

Influences des adaptations morphologiques et cinématiques sur la dynamique des mouvements

Nicolas Pronost¹ et Georges Dumont²

¹ Université de Rennes 1, ² ENS Cachan
^{1,2} IRISA, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex
{Nicolas.Pronost,Georges.Dumont}@irisa.fr

Abstract

In animation, to adapt motions to morphological and environmental constraints became a standard method to produce natural looking motions. Although the results of many approaches answer this kinematic criterion, nothing ensures their physical accuracies. We propose, in this paper, a method of evaluation of the influence of such methods of adaptation on the dynamics of a motion. We present an application on a method of adaptation using retargeting and kinematic interpolations in a database of locomotions. Our approach lies on the automatic creation of a biomechanical model of the character and on an algorithm of inverse dynamics. We separately evaluate how the retargeting and the interpolation change the physics of the motions thanks to comparisons with the literature and with experimental results from force plates.

En animation, adapter un mouvement à des contraintes morphologiques et environnementales est devenu une méthode standard pour produire un mouvement visuellement naturel. Bien que les résultats de nombreuses approches répondent parfaitement à ce critère cinématique, rien ne certifie pour autant la justesse physique. Nous proposons, dans cet article, une méthode d'évaluation de l'influence de telles méthodes d'adaptation sur la dynamique d'un mouvement. Nous présentons son application sur une méthode d'adaptation comportant une mise à l'échelle morphologique et une interpolation cinématique dans une base de données de mouvements de locomotion. Notre approche repose sur la création automatique d'un modèle biomécanique du personnage et sur un algorithme de dynamique inverse. Nous évaluons séparément comment l'adaptation morphologique et l'interpolation changent la dynamique des mouvements en la comparant à des données de la littérature et à des données expérimentales issues de plateformes de mesures de forces.

1. Introduction

La synthèse de mouvements réalistes de personnages reste une des grandes ambitions dans le domaine de l'animation. Le fait d'obéir aux lois de la physique semble être un critère important dans la plausibilité des mouvements. En effet, bien que de nombreuses méthodes d'animation cinématique produisent des mouvements visuellement réalistes, rien ne certifie pour autant la justesse physique. C'est pourquoi la dynamique de la locomotion humaine a été étudiée depuis longtemps à des fins d'animation [VFV92, FDCM97, Hod98]. La première méthode pour produire des mouvements physique-

ment réalistes est d'animer les personnages via des données issues de captures de mouvements qui sont intrinsèquement valides. Ces mouvements bruts sont adaptés à différentes représentations de personnages et à différents environnements. Les adaptations cinématiques et cinétiques (par interpolation, édition, retargeting ou blending) peuvent potentiellement rendre les mouvements physiquement non valides. Il est donc nécessaire d'être prudent lorsque de telles méthodes sont utilisées, par exemple en utilisant des adaptations relativement petites [GL98] ou en effectuant des modifications dans une classe de mouvement bien définie [KG04]. Quand

bien même les modifications introduisent des erreurs visuellement apparentes dans la dynamique, des améliorations peuvent être apportées comme post-processus ou peuvent corriger l'algorithme d'adaptation. À cette fin, Safonova et col. [SH05] ont proposé une méthode d'analyse de l'exactitude physique dans des mouvements linéairement interpolés.

Dans cet article, nous présentons une méthode d'évaluation de l'influence de telles méthodes d'adaptation cinématiques sur la dynamique d'un mouvement. Après avoir présenté l'état de l'art et nos objectifs (section 2), nous exposons la méthode d'adaptation évaluée ainsi que notre approche d'analyse de la dynamique en section 3. Elle repose sur la création automatique d'un modèle biomécanique du personnage étudié et sur l'application d'un algorithme de dynamique inverse sur le mouvement (voir Figure 8). Ces deux aspects ont été précédemment présentés dans [PD06], dont les contributions sont ici résumées. Nous présentons dans cet article, l'approche globale permettant d'évaluer les influences des méthodes d'adaptation sur la dynamique. Nous étudions pour cela plusieurs paramètres morphologiques et cinématiques tels que la taille du personnage, le ratio entre membres, la structure du modèle, la longueur des pas, le style du mouvement et la vitesse de déplacement (voir sections 4 et 5). Enfin, en section 6, nous résumons et discutons nos résultats.

