

Hexapode : un robot explorateur tout-terrain

MATHIEU GOULET
Laboratoire de robotique
Département de génie mécanique
Université Laval
mgoulet@gmc.ulaval.ca

CLÉMENT GOSSELIN
Laboratoire de robotique
Département de génie mécanique
Université Laval
gosselin@gmc.ulaval.ca

Résumé

Cet article traite du développement d'un robot mobile marcheur à six pattes : Hexapode. Tant la conception mécanique que celle du contrôleur utilise des principes biomimétiques, s'inspirant de la fourmi. Le développement de ce robot permet l'étude théorique et expérimentale de concepts menant à des démarches stables et efficaces sur des reliefs accidentés. La notion de polygone de contact permet de mieux gérer les paramètres de stabilité. Des critères tels que la mobilité, l'autonomie et l'adaptabilité sont utilisés pour parvenir à générer les idées et les concepts derrière cette plate-forme. Le prototype final qui a été construit ainsi que les étapes préalables à sa fabrication sont décrits. L'équilibrage statique du robot a été mis en oeuvre pour permettre de diminuer la consommation énergétique. La programmation hiéarchique sous forme de couche d'interface matériel, de couche de coordination et de couche décisionnelle permet la gestion des déplacements, des séquences de fonctionnement et la prise de décision pour permettre au robot de mieux faire face à l'environnement. Les applications où Hexapode se démarquerait sont celles requérant la dextérité propre à l'exploration de terrain, ceci pourrait inclure des tâches spatiales ou terrestres.

1 Introduction

Il y a beaucoup de roues, mais bien peu de jambes dans le domaine des moyens de transport non vivants. Les déplacements à pied présentent l'avantage indéniable de pouvoir produire des déplacements dans toutes directions où des points de contact le permettent. La succession des points permet de produire la trajectoire désirée. Cette façon de se déplacer repose sur des critères d'équilibre et de stabilité.

En contrepartie, le domaine de la mécanique emploie des roues pour produire des mouvements. Cette dernière n'a aucun équivalent biologique, elle procure des bénéfices qui ne peuvent être mis de côté, comme permettre de franchir de grandes distances avec une faible quantité d'énergie à fournir. Cependant, il y a des situations où la roue ne peut s'adapter adéquatement à l'obstacle à franchir. En fait, il a été démontré qu'il est difficile de franchir un élément de relief ayant une hauteur de plus du quart du diamètre de la roue. Par contre, des pattes le peuvent. En comparant la mobilité d'un marcheur et celle d'une plate-forme comportant des roues cylindriques (une voiture par exemple), on s'aperçoit que la marche (sur un plan) permet d'effectuer deux translations latérales (selon les axes X et Y du plan) en même temps qu'une orientation (rotation autour de l'axe Z), tandis que les roues ne peuvent effectuer qu'une seule translation (selon l'axe X) et qu'une orientation (rotation autour de l'axe Z). Ceci est un inconvénient de taille pour circuler dans un environnement encombré ou ayant un fort relief. C'est en observant les caractéristiques avantageuses de la marche que l'idée de développer un robot mobile marcheur a émergé.

Le biomimétisme est une approche qui s'inspire de solutions utilisées par les vivants afin de résoudre des problèmes. Les insectes sont parmi les êtres vivants qui se sont le mieux adaptés à leur milieu : on les retrouve dans toutes les régions tempérées du globe. Malgré leur petite taille, leurs possibilités sont énormes. Leur physiologie leur permet une intégration parfaite à leur environnement bien que leur complexité physiologique soit réduite au maximum. De plus, leur corps doté d'un exosquelette est

léger et résistant. Ceci est d'autant plus évident lorsqu'une comparaison, à l'échelle de leur dimension, de leur masse et de leur force, est faite par rapport à d'autres créatures. Toutes ces particularités sont source d'inspirations potentielles pour la robotique. Le robot marcheur en développement au laboratoire de robotique de l'Université Laval, s'inspire particulièrement de la fourmi. Celle-ci possède un physique hexapode, particulièrement bien constitué. Petite, agile et forte, elle est apte à répondre aux critères mécaniques de la robotique.

2 Biomimétisme et historique

Les premières recherches majeures dans le domaine de la marche chez les insectes ont été initiées par D. M. Wilson en 1966 [1]. Ses travaux portaient sur un modèle descriptif catégorisant les divers modes de marche rencontrés chez les insectes, plus particulièrement chez les phasmes et les coquerelles. Grâce à ses observations empiriques, il lui a été possible d'énoncer des lois régissant l'ensemble des mouvements généralement rencontrés lors de déplacement sur des surfaces planes et horizontales. Ces lois seront décrites plus loin dans le présent article. Les travaux de Keir Pearson en 1976 [2] ont porté sur la mise en forme des comportements étudiés par Wilson sous forme de réseaux neuronaux. Des travaux importants dans la robotique mobile biomimétique sont ceux de Holk Cruse [4] et [3]. Depuis 1972, ses recherches s'inscrivent dans la suite de ceux de Pearson. Un des premiers robots fonctionnels, nommé Hannibal, a été construit au MIT MoBotLab en 1991 sous la supervision de Rodney A. Brooks. Il était le successeur de Genghis [5] développé au préalable par Brooks et palliait aux carences de mobilité et d'autonomie de ce dernier. Une équipe nombreuse s'est répartie la tâche de construire physiquement Hannibal et Attila (son jumeau) [6] et [7], ainsi que leur contrôleur [8] et [9]. Le robot ARAMIES est réalisé par l'université de Bremen pour l'agence spatiale européenne [10] et [11]. Cette plate-forme est spécifiquement dédiée à des déplacements sur des surfaces terrestres ou martiennes, qui seraient impossibles à réaliser avec des robots à roues. Le projet LEMUR du Jet Propulsion Lab (NASA) propose un robot oeuvrant aussi dans le domaine spatial où les tâches à accomplir requièrent une grande dextérité [12].

3 Hexapode

L'objectif du présent projet est de développer un robot autonome et polyvalent pour l'exploration de surface à relief ou encombrée. L'idée est de construire une plate-forme permettant de faire l'étude théorique et expérimentale des concepts qu'implique une démarche stable et efficace sur des surfaces présentant des reliefs accidentés. Comme des applications spatiales ont été imaginées, le robot devra pouvoir fonctionner avec des ressources énergétiques réduites, être de petite dimension et comporter des systèmes mécaniques, électroniques et informatiques fiables.

