `scilab`.

Les contraintes sont donc :

- le pied droit ne doit pas bouger
- le pied gauche ne doit pas bouger
- la projection du CDM doit avancer selon la spline définie

Nous avons utilisé l'optimisation sous contraintes avec le même critère que précédemment, soit

$$f(q) = \frac{1}{2}u(q)^T u(q)$$

et les contraintes suivantes,

$$\begin{array}{ll}
 g_j = \text{tag}(j, 2) & \text{pour } j = 1, \dots, 4 \\
 g_j = \text{tag}(j - 4, 1) - \text{tagprec}(j - 4, 1) & \text{pour } j = 5, \dots, 8 \\
 g_j = \text{tag}(j - 8, 3) - \text{tagprec}(j - 8, 3) & \text{pour } j = 9, \dots, 12 \\
 g_j = \text{tag}(j - 2, 2) & \text{pour } j = 13, \dots, 16 \\
 g_j = \text{tag}(j - 6, 1) - \text{tagprec}(j - 6, 1) & \text{pour } j = 17, \dots, 20 \\
 g_j = \text{tag}(j - 10, 3) - \text{tagprec}(j - 10, 3) & \text{pour } j = 21, \dots, 25 \\
 g_j = \text{sortie}_1(q) - \text{spline}_x(k) & \text{pour } j = 26 \\
 g_j = \text{sortie}_3(q) - \text{spline}_y(k) & \text{pour } j = 27
 \end{array}$$

La différence de position entre deux postures de la projection du CDM est directement liée à la discrétisation de la spline : k correspond à l'indice dans la discrétisation de la spline, $\text{spline}_x(k)$ renvoie la $k^{\text{ième}}$ coordonnée selon l'axe x de la spline et $\text{spline}_y(k)$ renvoie la $k^{\text{ième}}$ coordonnée selon l'axe y . Le degré de discrétisation de la spline est donc le seul paramètre dans cette phase de double support.

Bien entendu, il est possible d'écrire sa propre spline d'interpolation afin d'avoir un meilleur contrôle de la trajectoire du CDM.

2.4 Résultats obtenus

Les contraintes citées dans la section précédente n'ont pas été appliquées littéralement dans la génération de démarches.

Remarquons, par exemple, qu'il suffit de bloquer l'altitude de 3 des 4 points caractéristiques du pied pour maintenir celui-ci au sol. Ce type de simplifications permet de réduire le nombre de contraintes à fournir à l'algorithme.

La complexité de l'appel à la fonction `fsqp`, nous a poussé à relâcher les contraintes afin d'atteindre la convergence de l'algorithme. Nous avons donc défini différents seuils correspondant à des mouvements que nous considérons négligeables. Ces seuils sont suffisamment petits pour être lissés par un post-traitement de la démarche. La figure 2.5 illustre nos propos. La variation maximale de l'orientation du pied est de l'ordre du dixième de millimètre, ce qui est acceptable pour un robot réel. Cependant, il sera préférable de lisser cette courbe pour la commande. La trajectoire de la cheville a quand à elle été bornée par deux paraboles (figure 2.6) La plupart des contraintes de type égalité ont ainsi été transformées en couples d'inégalités.

Nous indiquons que la technique lors de la phase de double support doit être améliorée. En effet, afin de converger vers la posture initiale imposée du second simple support, nous donnons à l'algorithme cette posture comme valeur initiale. La convergence rapide vers cette posture nous a amené à limiter l'amplitude du mouvement entre deux postures (limite sur la norme de la différence entre les postures). Il serait souhaitable d'affiner cette limitation de mouvement sur des paramètres plus caractéristiques (rotation du tronc, ...).

La figure 2.6 montre la trajectoire de la cheville de vol (avancée de la cheville selon l'axe x en abscisse, altitude en ordonnée) bornée par deux paraboles que nous avons choisi « proches ». Il est toujours possible de rapprocher les deux paraboles, afin de lisser la trajectoire, dans la limite de la convergence de `fsqp`.

Les figures 2.7 et 2.9 montrent la trajectoire de la projection du CDM sur le sol.