2. État de l'art et objectifs

L'adaptation au squelette et l'interpolation de mouvement sont des composantes des nombreuses approches pour l'édition [BT92, GL98], l'adaptation morphologique [Gle98, CK00] ou le mélange de mouvements humains [PSS02, KGP02]. Ces travaux ont pour but de produire des mouvements visuellement corrects et ils ne se focalisent pas sur leurs justesses physiques. Pour atteindre cet objectif, deux méthodes complémentaires ont été proposées : introduire de la simulation physique pendant l'adaptation ou bien corriger le mouvement après l'adaptation.

La première méthode a été la plus explorée, en commençant par l'utilisation conjointe des contraintes spatio-temporelles sur les positions et sur les forces [PW99]. Afin de résoudre la complexité des optimisations nécessaires, Fang et Pollard [FP03] ont proposé une nouvelle formulation des contraintes dynamiques spécialement destinées à la gestion des contacts. L'optimisation des forces aux articulations entraîne un important temps de calcul. Pour réduire cette complexité, des contraintes sur les moments des forces ont été ajoutées en y incluant des contraintes mécaniques et le style du mouvement [LP02, ALP04]. Le ZMP (Zero Moment Point) peut alors être utilisé pour maintenir l'équilibre [TSK00, TK05, ZH02]. La méthode a d'ailleurs été étendue afin de ne pas utiliser de processus itératif pour chercher les solutions optimales à chaque pas de temps. Cette méthode est appelée filtrage dynamique (dynamics filtering) [YN03]. Leurs auteurs utilisent un double filtrage des paramètres

pour vérifier les contraintes dynamiques. Le premier filtre prédit le prochain vecteur d'état en fonction des contraintes cinématiques et dynamiques telles que le respect du ZMP et de la position initiale ainsi que les limites des moments angulaires. Le second filtre corrige les contradictions résultantes entre les positions, les vitesses et les accélérations. Une autre possibilité consiste à étendre le graphe de contrôle des postures issu des modèles générateurs avec des postures réelles issues de captures. Cette méthode peut être utilisée pour prendre en compte des contacts et collisions localisés [ZH02, AFO05]. Oshita et Makinouchi [OM01] ont ajouté des masses contrôlant un sous-ensemble de degrés de liberté. Dans toutes ces approches, la méthode ajoute des moments angulaires à ceux calculés par les contrôleurs. Ces moments peuvent être calculés par exemple comme une force d'impact et retourner au mouvement initial grâce à un graphe de mouvements [AFO05], à des mélanges [ZMCF05], ou à l'utilisation de processus de recherche parallèles [TPZZ06].

La seconde méthode est plus récente, et seulement quelques travaux ont été effectués afin d'étudier la dynamique de mouvements interpolés. À partir de l'idée de déterminer le naturel cinématique d'un mouvement [RP03, RPE*05], quelques chercheurs étudient son naturel dynamique. Par exemple, Safonova et Hodgins [SH05] proposent une analyse de la conservation de propriétés physiques de base dans des mouvements linéairement interpolés tels que les moments linéaires et angulaires, l'équilibre statique et les frottements au sol. Ils suggèrent de légères modifications aux techniques standards d'interpolation qui dans certaines circonstances produisent des améliorations significatives du naturel des animations.

Dans ce travail, nous avons pour objectif de montrer qu'une méthode d'analyse en dynamique inverse peut être utilisée pour étudier l'influence physique de méthodes d'adaptation. La méthode d'analyse de la dynamique est indépendante de la méthode d'adaptation évaluée. Nous effectuons la validation de la méthode d'adaptation à travers l'étude des changements dans les forces et couples aux articulations. Nous montrons plus particulièrement les résultats des forces de réaction au sol, car lorsque nous le pouvons, nous les comparons à des valeurs expérimentales obtenues sur plateformes de forces.