Le design du robot a été réalisé de façon itérative, par des successions de génération d'idées, de conception à l'aide de logiciel CAO et d'évaluation des prototypes en comparaison à des critères de performance. Ces critères sont la capacité d'adaptabilité, de mobilité et d'autonomie du robot. Bien que qualitatifs, ces trois critères ont permis de diriger les itérations de design dans la direction finale. Ils sont à la base du développement du prototype du robot «Hexapode». La suite du présent document décrit ces critères et explique comment ils ont été atteints ou le seront dans les travaux futurs prévus.

3.1 Critères

La mobilité est le critère qui évalue la facilité qu'a le robot à se déplacer. Il implique la possibilité de se déplacer de façon stable sur diverses surfaces. La démarche doit être la plus fluide possible, en évitant de déstabiliser le robot à chaque pas. La vitesse de déplacement du robot n'est pas un critère de premier plan, cependant elle doit être optimisée selon les capacités de couple et de positionnement des actionneurs, ainsi que la stabilité de la plate-forme. La mobilité implique aussi la possibilité qu'ont

les pattes à s'orienter et se positionner par rapport au corps du robot, ainsi que leur indépendance les unes par rapport aux autres. Ce critère est également responsable de l'analyse du type et de la puissance des actionneurs nécessaires pour permettre au robot de se mouvoir. L'optimisation du châssis et des membrures pour permettre de meilleurs débattements articulaires, est gérée par ce critère.

Le critère d'autonomie évalue la faculté du robot à pouvoir se déplacer par lui-même. Un robot d'exploration doit idéalement être en mesure de se diriger et d'atteindre les objectifs fixés avec un minimum d'information de l'extérieur. Pour ce faire, une intelligence artificielle doit être implantée au robot pour lui permettre de prendre lui-même les décisions relatives au bien de sa mission. Toute composante essentielle au déplacement du robot doit être incluse. Afin que le robot soit autonome, la consommation énergétique doit être minimisée pour lui permettre de fonctionner avec des réserves énergétiques réduites.

L'adaptabilité du robot caractérise sa capacité de modifier sa démarche afin de faire face à des situations jusqu'alors inconnues. La programmation du contrôleur du robot entre dans ce critère puisque c'est elle qui lui permet de remplir des tâches plus ou moins complexes. Ceci comprend la possibilité pour le robot d'exécuter des démarches s'accordant aux lois de Wilson (décrites plus loin) et de modifier ses modes de fonctionnement à l'aide de l'intégration serrée de l'intelligence artificielle et du corps du robot.

3.2 Polygone de contact

Une des innovations propres au développement du robot en cours est la notion de polygone de contact. L'arrangement des points de contact au sol forme une géométrie appelée polygone de contact. La position de ce polygone est donnée par rapport au repère fixé sur le corps du robot. Pour que la marche soit stable, il faut que cette géométrie se déforme le moins possible durant l'avancée du corps du robot. Des variations d'orientation et de position permettent au robot de se déplacer, il faut que tous les points du polygone de contact subissent les mêmes transformations.

3.3 Marche quasi-statique et marche dynamique

Il y a deux types distincts de marche susceptibles d'être retrouvés dans les déplacements des vivants : la marche quasi-statique et marche dynamique. La marche quasi-statique est utilisée par presque tous les vivants. Elle permet des poses stables en tout temps et même des arrêts dans la démarche. Les déplacements qui résultent de la marche quasi-statique sont souvent assez lents puisque les effets de l'inertie doivent pouvoir être négligés. Les insectes et les crustacés possèdent pour la plupart six pattes et sont particulièrement doués pour ce type de marche.

Les vertébrés utilisent généralement une démarche dynamique. Ceux-ci étant habituellement de plus grande taille et flexibles, ils se servent du déplacement de leur centre de masse pour fournir une continuité à leurs mouvements. Il en résulte des aptitudes à la course ou à d'autres prouesses. La démarche quasi-statique est habituellement moins consommatrice d'énergie puisque l'énergie cinétique en présence est moins importante. C'est pour cette raison et à des fins de simplicité que ce style de marche sera utilisé avec le robot Hexapode.

3.4 Fourmi réelle

Grâce à sa grande adaptabilité, sa mobilité prodigieuse et son autonomie à affronter les obstacles, la fourmi est l'organisme vivant le plus répandu sur Terre. Son corps à exosquelette est composé de trois sections principales (Fig. 1) : la tête, le thorax et l'abdomen. Les six pattes sont rattachées sur le thorax et elles comportent plusieurs membres. Le premier est appelé coxa (ce qui serait l'équivalent du bassin pour l'humain). Ensuite se retrouve le fémur, suivi du tibia. Le pied est appelé tarse et est suivi du prétarse. À l'extrémité, se trouvent des crochets que la fourmi utilise pour s'accrocher ou saisir les objets. La fourmi est de nature sociale et des différences physiques sont apparentes entre les castes d'individus, on retrouve notamment les ouvrières, les soldats, les reines et les mâles. La vie de chaque fourmi se déroule dans un rôle spécifique, l'équilibre de la colonie dépend donc de tous les individus.

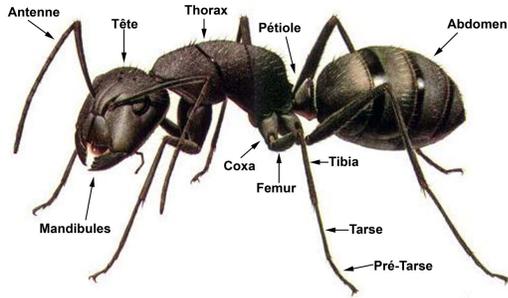


FIG. 1 – Anatomie de la fourmi.

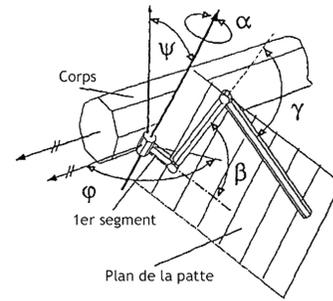


FIG. 2 – Schéma d'une patte.

