MDC-CR-RI-86-002

RAPPORT FINAL

TECHNIQUES D'ANIMATION GRAPHIQUE PAR ORDINATEUR

PHASE III

préparé pour:

MINISTÈRE DES COMMUNICATIONS
Centre de Recherche sur les communications
C.P. 11490, Succ. "H", Shirley Bay
3701, Avenue Carling
Ottawa (Ontario) K2H 8S2

Mars 1986 Projet CDT P1024

CDT
Centre de Développement Technologique

P
91
C654
T433
1986

IC

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

mDC-CR-R1-86-002

RAPPORT FINAL

TECHNIQUES D'ANIMATION GRAPHIQUE PAR ORDINATEUR

PHASE III

préparé pour:

MINISTÈRE DES COMMUNICATIONS
Centre de Recherche sur les communications
C.P. 11490, Succ. "H", Shirley Bay
3701, Avenue Carling
Ottawa (Ontario) K2H 8S2

Mars 1986 Projet CDT P1024

Industry Canada
Library - Queen
AVR APR - 2 2013
Industrie Canada
Bibliothèque - Queen

DEPARTMENT OF COMMUNICATIONS

COMMUNICATIONS RESEARCH CENTRE

RELEASABLE

MDC-CR-RI-86-002

ORIGINAL DOCUMENT REVIEW AND PUBLICATION RECORD

SECTOR	BRANCH	DATE
DDGRI	DIP	August 1986

PURPOSE This form is for use during review of the DOC-CR contractor reports. It is designed to: record decisions for classification, record reasons for classification and cautionary markin provide for indexing requirements.

INSTRUCTIONS * 1 copy of the completed form must accompany the contractor report package submitted to the CRC Library.

* Complete the following items as applicable.

1. DOC-CR NO. MDC-CR-RI-86-002	2. DSS CONTRACT NO. 36100-5-0109
3. TITLE: Techniques d'animation graphique par ordinateur : phase III : rapport final	4. DATE Mars 1986
5. CONTRACTOR Ecole Polytechnique de Montreal	

6. SCIENTIFIC AUTHORITY M. Guillet	7. LOCATION DIP/CRC	8. TEL. NO. 998-2384

9. CONTRACTOR REPORT CLASSIFICATION:

RELEASABLE [XXX] CONDITIONALLY RELEASABLE [ ] NON-RELEASABLE [ ]

* REASONS FOR CLASSIFICATION:

10. NO. OF COPIES SUBMITTED TO LIBRARY:

EXECUTIVE SUMMARY [ ] FINAL REPORT [XX] one copy

Rec'd 2nd copy

....

Scientific Authority's Signature Date

This form is not official therefore it is not signed.

CDT
Centre de Développement Technologique
École Polytechnique de Montréal

Projet CDT P1024

RAPPORT FINAL

TECHNIQUES D'ANIMATION GRAPHIQUE PAR ORDINATEUR

PHASE III

preparé pour:

MINISTÈRE DES COMMUNICATIONS
Centre de Recherche sur les communications
C.P. 11490, Succ. "H", Shirley Bay
3701, Avenue Carling
Ottawa (Ontario) K2H 8S2

par:

Dr Paul J. Cohen, ing.
Dr Hai Hoc Hoang,, ing.
Département de génie électrique
ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL

soumis par:

LE CENTRE DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE
DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
Campus de l'Université de Montréal
Case postale 6079, Succursale A
Montréal, Québec H3C 3A7

COMMUNICATIONS CANADA
CRC
MAR 4 1987
LIBRARY – BIBLIOTHÈQUE

Mars 1986

Dr Hai Hoc Hoang, ing.
Directeur de projet

Dr Paul J. Cohen, ing.
Directeur de projet

P
91
C654
T433
1986

CDT
Centre de
Développement
Technologique
École Polytechnique
de Montréal

RÉSUMÉ

La compréhension, la planification et la synthèse du mouvement de figures articulées à membres multiples (bipède, quadrupède, hexapode, etc.) font l'objet d'un intérêt croissant en animation par ordinateur. En effet, plusieurs champs d'applications importants, tels que la robotique, la biomécanique ou la cinématographie de synthèse, sont susceptibles de bénéficier des progrès accomplis dans ce domaine.

L'étude qui fait l'objet du présent rapport a porté sur le développement de modèles hiérarchiques pour la représentation et la synthèse de mouvements de mécanismes articulés naturels ou synthétiques.

La section II du rapport décrit les différents problèmes relatifs à cette modélisation ainsi que leur organisation hiérarchique. Un formalisme ainsi qu'un modèle sont ensuite proposés à la section III dans le cas du squelette humain et à la section IV dans le cas d'un véhicule quadrupède de synthèse. Enfin la section V propose une structure d'organisation d'un système logiciel, à être développé au cours de la prochaine phase, pour la planification, la simulation et la synthèse graphique de mouvements d'un véhicule multipode de synthèse sur des terrains de structure variable.

COMMUNICATIONS CANADA
CRC
MAR 4 1987
LIBRARY – BIBLIOTHÈQUE

TABLE DES MATIÈRES

Page

RÉSUMÉ i
TABLE DES MATIÈRES ii
LISTE DES FIGURES iii

I INTRODUCTION 1

II PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE EN MODÉLISATION DES MOUVEMENTS 3

III MOUVEMENTS DU SQUELETTE HUMAIN 6
- III-1 Le squelette 6
  - III-1-1 La composition du squelette 6
  - III-1-2 La cinématique des joints 10
  - III-1-3 L'hiérarchie des joints 11
  - III-1-4 Les primitives cinématiques 14
- III-2 Coordonnateur de mouvements 15
- III-3 Le contrôleur de marche 18
  - III-3-1 Le contexte d'une marche 18
  - III-3-2 Le contrôleur de démarche 19
  - III-3-3 Les phases d'un cycle de marche 22
- III-4 Le régulation des joints 25

IV MARCHE D'UN VÉHICULE MULTIPODE 26
- IV-1 Structure du véhicule multipode 26
- IV-2 Contrôleur de tâche 27
- IV-3 Contrôleur de déplacement 30
  - IV-3-1 Définition et formalisme de base 30
  - IV-3-2 Contrôleur de démarche 36
- IV-4 Régulateur de mouvement 42
  - IV-4-1 Contrôle de posture 42
  - IV-4-2 Évitement de collisions 42

V CONCLUSION 44

RÉFÉRENCES 46
BIBLIOGRAPHIE 48

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure III-1:	Approche descendante pour décrire le squelette ...	9
Figure III-2:	Arbre binaire de l'hiérarchie des joints du squelette	13
Figure III-3:	Représentation simplifiée de démarche cyclique ...	21
Figure III-4:	PLM de la phase de support de la jambe G	24
Figure III-5:	PLM de la phase de transfert de la jambe G	24
Figure IV-1 :	Modèle du véhicule quadrupède	28
Figure IV-2 :	Structure mécanique d'un membre de support	28
Figure IV-3 :	Contrôleur de tâches	31
Figure IV-4 :	Modèle du véhicule quadrupède	33
Figure IV-5 :	Modèles de terrain	33
Figure IV-6 :	Configurations de support pour une démarche cyclique	35
Figure IV-7 :	Démarche en crabe du véhicule	38
Figure IV-8 :	Exemples de démarche standard	38
Figure IV-9 :	Déplacement relatif des membres au cours d'un cycle de démarche standard	40
Figure IV-10:	Contrôleur de démarche	41
Figure IV-11:	Procédure d'évitement de collision	43

I INTRODUCTION

Le présent document constitue le rapport final du contrat no. 12ST.36100-5-0109, exécuté par le Centre de Développement Technologique de l'École Polytechnique pour le Centre de Recherches en Communications du Ministère des Communications du Canada. Conformément à la proposition de travail, ce contrat a porté sur une première phase d'analyse des problèmes reliés à la sémantique et la synthèse de mouvements en animation par ordinateurs.

La compréhension, la planification et la synthèse du mouvement de figures articulées à membres multiples (bipède, quadrupède, hexapode, etc.) font l'objet d'un intérêt croissant en animation par ordinateur. En effet, plusieurs champs d'applications importants sont susceptibles de bénéficier des progrès accomplis dans ce domaine. Il s'agit tout d'abord du domaine de la robotique, où le fait de pouvoir disposer d'un système informatique performant pour la synthèse de mouvement permettrait de simuler le comportement de différents types de véhicules à membres multiples, dans différents types d'environnement, en s'inrétessant en particulier aux aspects de planification de trajectoire, de stabilité dynamique et d'efficacité cinématique. Il s'agit ensuite du domaine de la biomécanique où un tel outil de synthèse permettrait de mieux comprendre les mécanismes naturels intervenant dans les déplacements des animaux et des humains. Mentionnons enfin le domaine de la cinématographie de synthèse (dessins animés) dans lequel un tel système pourrait s'avérer précieux pour contrôler le réalisme des mouvements à générer.

L'étude qui fait l'objet du présent rapport a porté sur le développement de modèles hiérarchiques pour la représentation et la synthèse de mouvements de mécanismes articulés naturels ou synthétiques.

La section II du rapport décrit les différents problèmes relatifs à cette modélisation ainsi que leur organisation hiérarchique. Un formalisme ainsi qu'un modèle sont ensuite proposés à la section III dans le cas du squelette humain et à la section IV dans le cas d'un véhicule quadrupède de synthèse. Enfin la section V propose une structure d'organisation d'un système logiciel, à être développé au cours de la prochaine phase, pour la planification, la simulation et la synthèse graphique de mouvements d'un véhicule multipode de synthèse sur des terrains de structure variable.

II PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE EN MODÉLISATION DE MOUVEMENTS

L'objectif général de la présente étude concerne la simulation des mouvements de mécanismes articulés. Une telle simulation peut être utilisée soit pour la conception et la synthèse de systèmes robotiques élaborés (e.g., des véhicules multipodes), soit encore pour l'analyse et la compréhension des mouvements de créatures animées.

Le produit ultime d'une telle étude devrait consister en un ensemble d'outils logiciels qui, à partir d'une spécification globale d'une tâche de mouvement à accomplir, permettrait de générer automatiquement la séquence d'animation correspondante. La conception d'un tel ensemble logiciel comporte plusieurs problèmes interdépendants différents.

Il s'agit tout d'abord de l'étude de la structure de l'objet mobile. Dans le cas de la conception de systèmes artificiels ce problème comporte lui-même plusieurs aspects distincts:

- la définition des caractéristiques structuralles imposées par le type d'environnement dans lequel l'objet mobile doit évoluer,

- la détermination des caractéristiques structuralles imposées par les types de mouvements à accomplir,

- la prise en compte des critères de performance dans la définition de structure (e.g., efficacité, stabilité, etc.) et

- l'établissement du modèle structural complet de l'objet mobile (squelette, types de joint, définition de membres).

Le deuxième problème concerne la spécification de l'environnement des points de vue topologique et morphologique. Dans le cas particulier du déplacement d'un véhicule il s'agira de classifier les différents terrains par rapport aux aptitudes cinématiques du véhicule.

Une fois l'objet mobile et l'environnement complètement définis le troisième problème consiste en une formalisation de la description des tâches à accomplir, en une décomposition de chaque tâche en séquences de mouvements canoniques, et en l'exécution de ces mouvements canoniques à l'aide de programmes moteurs. De façon plus spécifique si l'on limite l'étude aux véhicules de locomotion les aspects suivants doivent être considérés:

- au niveau hiérarchique supérieur, étant donné le modèle du véhicule et un modèle global de l'environnement, des procédures (de type heuristique) doivent être développées pour la planification de trajectoires viables d'un point initial à un point final (problème de navigation).