3. Études préliminaires

Dans [PDBN06], nous avons présenté un algorithme d'adaptation morphologique et un processus d'interpolations de mouvements. Les questions qui résultent de la discussion de cette approche sont les suivantes :

- Les mouvements adaptés sont ils physiquement valides ?
- Quelles sont les limites de la méthode d'adaptation ?
- Et ces limites sont elles dues à l'adaptation morpholo-

gique ou bien à l'interpolation ?

Dans [PD06], nous avons répondu à la première question. Pour cela nous avons, en particulier, appliqué une adaptation "vide", c'est-à-dire que nous avons adapté morphologiquement un mouvement à des données réelles connues et nous avons utilisé ces mêmes données pour interpoler le mouvement. Les forces de réactions au sol (FRS) estimées ont été comparées à des mesures expérimentales sur plateformes de forces effectuées par les mêmes personnes. Les résultats montrent une bonne corrélation des FRS réelles et calculées après adaptation.

La méthode permettant de calculer les FRS est la suivante. Nous partons d'une description mécanique du personnage et de ses degrés de liberté définie par un modèle utilisant la notation de Denavit-Hartenberg modifiée [KK86]. Nous définissons alors un algorithme de projection du mouvement sur ce modèle mécanique. Nous obtenons ainsi un modèle dont les dimensions (longueurs des membres) sont établies et un mouvement qui est modélisé par ses trajectoires articulaires. Un modèle biomécanique du personnage est alors automatiquement créé grâce aux calculs des masses et inerties dans des tables anthropomorphiques [DeL96] et des lois de régression linéaires [VDO99]. Les paramètres physiques du personnage sont ainsi adaptés à sa morphologie et à son genre.

Nous calculons ensuite, grâce à un algorithme de dynamique inverse, les couples articulaires nécessaires pour effectuer le mouvement. Ce calcul est basé sur les principes fondamentaux de la dynamique (seconde loi de Newton). Mais, afin de résoudre cette loi, nous avons besoin des forces extérieures agissant sur le système, et pour cela nous devons identifier les phases d'appui au sol. Nous définissons donc un algorithme, spécifique à la locomotion, de détermination des instants de contacts du pied sur le sol (posé de talon et levé d'orteil). Depuis ces données et le mouvement angulaire, la résolution en dynamique inverse calcule les torseurs résultants, et en particulier les forces de réaction au sol.

L'objectif de cet article est de répondre aux deux autres questions : quelles sont les limites de la méthode d'adaptation, et ces limites sont-elles dues à l'adaptation morphologique ou bien à l'interpolation ? Pour y répondre nous étudions séparément leurs influences sur les FRS et en déterminons les limites.

4. Influence de l'adaptation morphologique

Afin d'étudier l'influence de l'adaptation morphologique sur le réalisme physique des mouvements adaptés, nous observons les FRS lorsque nous changeons la morphologie du personnage.

4.1. Mise à l'échelle globale

Dans cette section, nous adaptons un mouvement non interpolé à plusieurs morphologies. Nous avons défini un échantillon représentatif de 8 morphologies différentes dont les tailles des membres varient du simple au double. Nous examinons alors les FRS résultantes qui sont calculées par l'algorithme de dynamique inverse (voir Figure 1(a)).

Les résultats montrent que la taille globale de l'humanoïde a une très grande influence sur la dynamique du mouvement. Et en effet, les masses des membres sont les paramètres les plus influents dans les équations de la dynamique. Ainsi représentées, il est difficile de comparer réellement les FRS et d'en déterminer les influences sur la dynamique. C'est pourquoi nous voulons les "adimensionner" par les différences morphologiques et les comparer à une morphologie de référence que nous choisissons comme la morphologie médiane de notre échantillon. Cette morphologie médiane, qui correspond à la morphologie pour laquelle le nombre de personnes de taille supérieure est égal au nombre de personnes de taille inférieure, possède alors par définition un facteur de mise à l'échelle s de 1.0. Le coefficient nous permettant d'adimensionner les FRS est défini comme étant le coefficient de normalisation CN appliqué aux FRS qui minimise l'erreur RMS cumulée d'ordre 1 avec les FRS de référence FRS_{ref} :

$$CN = \lambda \text{ tel que } \lambda, \mu \in [0, 2 \times s] \text{ et } \sum |FRS - \lambda \times FRS_{ref}| \leq \sum |FRS - \mu \times FRS_{ref}| \quad (1)$$

