

Interpolation Morphologique et Posturale pour la Simulation de Mouvement d'un Humanoïde Virtuel

Nicolas Pronost¹, Georges Dumont¹, Gilles Berillon²

¹IRISA-SIAMES, Campus Universitaire de Beaulieu, 35042 Rennes cedex, France

²UPR 2147, CNRS, Dynamique de l'Évolution Humaine : Individus, Populations, Espèces, 44, rue de l'Amiral Mouchez, 75014 Paris

Nicolas.Pronost@irisa.fr, Georges.Dumont@irisa.fr,
berillon@ivry.cnrs.fr

Résumé : Cet article présente une technique de calcul de mouvement de marche pour un humain virtuel. Cette technique est basée sur des méthodes d'interpolations entre représentations de différentes marches réelles, acquises par Motion Capture. Ces interpolations ont été décorréliées suivant deux paramètres : la morphologie du squelette de l'humanoïde virtuel et sa posture de référence, c'est-à-dire sa position naturelle au repos. Après avoir présenté ces interpolations, nous en montrerons les premiers résultats sur le domaine applicatif de l'anthropologie, et en particulier sur les données de l'australopithèque Lucy (AL 288-1), hominidé disparu dont nous cherchons à évaluer la locomotion.

Mots-clés : Humain virtuel, Simulation biomécanique, Motion Capture, Modification de mouvement, Interpolation morphologique et posturale, Hominidés anciens

1 Introduction

Cet article a pour but de présenter un outil permettant de tester différentes hypothèses sur une marche en calculant un mouvement associé le plus réaliste possible. Ces hypothèses sont un ensemble de paramètres qui pilotent le calcul.

L'un des objectifs de la réalité virtuelle est d'offrir des outils de test qui permettent la reproduction et la compréhension de phénomènes naturels. L'approche du problème de l'animation naturelle et réaliste d'humanoïdes que nous avons mise au point consiste à modifier des mouvements réels de marches acquises.

Après une étude bibliographique sur le problème de l'adaptation de mouvement, nous présenterons la constitution de notre base de données de marche et sa représentation. Puis nous exposerons la méthodologie qui a été mise en place, les raisons et manières dont les modifications de mouvement sont faites. Enfin nous présenterons nos résultats sur le domaine applicatif de l'anthropologie, par un essai sur les données d'un australopithèque.

2 État de la recherche

Les techniques d'adaptation de mouvement (*retargetting*) consistent à adapter un mouvement connu d'un personnage à un autre. Witkin et Popović sont souvent considérés comme les pionniers dans ce domaine, ils ont présenté entre autres une technique d'édition de mouvements par fonctions de déformations (*motion warping functions*) [1]. Cette technique est utilisée pour ajouter de petits changements à un mouvement. Une vision simple de l'adaptation de mouvement [2] consiste à reproduire le mouvement d'un personnage à un autre de proportions différentes tout en conservant certaines contraintes importantes comme le contact du pied au sol. Quand une contrainte est violée lors de la modification, un solveur de contraintes spatio-temporelles calcule une adaptation afin de la rétablir.

Komura et col. [3] adaptent également des mouvements à partir de contraintes spatio-temporelles. Le squelette est toutefois ici enrichi par la prise en compte de forces liées aux muscles. Choi et Ko [4] proposent une adaptation temps réel par cinématique inverse. Le vecteur de sortie est une composition de l'ensemble des positions à conserver (extrémité des mains et pieds). Bruderlin et Williams [5] ont introduit des filtres multirésolutions et des interpolations multiciblées pour traiter le mouvement. Lee et Shin [6] utilisent dans leur système une hiérarchie de B-splines pour interpoler les solutions calculées par un calculateur de cinématique inverse.

Par ailleurs, d'autres travaux se sont penchés sur l'adaptation plus localisée d'une partie du corps humain. Kovar et col.[7] proposent, par exemple, une méthode analytique pour spécifier la contrainte de pied d'appui visant à éviter des effets indésirables tels que la pénétration des pieds dans le sol ou le glissement du pied d'appui.