- à un niveau hiérarchique moins élevé, un formalisme adéquat doit être mis au point afin de décomposer les mouvements du véhicule en séquences, si possible standardisées, de mouvements des différents membres. Un tel formalisme doit en particulier prendre en charge les aspects de coordination des mouvements des différents membres et d'efficacité cinématique du mouvement.

- l'interaction entre le véhicule en déplacement et l'environnement doit être gérée de manière localement adaptative. En particulier, une procédure adéquate d'analyse locale du terrain par rapport au modèle du véhicule doit être développée afin de déterminer les déplacements élémentaires de celui-ci en évitant les problèmes d'instabilité mécanique, de blocage cinématique et de collision;

- au niveau hiérarchique inférieur, il s'agit de développer une technique de synthèse de mouvement au niveau de chaque membre. Une telle technique doit permettre, étant donné certaines contraintes cinématiques et dynamiques, de déterminer une solution (en termes d'évolution temporelle des joints) qui satisfasse un objectif de trajectoire du membre;

III MOUVEMENTS DU SQUELETTE HUMAIN

III-1 Le squelette

Le squelette du corps humain est composé exactement de 200 os de tailles et de formes extrêmement variées [1]. La description détaillée de ces os n'intéresse probablement que les anatomistes et n'est certainement pas nécessaire pour fins d'animation. Il est cependant essentiel d'avoir une description moins détaillée sous forme d'une structure abstraite composée d'environ une trentaine ou quarantaine de composants différents. Un composant peut alors être la colonne vertébrale (formée des vertèbres cervicales, dorsales et lombaires, du sacrum et du coccyx), la main ou le pied. Les composants du squelette sont disposés selon une structure topologique bien définie impliquant divers types de joint. Ce sont précisément ces mécanismes de joint qui permettent la mise en oeuvre des mouvements divers du coups humain. C'est pourquoi, selon le point de vue d'animation, la description du squelette doit contenir aussi les caractéristiques cinématiques des joints. De plus, certaines combinaisons des mouvements élémentaires d'un groupe bien identifié de joints constituent des primitives cinématiques intéressantes sur lesquelles la mise en oeuvre des mouvements naturels complexes se base. Les sections ci-après abordent les aspects mentionnés de la description du squelette.

III-1-1 La composition du squelette

En utilisant une approche descendante les composants du squelette peuvent être déterminés de la façon illustrée à la figure III-1. La décomposition hiérarchique s'arrête quand les composants obtenus fournissent une description suffisamment détaillée du squelette pour permettre une animation de qualité. La géométrie des composants doit

alors être spécifiée possiblement au moyen de polygones, ou surfaces polygonales dans des systèmes de coordonnées locales attachés aux composants. Pour fins d'affichage graphique ou de production d'images d'animation cette description géométrique doit être transformée afin de positionner et orienter correctement les composants en vue de la visualisation du squelette. Par conséquent, à chaque composant est associée une matrice de transformation.

Une fois les composants sont bien identifiés et décrits géométriquement, la structure topologique des connexions entre les composants doit être spécifiée en termes des joints d'articulation. Il s'agit alors d'énumérer, nommer et caractériser tous les joints du squelette. Les relations entre les joints et les composants sont aussi à expliciter. Des fois il est commode d'identifier des composés, appelés "membres", qui sont définis comme groupes de composants séquentiellement connectés. Un doigt, par exemple, est un membre formé d'une phalange suivie d'une phalangine, qui à son tour est suivie d'une phalangette. Il existe une forme de dualité entre les composants et les joints d'un membre. Dans le cas de l'index, par exemple, en plus de la description en termes de phalanges il y a une description en termes de joints comme suit:

- index 1: joint d'articulation entre la phalange et la paume,
- index 2: joint d'articulation entre la phalangine et la phalange,
- index 3: joint d'articulation entre la phalangine et la phalangette.

Ces considérations sont résumées par la notation suivante:

< doigt > : {phalange, phalangine, phalangette}

< index > : [index 1, index 2, index 3]

Du point de vue anatomique il existe plus d'une douzaine types de joints regroupés en trois classes majeures: les joints immobiles (synarthrosis), les joints mixtes (amphiarthrosis) et les joints mobiles (diarthrosis) [1]. Les joints mobiles sont de types ginglymus, trochoïde, condyloïde, enarthrosis, arthrodia et réception réciproque. Cependant, du point de vue d'animation il est nécessaire de ne retenir que des caractéristiques cinématiques des joints qui sont nécessaires à l'obtention d'une qualité adéquate de visualisation. À un certain niveau d'abstraction on distingue les joints élémentaires (reliant chacun deux composants) des joints composés (reliant chacun plusieurs composants). Le poignet, par exemple, peut être considéré comme un joint composé reliant l'avant-bras aux cinq doigts et décrit par la notation suivante:

<u>début</u> poignet /*joint composé*/

[pouce 1, pouce 2] /*membre connecté*/
[index 1, index 2, index 3] /*membre connecté*/
[majeur 1, majeur 2, majeur 3] /*membre connecté*/
[annulaire 1, annulaire 2, annulaire 3] /*membre connecté*/
[auriculaire 1, auriculaire 2, auriculaire 3] /*membre connecté*/

<u>fin</u> /*poignet*/

Une caractérisation cinématique de joints en vue de la production des séquences d'animation a été proposée par Zeltzer [2]. Elle fait l'objet de la prochaine section.

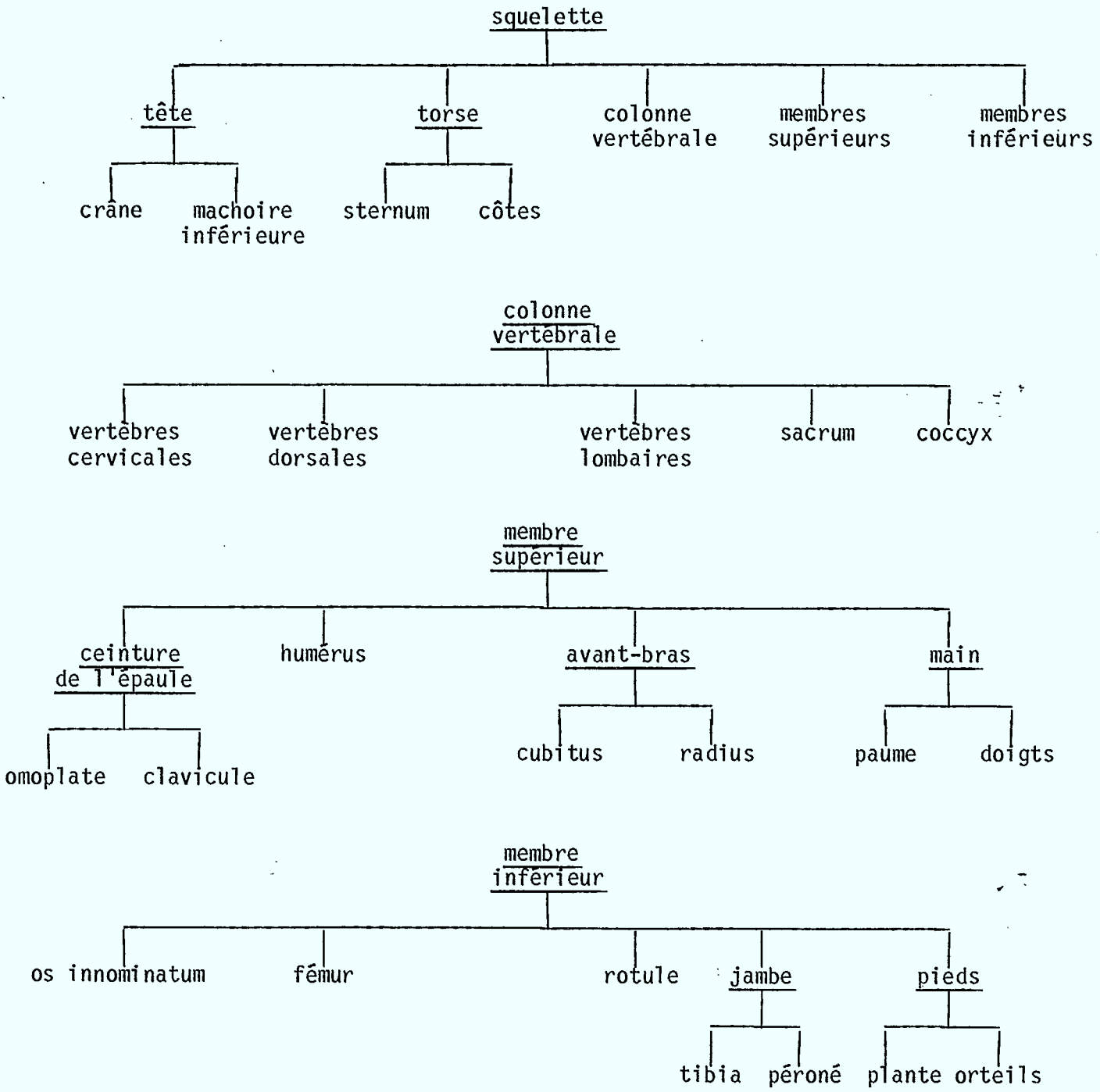


Figure III-1: Approche descendante pour décrire le squelette

III-1-2 La cinématique des joints

Un fait très remarquable est que tout mouvement de l'être humain et de l'animal vertébré est entièrement le résultat des rotations de joints. Pour obtenir un déplacement effectif, le centre de rotation doit nécessairement changer de place au cours du temps. Dans le but de produire ces phénomènes en animation graphique, il est essentiel de décrire les rotations possibles d'un joint en spécifiant les degrés de liberté (identifiés par les axes de rotation x, y et z) et les contraintes (sous forme d'angles limites par rapport à un axe de rotation). Le genou, par exemple, ne possède qu'un seul degré de liberté (la rotation autour de l'axe x). L'angle initial de zéro degré correspond à l'extension complète (la cuisse et la jambe en ligne droite). C'est aussi l'angle minimal. L'angle maximal de 180 degrés correspond à la flexion "complète" (la jambe en "superposition" complète avec la cuisse!). Le sens positif de rotation est le sens horaire. Les caractéristiques cinématiques du genou se résument par la notation suivante:

genou: x 0 0 180;

Le genou est typiquement un joint élémentaire (reliant deux composants seulement) et simple (ayant un seul degré de liberté). Un exemple de joint élémentaire multiple (possédant plusieurs degrés de liberté) est la hanche. Un joint multiple avec k degrés de liberté peut en fait être décomposé en une série de k joints simples admettant tous la même origine. Les compositions (au sens de la théorie des fonctions) de ces k rotations peuvent être utilisées pour obtenir certaines rotations composées normalisées selon une convention bien définie. Cette observation permet de voir clairement les implications de

la convention utilisée par Zeltzer[2]. Selon la convention de Zeltzer, la notation:

pelvis: y 0 -90 90 x 0 -40 15 z 0 -5 5;

désigne la composition:

rotation-z (rotation-x (rotation-y (squelette))),

c'est-à-dire:
une rotation autour de y transforme les axes x et z,
une rotation autour de x transforme seulement l'axe z et
une rotation autour de z n'a aucun effet sur l'axe x ni sur l'axe y.

Dans certaines situations , il peut être utile de découpler les degrés de liberté d'un joint multiple. Un exemple d'illustration se présente dans le découplage des trois degrés de liberté de la hanche en deux opérations: positionner le genou et orienter le genou (par une torsion de la cuisse). Ce découplage est réflété par la notation suivante:

hanche: y 0 0 0 x 0 -100 90 z 0 -45 0;
cuisse: y 0 -30 30;

III-1-3 L'hiérarchie des joints

Les composants du squelette humain sont organisés en structure hiérarchique qui peut être représentée par une arborescence (orientée). Les noeuds de l'arborescence correspondent aux composants et les relations hiérarchiques (parent-fils) décrivent les joints d'articulation entre les composants. Étant donné la topologie de connexions arborescente, il est possible d'identifier un composant par le joint qui le relie à son parent. On obtient alors l'hiérarchie des joints qui semble être une représentation plus intuitive du squelette utilisée en animation parce que tout mouvement à animer est le résultat de plusieurs rotations de ces joints.