3.5 La première représentation robotisée

La fourmi vivante remplit tous les critères à la perfection. Elle est la championne de la mobilité, de l'autonomie dans sa démarche et dans son adaptabilité au terrain. La solution proposée est donc de construire un robot qui s'en inspire, avec l'approche biomimétique. La patte d'une fourmi comporte six articulations, certaines sont des articulations rotoïdes, d'autres sont l'équivalent de joints de cardan ou d'articulations sphériques. Le nombre total de degrés de liberté que contient une patte est discutable puisque les articulations présentent parfois des débattements assez faibles, cependant ce nombre s'approche de neuf degrés de liberté actionnés ou compliants.

Les membres d'une patte peuvent être schématisés plus simplement comme sur la figure 2. Il est à noter que le tarse et le pré-tarse n'ont pas été représentés. Sur l'insecte, ils jouent un rôle de stabilisation et en supposant que le contact de la patte est ponctuel et sans glissement, il est possible de les négliger pour le modèle. Certaines articulations ont aussi été simplifiées pour mieux décomposer les mouvements. Il en résulte une architecture à cinq degrés de liberté. En conservant l'hypothèse que le contact se fait ponctuellement à l'extrémité de la patte, il est possible ne pas tenir compte de l'orientation de celle-ci.

L'architecture devient alors celle d'un manipulateur en position à trois degrés de liberté, l'angle ϕ et ψ de la figure est alors fixé au préalable. La figure 3 présente une ébauche d'un modèle envisageable. Ce modèle ne comporte pas d'actionneur et sert uniquement à la visualisation des divers mouvements qu'il serait possible de produire avec les pattes. Il est à noter que bien que le corps du robot ne soit construit que d'une seule partie, les dimensions approximatives de la physiologie de la fourmi ont été transposées.

Pour marcher, il faut que l'extrémité des pattes qui touche au sol se déplace selon certaines séquences. Ceci produit la translation du corps. Ce premier modèle est assemblé dans le logiciel de CAO Pro-Engineer de façon à ce que les articulations des pattes puissent bouger comme s'il s'agissait d'articulations rotoïdes libres. Il est possible de déplacer les pattes comme si c'était celles d'un pantin. Cette inspection visuelle du mouvement des membres sert à donner l'intuition des mouvements réalisables par les pattes, en vue de déterminer les mouvements permettant la marche.

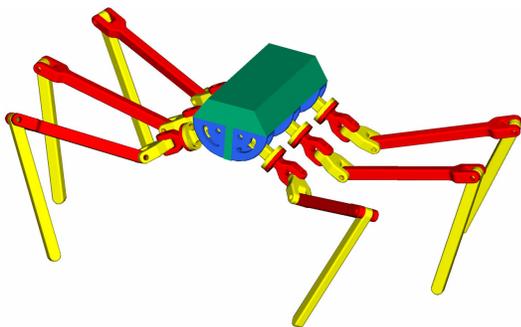


FIG. 3 – La première représentation CAO.

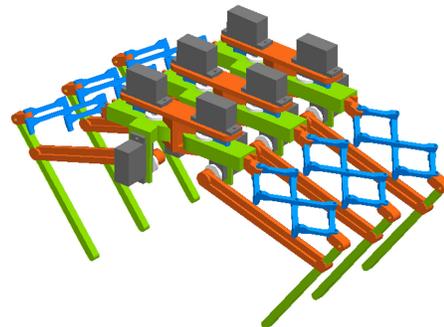


FIG. 4 – Prototype à mécanismes déployables.

3.6 Prototype utilisant les mécanismes déployables

Suite à l'analyse des déplacements des pattes à l'aide du premier modèle, la poursuite des travaux a consisté à vérifier s'il était viable de réduire le nombre de degrés de liberté présent sur les pattes ou d'en coupler certains. Moins de degrés de liberté actionnés par patte signifie avoir moins de moteurs à contrôler et à alimenter. La réduction du nombre d'actionneurs permet d'augmenter l'autonomie du robot, cependant ceci ne se fait pas sans impact sur la mobilité et l'adaptabilité. Pour que le corps du robot effectue une trajectoire rectiligne et continue, le polygone de contact doit se déplacer par rapport au corps de façon inverse. Les trajectoires résultantes des extrémités des pattes sont tout simplement le déplacement selon une droite et parallèle à la direction de la marche. Il faut ensuite relever la patte et rechercher un prochain point de contact. L'utilisation d'un mécanisme déployable permettant l'extension de la patte permettrait la correction des arcs de cercle générés par la rotation de l'articulation représentée par l'angle α (Fig. 2). Les résultats obtenus étaient près de la trajectoire voulue.

Nous avons cependant rejeté ce design (Fig. 4) après avoir analysé la complexité du mécanisme. Même la diminution de masse résultant de la réduction du nombre de moteurs, est complètement éclipsée par la masse à ajouter par le mécanisme de compensation lui-même. De plus, le fait de générer des trajectoires linéaires sur un plan est de peu d'intérêt car il n'est qu'un des cas rencontrés dans la marche sur terrain encombré. Les polygones de contact générés avec cette architecture ne peuvent effectuer que des translations dans une seule direction et ne peuvent effectuer de rotation. Ceci amène une contre-indication au niveau de la mobilité et de l'adaptabilité qui ne peut être négligée. Un design à trois degrés de liberté permettant le plein positionnement est préférable.

3.7 Prototype final à trois degrés de liberté par patte

L'architecture retenue pour le robot Hexapode comporte trois degrés de liberté par patte : elle est plus efficace et permet le plein positionnement de l'extrémité des pattes. Le développement d'un prototype physique de robot marcheur avec ce type de pattes a été mis en branle au laboratoire de robotique de l'Université Laval. La plate-forme sert à l'étude et à la vérification des trajectoires réelles qui sont imposées aux pattes par le contrôleur afin de s'assurer de la meilleure mobilité, de la meilleure autonomie, ainsi que de la meilleure adaptabilité. La conception du modèle CAO pour le prototype final a été faite avec le logiciel de CAO Pro-Engineer. Plusieurs itérations de design ont abouti à une version finale. Les membrures et le corps ont été soigneusement conçus pour comporter le moins de matériel possible tout en conservant le maximum de rigidité. Les trois paires de pattes sont identiques pour permettre la pleine omnidirectionnalité du robot. Ceci a aussi pour effet de simplifier le design et l'usinage des pièces du robot. Le modèle CAO, ainsi que la version réelle sont montrées sur les figure suivantes (Fig. 5 et Fig. 6).