Une autre approche, orientée vers la morphologie, a été proposée par Monzani et col. [8], elle se base sur l'utilisation d'un squelette intermédiaire. Cette technique permet de convertir des mouvements entre des acteurs de hiérarchie structurelle et géométrie différentes. Ils utilisent un squelette intermédiaire qui possède le même nombre de nœuds et les mêmes axes locaux que le personnage cible, mais dont les os sont orientés comme le personnage source. Savenko et Clapworthy [9] ont récemment étudié le même problème. Ils ont proposé un algorithme qui analyse dans un premier temps le mouvement, puis effectue une classification du mouvement, détermine sa structure et identifie les contraintes. Ces contraintes sont ensuite utilisées pour effectuer l'adaptation. Cette analyse se fait en deux étapes, la première décompose le mouvement en pas et la seconde classe ces pas suivant leur type. La décomposition des pas identifie quand le pied est sur le sol. Le but premier de leur algorithme d'adaptation est d'assurer que le mouvement est biomécaniquement correct et qu'il corrige les artefacts possibles.

La synthèse de marche bipède utilise de nombreux modèles et outils souvent complémentaires. Nous avons connaissance ici de mouvements réels issus de la marche de l'Homme, nous pouvons donc modifier directement ce mouvement. Le problème est de savoir comment modifier le mouvement et à travers quelle représentation afin que ce mouvement soit acceptable (réaliste) pour un humanoïde donné. Il faut spécifier un ensemble de contraintes acceptables et de paramètres influents grâce aux données morphologiques en notre possession. Notre approche permet de créer un modèle de marche propre à n'importe quel bipède dont nous connaissons les caractéristiques morphologiques et quelques hypothèses de marches. Ces interpolations et extrapolations multisources sont une caractéristique essentielle des techniques élaborées. Notre approche est différente car elle modifie directement le mouvement par influences de paramètres biomécaniques. La morphologie même du squelette, c'est-à-dire les os, influe directement sur l'interpolation, ainsi que d'autres paramètres spécifiques à la marche telles que la longueur de pas ou l'amplitude des rotations internes et externes du bassin.

3 Données de mouvements réels

Nous avons utilisé un système de Motion Capture pour construire notre base de données de marche. Ces données sont un point d'entrée pour créer un modèle de marche réaliste. À partir de travaux réalisés par S. Ménardais [10], nous obtenons les trajectoires des capteurs positionnés au plus près des articulations étudiées, nous reconstruisons les marqueurs occultés, et nous calculons certains points supplémentaires.

Nous voulons étudier l'influence séparée de la morphologie et de la posture sur les trajectoires articulaires. Nous avons donc acquis des marches de trois personnes de tailles différentes, à qui nous avons demandé de marcher de trois façons différentes: normale, intermédiaire et fléchie (voir Figure 1, travaux réalisés en collaboration avec le Laboratoire de Physiologie et de Biomécanique de l'Exercice Musculaire de Rennes).

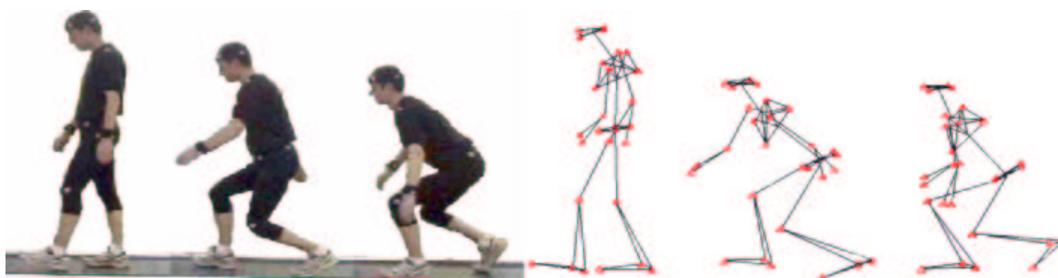


FIG. 1 – 3 marches à postures différentes et leurs visualisations 3D.

Nous appelons ici posture de référence, l'ensemble des angles de toutes les articulations du personnage dans une position de repos.

Les acquisitions de marche se sont faites sur tapis roulant. Le tapis roulant permet d'obtenir des trajectoires sur un grand nombre de pas à vitesse constante, nous pouvons alors facilement isoler un cycle de marche correct.

Par contre, les sujets n'ont pas pu effectuer de larges mouvements de rotations internes et externes du bassin,

qui sont pourtant assez caractéristiques de la marche des grands singes et donc sans doute d'australopithèques. Cela est dû à l'instabilité causée par la marche sur tapis roulant.

Nous obtenons ainsi un ensemble de neuf marches correspondant à trois postures différentes de trois sujets. C'est dans cette première base de données de marches que nous effectuons nos interpolations.