Malgré toutes ces limitations dues à l'implémentation, nous obtenons des démarches satisfaisantes (figure 2.11), paramétrable facilement (figures 2.6 et 2.12). Il est possible également

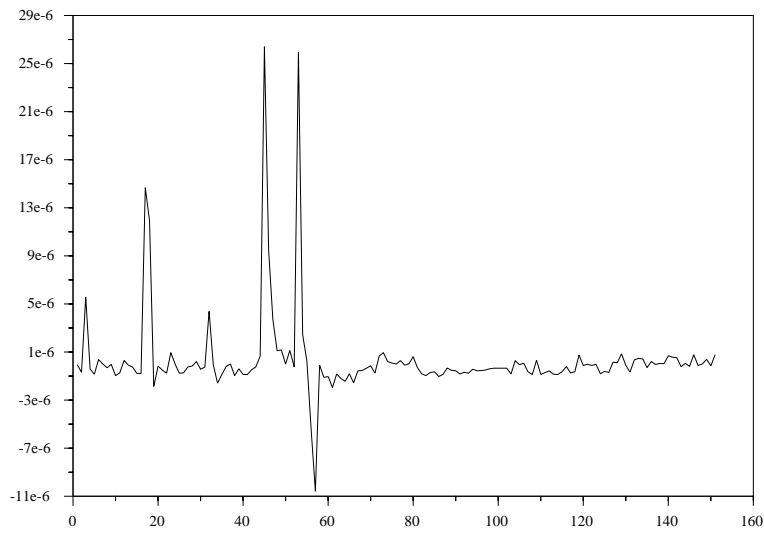


FIG. 2.5 – l'évolution entre les différentes postures de la différence d'altitude entre les tags 11 et 12 (extérieur et intérieur avant du pied gauche)

d'enchaîner facilement des pas différents. Par exemple des pas de longueurs différentes en introduisant un pas de transition sur la base d'une parabole de largeur adaptée qui permet à partir de la posture finale du pas précédent d'atteindre la posture initiale du pas suivant.

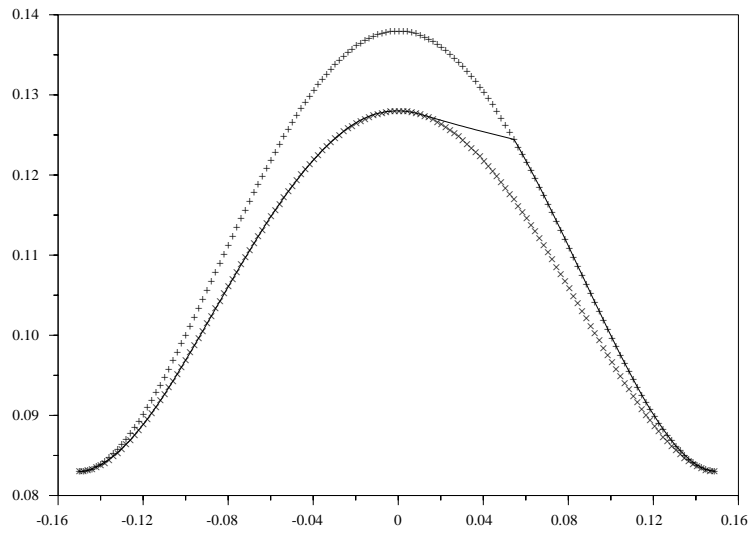


FIG. 2.6 – Trajectoire suivie par la cheville de vol pour un pas de longueur 30 centimètres et de hauteur 5 centimètres