Selon la pratique courante en informatique, la structure arborescente décrivant l'hiérarchie des joints du squelette est transformée en "arbre binaire" de façon à être en mesure d'appliquer directement les algorithmes de parcours (tree traversal algorithms). La transformation consiste essentiellement à introduire des noeuds (fictifs) additionnels à la représentation d'un joint composé. L'arbre binaire qui en résulte est illustré à la figure III-2 et décrit comme suit:

```
début corps début pelvis

        [hanche-g, cuisse-g, genou-g, début cheville-g
                                      [plante-g, orteils-g]
                                      [talon-g] fin]
        [hanche-d, cuisse-d, genou-d, début cheville-d
                                      [plante-d, orteils-d]
                                      [talon-d,] fin]

        [coccyx-sacrum
        début vertèbres
        [clavicule-g  épaule-g  bras-g  coude-g  avant-bras-g
        début poignet-g  [pouce-1-g  pouce-2-g]
        [paume-g  doigt-1-g  doigt-2-g  doigt-3-g] fin]
        [clavicule-d  épaule-d  bras-d  coude-d  avant-bras-d
        début poignet-d  [pouce-1-d  pouce-2-d]
        [paume-d  doigt-1-d  doigt-2-d  doigt-3-d] fin]
        [crâne  menton]
        fin /*des vertèbres*/
        fin /*du pelvis*/

fin /*du corps*/
```

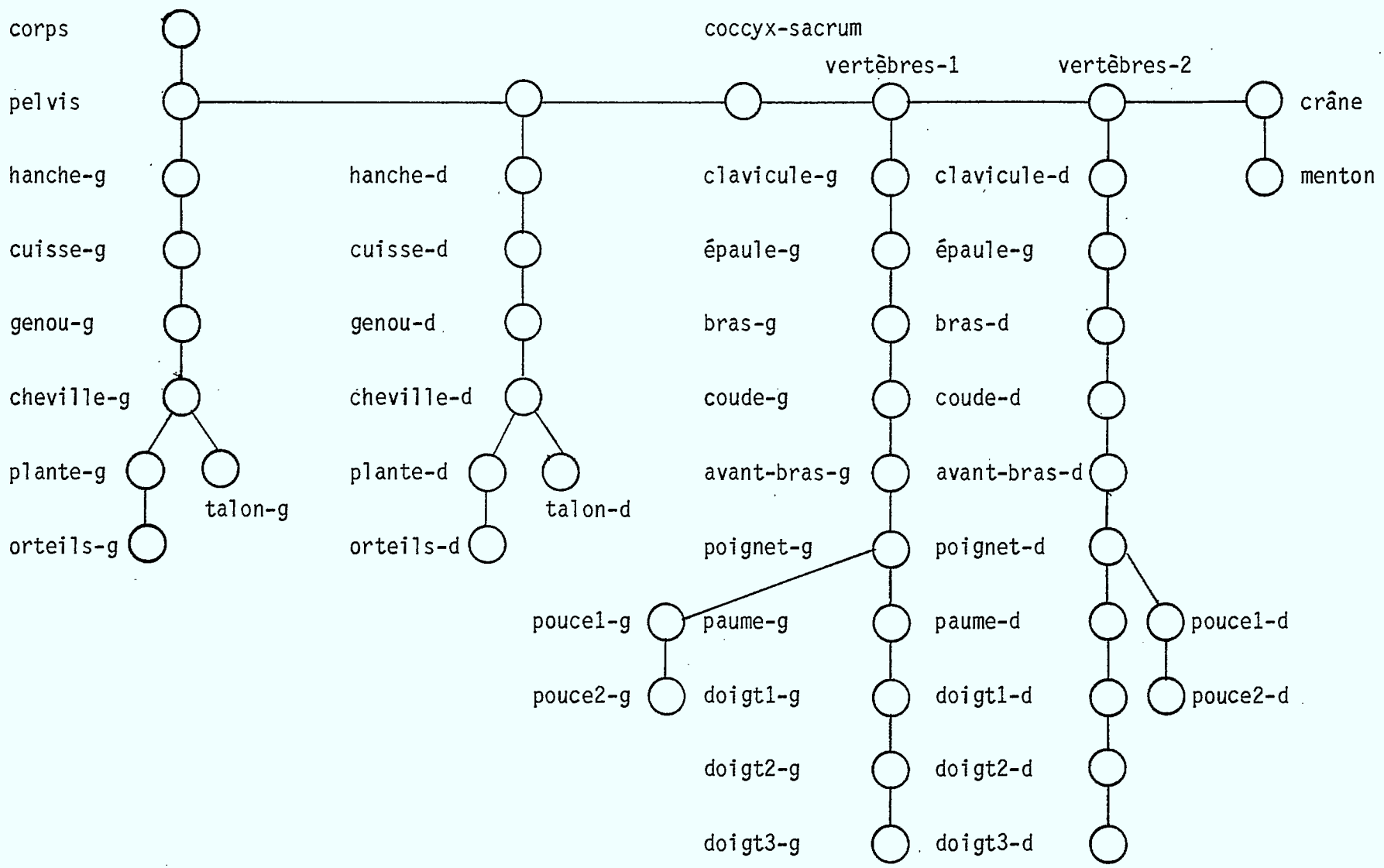


Figure III-2: Arbre binaire de l'hiérarchie des joints du squelette

III-1-4 Les primitives cinématiques

Il est connu que tout mouvement de l'être humain, en particulier, et de l'animal vertébré, en général, est simplement le résultat des rotations de joints. Cinématiquement parlant, pour produire un mouvement du corps humain il suffit donc d'appliquer une combinaison de rotations appropriées aux joints choisis. Le fait d'appliquer une rotation à un joint se traduit par une transforamtion du système de coordonnées locales du composant correspondant au joint, c'est-à-dire le composant qui est relié à son parent par l'intermédiaire du joint considéré. Pour fixer les idées, considérer une rotation autour de la hanche. Cette rotation transforme le système de coordonnées locales du fémur et modifie par ce fait même la position de l'origine du système de coordonnées locales de la jambe dans le système de coordonnées globales. Cependant, le système de coordonnées locales de la jambe en tant que tel demeure inchangé. Par conséquent, dans une marche en défilé militaire, par exemple, pour lever un membre inférieur correctement, il est nécessaire d'appliquer la même transformation à la fois au fémur, à la jambe et au pied. Une telle opération constitue une primitive cinématique intéressante pour le squelette humain. Dans le but de produire des séquences d'images pour l'animation de personnages humains, il est d'une utilité indéniable de définir un ensemble minimal de primitives cinématiques suffisamment riche pour construire tous les mouvements désirés. En ce qui concerne les marches humaines, deux primitives cinématiques suffisent: la flexion et le pivot [2]. Le pivot décrit la rotation autour d'un joint de support (weight-bearing joint). Une opération de pivot d'un joint k, qui est la racine du sous-arbre A(k), ne transforme pas les joints du sous-arbre A(k) tandis que tous les joints dans $N \setminus A(k)$, N étant l'ensemble des joints du squelette, sont transformés par une même rotation. La flexion décrit la rotation autour d'un joint de suspension (non-weight-bearing

joint). Dans une opération de flexion d'un joint k, les joints du sous-arbre A (k) sont transformés par une même matrice de rotation, tandis que les joints de N\A (k) ne le sont pas. La mise en oeuvre des opérations de pivot et de flexion nécessite donc le parcours de la structure arborescente des joints du squelette. Les différences sémantiques entre le pivot et la flexion peuvent être mises en évidence par les deux cas suivants:

- l'accroupissement du corps en pliant les genous: le corps pivote d'abord vers l'avant autour des chevilles, ensuite vers l'arrière autour des genous et enfin vers l'avant autour des hanches; les pieds restent évidemment fixes au sol.

- l'action de retirer les jambes par un corps suspendu dans l'air: une flexion de la hanche vers l'avant suivi d'une flexion du genou vers l'arrière.

III-2 Coordonnateur de mouvements

L'objectif d'un logiciel pour l'animation de personnages humains qui nous intéresse ici est de produire des séquences d'images dont la visualisation donne l'apparence des mouvements désirés. La façon la plus rudimentaire et archaïque de production est d'utiliser un éditeur graphique pour créer la séquence animée image par image et créer toute image pièce par pièce possiblement en utilisant des transformations appliquées aux pièces. En procédant ainsi on apperçoit vite que d'une image à la suivante les changements obéissent à des règles plus ou moins difficiles à découvrir. L'étude de la marche humaine coutumière révèle deux primitives cinématiques de base: le pivot et la flexion [2]. En utilisant ces primitives il est possible de construire une procédure, appelée programme moteur (motor program), dont l'exécution ou l'interprétation produit les modifications d'image en image

dans la séquence de marche. La réalisation des programmes moteurs de ce genre est sûrement une étape importante dans la conception des logiciels d'animation.

Idéalement, un programme moteur pour la marche doit être en mesure d'accomoder les différentes vitesses et cadances (pace, strike) de marche sur un terrain plat horizontal ou incliné. On peut concevoir un ensemble de programmes moteurs pour plusieurs classes de mouvements, tâches ou habilités (skills) telles que la marche, la montée et descente d'escalier, la course, le saut, etc. Une fois cet ensemble de programmes moteurs ou ce répertoire de mouvements ou d'habiletés est implanté, on peut aborder le problème de coordonner les mouvements pour réaliser une action telle que "courir vers la balle de soccer et la shooter" [2]. L'étape ultime serait typiquement de planifier les actions des onze joueurs de chacune des deux équipes de soccer, de l'arbitre et les deux juges de ligne pour animer un match de soccer. Les problèmes de coordination des mouvements pour réaliser une action et de planification des actions pour construire une scène sont très complexes et demandent beaucoup d'efforts et d'initiatives en recherche. Pour bien comprendre et évaluer la complexité de ces problèmes, il est nécessaire de trouver les méthodes pour concevoir des programmes moteurs mentionnés précédemment. Zeltzer a proposé une approche intéressante afin de réaliser le programme moteur pour l'animation de la marche humaine coutumière. Il s'agit d'une architecture de système logiciel pour étudier les mécanismes de coordination de mouvements de l'être humain avec des possibilités d'extension aux cas d'un animal vertébré ou d'un système artificiel de locomotion. Il est à remarquer qu'un tel système logiciel n'est qu'un outil de simulation pour vérifier le bien fondé des algorithmes de coordination utilisant la décomposition hiérarchique des commandes. Étant donné qu'un programme moteur est décomposé en composants, appelés <u>programmes moteurs locaux</u> (local motor

programs), ayant un certain degré d'autonomie, fonctionnant en parallèle et ayant besoin d'être synchronisés et coordonnés, la simulation vue sous l'angle de processus parallèles coopératifs [3] semble être l'architecture qui répond le mieux aux besoins considérés. Vu sous cet angle un mouvement d'un type donné constitue une tâche et le simulateur n'est rien autre qu'un contrôleur de tâches. De plus, une tâche peut être réalisée par plusieurs sous-tâches parallèles coopératives. Chacune des sous-tâches n'est rien d'autre que l'exécution d'une procédure qui est un programme moteur local. On retrouve donc la notion de processus qui est l'élément clef des systèmes d'exploitation des ordinateurs. Cela veut dire que la coordination de mouvements présente toutes les difficultés de réalisation et de mise-en-oeuvre d'un système d'exploitation pour le traitement en temps réel.