4 La poulaine : une représentation caractéristique

Nous avons représenté ces neuf marches par une trajectoire particulière : la poulaine. La poulaine est la description de la trajectoire du pied dans le repère de la hanche projeté sur le plan sagittal.

On suppose que le mouvement du corps est guidé par celui des jambes dont le but est de suivre un ensemble d'empreintes définissant une trajectoire sur le sol. La trajectoire du pied permettant de passer par ces points de l'espace est appelée poulaine en raison de ses caractéristiques géométriques. De la même manière que dans une approche par acquisition de mouvements, il est possible, en changeant des valeurs, par exemple des extrema, de modifier la poulaine en préservant ses caractéristiques. À partir des trajectoires de pied, le calcul des trajectoires articulaires revient à résoudre un problème de cinématique inverse [11]. Nous utilisons cette technique au cours de notre travail.

5 La méthodologie

5.1 Des données morphologiques

Afin de pouvoir étudier l'influence de la morphologie, nous avons acquis les marches de trois sujets de tailles et proportions différentes. Grâce à ces acquisitions, nous avons calculé les longueurs des membres des sujets (voir Table 1). On voit ainsi que les sujets sont différents morphologiquement, autant sur la somme des longueurs que sur leur proportion.

Sujet n°	longueur fémur (cm)	longueur tibia (cm)	rapport fémur / tibia	longueur jambe (cm)
1	41.9	43.7	0.96	85.6
2	51.6	45.1	1.14	96.7
3	47.9	45.8	1.05	93.7

TAB. 1 – Mesures des longueurs des membres des différents sujets.

5.2 Des données posturales

Les sujets ont ensuite marché avec les jambes fléchies et une amplitude verticale du bassin assez grande. Comme indiqué précédemment, les rotations interne et externe n'ont pas pu être facilement mises en œuvre. Les résultats de la quantification des différentes postures sont donnés en Table 2. L'angle de la hanche est mesuré entre la verticale (orientée vers le bas) et le fémur (positivement en avant). L'angle du genou est mesuré entre le prolongement du fémur et le tibia (positivement vers l'avant). Ces angles sont mesurés au moment où la cheville du sujet passe à la verticale du bassin et en phase d'appui, ce qui correspond à la posture de référence.

Posture et articulations	Sujet 1	Sujet 2	Sujet 3
Normale: Hanche	13.3°	13.9°	13.7°
Genou	-25.9°	-29.5°	-27.3°
Intermédiaire: Hanche	37.4°	35.7°	22.2°
Genou	-72.7°	-77.8°	-45.5°
Fléchie: Hanche	40.9°	45.0°	30.5°
Genou	-81.0°	-98.8°	-61.6°

TAB. 2 – Mesures des angles de différentes postures sur 3 sujets.

5.3 Modéliser une poulaine

Bien que les poulaines de marche très fléchies soient assez différentes, certaines caractéristiques sont toujours respectées. Afin de pouvoir effectuer des calculs sur ces poulaines, il a fallu les modéliser.

Nous avons défini le repère suivant :

- le centre du repère O est le centre de gravité de l'humanoïde (milieu des hanches) ;
- l'axe \vec{x} représente son sens de déplacement (plan sagittal) ;
- l'axe \vec{z} représente son déplacement vertical (plan transversal) ;
- l'axe \vec{y} le vecteur rendant le repère orthonormé (plan frontal).

Une poulaine possède quatre points caractéristiques qui peuvent être associés à un moment précis du cycle de marche. Une courbe représentant cette poulaine peut être définie grâce à ces quatre points, nous avons utilisé pour cela une courbe paramétrée cubique (Courbe de Coons). Les quatre points caractéristiques sont les suivants (voir Figure 2 et 3):

- le point 1 est le point représentant le moment où la cheville passe à la verticale de la hanche (posture de référence). Sur la poulaine, ce point est le point dont la coordonnée en \vec{x} est la plus proche de 0.
- le point 2 représente le moment où la cheville atteint son altitude maximale. Sur la poulaine, il s'agit du point qui possède la composante \vec{z} la plus élevée.
- le point 3 est atteint lors de la flexion maximale de la jambe. Sur la poulaine, ce point possède la composante \vec{x} la plus faible.
- le point 4 est atteint lors de l'extension maximale de la jambe. Sur la poulaine, ce point possède la composante \vec{x} la plus forte.