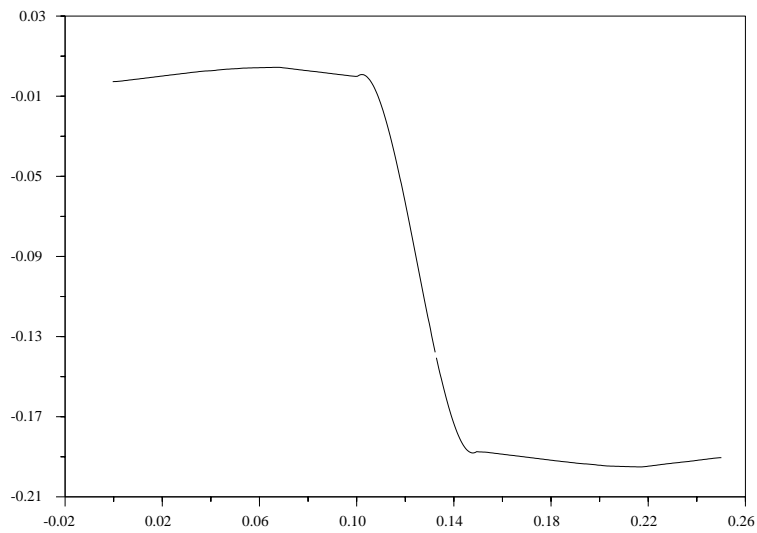


FIG. 2.7 – Trajectoire suivie par la projection du CDM pendant un pas (voir détail 2.9)