Nous présentons cette relation en Figure 1(b), où nous affichons en abscisse le facteur de la mise à l'échelle s et en ordonnée les coefficients de normalisation CN . La relation obtenue peut être considérée comme une fonction linéaire, ce qui signifie que les torseurs évoluent de manière linéaire en fonction de la taille de la personne. La régression linéaire obtenue possède un coefficient de corrélation linéaire de 0.87 ce qui est considéré comme une valeur d'ajustement valide (supérieur à $\frac{\sqrt{3}}{2}$). Nous avons également comparé les FRS avec des données expérimentales issues de 5 mesures de plateformes de forces, et nous avons constaté le respect de cette propriété sur un échantillon de personnes réelles allant d'un facteur 0.7 à 1.2 par rapport à la personne médiane de cet échantillon de 5 personnes. En dessous du facteur 0.7 et au dessus de 1.2 nous supposons uniquement que la relation est toujours valide.

4.2. Ratio fémur/tibia

Dans cette section, nous étudions l'influence de la modification des longueurs relatives des membres. Cette étude est utile pour évaluer les erreurs initiales dans l'estimation de centres articulaires à partir de marqueurs 3D et donc dans les longueurs des membres. Ici, nous changeons le ratio entre les longueurs du fémur et du tibia, sans pour autant changer la longueur totale de la jambe. Les FRS résultantes sont affichées en Figure 2(a). Nous présentons en Figure 2(b) les

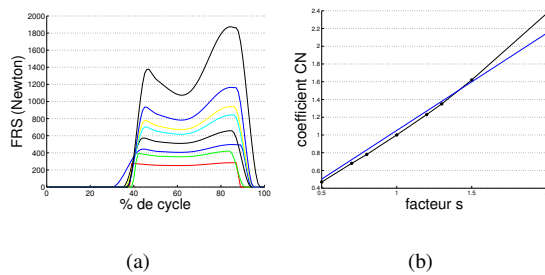


Figure 1: Influence d'une mise à l'échelle globale. (a) Nous adaptons une locomotion sur 8 morphologies aux facteurs d'échelle : 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3, 1.5 et 2.0. (b) Les coefficients de normalisation sont affichés en fonction des facteurs d'échelle s , ainsi que la droite de régression (bleue).

erreurs RMS d'ordre 1 cumulées sur un cycle entre les FRS adaptées et l'originale. Nous avons pu comparer les résultats avec un échantillon de données expérimentales de ratios fémur/tibia compris entre 0.8 et 1.2. Les erreurs RMS observées dans cet intervalle sont assez faibles (approximativement 6 Newtons). Mais lorsque nous observons l'erreur associée à un ratio inférieur (0.6) qui est d'environ 13 Newtons, nous pouvons supposer qu'adapter morphologiquement une locomotion hors de cet intervalle produit beaucoup plus facilement un mouvement non valide.

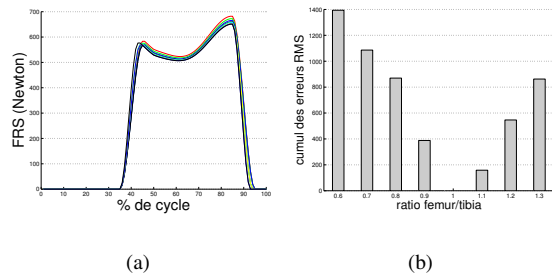


Figure 2: Influence du ratio fémur/tibia. (a) Nous adaptons une locomotion à 8 valeurs de ratios : 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95, 1.1, 1.2 et 1.3, notre ratio initial étant de 0.95. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des ratios.

Nous notons un autre phénomène logique mais important auquel il faut être attentif. Quand un mouvement est adapté, les déplacements des membres les plus lourds sont les plus influents. On peut observer ce phénomène encore plus facilement en changeant le ratio haut/bas du corps, non présenté ici, car le tronc possède une masse beaucoup plus importante que les autres membres. Nous pouvons donc conseiller, dans les méthodes d'adaptation de mouvement, de pondérer,

lorsque c'est possible, les modifications des longueurs relatives des membres par leurs masses.