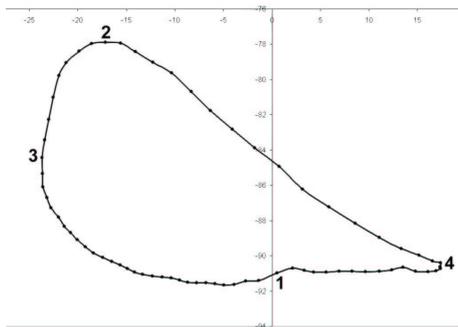


FIG. 2 – Positions des quatre points caractéristiques.

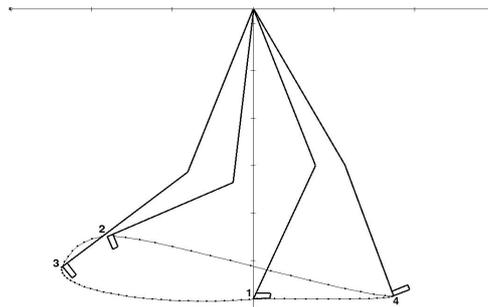


FIG. 3 – Positions des quatre points dans un cycle.

5.4 Une méthode décorrélée

L'idée fondamentale de notre méthode est de séparer l'interpolation en \vec{x} et en \vec{z} . Nous effectuons tout d'abord une mise à l'échelle morphologique pour toutes les poulaines grâce aux longueurs des jambes ceci afin de pouvoir réaliser nos interpolations dans la base de données.

L'objectif qui motive l'interpolation dans le plan sagittal est de réussir à faire marcher l'humanoïde dans des traces de pas voulues. Son paramètre influent est donc la longueur de pas (dépendance unique en \vec{x}). Nous choisissons, dans notre ensemble de marches, la poulaine qui possède la longueur de pas la plus proche, et nous en conservons les composantes en \vec{x} des coordonnées et tangentes des points caractéristiques.

Le paramètre influent de l'interpolation dans le plan transversal est la posture de référence (dépendance unique en \vec{z} , décalage en \vec{x} négligeable pour des raisons d'équilibre). Nous sélectionnons donc la démarche qui possède la posture de référence la plus proche de celle voulue. Nous en conservons les composantes en \vec{z} des coordonnées et tangentes des points caractéristiques.

Nous ne travaillerons donc pas ici avec une unique poulaine mais avec des composantes en \vec{x} et \vec{z} de différentes sources.

Ainsi le choix du sujet (longueur de pas) et d'une posture est fait séparément. Étant donné que le choix du sujet sélectionné se fait par la longueur de pas et que celui de la posture par la distance hanche-cheville et seulement par cela, nous permettons à l'utilisateur de forcer le choix du sujet et de la posture. Ainsi si l'utilisateur veut tester l'outil avec un nouveau sujet comme base d'interpolation mais que le calcul automatique ne le sélectionne pas comme étant le mieux adapté, il peut tout de même le choisir et l'interpolation se fera sur ce choix.

Il est nécessaire d'apporter ensuite quelques corrections à la poulaine obtenue telles que la mise à l'échelle exacte de la longueur de pas et de la posture, ou l'influence des rotations internes et externes du bassin.

5.5 Contrôler la vitesse

Nous avons donc la forme de la courbe à notre disposition, le problème est qu'elle ne nous fournit pas pour autant sa vitesse de parcours. Afin de contrôler la vitesse, nous utilisons un profil de vitesse. Celui-ci est adimensionné et caractérise l'ensemble des marches. Pour l'obtenir, il a fallu comparer les profils des neuf poulaines différentes. Ces courbes de vitesse sont à la fois désynchronisées et différentes en durée de parcours et en distance effectuée.

Nous avons isolé un cycle et l'avons synchronisé sur l'un des quatre points caractéristiques : le point 2 où la vitesse est la plus grande pour éviter les confusions de points.

La seconde étape consiste à adimensionner les courbes afin de pouvoir les comparer :

- Deux personnes différentes ne font pas un pas dans le même temps, nous avons donc normalisé les marches suivant la durée d'un pas.
- Comme ces personnes n'ont également pas les mêmes longueurs de jambes, les pieds ne parcourent pas la même distance, nous avons donc normalisé les marches suivant ces distances.