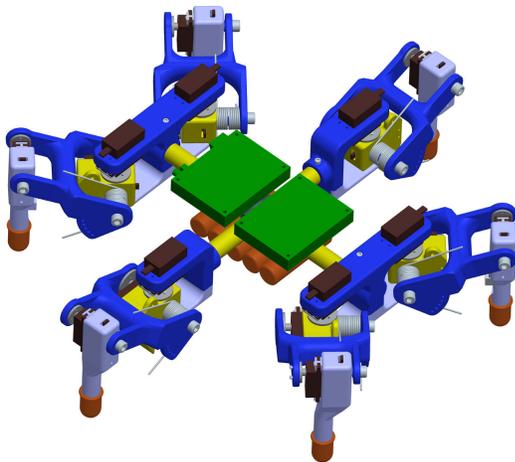


FIG. 5 – Modèle CAO du prototype final.

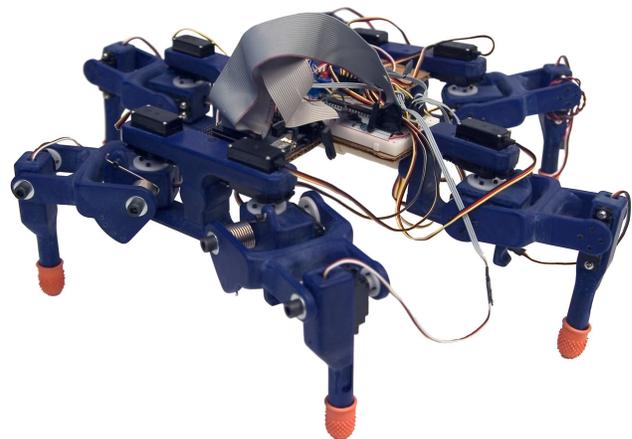


FIG. 6 – Prototype réel.

3.8 Fabrication mécanique

La majeure partie du prototype final est en matière plastique. Les pièces sont fabriquées avec la technologie du prototypage rapide FDM [13]. Le châssis du robot est construit à partir de tuyaux en CPVC standard. Ce matériau a l'avantage d'être solide et léger. D'autres pièces viennent compléter le design. Un pivot est ajouté pour réduire l'usure induite par la charge radiale appliquée sur les arbres des moteurs. Afin que ce pivot puisse tourner sans frottement, des paliers lisses sont utilisés. Enfin, l'extrémité des pattes est recouverte d'une gaine de caoutchouc afin d'optimiser leur adhérence.

4 Évaluation du robot selon les critères de performance

4.1 Mobilité

La mobilité est le critère qui tient compte de la facilité qu'a le robot à bouger. Comme énoncé auparavant, la présence de trois degrés de liberté sur chacune des six pattes est utile pour générer des translations et des rotations au polygone de contact sans le déformer. Cette condition est nécessaire afin d'assurer une démarche stable. Le contrôle du déplacement de chacune des pattes se fait de façon indépendante, ce qui permet d'augmenter grandement les possibilités de mouvements. Pour simplifier les algorithmes de contrôle afin de leur permettre de fonctionner en temps réel les angles ϕ et ψ (Fig. 2) ont été fixés à zéro degré. Les six pattes sont donc identiques, assurant la symétrie de la plate-forme.

Le robot comporte six pattes ayant chacune trois actionneurs, un total de dix-huit actionneurs font donc partie de l'hexapode. L'objectif d'une marche stable et polyvalente est d'imprimer au corps les six degrés de liberté possibles, c'est-à-dire de changer le positionnement et l'orientation du corps du robot tout en naviguant sur un terrain comportant des obstacles inconnus. La démarche tripode (voir plus loin l'explication détaillée) est celle qui assure la stabilité tout en comportant le moins de pattes simultanément en contact avec le sol. Avec trois pattes au sol, neuf degrés de liberté motorisés, au total, sont en jeu pour permettre de donner les six degrés de liberté nécessaires au corps.

Les contacts ponctuels au sol sont modélisés comme des liaisons passives à trois degrés de liberté. Il y a donc redondance de trois degrés de liberté motorisés (actionneurs). Cependant puisque le polygone de contact ne doit pas être déformé et n'est pas fixé au sol, il importe de conserver ces actionneurs redondants. Il est aussi préférable d'être surcontraint dans le cas d'une perte de contact ou de glissement de l'une des pattes.

4.2 Autonomie - Actionneur

Comme énoncé dans la précédente section, trois actionneurs permettent de positionner l'extrémité de la patte. Les moteurs des deux premiers axes ont à soutenir plus de charges que celui du troisième axe. Ce dernier est donc d'un modèle moins puissant et par le fait même, moins volumineux afin de ne pas transporter de masse inutilement. Tous ces actionneurs sont des moteurs rotatifs de type RC servo (Remote Control) fabriqués par Hitec. Ces moteurs sont habituellement utilisés dans le domaine des véhicules radioguidés pour motoriser le système de direction. Ils sont compacts et peu coûteux, c'est pourquoi leur utilisation en robotique se multiplie. Ils comprennent un module interne de gestion de la puissance et de la position. Pour leur transmettre une commande, il suffit d'envoyer une impulsion d'une certaine durée selon une période de vingt millisecondes.