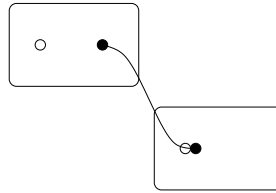


FIG. 2.8 – Trajectoire de la projection du CDM en double support

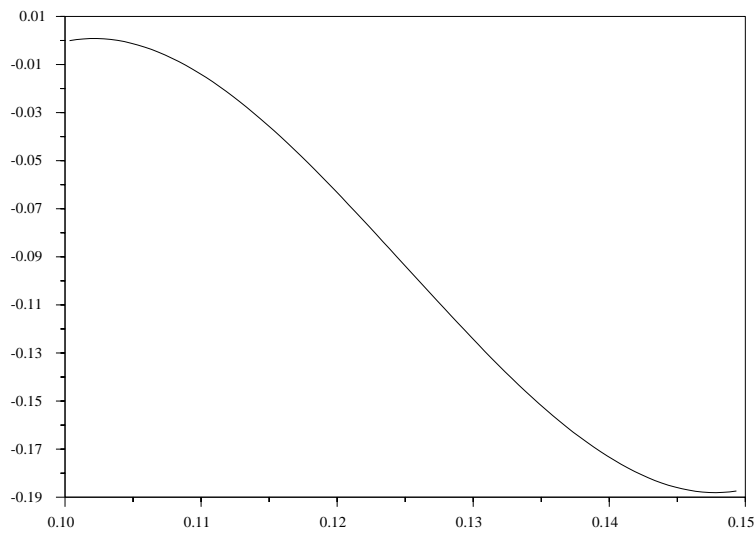


FIG. 2.9 – Détail de la figure 2.7, phase de double support

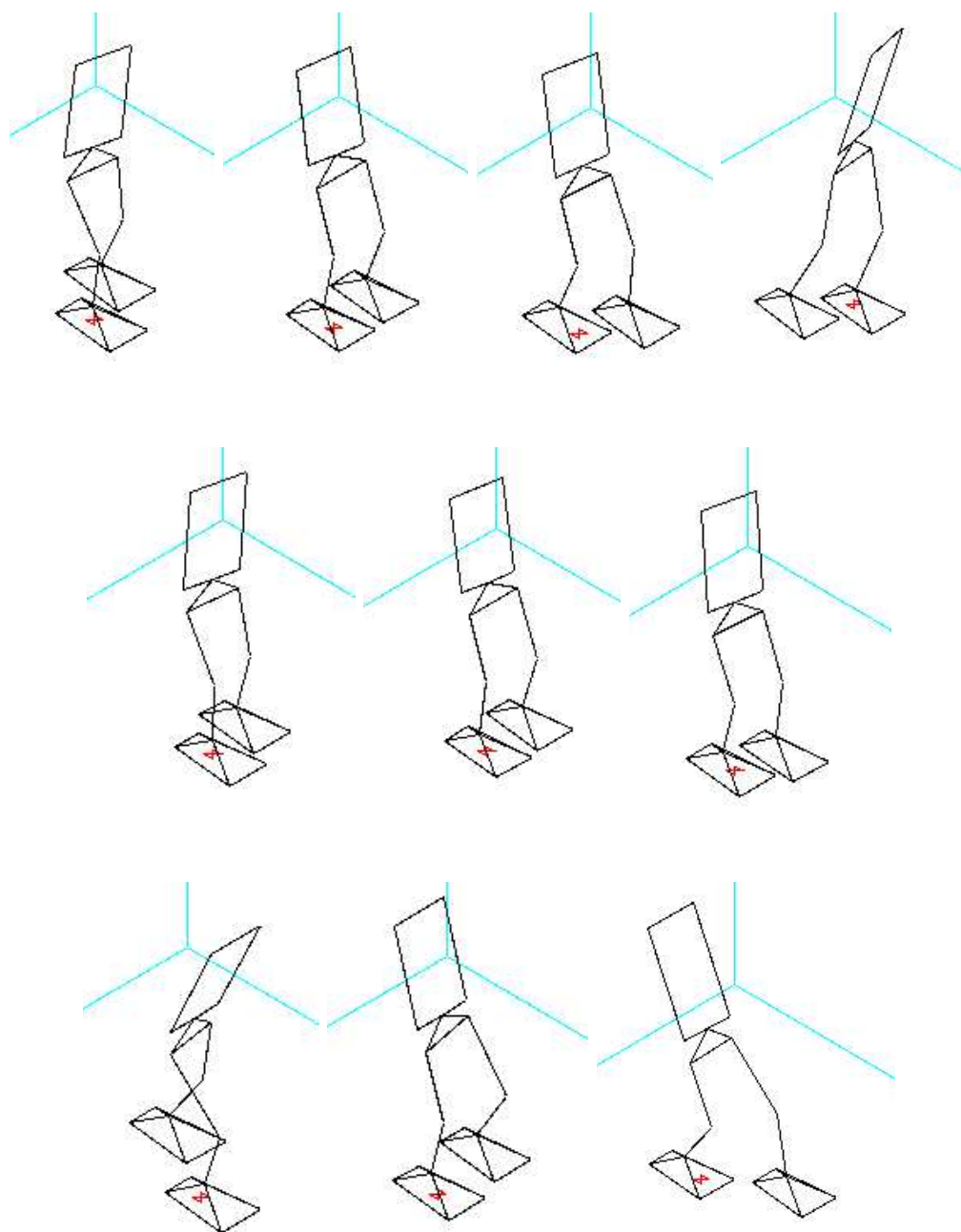


FIG. 2.10 – Différentes démarches obtenues (longueur 30cm, hauteur 5cm / longueur 15cm, hauteur 5cm / longueur 70cm, hauteur 10cm)