En animation du squelette un processus n'effectue que la rotation d'un certain sous-ensemble de joints. Le temps simulé est intrinséquement l'image ou la trame courante. Le phénomène d'interblocage de processus se traduit simplement pour le fait qu'un joint est commandé simultanément par plus d'un processus. Il est donc très facile de détecter un interblocage, si tout programme moteur (local) possède une liste de joints requis. De plus, l'activation d'un processus peut être contrôlée par une condition basée sur l'état des joints ou l'interaction entre le squelette et l'environnement. La completion d'un processus est également contrôlée par une condition spécifiée. Sous ces conditions, la coordination des mouvements cycliques ou des habiletés routinières (closed skills) peut être simulée d'une manière fort simple et très élégante [2]. Elle est basée sur une interprétation sémantique d'une structure de données générique. La structure de données est simplement un ensemble ordonné de listes linéaires. Les éléments à l'intérieur d'une même liste linéaire représentent des processus parallèles ou des programmes moteurs (locaux) fonctionnant en

simultanéïté. L'ordre entre les listes indique la succession des phases de mouvements. Il est à remarquer qu'un élément d'une liste peut pointer vers une ensemble ordonné de listes linéaires. Cette forme de récursivité de l'interprétation sémantique permet de décrire et simuler des mouvements forts complexes. L'utilisation de cette technique pour simuler la marche humaine coutumière est l'objet de la section suivante.

III-3 Le contrôleur de marche

III-3-1 Le contexte d'une marche

Avant de formuler un modèle pour le contrôleur de marche, il est nécessaire d'examiner les éléments qui doivent entrer un ligne de compte dans l'étude de la locomotion d'un être humain. Tous ces éléments clefs constituent le "contexte" d'une marche humaine. Le contexte d'une marche humaine doit contenir au moins deux éléments clefs majeurs: le corps humain et le terrain sur lequel le corps humain se déplace.

En ce qui concerne le corps humain on peut adopter le modèle du squelette examiné dans la section III-1 pour étudier les principes de coordination des mouvements humains. Il est bien entendu qu'un tel modèle ne peut représenter qu'un sous-ensemble des caractéristiques extrêmement variées du corps humain. Une autre remarque importante à indiquer est que la description du squelette comporte quelques soixante-dix degrés de liberté dont vingt-deux sont mis en jeu dans une marche. En outre, le centre de gravité du squelette change continuellement de position par rapport même aux systèmes de coordonnées locales des composants d'une manière non négligeable au cours de la marche. Ce fait rend difficile (en terme de complexité de calcul) l'application du critère simple de stabilité statique selon lequel la projection du

centre de gravité doit être contenue dans la fermeture convexe de la projection du squelette sur un plan horizontal.

Du côté de l'élément terrrain, le cas le plus simple est une "plaine", c'est-à-dire un terrain plat horizontal ou très légèrement incliné. Les cas plus compliqués sont: terrain incliné, terrain accidenté, etc. On peut également envisager un environnement multi-planchers avec des escaliers reliant les planchers.

III-3-2 Le contrôleur de démarche

L'objet de cette section est la marche du squelette humain sur un terrain non-nécessairement planaire mais ne comportant pas d'obstacles, c'est-à-dire un terrain dit non-accidenté. Le squelette n'est pas muni de mécanisme de vision, ni de mécanisme de balancement sophistiqué. Cela revient à dire que l'interaction entre le squelette et l'environnement se résume simplement à la détection de contacts entre les composants du squelette (les pieds au niveau des talons, des plantes et des orteils par exemple) et la surface du terrain. D'autre part, l'emphase est mise sur la coordination des programmes moteurs locaux sans entrer dans la dynamique de ces derniers.

La locomotion humaine est une activité bien étudiée [4]. Les allures des démarches (gait patterns) en locomotion normale sont assez bien connues. En se basant sur des données disponibles Zeltzer a conçu un contrôleur de démarche qui régularise les activités de 22 degrés de liberté du squelette au niveau des chevilles, des genous, des hanches, du pelvis, etc. [3].

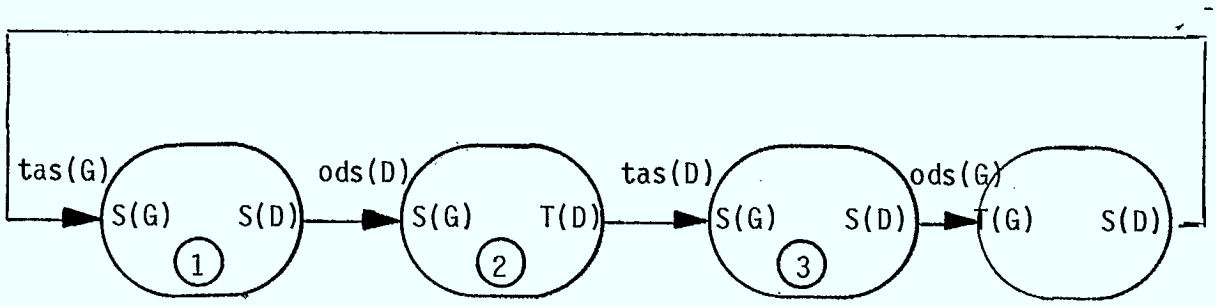
La première question à répondre concerne la façon de décomposer la marche en plusieurs programmes moteurs locaux (PML) relativement

autonomes et fonctionnant en simultanéité. Un examen détaillé d'un cycle de marche de promenade révèle que chaque jambe (par abus de langage nous entendons par jambe un membre inférieur du corps humain qui s'étend de la hanche jusqu'au pied) passe successivement par une phase de support (stance) et une phase de transfert (swing). Le pied de la jambe en support reste toujours en contact au sol durant la phase de support en question. La jambe supporte tout le poids du corps. Du point de vue de stabilité statique, il faut que la projection du centre de gravité tombe à l'intérieur de la fermeture convexe de la projection du (des) pied(s) de support sur un plan horizontal. Une phase de transfert correspond au mouvement d'une jambe au dessus du sol d'une distance horizontale égale à la longueur d'un pas. En parallèle avec les mouvements des jambes il y a la rotation du pelvis et les mouvements des bras (encore par abus du langage nous entendons par bras un membre supérieur du corps humain qui s'étend de l'épaule jusqu'à la main). Le bras de gauche, par exemple, est en mouvement vers l'avant pendant que la jambe de droite est en transfert et puis vers l'arrière quand cette jambe passe à la phase de support. Par conséquent, la marche de promenade de l'être humain peut être réalisée au moyen de cinq automates à états finis qui exécutent des PML en parallèle. Il y a un PML pour chacun des cas suivants:

- la phase de support d'une jambe,
- la phase de transfert d'une jambe,
- le transfert vers l'avant d'un bras et
- le transfert vers l'arrière d'un bras.

Le contrôleur de démarche lui-même peut aussi être modélisé par un automate à états finis. Chaque état du contrôleur représente un

ensemble de PMLs qui se déroulent concuremment. Une transition d'état du contrôleur se produit quand un PML signale sa complexion. En désignant par S(.) et T(.) les phases de support et de transfert d'une jambe D (droite) ou G (gauche) et en faisant abstraction des mouvements des bras (la rotation du pelvis est implicitement prise en ligne de compte dans le PML de la jambe de support) on obtient la représentation simplifiée du contrôleur de démarche pour une marche de promenade illustrée à la figure III-3. Noter que la phase de support de la jambe G commence quand le talon G touche au sol (le signal ou l'évènement tas(G)) au début de l'état (1) et se termine quand les orteils du même pied sont décollés du sol (le signal ou l'évènement ods(G)) à la fin de l'état (3) . Le signal ods(G) déclenche la transition d'état. La jambe gauche passe alors à la phase de transfert qui se termine plus tard quand le talon du pied G touche à nouveau au sol à la fin de l'état (4) . C'est ainsi qu'un pas de la jambe G est complété. On peut observer qu'un pas semblable de la jambe D commence avec le début de l'état (3) du présent cycle et se termine avec la fin de l'état (2) du cycle suivant.



tas(x) signale la touchée du talon du pied "x" au sol
ods (x) signale le décollage des orteils du pied "x"

Figure III-3: Représentation simplifiée de démarche cyclique

En poursuivant l'étude de plus en plus détaillée de la marche de promenade selon le schéma de la démarche cyclique illustrée à la figure III-3,on cherche à décomposer davantage les phases de support et de transfert, c'est-à-dire à déterminer les états et les transitions d'état des PML correspondants. Pour cela on peut considérer que chaque état d'un PML désigne une période durant laquelle chacun des degrés de liberté contrôlés par le PML effectue une activité "constante" sous forme d'un mouvement élémentaire uniforme. Une transition d'état d'un PML a lieu dans les circonstances suivantes:

- la rotation d'un ou plusieurs degré(s) de liberté change de sens ou de vitesse,
- un événement particulier est produit (le talon d'un pied touche au sol, les orteils d'un pied décollent du sol),
- la rotation d'un joint autour d'un axe atteint un angle cible,
- un intervalle de temps spécifié est écoulé.

Noter qu'une transition d'état d'un PML joue le rôle d'une trame ou image clef dans une séquence animée. Ce qui se passe entre deux trames clefs consécutives peut être obtenu par l'interpolation conventionnelle. Cela correspond au concept d'activité constante ou mouvement élémentaire uniforme des joints contrôlés par le PML à un état déterminé.

III-3-3 Les phases d'un cycle de marche

La phase de support d'une jambe constitue un PML à 5 états. Le PML de la phase de support de la jambe G est représenté à la figure

III-4. Une brève description des états du PML est donnée ci-après:

- S1 (G): cet état commence quand le talon du pied G touche au sol (i.e., avec l'événement tas(G)). Le squelette pivote autour du talon jusqu'à la touchée du sol des orteils (i.e., l'événement oas(G)).

- S2 (G): le squelette pivote autour de la cheville de la jambe G jusqu'à ce que la jambe devient presque verticale (au moment où les orteils du pied D se décollent du sol, i.e., l'événement ods(D)).

- S3 (G): le squelette continue à pivoter autour de la cheville G jusqu'à la limite de flexion de ce dernier, où le talon G commence à se décoller du sol (i.e., l'événement tds (G)). [Parallèlement à cela, la jambe D est en rotation libre vers l'avant].

- S4 (G): le squelette pivote autour de l'extrémité de la plante du pied G et se prépare pour la touchée au sol du talon D. L'événement tas(D) marque la fin de cet état.

- S5 (G): dans cet état la jambe G trainée en arrière est tirée vers l'avant au niveau de la hanche. Elle forme une chaîne fermée avec la jambe D, qui se trouve en état S1(D) et puis S2(D), car les deux pieds restent collés au sol. L'événement ods(G) marque la fin de cet état.

La phase de transfert d'une jambe est un PML à 3 états. Le PML de la phase de transfert de la jambe G est représenté à la figure

III-5. Une brève description des états de ce PML se trouve ci-après:

- T1 (G): les mouvements de flexion de la hanche G vers l'avant et du genou G vers le haut se continuent jusqu'à la limite de flexion (maximale) du genou G (i.e., événement ms(G)).

- T2 (G): le mouvement d'extension du genou G se déroule en même temps que le mouvement de flexion de la hanche G jusqu'à la limite de flexion (maximale) de la hanche G (i.e., événement mx(G)).

- T3 (G): le mouvement d'extension du genou G se continue jusqu'à la limite maximale; la jambe G demeure ensuite immobile jusqu'à la touchée au sol du talon du pied G (i.e., événement tas(G)).