Le circuit de contrôle interne de ces moteurs est cependant assez primitif. Il utilise seulement une compensation proportionnelle à l'erreur de position fournie par un potentiomètre fixé sur l'arbre de sortie du réducteur du moteur. Dans le cas où le couple statique à fournir est grand, l'erreur sur la position doit être grande, ce qui n'est pas souhaité. L'hypothèse du fonctionnement de la commande en boucle ouverte pour le positionnement des moteurs est donc fautive. Afin de corriger ce problème et d'obtenir de meilleures performances avec les moteurs, des modifications peuvent être réalisées. Il suffit de remplacer le contrôleur interne par un contrôleur externe. Pour pouvoir conserver le module de gestion de la puissance

interne au moteur, il faut modifier l'électronique interne du moteur afin de tromper le contrôleur interne pour qu'il reçoive en permanence la même information que si le moteur était en position centrale. La façon de faire est de remplacer, sur la carte de contrôle, l'entrée du potentiomètre donnant la position de l'arbre de sortie du moteur par deux résistances de valeurs équivalentes. Le signal du potentiomètre en question doit alors être lu par ce qui servira de contrôleur externe. Pour gérer la position, ce dernier doit envoyer une commande semblable à une position désirée, cette dernière doit être proportionnelle au couple à fournir, soit pour faire tourner le moteur ou pour maintenir la charge. Plus la position est loin de la valeur centrale, plus le couple fourni est grand.

4.3 Autonomie - Équilibrage statique

La clef de l'autonomie est de dépenser le moins d'énergie possible pour se déplacer. Il devient alors possible de naviguer plus longtemps ou d'accomplir davantage d'actions. Les éléments qui consomment le plus d'énergie sont les moteurs. Ces derniers doivent être capables de soutenir le corps et de le faire se déplacer avec aisance. Pour un robot marcheur, la majorité du poids vient des pattes, donc des membrures et des moteurs eux-mêmes. Le reste du poids provient du corps, des piles et du système de contrôle. Il importe de minimiser la masse à transporter et donc le couple que les moteurs fournissent. Le design du robot a été prévu en conséquence, c'est-à-dire en diminuant la quantité de matériel utilisée. La fabrication avec la technologie du prototypage rapide a contribué à y parvenir.

Pour minimiser la consommation d'énergie, les moteurs doivent fournir le couple le plus faible possible. En fixant les membrures directement à la sortie de l'arbre des moteurs, les organes de transmission intermédiaires sont évités et l'importance du couple à fournir est abaissé. Des études ont été réalisées sur l'impact de la variation des angles ϕ et ψ (Fig. 2). Ceci a un effet au niveau de la répartition de la charge sur plusieurs moteurs. L'orthogonalité des axes est préférée afin de mieux isoler le couple à fournir pour soutenir le poids du corps de l'hexapode sur un seul actionneur. Le moteur qui soutient la majorité de la charge est celui qui donne l'orientation de la variable articulaire β (Fig. 2). Il devient alors possible d'agir localement sur cet axe pour fournir un couple inverse afin que le moteur ait moins à combattre la force de gravité qui s'applique sur l'Hexapode. Cette technique s'appelle l'équilibrage statique : en théorie, elle permet au moteur de fournir seulement le couple pour vaincre l'inertie de l'élément à déplacer, ce qui est beaucoup moindre que le couple total à fournir.

Cependant, dans le cas d'un robot marcheur, le chargement de cet axe est variable. En effet, le changement de topologie, comme la modification du nombre de pattes au sol par exemple, influe sur le chargement local sur les pattes. Pour cette raison l'équilibrage statique parfait ne peut être réalisé. Il est tout de même possible de réaliser un équilibrage partiel, aidant à diminuer le couple dans la situation d'utilisation standard. Un ressort en torsion est ajouté pour fournir ce couple antagoniste. Toutefois, ce type de composante ne fournit pas un couple continu sur toute sa plage d'utilisation. Ce couple est proportionnel au produit de la fraction d'un tour complet où il est opéré par le couple maximal pouvant être fourni. Comme la plage d'utilisation est de 90 degrés, une variation du quart du couple maximal est à prévoir entre le maximum et le minimum fourni. Il y a donc une position d'équilibre différente selon la topologie rencontrée.

Des études ont été réalisées afin de connaître le couple optimal à fournir avec chacune des topologies. Le couple maximal pouvant être produit par le ressort doit être inférieur à celui que peut fournir le moteur. Le cas critique se produit lorsque la patte est à sa limite articulaire supérieure sans qu'il n'y ait de contact avec le sol. Puisque les moteurs peuvent fournir un couple continu de 470 mN.m et que les ressorts les plus adaptés fournissent un couple de 475 mN.m, un décalage de la plage d'utilisation est nécessaire. Ceci est bénéfique : des ressorts plus gros peuvent accumuler une plus grande quantité d'énergie avant de subir des déformations plastiques.

4.4 Adaptabilité - Systèmes de capteurs

La capacité d'adaptabilité du robot passe par la représentation qu'il peut se faire de son environnement. Ceci implique l'implantation de capteurs pour lui permettre de prendre conscience de son environnement. Un potentiomètre interne, branché comme un diviseur de tension, fournit un signal qui permet de connaître la position angulaire des moteurs. L'information en lien avec le chargement du bout de la patte est aussi nécessaire afin que l'hexapode puisse s'adapter à la condition du terrain. Pour ce faire, un système comprenant un capteur de force est utilisé. Un poussoir installé dans le caoutchouc du bout de la patte vient faire pression sur le capteur. Ce dernier possède une résistance inversement proportionnelle à la charge.

Pour permettre au robot de «voir» son environnement, des capteurs de proximité de type phototransistor sont intégrés au robot. Des diodes led infrarouges éclairent la scène par impulsion, les phototransistors montés autour du robot vont capter différents niveaux de lumière réfléchié selon la proximité des obstacles. Ces signaux ne permettent pas une vue à très longue distance, mais sont suffisants pour permettre au robot de voir les obstacles qu'il aura à franchir. Des capteurs d'orientation pourraient également être installés pour donner plus d'information sur les conditions du terrain. Un inclinomètre, c'est-à-dire un accéléromètre qui mesure l'accélération gravitationnelle, permet d'orienter un plan de navigation inertielle. Enfin, un magnétomètre permet de situer le nord magnétique, ce qui aidera le robot à gérer ses déplacements sur de longues distances.