La courbe de vitesse moyenne des différents profils obtenus peut être représentée par un polynôme. La Figure 4 montre ce profil moyen et le polynôme qui le caractérise, il nous permet de représenter la courbe avec une erreur inférieure à 10% sur les différentes courbes sources.

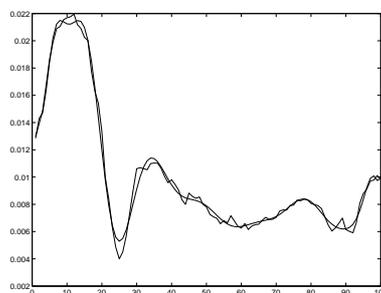


FIG. 4 – Profil de vitesse moyen calculé et approximé (polynôme de degré 20).

5.6 Méthode de validation autocohérente

Nous avons deux niveaux de validation à effectuer. Le premier est la validation des choix de l'interpolation (forme), le second le contrôle de la vitesse.

5.6.1 La géométrie : points et tangentes

Prenons les données connues d'un sujet capturé comme paramètres d'entrée :

Sujet	lg fémur (cm)	lg tibia (cm)	lg pas (cm)	posture : hanche / genou
3	47.9	45.8	47.7	Intermédiaire : 22.2° / -45.5°

Si l'interpolation est correcte, la forme de la poulaine calculée devra être identique à celle capturée. Ces poulaines sont présentées en Figure 5.

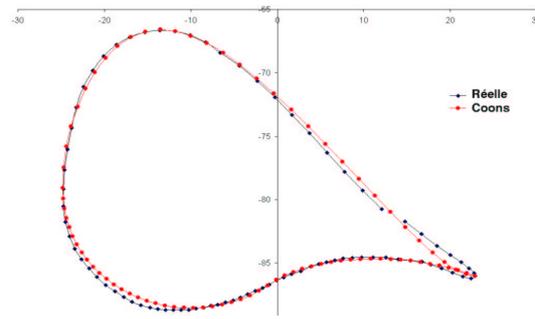


FIG. 5 – Poulaines réelle et paramétrique (Coons) calculée.

Nous constatons que la forme est correcte, le décalage visible étant dû à des valeurs de tangentes non exactes dans la représentation même de la courbe paramétrée originale. Nous avons fait cette même validation pour les neuf poulaines de base.

5.6.2 La vitesse

Nous venons de voir que notre méthode fait les choix corrects d'interpolation. Par contre, les points ne sont pas répartis correctement sur la courbe. C'est pourquoi nous avons mis en place un contrôle de la vitesse, nous allons montrer sa validation sur un exemple. Prenons de nouvelles données connues comme paramètres d'entrée :

Sujet	lg fémur (cm)	lg tibia (cm)	lg pas (cm)	posture : hanche / genou
1	41.9	43.7	75.7	Fléchie : 40.9° / -81.0°

La poulaine obtenue sans contrôle est donnée en Figure 6, et celle avec en Figure 7.

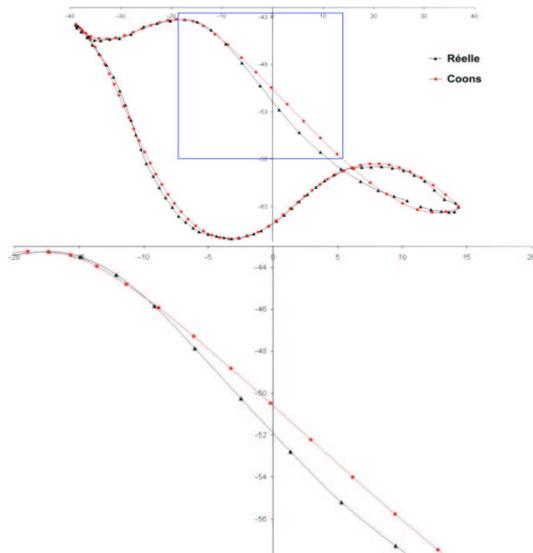


FIG. 6 – Poulaines réelle et paramétrée calculée (entière et détaillée).