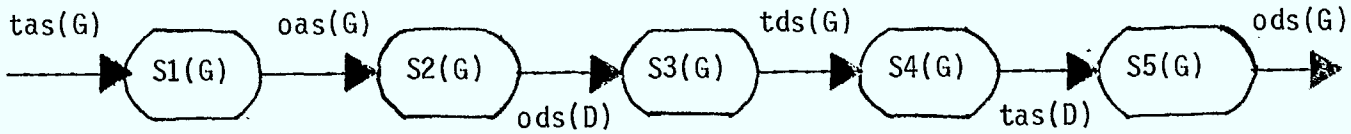


Figure III-4: PLM de la phase de support de la jambe G

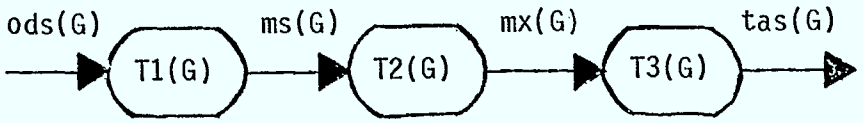


Figure III-5: PLM de la phase de transfert de la jambe G

III-4 La régulation des joints

En considérant le début et la fin d'un état d'un PML comme deux images clefs consécutives définies relativement à l'expression du mouvement d'une partie (i.e., une combinaison de plusieurs composants connectés) du squelette, l'exécution d'un PML dans un état considéré équivaut à la génération des images intermédiaires entre deux images clefs. Par conséquent, pour chaque état d'un PML l'animateur construit une liste d'angles cibles pour l'ensemble des joints contrôlés par le PML. Les angles cibles sont considérés comme points de consigne quand les états du contrôleur de démarche sont interprétés comme des servomécanismes. On peut donc faire appel à des techniques de régulation de position et de vitesse. La mise en oeuvre de ces techniques de régulation mène à celle des schémas d'approximation, e.g., approximation linéaire par morceaux, approximation par splines, approximation trigonométrique, etc. L'application de ces techniques à des chaînes ouvertes est banale. Dans le cas des chaînes fermées, certaines approches de résolution de mouvement peuvent être envisagées. En outre, dans le cas d'une marche sur un terrain non planaire il faut aussi s'adapter aux variations locales du terrain. Il est possible de procéder par des ajustements locaux de positions ou par traçage de trajectoires pour les composants du squelette en fonction de la surface du terrain.

IV MARCHE D'UN VÉHICULE MULTIPODE

Dans le cas d'un véhicule multipode (quadrupède, hexapode, etc...) la structuration du problème de planification et de génération de mouvements peut être effectuée de manière similaire à celle présentée dans les paragraphes précédents, pour la marche humaine. En effet, un examen détaillé du problème [1] révèle l'existence de trois niveaux hiérarchiques: le plus élevé concerne la description et la planification des objectifs de déplacement, le niveau intermédiaire concerne la planification proprement dite des mouvements et leur coordination tandis que le niveau inférieur concerne le calcul et l'exécution de ces mouvements.

Comme dans le cas de la marche humaine, seuls les deux niveaux inférieurs seront présentés dans cet exposé, mais au préalable il est nécessaire de décrire la constitution mécanique du véhicule considéré, en ce qui concerne les types de joints, leurs organisations en squelette, leurs limitations cimématiques, etc.

IV-1 Structure du véhicule multipode

La supériorité d'un véhicule multipode par rapport à un véhicule à roues ou à traction réside dans son adaptabilité à un éventail beaucoup plus vaste de terrains. Néanmoins, des études mécaniques de ce type de véhicule [2, 3] montrent que pour tirer un avantage maximal de cette adaptabilité et découpler le plus possible le déplacement des accidents de terrain, chaque membre du véhicule doit posséder un minimum de trois degrés de liberté. En conséquence un véhicule quadrupède consiste en 12 degrés de liberté, un hexapode en 18 degrés de liberté.

En ce qui concerne le nombre de membres de support, un nombre minimum de quatre est nécessaire pour assurer la stabilité statique du

véhicule. Une augmentation du nombre de membres permet d'accroître les conditions de stabilité mais cet accroissement est atteint au détriment de la simplicité d'opération du véhicule. Le choix de six membres de support est souvent adopté en guise de compromis entre stabilité et simplicité. Cependant les notions introduites sont généralisables sans problème aux cas d'un nombre de membres plus élevé.

Le véhicule considéré dans la suite, et illustré à la figure IV-1, est constitué d'une plate-forme sur laquelle sont fixées quatre membres de support identiques comportant chacun trois degrés de liberté. On supposera que la forme exacte de la plate-forme ainsi que la nature des fixations des quatre membres ont été choisies de façon adéquate afin de ne pas gêner l'opération des degrés de liberté de chaque membre.

D'autre part des études poussées concernant le choix de la structure mécanique de chaque membre [2, 4] montrent que pour réduire l'énergie dépensée lors de chaque déplacement élémentaire ainsi que pour maximiser l'espace atteignable par l'extrémité de chaque membre, la configuration souhaitable est une configuration de type "pantographe" telle qu'illustrée à la figure IV-2. Une telle structure présente de plus l'avantage de permettre un déplacement dans un repère cartésien. Trois actuateurs linéaires (joints de translation) agissant aux points R et Q, commandent le mouvement du membre. L'extrémité P du membre subi un déplacement dont l'ampleur est proportionnelle au déplacement des joints en R et Q.

IV-2 Contrôleur de tâche

Le contrôleur de tâche constitue l'élément au niveau duquel la planification et la coordination du mouvement sont effectuées. Les entrées d'un tel contrôleur doivent consister en la spécification d'une

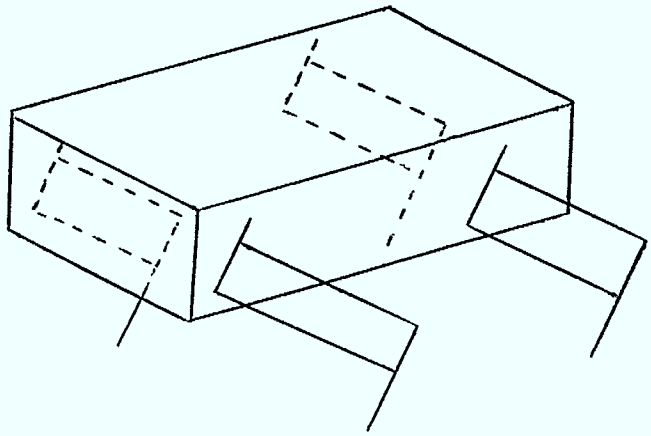
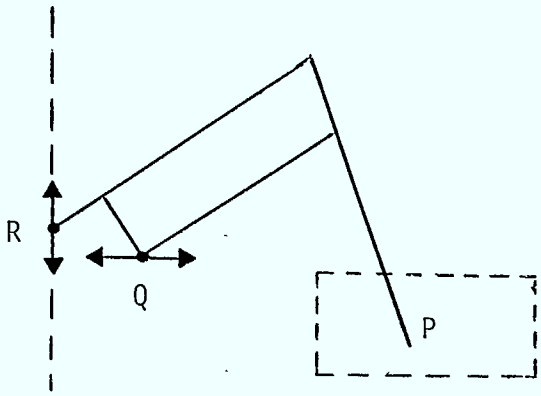
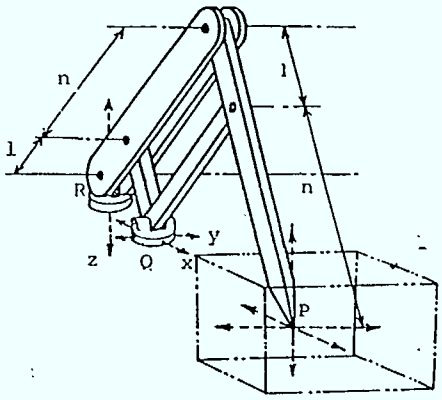


Figure IV-1: Modèle du véhicule quadrupède



(a)
Principe du pantographe



(b)
Membre de support

Figure IV-2: Structure mécanique d'un membre de support

tâche de déplacement (station initiale et station finale du véhicule multipode) ainsi qu'en une description adéquate de l'environnement (terrain). Quant à la sortie du contrôleur, elle doit consister en la description d'un réseau de mouvements élémentaires (certains simultanés, d'autres séquencés) affectant les différents membres du véhicule.

Dans ces conditions, il est possible de subdiviser le contrôleur de tâche en trois niveaux distincts:

Niveau 1: établissement de la trajectoire globale de déplacement. Il s'agit, étant donnés les objectifs de déplacement (départ et arrivée) ainsi que la description du terrain, de résoudre le problème général de navigation du véhicule afin de déterminer une trajectoire "réalisable" de déplacement. Par trajectoire réalisable on entend une trajectoire qui, moyennant certaines modifications locales éventuelles, assurera un passage du véhicule de la station initiale à la station finale.

Niveau 2: contrôle de déplacement du véhicule. Il s'agit d'une part part d'ajuster localement la trajectoire du centre de gravité du véhicule en fonction des informations de terrain et d'autre part d'établir et de coordonner les mouvements élémentaires devant affecter les différents membres du véhicule. Pour cette dernière tâche, seuls sont prises en compte des considérations de réalisabilité cinématique et de stabilité statique. Les problèmes d'évitement de collision et leurs implications au niveau des mouvements des membres du véhicule sont pris en compte au niveau 3.

Niveau 3: régulation du mouvement du véhicule. Il s'agit, à ce niveau, de contrôler la hauteur générale du véhicule, sa posture générale ainsi que de détecter des collisions éventuelles avec l'environnement et de modifier en conséquence les mouvements élémentaires du véhicule.

La figure IV-3 illustre l'organisation générale du contrôleur de tâche.

En ce qui concerne le niveau 1, celui-ci n'a pas fait l'objet d'investigation dans le présent travail. Dans la suite, on supposera donc donnée la trajectoire globale de déplacement de la station initiale à la station finale. On supposera également que les modifications locales de trajectoire ont été opérées de manière adéquate et, par conséquent, que la trajectoire locale spécifiée correspond au parcours effectif du centre de gravité du véhicule. Les sections qui suivent concernent donc la descripton du contrôleur de déplacement du véhicule (Niveau 2) ainsi que du régulateur de mouvement (Niveau 3).

IV-3 Contrôleur de déplacement

IV-3-1 Définition et formalisme de base

a) Modèle du véhicule

À partir de la structure du véhicule définie au paragraphe IV-1, on peut modéliser le quadrupède de la façon illustrée à la figure IV-4. L'origine du système de coordonnées lié au véhicule est prise au centre de gravité de ce dernier; l'axe des x est confondu avec l'axe