4.5 Adaptabilité - Microcontrôleur

Pour que le robot soit autonome, il faut qu'il puisse, de lui-même, prendre des mesures, gérer le déplacement de ses pattes et décider des modifications à effectuer sur les séquences afin de se donner une démarche permettant de s'adapter à l'environnement. Le «cerveau» du robot est un microcontrôleur de modèle DSP 56F807 [14] fabriqué par Motorola. Ce microcontrôleur est spécialisé aussi bien dans le traitement de signal (Digital Signal Processing), que dans le calcul d'opération de commande. Le processeur fonctionne avec des mots de seize bits à une cadence de quatre-vingts mégahertz. L'environnement de développement utilisé est CodeWarrior de Metrowerk. La programmation s'effectue en langage C, ce qui permet d'obtenir des niveaux de complexité beaucoup plus intéressants qu'avec la programmation en langage Assembleur. Les programmes sont donc plus transportables et il est possible de les faire fonctionner sur d'autres plates-formes en ne supposant que des modifications mineures.

Plusieurs périphériques déjà inclus dans le microcontrôleur sont utilisés comme interface avec le corps du robot et avec l'environnement. Seize convertisseurs effectuant la mesure de tension analogique vers des valeurs digitales permettent de faire la mesure des capteurs externes. Trente-deux entrées et sorties digitales (i/o) sont aussi présentes pour permettre le contrôle et la communication avec des périphériques externes. Pour permettre la commande des moteurs, des générateurs d'échelon sont disponibles. Douze générateurs PWM dédiés sont présents et il est aussi possible d'utiliser quatorze temporisateurs à sortie digitale pour pouvoir contrôler un total de vingt-six RC servomoteurs. Un autre périphérique intégré qui est bien utile, est la communication sérielle par protocole RS-232. Cela permet de communiquer en temps réel, de façon facile et efficace avec un ordinateur externe.

Tous ces périphériques requièrent bien entendu une programmation de bibliothèques afin de gérer l'accès aux adresses-mémoires correspondantes. La programmation de ces bibliothèques et des autres fonctions utilisées pour la tâche de haut niveau implique une optimisation en vue de diminuer le temps de calcul requis et de réduire l'espace mémoire nécessaire. Il est à noter que les variables en format à virgule flottante ne sont pas directement supportées par l'unité de calcul. En effet, une conversion est nécessaire pour les traiter. La mémoire disponible est également limitée, soit 60K en mots de 16-bit dans la mémoire flash EEPROM dédiée au programme et 2K en mots de 16-bit dans la mémoire RAM. La quantité de mémoire peut également être augmentée par l'ajout de carte «Smart media» pouvant aller jusqu'à 128 mégaoctets.

4.6 Adaptabilité - Programmation hiérarchique

La clef du développement du système de contrôle de l'Hexapode est la programmation hiérarchique. Cette approche consiste à développer les différents niveaux d'action de façon indépendante. Ceci revient à construire différentes couches qui s'imbriquent parfaitement tout en permettant un fonctionnement autonome.

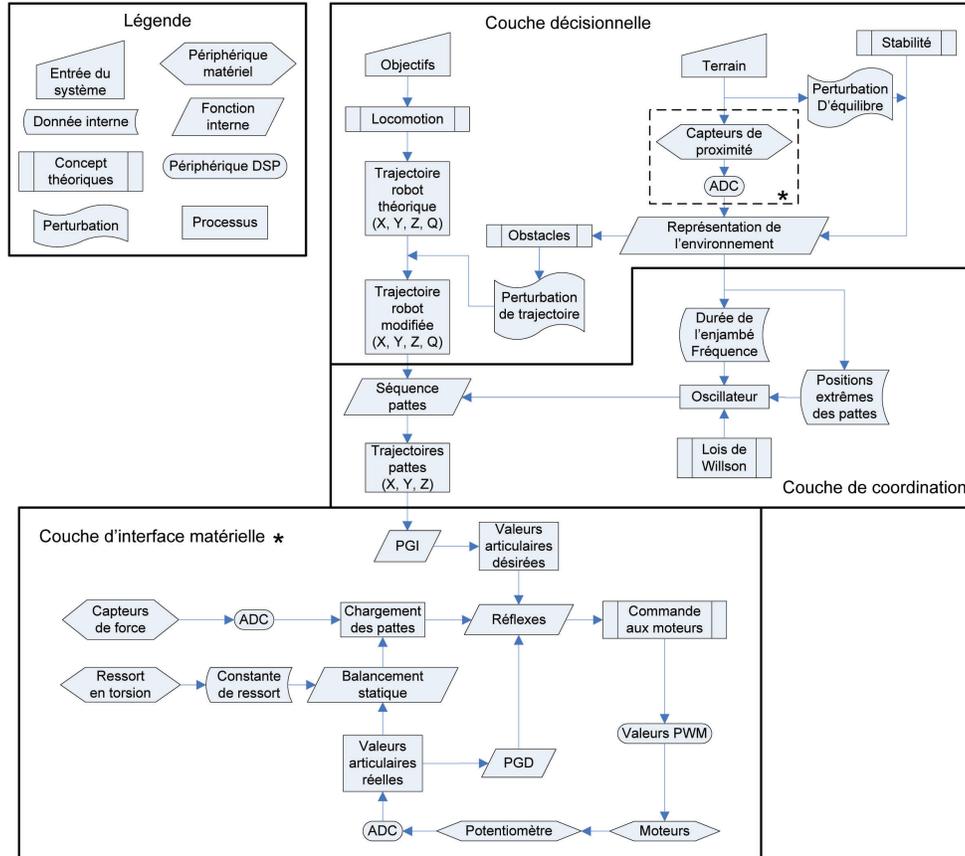


FIG. 7 – La programmation hiérarchique.

4.6.1 Couche d'interface matérielle

La couche d'interface matérielle permet le contact physique du contrôleur avec les composants du robot. Elle gère tout ce qui a trait au système d'acquisition des capteurs. Elle gère aussi le positionnement des pattes. À l'aide de la résolution du problème géométrique inverse, les coordonnées cartésiennes désirées pour l'extrémité de la patte sont converties en coordonnées articulaires équivalentes. Il est à noter que la programmation de ce calcul doit être optimisée pour permettre sa résolution en temps réel. Cette couche gère aussi l'équilibrage statique en fournissant le couple nécessaire pour permettre au robot de soutenir son poids de façon optimale. Suite à cette opération, les durées d'impulsion (valeurs PWM) qui permettront la commande sont calculées et envoyées aux moteurs. L'aspect temporel de cette couche est primordial pour assurer le bon fonctionnement des systèmes, son aspect temporel est donc prioritaire par rapport aux autres couches. La couche d'interface matérielle est la base sur laquelle seront installées les autres couches ; elle pourrait être considérée comme le système nerveux du robot. Elle permet l'adaptation à l'environnement par des réflexes du contrôleur, cette adaptation doit être immédiate pour permettre une meilleure stabilité.