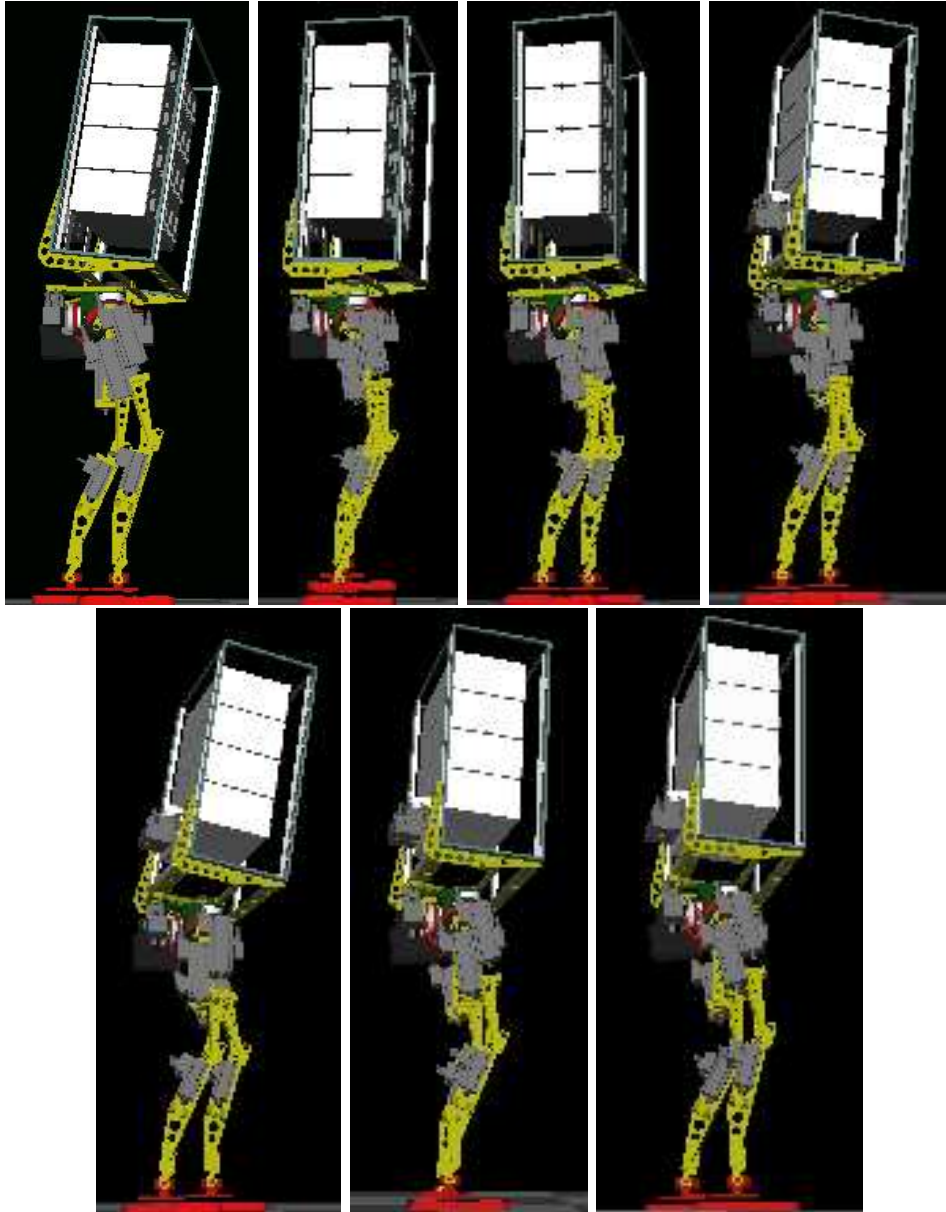


FIG. 2.11 – Cycle de marche du robot BIP

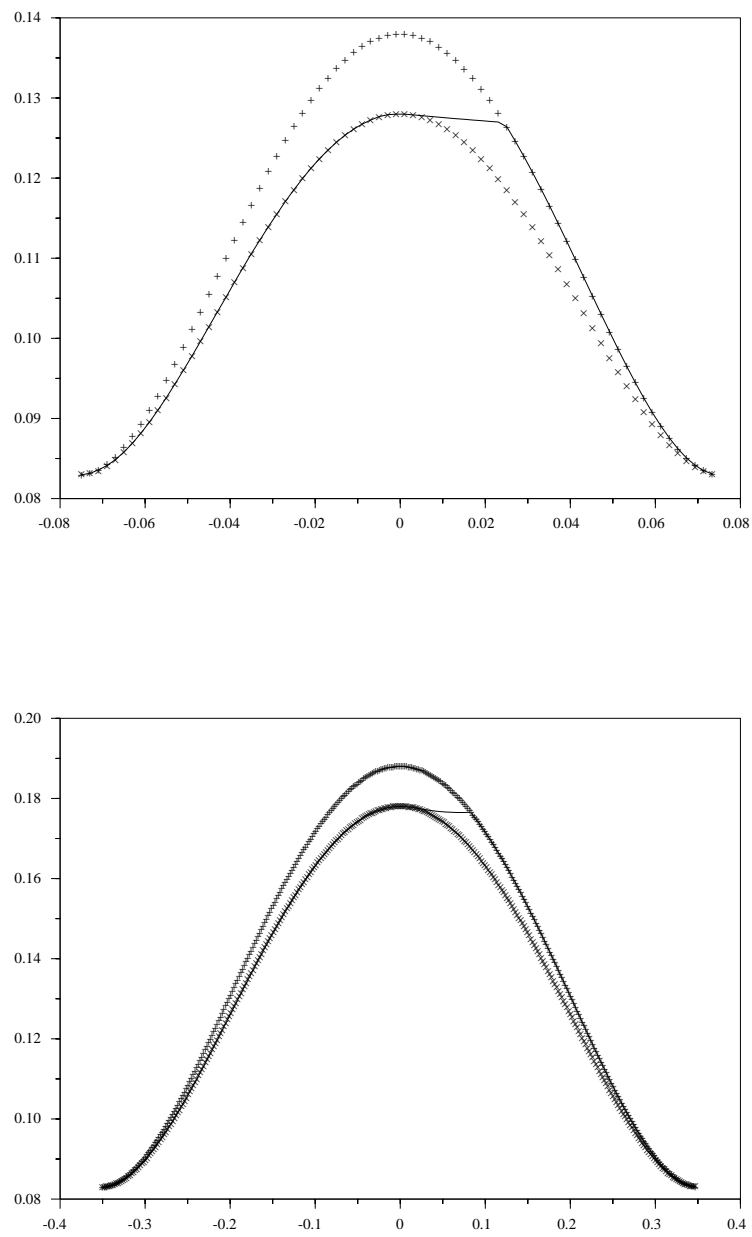


FIG. 2.12 – Courbes représentant la trajectoire des chevilles de vol pour des pas de longueur 15 centimètres et de hauteur 5 centimètres puis de longueur 70 centimètres et de hauteur 10 centimètres

Chapitre 3

Conclusion & Perspectives

Ce stage de DEA a abouti à la génération de démarches paramétrées pour le robot bipède BIP possédant 21 degrés de liberté. Notre méthode est axée uniquement sur l'aspect géométrique de ces démarches, l'aspect dynamique étant laissé à la commande chargée de suivre cette trajectoire. Cependant, un soin particulier a été apporté à la discrétisation du mouvement (limitation des déplacements entre deux postures consécutives) afin de laisser la maximum de liberté pour la gestion de la dynamique. Le parcours des trajectoires générées peut d'ailleurs être réalisé de façon non uniforme, afin d'avoir un contrôle fin sur les vitesses et accélérations.

Les paramètres de la démarche ainsi que les fonctions, décrivant les trajectoires de points particuliers du robot, liées à ces paramètres peuvent aisément être modifiés, afin d'obtenir de nouveaux types de démarches.

Notre méthode, par rapport à une interpolation polynômiale, permet donc une génération plus libre de démarches.