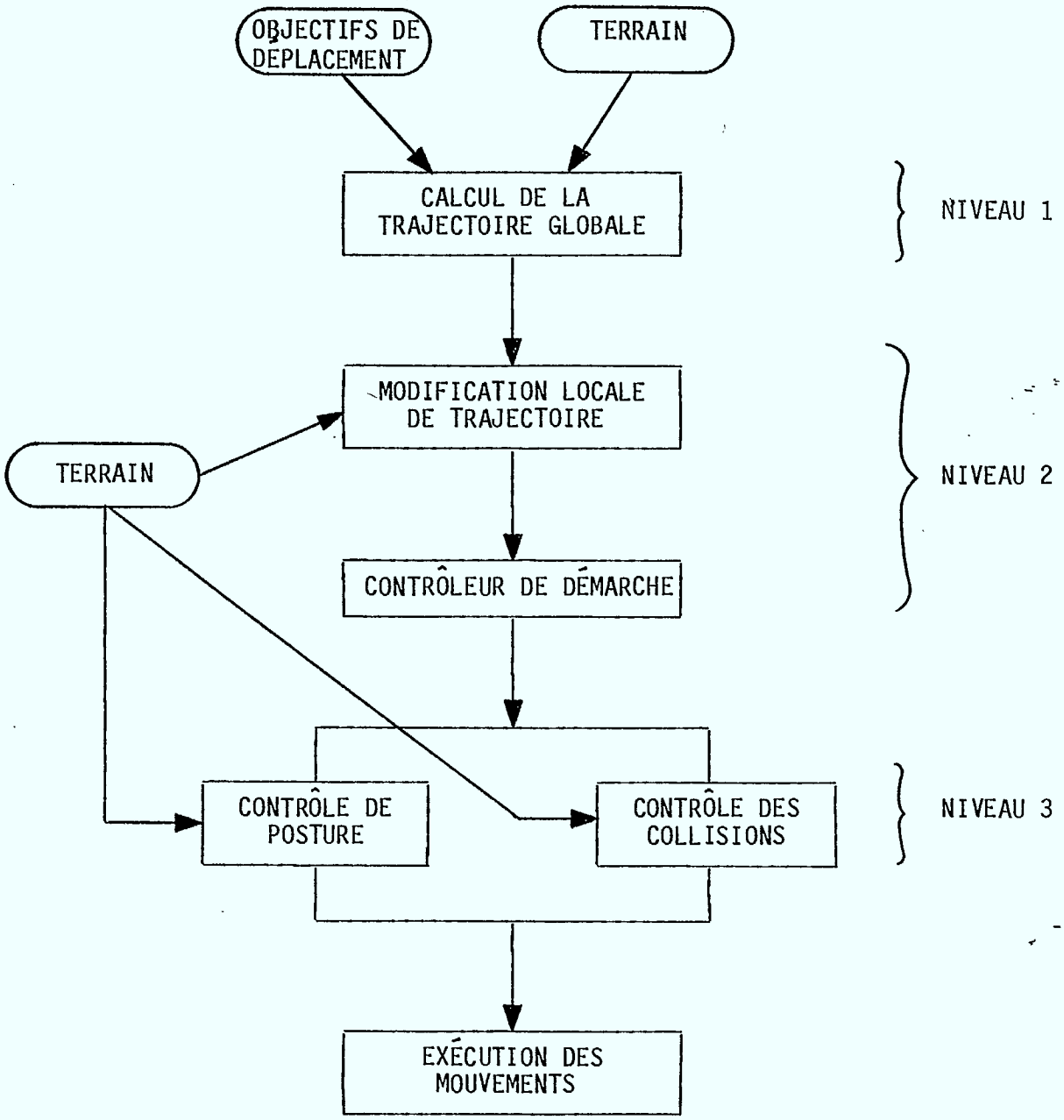


Figure IV-3: Contrôleur de tâches

de symétrie longitudinal du véhicule. Du fait de la structure pantographique des membres, à chacun de ceux-ci est associé un espace accessible de dimensions (x*, y* et z*), le point accessible le plus proche de l'origine ayant pour coordonnées ($\pm x_0$, $\pm y_0$, $\pm z_0$). De plus, le choix d'une telle structure impose de conserver, le plate-forme horizontale tout au long du déplacement.

b) Modèle de terrains

On peut distinguer les quatre types suivants, illustrés sur la figure IV-5.

- terrain de type 0: il s'agit d'un terrain sans accident mais non nécessairement plat sur lequel le déplacement se fait sans rencontrer d'obstacle.

- terrain de type H: il s'agit d'un terrain présentant des accidents de type "dépression" seulement.

- terrain P: il s'agit d'un terrain présentant des accidents de type "protubérance" seulement.

- terrain HP: il s'agit d'une combinaison de terrains de type H et P.

c) Notion de démarche cyclique

Étant donné le modèle de quadrupède précédemment décrit, ou définit l'état du quadrupède à l'instant t comme le vecteur à 4 composantes $y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)]$ dans lequel:

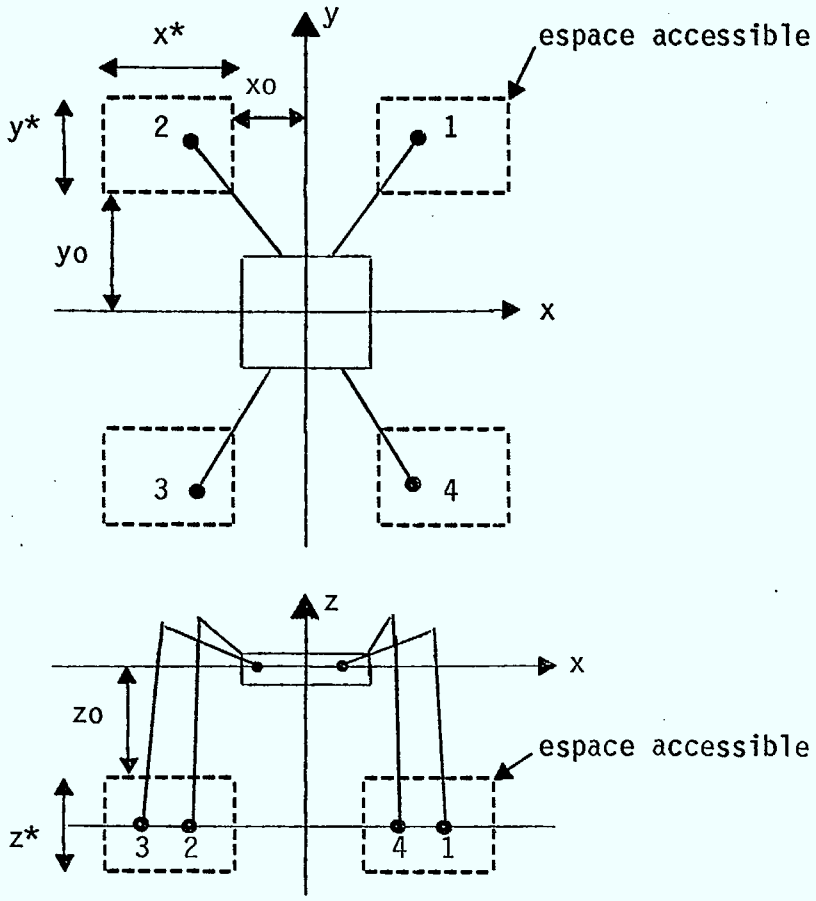


Figure IV-4: Modèle du véhicule quadrupède

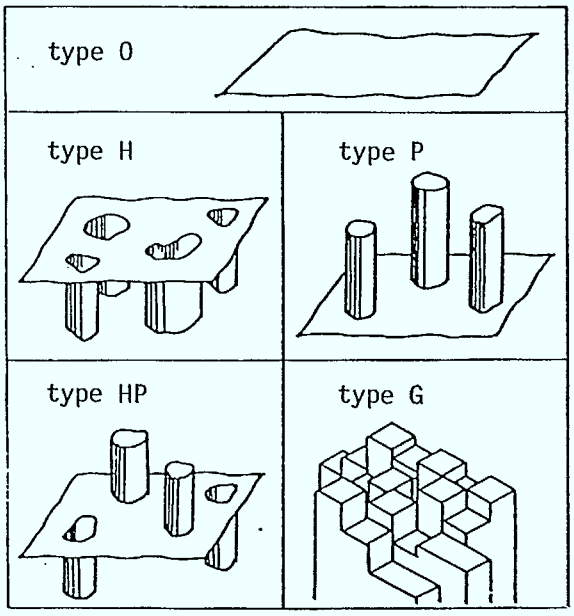


Figure IV-5: Modèles de terrain

$y_i(t)$ = 1 si le membre i est en phase de support (en contact avec le sol)
0 si le membre i est en phase de transfert (décollé du sol)

À chaque état du quadrupède est associé une configuration de support constituée du polygone convexe reliant les extrémités des membres en phase de support.

On dira que le véhicule se déplace suivant une démarche cyclique lorsque la série temporelle des états y(t), ou des configurations de support, constitue une série périodique. La figure IV-6 illustre des configurations de supports possibles pour la démarche cyclique d'un quadrupède. À chaque configuration est associé le déplacement correspondant du centre de gravité du véhicule.

La marge de stabilité S de la démarche cyclique est défini comme la plus petite distance séparant un point de la trajectoire du centre de gravité de la limite de la configuration de support qui lui correspond (voir la figure IV-6).

Pour chaque membre, le facteur de cycle est défini comme la fraction d'un cycle pendant laquelle le membre reste en phase de support. En supposant que tous les membres possèdent le même facteur de cycle β et en supposant un terrain sans obstacle (type 0), la recherche d'une démarche qui maximise le déplacement du centre de gravité par cycle tout en respectant la marge de stabilité S conduit à la notion de démarche en vague [6]. Une démarche en vague est caractérisée par une série de déplacements en forme de "vague-avant" pour tous les membres situés sur un même côté de l'axe de déplacement du véhicule. Les phases de transfert relatives à deux membres symétriques par rapport à l'axe de déplacement sont alors toujours séparés par un demi-cycle. La

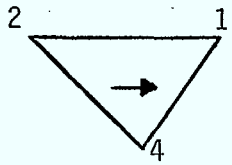
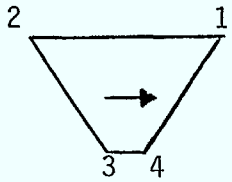
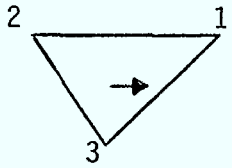
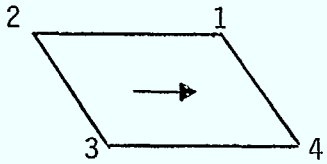
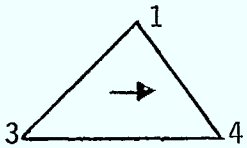
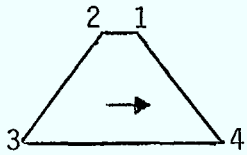
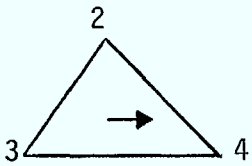
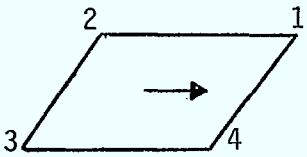
	TYPE DE PHASE	MEMBRE DE SUPPORT	MEMBRE EN TRANSFERT
	Transfert	1,2,4	3
	Support	1,2,3,4	-
	Transfert	1,2,3	4
	Support	1,2,3,4	-
	Transfert	1,3,4	2
	Support	1,2,3,4	-
	Transfert	2,3,4	1
	Support	1,2,3,4	-

Figure IV-6: Configurations de support pour une démarche cyclique

démarche cyclique illustrée à la figure IV-6 constitue une démarche en vague, la séquence des membres en transfert étant alors:

...3, 4, 2, 1...

Remarquons enfin que, quelle que soit le type de démarche considéré, l'axe de déplacement n'est pas nécessairement confondu avec l'axe longitudinal du véhicule. On parlera alors de démarche en crabe, celle-ci étant caractérisée par l'angle α formé par l'axe de déplacement et l'axe longitudinal du véhicule.

IV-3-2 Contrôleur de démarche

Comme indiqué précédemment, au niveau du contrôleur de démarche, on suppose que la trajectoire globale de déplacement ainsi que son ajustement local ont déjà été effectués. D'autre part, on suppose que la démarche en crabe constitue le moyen fondamental de déplacement. Conformément à l'illustration de la figure IV-7, ceci signifie que l'axe longitudinal demeure en permanence parallèle à la trajectoire globale, même dans le cas où la trajectoire locale effective dévie de cette dernière.

Le rôle du contrôleur de démarche consiste alors à calculer tous les paramètres d'évolution de la démarche en fonction de la trajectoire locale, des caractéristiques cinématique du véhicule et de la configuration locale du terrain. Il s'agit essentiellement à partir de la position courante du véhicule, de déterminer les membres devant rester en phase de support et le membre devant entrer en phase de transfert. Pour ce dernier, il s'agit également de calculer la prochaine position de support. Finalement, il s'agit de calculer le déplacement du centre de gravité du véhicule au cours de la phase de

transfert et au cours de la phase de support consécutive. Deux objectifs doivent être poursuivis lors de ces calculs:

(1) dans la mesure où la nature locale du terrain ainsi que les contraintes de stabilité le permettent, le véhicule doit se déplacer suivant un démarche en vague (démarche standard), de façon à préserver une efficacité de déplacement maximum.