4.6.2 Couche de coordination

La couche de coordination gère les interactions entre les pattes. Pour produire une démarche efficace et stable, il importe que la séquence des mouvements soit cohérente. Pour ce faire, il est possible de se référer aux lois de Wilson, dont les points saillants sont décrits ci-dessous.

1. La marche est constituée de deux phases : l'enjambée et la poussée. L'enjambée se produit lorsque la patte n'est intentionnellement plus en position pour soutenir le robot. La poussée se produit lorsque la patte soutient le robot et est donc intentionnellement dans une position pour être en contact avec le sol. Ces deux phases alternent et ne peuvent se chevaucher.

2. Une vague d'enjambée se propage des pattes arrière vers les pattes avant. Ceci donne l'allure temporelle de la démarche en imposant un ordre relatif d'actions entre les pattes situées sur un même côté du robot.

3. La phase d'enjambée d'une patte ne peut être amorcée avant que la patte directement en arrière de celle-ci n'ait atteint la phase de poussée. Cette condition est essentielle pour assurer un équilibre quasi statique au robot avant d'entamer la prochaine enjambée.

4. Les pattes du même segment alternent en phase. Un segment est une paire de pattes qui est en avant, au centre ou en arrière du robot. L'alternance de la phase est le concept qui donne l'allure temporelle de la démarche, en imposant un ordre d'action entre les pattes du même segment du robot.

5. La durée d'une enjambée est constante. C'est la durée du cycle qui varie. La durée de la poussée diminue lorsque la fréquence augmente. En diminuant cette durée, la poussée s'exécute donc plus rapidement, ce qui accélère la démarche du robot.

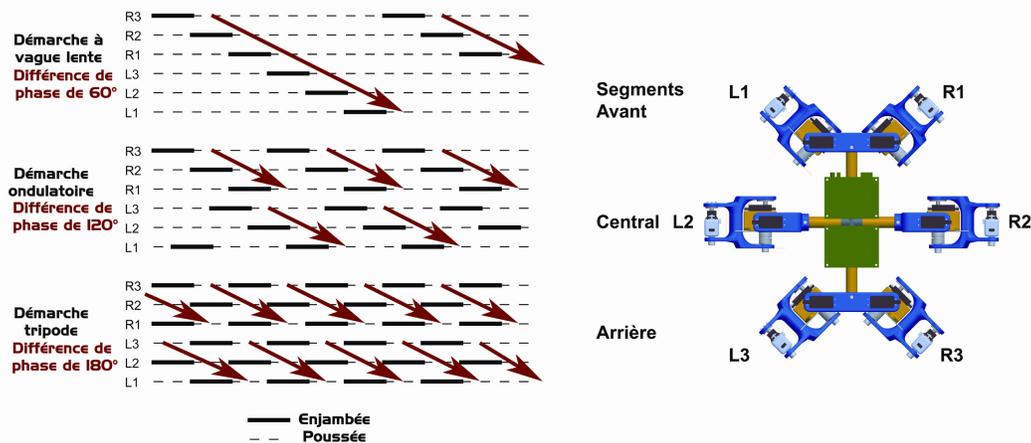


FIG. 8 – Représentation visuelle des séquences.

Les paramètres modifiables pour agir sur le contrôle de la démarche sont donc : la durée de l'enjambée et la fréquence des enjambées. La figure 8 présente des séquences qui résultent de l'implantation des lois de Wilson. Un oscillateur donne la cadence qui synchronise les temps utiles dans la démarche. Chez les êtres vivants, cet oscillateur provient habituellement des pulsations cardiaques. Dans le cas de l'Hexapode, cet oscillateur est fonction d'une horloge interne permettant la gestion temporelle de l'exécution des programmes. Il est à noter que la démarche tripode est la plus rapide qui est observée chez les insectes réels, alors que la démarche à vague lente est la plus stable. L'analyse de cette figure met en évidence le fait que la durée de l'enjambée détermine la vitesse globale de la séquence puisque l'une est un multiple de l'autre. La différence de phase utilisée sur la figure est la fraction du temps de l'enjambée d'une patte par rapport à la séquence complète (360 degrés). En augmentant la fréquence des enjambées, les cycles de poussée sur les pattes situées d'un même côté deviennent tout simplement compressés. Il est possible de situer, par l'alternance de phase, les cycles d'enjambée d'un côté en les plaçant au milieu de la période de l'autre côté, ce qui est conforme aux lois de Wilson. Il est important de réaliser que ces lois s'appliquent

seulement pour des conditions uniformes de marche. Lorsque le terrain devient encombré ou que des virages doivent être effectués, il faut modifier ces séquences pour permettre de conserver la stabilité de la plate-forme.

4.6.3 Couche décisionnelle (intelligence artificielle)

C'est sur la couche décisionnelle que repose la responsabilité de prévoir les meilleures actions à accomplir afin d'atteindre les objectifs externes. De façon autonome par le robot, ces objectifs sont transformés en une série d'actions d'où émerge une trajectoire théorique. Cette trajectoire est ensuite transformée pour tenir compte de la représentation de l'environnement que se fait le robot à l'aide de ses capteurs. Les obstacles sur le terrain impliquent des perturbations de la stabilité qui devront être compensés par le robot pour remplir sa mission avec brio. L'approche utilisée pour adapter le comportement du robot est de modifier les séquences de marche. La couche décisionnelle influe sur les paramètres de la marche, c'est-à-dire la durée de l'enjambée et la fréquence des enjambées. Ceci a pour effet de faire varier la vitesse d'avance du robot en modifiant le nombre de pattes au sol. La stabilité du robot est donc fonction de la vitesse de la démarche. Cette vitesse peut aussi être modifiée en changeant les positions extrêmes que prendront les pattes durant le déplacement. Ces positions sont celles que devrait atteindre la patte en fin de phase, soit la position la plus avancée et la plus reculée. La modification de ces points permet au robot d'effectuer des rotations en donnant des positions extrêmes plus rapprochées aux pattes qui seront du côté de la direction du virage. Il est alors nécessaire d'effectuer la phase de poussée avec une trajectoire non rectiligne pour éviter de déformer le polygone de contact. Pour que la démarche soit stable, il importe que seulement le corps se déplace et non pas les points de contact.