La complexité de la fonction `fsqp` utilisée pour appliquer l'algorithme d'optimisation sous contraintes nous a poussé à relâcher les contraintes sur le mouvement, dans des limites de mouvements que nous considérons comme négligeables. Afin d'obtenir des trajectoires plus lisses en vue de la commande de suivi de ces trajectoires, il serait souhaitable, à l'avenir, d'étudier de façon plus approfondie la fonction `fsqp`, de changer de fonction d'optimisation ou bien de lisser numériquement les trajectoires générées.

Un autre problème intéressant à traiter est celui des approximations numériques qui interviennent notamment lors des calculs des contacts avec le sol.

Cette étape réalisée, il sera alors possible de valider ces trajectoires sur le robot réel.

D'un point de vue personnel, j'ai trouvé la thématique de ce stage particulièrement enrichissante. J'ai été enthousiasmé par les nombreux aspects abordés, ce qui m'a amené, parfois, à me disperser dans mon travail.

Une grande part de ce travail de stage qui n'apparaît pas dans ce rapport, est la compréhension du simulateur du robot BIP, peu documenté, écrit par P.B Wieber au cours de sa thèse.

La poursuite de ce stage au mois de juillet devrait me permettre de rédiger une documentation pour l'utilisation du simulateur et ainsi le rendre utilisable par l'ensemble du projet.

Je me suis fait une meilleure idée de ce qu'est la recherche, ce qui me motive pour la poursuite de mes études en Thèse.