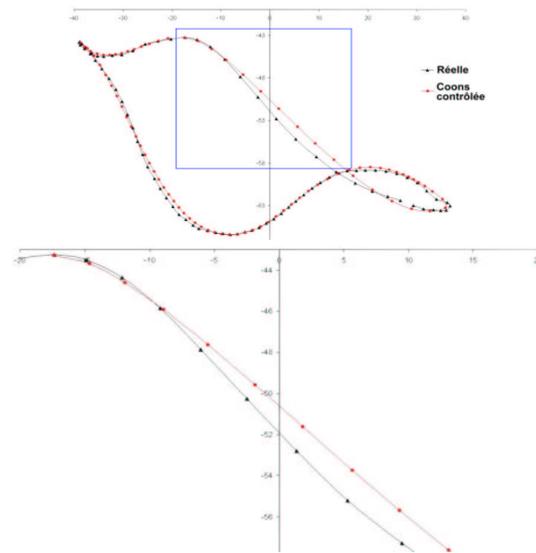


FIG. 7 – Poulaines réelle et paramétrée calculée contrôlée (entière et détaillée).

En comparant les vitesses de parcours de la courbe réelle et de celle contrôlée, on observe qu'elles sont très proches. Un décalage subsiste étant dû à la différence entre le profil de vitesse moyen utilisé et le profil de vitesse réel sur cette poulaine particulière. Afin de minimiser ce problème, nous envisageons de représenter un profil moyen pour chacune des quatre sous-courbes paramétrées.

5.7 Application

Ces deux aspects étant validés, nous estimons que l'interpolation sur un sujet inconnu est correcte. Nous allons donc maintenant présenter le résultat de notre méthode à travers une application anthropologique. Les paramètres influents sont les données morphologiques du squelette de Lucy (3.5 Millions d'années) et les hypothèses des paléanthropologues. Pour pouvoir visualiser la simulation de marche, nous utilisons des modèles en trois dimensions des parties basses du squelette : bassin, fémur et tibia (voir Figure 8) reconstruites à partir des fossiles par le laboratoire de Dynamique de l'Évolution Humaine [12]. Les données morphologiques utilisées sont issues de ces modèles.

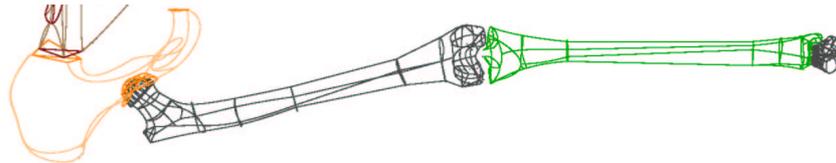


FIG. 8 – Demi modèle 3D utilisé (coté droit) : Bassin, Fémur et Tibia. [12]

Nous avons utilisé l'algorithme avec ces valeurs de paramètres :

Sujet	lg fémur (cm)	lg tibia (cm)	lg pas (cm)	posture : hanche / genou
Lucy (AL 288-1)	26.48	27.3	44.0	25.0° / -45.0°

Les valeurs des paramètres morphologiques sont des données de bases relativement sûres, par contre la longueur de pas [13] et la posture sont des hypothèses. La poulaine résultante est donnée en Figure 9. Une représentation de la visualisation de la marche associée à cette poulaine est présentée en Figure 10.

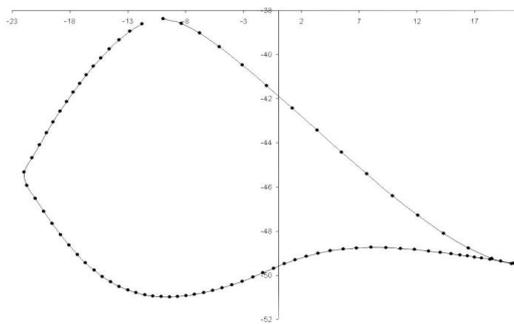


FIG. 9 – Poulaine obtenue avec un jeu de paramètres corrects pour l'australopithèque Lucy.



FIG. 10 – Représentation de la visualisation obtenue.

La forme obtenue combine deux poulaines différentes, géométriquement elle correspond à une stature intermédiaire entre l'Homme et le singe, ce qui était prévisible. La posture sélectionnée correspond d'ailleurs à une posture intermédiaire. La vitesse de parcours sur cette courbe semble également correcte.

6 Conclusion

Cet article présente une technique d'interpolation pour la simulation de marche d'humains virtuels mise en œuvre à l'IRISA¹ au sein du projet SIAMES². La méthode présentée a pour but de créer un mouvement de marche adapté à une morphologie et à une posture. Elle repose sur des captures de mouvements de marches réelles acquises dans ce but. Ces marches sont représentées par leurs poulaines et interpolées suivant plusieurs paramètres. La forme et la vitesse de la poulaine sont calculées et contrôlées séparément.