4.3. Structure du squelette

Dans cette section, nous modifions la structure du squelette à travers la manipulation des degrés de liberté du modèle. Nous adaptons morphologiquement une locomotion à deux squelettes ayant respectivement 33 et 21 ddl. Ils diffèrent par les articulations suivantes : les coudes, genoux et chevilles où les liaisons rotules (3 ddl) du premier modèle deviennent des liaisons pivots (1 ddl) dans le second. En effet, dans de nombreuses méthodes d'animation, ces articulations sont en général approximées par des liaisons pivots, il est donc intéressant d'étudier l'influence de ce type de simplification sur la cinématique mais aussi sur la dynamique des mouvements. En terme de cinématique, la Figure 3 montre la somme des distances Euclidiennes des positions des centres de gravité des 11 membres sur un cycle de locomotion.

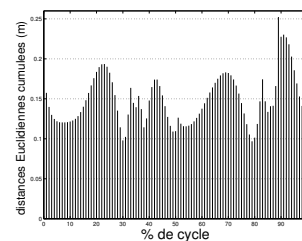


Figure 3: Somme, sur un cycle, des distances Euclidiennes (en mètres) entre les positions des centres de gravité des 11 membres des deux squelettes à 33 et 21 ddl.

La moyenne des distances cumulées des 11 membres est de 0.15 mètre, c'est-à-dire 1.4 cm par membre sur un cycle entier de locomotion. Cette valeur n'est a priori pas petite, mais est-elle significative ? Les FRS résultantes des deux mouvements adaptés sont affichées en Figure 4(a) et leurs erreurs RMS d'ordre 1 en Figure 4(b).

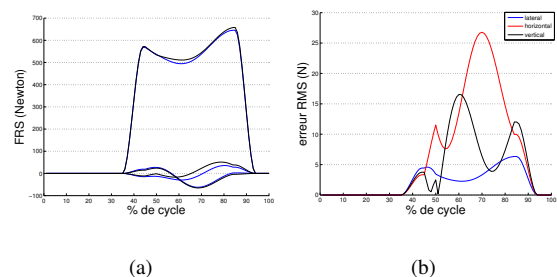


Figure 4: Influence de la structure du squelette. (a) Les 3 composantes des FRS (en bleu 21 ddl, en noir 33 ddl) sur un cycle de locomotion, et (b) leurs erreurs RMS d'ordre 1.

L'erreur latérale est très faible et ceci est logique puisque durant la locomotion l'accélération linéaire des membres est faible sur cet axe. Lorsqu'une locomotion est adaptée sur un squelette plus restrictif (moins de ddl), l'influence sur l'axe horizontal est plus importante que sur l'axe vertical. Ainsi, l'adaptation d'un mouvement doit surtout faire attention à la modification de l'accélération horizontale des membres. Dans notre exemple, la différence maximale est équivalente à la modification de la masse de l'humanoïde de 2.5 kg (en moins pour le modèle à 21 ddl), ce qui correspond à 4.5% de sa masse totale. L'influence de la projection du mouvement sur un modèle cinématique est donc relativement importante.

5. Influence de l'interpolation

Afin d'étudier l'influence de l'interpolation sur les changements physiques de mouvements adaptés, nous en observons les FRS lors de changements de paramètres locomoteurs. Nous étudions trois de ces paramètres que nous modifions indépendamment.

5.1. Longueur de pas

Dans cette section, nous étudions l'influence de la modification de la longueur de pas. Cette étude est utile, en particulier, pour évaluer les corrections de frottements des pieds d'appui, méthodes souvent utilisées dans les adaptations cinématiques. Ces corrections modifient principalement les trajectoires angulaires par une méthode en cinématique inverse mais peuvent également modifier la position des pieds, et donc la longueur de pas. Nous changeons la longueur initiale l_s en 8 nouvelles longueurs $l = \alpha \times l_s$ avec $\alpha \in [0.6, 1.3]$. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 5(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 5(b).