(2) lorsqu'une démarche en vague n'est plus possible, une démarche libre doit être adoptée afin de pouvoir s'accomoder aux irrégularités du terrain. Cette démarche libre doit tenter de maximiser le déplacement du centre de gravité du véhicule tout en préservant sa stabilité statique.

a) Démarche standard

Comme mentionné précédemment, la démarche cyclique d'efficacité maximum est la démarche en vague qui, pour un quadrupède se déplaçant dans la direction de son axe longitudinal, consiste en la séquence de membres de transfert: 3, 4, 1, 2.

Cette séquence peut en général être maintenue lorsque la direction du déplacement forme un angle α avec l'axe longitudinal du véhicule (démarche en crabe).

On suppose en général [4] que les supports des trajectoires de transfert des quatre membres sont symétriques par rapport au centre de gravité du véhicule et qu'ils passent toujours par le centre des régions accessibles correspondantes. D'autre part, comme illustré sur la figure IV-8, lorsque l'angle α dépasse une certaine valeur critique, si l'on désire éviter que la trajectoire de transfert de certains membres ne croise l'axe de déplacement, on doit changer de patron de

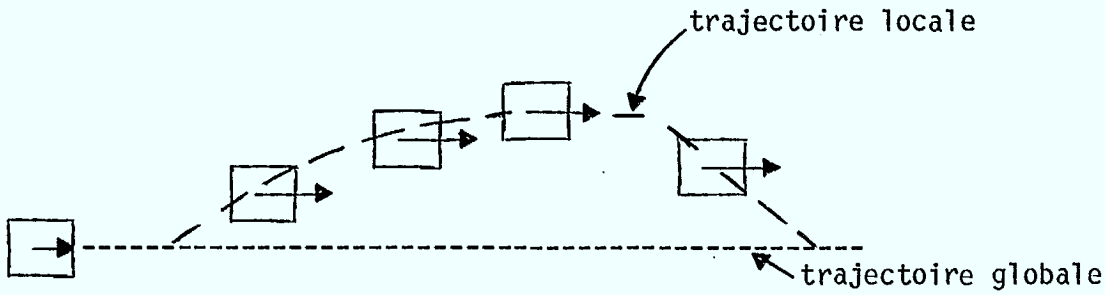


Figure IV-7: Démarche en crabe du véhicule

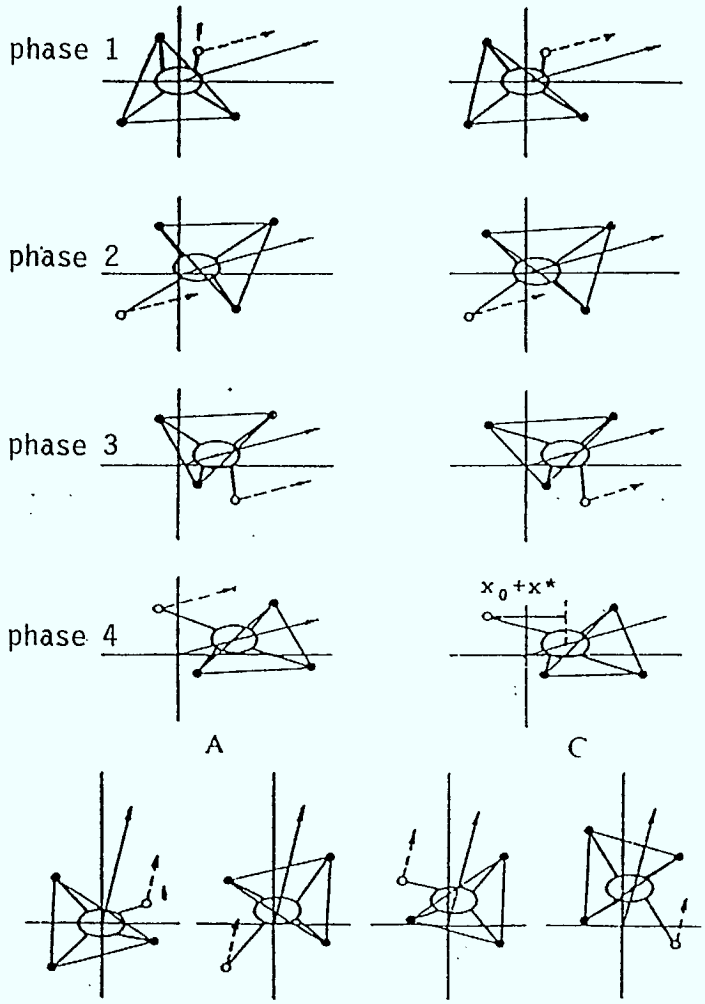


Figure IV-8: Exemples de démarche standard

démarche et choisir une démarche en vague suivant l'axe latéral du véhicule, c'est-à-dire en accord avec la séquence 1, 3, 2, 4.

La figure IV-9 illustre le déplacement relatif des quatre membres d'un véhicule quadrupède au cours d'un cycle démarche standard, sur un terrain de type 0.

b) Démarche libre

Lorsque les conditions locales ne permettent pas la poursuite d'une démarche standard, le véhicule doit adopter une démarche libre et dans ce cas plusieurs étapes de calcul doivent être accomplies à savoir:

- la détermination du prochain membre de transfert. Il s'agit en réalité d'une détermination tentative car, avant de valider un tel choix, il faudra déterminer une position de support réalisable pour ce membre. Dans le cas où aucune position de support ne s'avérerait possible, il faudra alors modifier le choix du membre de transfert.

- la détermination d'une position de support pour le membre de transfert. Il s'agit tout d'abord de calculer la région de recherche de la position de support. En général, cette région consiste en un sous-ensemble de l'espace accessible du membre, ce sous-ensemble étant déterminé à l'aide des contraintes cinématiques du véhicule. Une fois la région de recherche établie, il s'agit de calculer la position de support qui maximise l'efficacité de déplacement.

Dans le cas où aucun membre de transfert n'est possible, un calcul de déplacement vers l'arrière doit être effectué afin de sortir de la situation de blocage. La figure IV-10 illustre toutes les étapes du contrôle de démarche ainsi décrit.

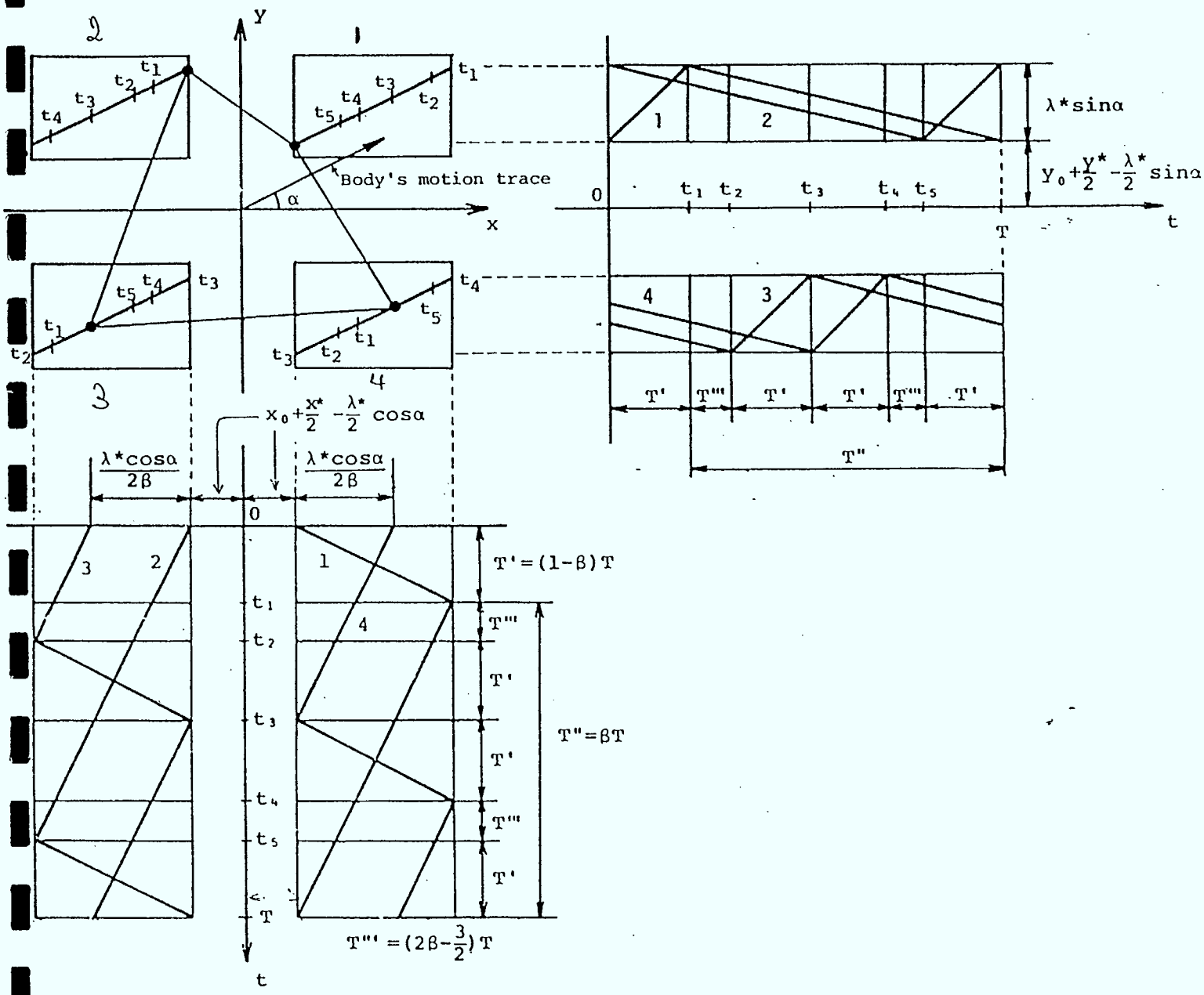


Figure IV-9: Déplacement relatif des membres au cours d'un cycle de démarche standard