1. IRISA : Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires

2. SIAMES : Synthèse d'Image, Animation, Modélisation Et Simulation

Dans nos objectifs actuels, nous visons à augmenter la taille et la diversité de notre de base de données de marches, avec par exemple des données sur des grands singes ou sur des enfants.

Nous envisageons également de créer un outil plus automatique et général. En englobant les calculs faits dans le module de S. Ménardais [10] sur le passage entre les fichiers de captures et ceux utilisés par l'outil actuel. On peut ainsi concevoir un outil qui prendrait directement en entrée des acquisitions brutes de marches, les traiterait automatiquement et produirait un modèle de marche correspondant à certains critères (morphologiques ou autres) demandés.

Du point de vue biomécanique, un meilleur réalisme de l'outil devra certainement passer par la prise en compte de degrés de liberté supplémentaires, comme par exemple la troisième rotation du bassin non abordé dans l'état actuel, ou bien un système d'articulation du genou plus complexe. Leurs modélisations et interpolations pourront également se faire par des trajectoires d'articulations dans le repère d'autres articulations projetés sur divers plans.

7 Collaborations

Cette étude a été partiellement réalisée dans le cadre d'un soutien ATIP³ CNRS : «l'évaluation des aptitudes locomotrices des hominidés fossiles : modélisation et simulation 3D de la bipédie de Lucy, Australopithecus afarensis». Ce projet regroupe deux laboratoires de paléanthropologie^{4,5}, un laboratoire de biomécanique⁶ et un laboratoire d'informatique⁷.

Références

- [1] A. Witkin and Z. Popović. Motion warping. In *Computer Graphics Proceedings*, 1995.
- [2] M. Gleicher. Retargetting motion to new characters. In *SIGGRAPH'98*, 1998.
- [3] T. Komura, Y. Shinagawa, and L. Kunii. Creating and retargetting motion by the musculoskeletal human body model. *The Visual Computer*, pages 254–270, 2000.
- [4] K.J Choi and H.S Ko. Online motion retargetting. *The Journal of Visualisation and Computer Animation*, 11(5):223–235, Décembre 2000.
- [5] A. Bruderlin and L. Williams. Motion signal processing. In *ACM SIGGRAPH'95*, pages 97–104, 1995.
- [6] J. Lee and SY. Shin. A hierarchical approach to interactive motion editing for human-like figures. In *SIGGRAPH'99*, pages 39–48, 1999.
- [7] L. Kovar, M. Gleicher, and J. Schreiner. Footstake cleanup for motion capture. In *ACM Siggraph Symposium on Computer Animation*, 2002.
- [8] JS. Monzani, P. Baerlocher, R. Boulic, and D. Thalmann. Using an intermediate skeleton and inverse kinematics for motion retargetting. *EuroGraphics 2000*, 2000.
- [9] A. Savenko and G. Clapworthy. Using motion analysis techniques for motion retargetting. Technical report, Departement of Computer & Information Sciences - De Montfort University, 2002.
- [10] S. Ménardais. *Fusion et adaptation temps réel de mouvements acquis pour l'animation d'humanoïdes synthétiques*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 31 janvier 2003.
- [11] F. Multon. *Contrôle du Mouvement des Humanoïdes de Synthèse*. PhD thesis, Université de Rennes 1, Octobre 1998.
- [12] F. Marchal and G. Berillon. Modelling the architecture of the pelvic girdle and lower line fonctional complex : a three dimensional perspective. In *14ème Congrès de l'UISPP, Liège*, 2001.
- [13] Y. Deloison. Empreintes de pas à laetoli (tanzani). leur apport à une meilleure connaissance de la locomotion des hominidés fossiles. *C.R. Acad. Sci. Paris, t.315, Série II*, pages 103–109, 1992.

3. ATIP: Action Thématique et Incitative sur Programme

4. UPR 2147, CNRS, Dynamique de l'Évolution Humaine : Individus, Populations, Espèces (Paris)

5. UMR 5809, Laboratoire d'Anthropologie des Populations du Passé (Bordeaux)

6. Laboratoire de Physiologie et de Biomécanique de l'Exercice Musculaire (Rennes 2)

7. UMR 6074, Institut de Recherche en Informatique et Système Aléatoire, Projet SIAMES (Rennes 1)