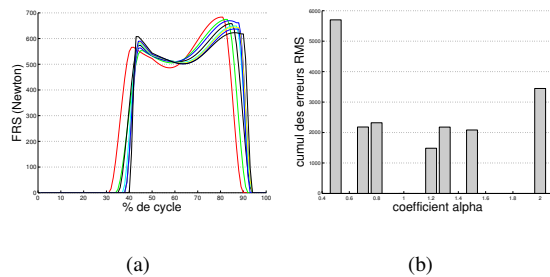


Figure 5: Influence de la longueur de pas. (a) Nous interpolons une locomotion avec 8 valeurs d' α : 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.3, 1.5 et 2.0. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients α .

Ces résultats montrent qu'autour de la locomotion de référence, les erreurs peuvent être considérées comme équivalentes. En effet, entre les coefficients 0.7 et 1.5, les erreurs RMS se situent entre $1.48e+03$ et $2.32e+03$, alors que hors

de cet intervalle elles montent au dessus des $4.0e+03$. Le fait que l'on observe un palier autour de la locomotion de référence montre que la méthode d'interpolation corrige la locomotion pour un ensemble de longueurs de pas proches de celle de référence. La méthode d'interpolation utilise effectivement pour cela une base de données de locomotions, si cette base de données est assez hétérogène, le mouvement peut être adapté à n'importe quelle longueur de pas. Ici, nous constatons, que des longueurs de pas trop importantes (supérieures à 1.5 fois celle de référence) ou trop faibles (inférieures à 0.7 fois celle de référence) ne seront pas correctement prises en compte. Pour résoudre ce problème, il faudrait enrichir d'avantage la base de données avec un large échantillonnage de longueurs de pas.

5.2. Style de mouvement

Dans cette section, nous voulons changer le style de mouvement. Il existe plusieurs définitions du style d'un mouvement, mais ici, nous le définissons par le fléchissement des membres inférieurs, et nous le modélisons par le rapport entre la distance des pieds à la tête et la distance des pieds au bassin. Ce paramètre est un des paramètres de l'interpolation, c'est pourquoi nous pouvons étudier directement son influence sur la dynamique. La locomotion normale de référence est définie comme ayant un pourcentage de fléchissement P_f de 1.0. Nous interpolons alors le mouvement pour 8 pourcentages $P = \theta \times P_r$ différents avec θ compris entre 0.8 et 1.15. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 6(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 6(b).

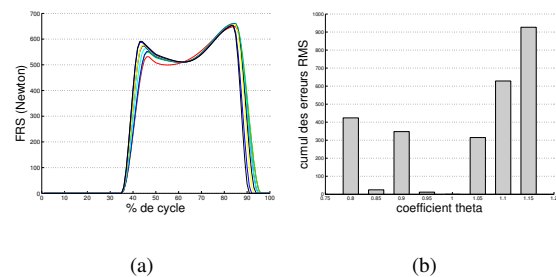


Figure 6: Influence du style de mouvement. (a) Nous interpolons une locomotion avec 8 valeurs θ : 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1 et 1.15. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients θ .

Si le mouvement est interpolé sur un style plus fléchi, les erreurs ne sont pas significatives. Par contre, l'interpolation sur un style de locomotion très redressé fait accroître l'erreur rapidement. Ce phénomène s'explique par l'impossibilité d'effectuer de grands pas avec une posture très droite. Si l'interpolation le force, il est normal qu'elle introduise des erreurs dans la dynamique du mouvement. La conclusion en

est que l'interpolation est plus sûre lorsqu'elle est faite sur des styles plus fléchis car il y a alors des contraintes cinématiques moins fortes.

5.3. Vitesse de déplacement

Dans cette section, nous modifions la vitesse v_i de déplacement de l'humanoïde, en interpolant un mouvement à 8 vitesses $v = \gamma \times v_i$ avec $\gamma = 0.67$ à 1.33. Les FRS résultantes sont présentées en Figure 7(a) et les erreurs RMS cumulées en Figure 7(b).