La couche décisionnelle gère aussi les réactions aux stimuli extérieurs afin de permettre l'adaptation à l'environnement. La représentation de l'environnement sera l'élément qui permettra au robot de s'adapter aux nouvelles conditions. Dans le cas où la mission du robot serait de tracer une carte du terrain, il sera possible d'y parvenir en se servant des coordonnées des polygones de contact juxtaposées selon les informations données par l'inclinomètre sur l'orientation du corps du robot. Des zones d'intérêt pourront être identifiées à l'aide des capteurs de proximité.

La programmation de cette couche est en cours de développement au laboratoire de robotique de l'Université Laval. Elle inclura fort probablement des techniques d'algorithmie permettant l'apprentissage et la prise de décision comme les réseaux de neurones et la logique floue. Cependant, puisque ces approches nécessitent des calculs plus complexes, il est possible que le microcontrôleur actuel ne fournisse pas une capacité de calcul suffisante. Dans ce cas, il sera alors possible d'ajouter un autre processeur qui se chargera d'effectuer les calculs. De plus, cette façon de faire irait dans le même sens que l'approche de la programmation hiérarchique, puisque qu'elle amplifierait le concept de découplage des couches de programmation. En comparaison avec les êtres vivants, cela reviendrait à dissocier le cerveau qui prend les décisions et le cervelet qui gère l'équilibre.

5 Applications et conclusion

Les avenues d'utilisation pour le robot Hexapode correspondent à celles nécessitant des déplacements dans un milieu avec un relief accidenté ou encombré. Ce robot a été conçu plus spécifiquement pour franchir les restrictions qui limitent d'autres robots ou encore pour des applications où la mobilité, l'autonomie et l'adaptabilité sont primordiales. Associée au biomimétisme, la mise en valeur des critères de performance que nous avons initialement retenus, a permis de générer une solution viable aux problèmes de déplacements sur des surfaces dont le relief n'est pas connu à l'avance.

L'avenir des robots marcheurs est de se déplacer dans des environnements difficiles. Certains espaces terrestres entrent aussi dans cette catégorie. Hexapode pourrait faire la collecte d'informations biologiques à des endroits trop à risque pour les scientifiques, comme un lieu ayant subi une contamination biologique, chimique ou même nucléaire. Le robot pourrait aussi patrouiller des régions pour identifier

les transformations du milieu. Hexapode pourrait aussi être utilisé pour faire la fouille du site d'une catastrophe, son faible poids lui donnerait l'avantage de diminuer les risques d'effondrement des structures et conséquemment les risques pour la vie des sauveteurs ; il augmenterait alors les chances de retrouver des survivants

La voie d'utilisation visée est l'exploration de terrains de toutes sortes, terrestres ou non. Le robot Hexapode pourrait être un premier pas vers le développement de modules utilisés pour l'exploration spatiale. L'environnement de Mars, de la Lune ou d'autres planètes serait tout à fait le type de mission dont pourrait se charger Hexapode. Dans une optique d'exploration planétaire, il serait possible d'introduire la notion de coopération entre plusieurs robots similaires pour effectuer des tâches complexes. Comme chez les fourmis, les robots pourraient même être de physionomies quelque peu différentes, certains individus se spécialisant dans des tâches particulières afin de donner au groupe des possibilités encore plus grandes pour remplir leurs objectifs. Il pourrait y avoir des robots plus agiles pour agir comme éclaireurs, d'autres plus forts pour transporter les instruments ou ramener des échantillons.

Références

- [1] Wilson, D.M., "Insect walking, Annual review of entomology", 1966.
- [2] Pearson, K., "Characteristics of leg movements and patterns of coordination in locust walking on rough terrain", International Journal of Robotics Research no.3,p.101–112, 1976.
- [3] Dean, J., Cruse, H., "Modelling the control of walking in insects", Biological Motion, Springer, 1990.
- [4] Cruse, H., "A new model describing the coordination pattern of the leg of a walking stick insect", Biological Cybernetics no.32, p.107–113, 1979.
- [5] Brooks, R.A., "A Robot That Walks ; Emergent Behaviors from a Carefully Evolved Network", MIT AI Lab Memo 1091, Février 1989.
- [6] Angle, C., Brooks, R.A., "Small Planetary Rovers", Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1990.
- [7] Angle, C., "Design of an Artificial Creature", Masters Thesis, MIT Department of Electrical Engineering and Computer Science, Juin 1991.
- [8] Ferrell, C., "Robust Agent Control of an Autonomous Robot with Many Sensors and Actuators", MIT Artificial Intelligence Lab Technical Report 1443, 1993.
- [9] Ferrell, C., "A Comparison of Three Insect-Inspired Locomotion Controllers, Robotics and Autonomous Systems", no.16, p.2–4 135–159, 1995.
- [10] Kirchner, F., Speneberg, D., "Omni-Directional walking in multi-pod robots based on feedback driven oscillators and local reflex mechanisms", CLAWAR 2001, no.16, p. 2–4 135–159, 1995.
- [11] Speneberg, D., Kirchner, F., De Gea, J., "Ambulating Robots for Exploration in Rough Terrain on Future Extraterrestrial Missions", 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, ASTRA 2004.
- [12] Kennedy, B., Agazarian H., Cheng Y., "LEMUR : Legged Excursion Mechanical Utility Rover", Autonomous Robots, vol.11, p. 201-205, 2001.
- [13] Laliberté, T., Gosselin C.M., Côté, G., "Rapid prototyping of mechanisms", IFToMM Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, 20–24, p.959–964, Juin 1999.
- [14] Freesacale, "DSP56F801-7UM 16-Bit Digital Signal Processor Users Manual",révision 6.0, p.1–727, Octobre 2004.