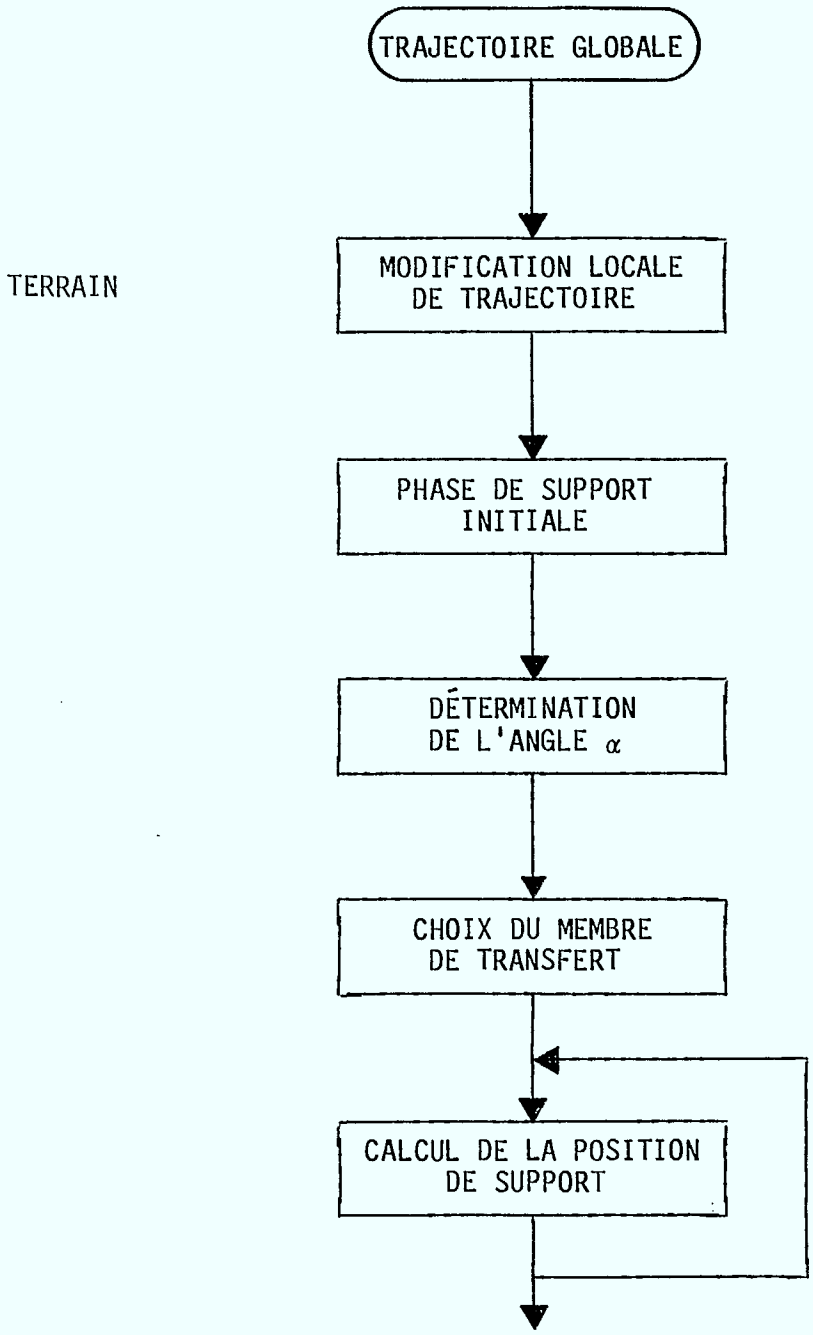


Figure IV-10: Contrôleur de démarche

IV-4 Régulateur de mouvement

Le régulateur de mouvement a pour rôles de contrôler la posture du véhicule au cours du déplacement ainsi que l'ajustement des mouvements du véhicule afin d'éviter les obstacles éventuels.

IV-4-1 Contrôle de posture

Le contrôle de posture se compose essentiellement des opérations suivantes:

- la régulation de la hauteur du véhicule afin de s'adapter aux variations de la nature locale du terrain. À ce niveau, il faut remarquer que la hauteur du véhicule peut avoir un effet sur la classification du terrain. En effet, plus la hauteur du véhicule est élevée et plus un grand nombre de terrain seront considérés comme sans accident (type 0).

- la régulation de l'orientation de la plate-forme du véhicule: étant donnée la structure, de type pantographe, utilisée pour les membres il est impératif que la plate-forme du véhicule soit maintenue horizontale en permanence.

IV-4-2 Évitement de collisions

Après que le contrôleur de démarche ait choisi le membre de transfert ainsi que sa prochaine position de support, le régulateur de mouvement doit examiner le parcours envisagé pour ce membre afin de détecter la présence éventuelle d'un obstacle. Une procédure d'ajustement doit être alors initiée afin que le membre puisse surmonter l'obstacle:

- une fois la collision détectée, reculer le membre de transfert, le soulever d'une hauteur Δz supplémentaire et répéter l'opération de transfert.

- si une collision est toujours présente, rehausser encore le membre Δz. Si ceci n'est plus possible rehausser le centre de gravité du véhicule de Δz et répéter l'opération de transfert.

La figure IV-11 illustre une telle procédure.

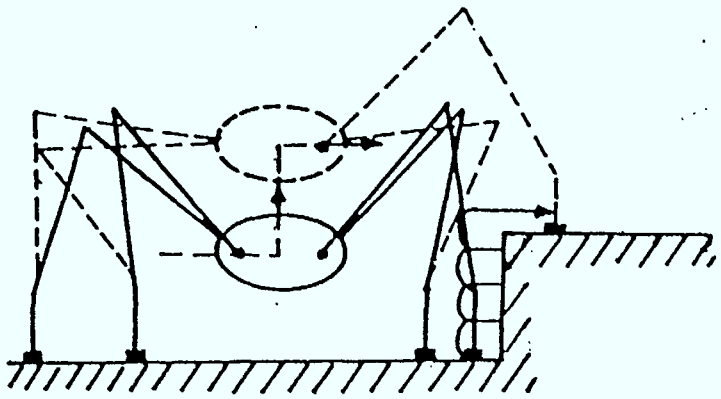


Figure IV-11: Procédure d'évitement de collision

V CONCLUSION

Après une courte introduction à la problématique générale d'une étude des mouvements d'un mécanisme articulé dans le chapitre II, un examen plus détaillé des types de problèmes rencontrés dans l'analyse et la compréhension des mouvements du corps humain est présenté dans le chapitre III tandis que ceux de la conception et de la synthèse des mouvements d'un véhicule multipode artificiel sont considérés dans le chapitre IV.

Le mécanisme de mouvement du corps humain constitue un système biologique de commande moteur extrêmement sophistiqué qui est le résultat des siècles d'évolution. Pour toute fin de modélisation d'un tel système, il est essentiel de procéder par diverses voies d'abstraction. Une abstraction structurale mène au modèle cinématique du squelette. Une abstraction procédurale fournit des algorithmes de résolution de mouvement qui reflètent la régulation des joints au niveau de l'exécution d'un programme moteur local. Une abstraction fonctionnelle fournit des synergies qui sont à la base des programmes moteurs. Elle permet également l'expression du comportement au moyen du jeu de composition de mouvements. Ces voies d'abstraction sont mises en oeuvre dans la décomposition hiérarchique de structure et de commande du corps humain en mouvement. La même approche et les mêmes concepts s'appliquent aux mouvements de plusieurs familles d'animaux. D'autre part, la conception des véhicules multipodes est largement inspirée des organismes vivants et fait appel à la même organistion structurale et la même architecture de système de commandes de ces derniers. Évidemment, le design artificiel est beaucoup moins sophistiqué que le design naturel.

Les considérations précédentes conduit à la définition d'un objectif de recherche qui consiste en la réalisation d'un système

informatique de synthèse de mouvement pour un mécanisme articulé. À court terme l'objectif concret se limite à la marche d'un quadrupède ou un hexapode sur différents types de terrains. En excluant l'aspect de planification globale de trajectoire qui constitue le problème très difficile de navigation, la réalisation de ce système comportera les aspects suivants:

- la caractérisation des entrées du système incluant le modèle du véhicule, le modèle du terrain et la trajectoire globale,

- la détermination locale des ajustements de trajectoire basée sur des règles de recherche heuristique pour éviter des situations de blocage,

- la synthèse locale de mouvement pour la mise en oeuvre d'un démarche appropriée et

- le calcul du mouvement des joints et la synthèse graphique.

RÉFÉRENCES

[1] H. Gray. Anatomy, Descriptive and Surgical, Edition 1901. Philadelphia: Running Press, 1974.

[2] D.L. Zeltzer, "Representation and Control of Three Dimensional Computer - Animated Figures", Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, March 1984.

[3] W.R. Franta. The Process View of Simulation. New York: Elsevier, 1977.

[4] V.T. Inman, H.J. Ralston & F. Todd. Human Walking. Baltimore: Williams & Wilkins, 1980.

[5] D.E., Orin, R.B. McGhee, W.C. Jaswa, "Interactive Computer-Control of a six-legged Vehicule with Optimization of Stability, Terrain Adaptability and Energy" Proc. 1976 IEEE Conf. Decision and Control, Dec. 1976.

[6] K.J. Waldron, V.J. Vohnout, A. Dery, R. McGhee, "Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicule", The International Journal of Robotic Research Vol. 3, No. 2, 1984.

[7] Lee Wha-Joon, "A computer Simulation of Omnidirectional Supervisory Control for Rough-Terrain locomation by a Multi-legged Robot Vehicule", Ph.D. Thesis, Ohio State University, 1984.

[8] S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicule, "The International Journal of Robotic Research, Vol. 3, No. 2, 1984.

[9] R.B. McGhee, G.L. Iswandhi, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain", IEEE Trans on Systems, Nan and Cybernatics, Vol. SMC. 9, No. 4, April 1979.

[10] R.B. McGhee, "Some finite state Aspects of Legged Locomotion" Mathematical Biosciences, Vo. 2, No. 1/2, February 1968.

-- BIBLIOGRAPHIE --

Alain Liegiois, "Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-7, Dec. 1977.

C. Cswi, "Goal-Directed Movement Simulation", CMCCS '81/ACCHO '81.

J. Vicker, J. Denavit, R.S. Hartenberg, "An Iterative Method for the Displacement Analysis of Spatial Mechanisms", Journal of Applied Mechanics, June 1964.

J. Denavit, R.S. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices", Journal of Applied Mechanics, June 1955.

G.N. Saridis, H.E. Stephanou, "A Hierarchical Approach to the Control of a Prosthetic Arm", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-7, June 1977.

S.N. Steketec, N.I. Badler, "Parametric Keyframe Interpolation Incorporating Kinetic Adjustment and Phrasing Control", Proc. SIGGRAPH '85, June 1985.

T.W. Calvert, J. Chapman, "Aspects of the Kinematic Simulation of Human Movement", IEEE Computer Graphics and Animation, Nov. 1982.

W.W. Armstrong, M. Green, "The Dynamics of Articulated Rigid Bodies for Purposes of Animation", Graphics Interface '85, Montreal, May 1985.

D. Zeltzer, "Motor Control Techniques for Figure Animation", IEEE Computer Graphics and Animation, Nov. 1982.

N.I. Badler, S.W. Smoliar, "Digital Representations of Human Movement", Computing Surveys, Vol. 11, March 79.

J.V. Korein, N.I. Badler, "Techniques for Generating the Goal Directed Motion of Articulated Structures", IEEE Computer Graphics and Animation, Nov. 82.

A.A. Maciejewski, C.A. Klein, "SAM - Animation Software for Simulating Articulated Motion", to appear in Computer & Graphics, Vol. 9, No. 4.

(suite) -- BIBLIOGRAPHIE --

D.E. Whitney, "The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators", Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, Dec. 1972.

D.E. Whitney, "Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses", IEEE Trans. on Man-Machine Systems, June 1969.

D. Zeltzer, "Toward and Integrated View of 3-D Computer Character Animation", Grapics Interface '85.

T. Lozano-Perez "Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, Oct. 81.

R.P. Paul, "Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, MIT-Press, 1981.

R.P. Paul, "Kinematic Control Equations for Simple Manipulators", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, June 81.

R.P. Paul, "Manipulator Cartesian Path Control", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-9, Nov. 79.

J.M. Hollerbach, "A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative Study of Dynamics Formulation Complexity", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-10, Nov. 80.

D.L. Zeltzer, "Representation and Control of Three-Dimensional Computer Animated Figures, Ph.D. thesis, Ohio State University, 1984.

J. Wilhelms, B.A. Barsky, "Using Dynamic Analysis to Animate Articulated Bodies such as Humans and Robots", Graphics Interface '85, May 1985.

E.A. Ribble, "Synthesis of Human Skeletal Motion and the Design of A Special - Purpose Processor for Real-Time Animation of Animal and Human Figure Motion", Master thesis, Ohio State University, June 1982.

* * * * * *

COHEN, PAUL J.
--Techniques d'animation
graphique par ordinateur...

P
91
C654
T433
1986

DATE DUE

OCT - 9 1987			

NATCO N-34

CRC LIBRARY/BIBLIOTHEQUE CRC
P91.C654 T433 1986
Cohen, Paul J.
INDUSTRY CANADA / INDUSTRIE CANADA
214615