Annexe A

Liens Internet

La page du projet BIP

<http://www.inrialpes.fr/bip>

Page référençant la recherche sur les robots bipèdes dans le monde

<http://www.mel.go.jp/soshiki/robot/undo/kajita/bipedsite-e.html>

Le robot Honda

<http://world.honda.com/ASIMO/>

MIT Leg Laboratory

<http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/>

Humanoid Robotics Institute, Waseda University

<http://www.humanoid.rise.waseda.ac.jp/index.html>

Bipedal Autonomous Robot - Universität Hannover

<http://www.irt.uni-hannover.de/~biped/>

Johnnie - The TUM Biped Walking Robot

<http://www.lbm.mw.tu-muenchen.de/Misc/Messe/hanmesse-e.html>

Le robot Rabbit - Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG)

<http://www-lag.ensieg.inpg.fr/PRC-Bipedes/Prototype/rabbit.html>

Annexe B

Paramètres de la fonction fsqp sous scilab

La fonction `fsqp` doit être appelée avec les paramètres consignés dans le tableau B.1

x_0	Valeur initiale de x
$[ipar]$	voir tableau B.2
$[rpar]$	voir tableau B.3
$[bl, bu]$	$[x_{min}, x_{max}]$
obj	fonction critère
cntr	fonction contraintes
grobfd	gradient fonction critère
grcnfd	gradient fonction contraintes

TAB. B.1 – Paramètres de la fonction `fsqp` de scilab

nf	nombre de critère
nineqn	nombre de contraintes d'inégalités non linéaires
nineq	nombre total de contraintes d'inégalités
neqn	nombre de contraintes d'égalités non linéaires
neq	nombre total de contraintes d'égalités
modefsqp	paramètres de résolution (choix de l'algorithme [5])
miter	noubre maximal d'itérations
iprint	mode d'affichage [5]

TAB. B.2 – Composantes du vecteur $ipar$ paramètre de `fsqp`

bigbnd	« l'infini »
eps	valeur de la norme requise pour la direction de Newton d_k^0 [5]
epsneq	violation maximale des contraintes d'inégalités
udelta	perturbation dans l'approximation du gradient par différences finies

TAB. B.3 – Composantes du vecteur $rpar$ paramètre de `fsqp`

Bibliographie

- [1] Bilal El Ali. *Contribution à la Commande du Centre de Masse d'un Robot Bipède*. Thèse de Doctorat, INPG, 1999.
- [2] B.Espiau and the BIP team. BIP : A joint project for the development of an anthropomorphic biped robot. *International Conference on Advanced Robotics, ICAR'97*, 1997.
- [3] Marie-Noëlle Cailleux. *Amputation de cuisse chez l'adulte actif : plaidoyer pour le CAT-CAM*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, Faculté de médecine et de pharmacie de Besançon, 1994. page 146.
- [4] Yamaguchi G.T. and Zajac F.E. Restoring unassisted natural gait to paraplegics via functional neuromuscular stimulation : A computer simulation study. *IEEE Transaction On Biomedical Engineering*, 1990.
- [5] Craig Lawrence, Jian L. Zhou, and André L. Tits. *User's guide for CFSQP Version 2.5 : A C code for solving (large scale) constrained nonlinear (minimax) optimization problems, generating iterates satisfying all inequality constraints*. Electrical Engineering Department and Institute for Systems Research, University of Maryland.
- [6] T. McGeer. Passive walking with knees. *IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, 2 :1640–1645, 1990.
- [7] Laurence Roussel. *Génération de trajectoires optimales de marche pour un robot bipède*. Thèse de Doctorat, INPG, 1998.
- [8] The Orccad Team. The Orccad Architecture. *Robotics Research, Special issues on Integrated Architectures for Robot Control and Programming*, 17(4) :338–359.
- [9] C.L. Vaughan, B.Davis, and J.C. O'Connor. *Dynamics of Human Gait*. Human Kinetics, 1992.
- [10] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic. *Scientific Fundamentals of Robotics 7. Biped Locomotion : Dynamics Stability, Control and Application*. Springer-Verlag, 1990.
- [11] P.B. Wieber. *Modélisation et commande d'un robot marcheur anthropomorphe*. Thèse de Doctorat, INPG, 2000.