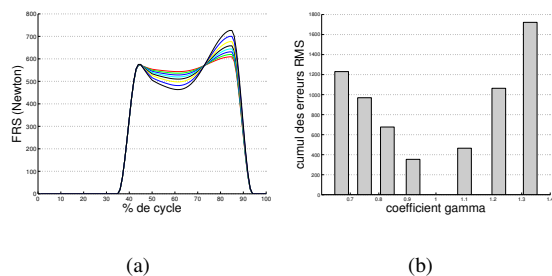


Figure 7: Influence de la vitesse de déplacement de l'humanoïde. (a) Nous interpolons une marche avec 8 valeurs γ : 0.67, 0.75, 0.83, 0.92, 1.0, 1.1, 1.22 et 1.33. (b) Les cumuls des erreurs RMS d'ordre 1 des FRS sont affichés en fonction des coefficients γ .

Lorsque la vitesse décroît, l'erreur croît mais les caractéristiques physiques sont préservées. Lorsque la vitesse croît, l'amplitude de la double bosse d'appui croît jusqu'à des valeurs invalides. Ce qui signifie qu'à ce moment, le processus d'interpolation doit changer le mode de locomotion, par exemple pour une course, ce qui n'est pas géré dans notre approche.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode d'évaluation de l'influence de méthodes d'adaptation sur la dynamique d'un mouvement. Nous avons présenté son application sur une méthode d'adaptation comportant une mise à l'échelle morphologique et une interpolation cinématique dans une base de données de mouvements de locomotion. Notre approche repose sur la création automatique d'un modèle biomécanique du personnage et sur un algorithme de dynamique inverse. Puis nous avons évalué séparément comment l'adaptation morphologique et l'interpolation changent la dynamique des mouvements en la comparant à des données de la littérature et à des données expérimentales issues de plateformes de mesures de forces.

Afin de déterminer l'influence de l'adaptation morphologique, nous avons étudié l'impact de la modification de la

taille du personnage. Les résultats montrent sa grande influence sur les amplitudes des torseurs et montrent la dépendance linéaire entre ces torseurs et la taille globale. Nous avons également étudié l'influence de la modification du ratio fémur/tibia qui montre l'importance de la gestion prioritaire des membres les plus lourds. Et nous avons montré aussi que l'adaptation morphologique sur des squelettes de structures différentes peut introduire des différences de plusieurs dizaines de Newtons dans les forces résultantes.

Afin d'étudier l'influence de l'interpolation dans la dynamique, nous avons déterminé l'impact de la modification de la longueur de pas, qui a montré ici le bon comportement de la méthode d'interpolation sur l'intervalle de travail défini par la base de données. Le style de mouvement a aussi été étudié et nous montrons l'intérêt d'interpoler les mouvements sur des locomotions plus fléchies. Quant à la vitesse de déplacement, nous montrons que plus on s'éloigne de la vitesse initiale, plus les différences dynamiques sont importantes.

Un résultat de cette validation montre également que la méthode d'adaptation évaluée semble correcte sur les intervalles étudiés. Bien que nous ayons pu valider les résultats obtenus que sur ces intervalles de travail, il y a une différence entre la manière dont évolue la modification de la dynamique d'un mouvement et la dynamique réelle de ce mouvement. Nous avons, à chaque fois que nous l'avons pu, comparé les résultats à des données réelles, mais ceci n'est parfois pas suffisant pour certifier que la méthode d'adaptation est valide quelque soit les contraintes imposées. Pour être plus général, de nouvelles données expérimentales telles que des mesures réelles de couples moteurs ou des forces de réaction au sol devraient être effectuées. Ces données expérimentales pourraient idéalement couvrir le spectre des paramètres étudiés des mouvements contenus dans notre base de données. Ainsi nous pourrions valider expérimentalement et largement chaque paramètre. La méthode de dynamique inverse utilisée peut elle-même être améliorée afin de prendre en compte davantage de phénomènes biomécaniques et ainsi analyser séparément davantage de paramètres tels que les frottements de l'air, les frottements articulaires ou les activations musculaires.

References

- [AFO05] ARIKAN O., FORSYTH D., O'BRIEN J. : Pushing people around. In *ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation* (July 2005), pp. 59–67.
- [ALP04] ABE Y., LIU C., POPOVIĆ Z. : Momentum-based parametrization of dynamic character motion. In *ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation* (August 2004), pp. 173–182.
- [BT92] BOULIC R., THALMANN D. : Combined direct and inverse kinematic control for articulated figure motion

- editing. *Computer Graphics Forum* 11(4) (1992), 189–202.
- [CK00] CHOI K., KO H. : On-line motion retargetting. *The Journal of Visualisation and Computer Animation* 11(5) (December 2000), 223–235.
- [DeL96] DELEVA P. : Adjustments to zatsiorsky-seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics* 29 (9) (September 1996), 1223–1230.
- [FDCM97] FAURE F., DEBUNNE G., CANI M., MULTON F. : Dynamic analysis of human walking. In *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)* (September 1997).
- [FP03] FANG A., POLLARD N. : Efficient synthesis of physically valid human motion. *ACM Transactions on Graphics* 22 (3) (July 2003), 417–426.
- [GL98] GLEICHER M., LITWINOWICZ P. : Constraint-based motion adaptation. *The Journal of Visualization and Computer Animation* 9, 2 (1998), 65–94.
- [Gle98] GLEICHER M. : Retargetting motion to new characters. In *SIGGRAPH '98 : Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (1998), pp. 33–42.
- [Hod98] HODGINS J. : Animating human motion. *Scientific American* 278 (3) (March 1998), 64–69.
- [KG04] KOVAR L., GLEICHER M. : Automated extraction and parametrization of motions in large data sets. *ACM Transactions on Graphics* 23 (3) (August 2004), 559–568.
- [KGP02] KOVAR L., GLEICHER M., PIGHIN F. : Motion graphs. In *Proceedings of SIGGRAPH'02* (July 2002).
- [KK86] KHALIL W., KLEINFINGER J. : A new geometric notation for open and closed loop robots. In *ICRA'86* (April 1986), pp. 75–79.
- [LP02] LIU C., POPOVIĆ Z. : Synthesis of complex dynamic character motion from simple animation. *ACM Transactions on Graphics* 21 (3) (July 2002), 408–416.
- [OM01] OSHITA M., MAKINOCHI A. : A dynamic motion control technique for human-like articulated figures. *Computer Graphics Forum / EG2001 Proceedings* 20 (3) (2001), 192–202.
- [PD06] PRONOST N., DUMONT G. : Validation de mouvements adaptés par analyse de la dynamique et squelette biomécanique. In *13èmes Journées du GTAS* (15-16 Juin 2006).
- [PDBN06] PRONOST N., DUMONT G., BERILLON G., NICOLAS G. : Morphological and stance interpolations in database for simulating bipedalism of virtual humans. *The Visual Computer* 22, 1 (January 2006), 4–13.
- [PSS02] PARK S., SHIN H., SHIN S. : On-line locomotion generation based on motion blending. In *ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation* (July 2002), pp. 105–111.
- [PW99] POPOVIĆ Z., WITKIN A. : Physically based motion transformation. In *Proceedings of SIGGRAPH'99* (August 1999), pp. 11–20.
- [RP03] REITSMA P., POLLARD N. : Perceptual metrics for character animation : Sensitivity to errors in ballistic motion. *ACM Transactions on Graphics - SIGGRAPH 2003 Proceedings* 22(3) (2003), 537–542.
- [RPE*05] REN L., PATRICK A., EFROS A., HODGINS J., REHG J. : A data-driven approach to quantifying natural human motion. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2005)* 24(3) (2005), 1090–1097.
- [SH05] SAFONOVA A., HODGINS J. : Analyzing the physical correctness of interpolated human motion. In *ACM Siggraph / Eurographics Symposium on Computer Animation* (July 2005), pp. 171–180.
- [TK05] TAK S., KO H. : A physically-based motion retargetting filter. *ACM Transaction on Graphics* 24(1) (2005), 98–117.
- [TPZZ06] TANG B., PAN Z., ZHENG L., ZHANG M. : Interactive generation of falling motions. In *Computer Animation and Virtual Worlds Journal (Intl. Conf. on Computer Animation and Social Agents, CASA 2006)* (Septembre 2006), pp. 271–279.
- [TSK00] TAK S., SONG O., KO H. : Motion balance filtering. *Computer Graphics Forum* 19(3) (2000), 437–446.
- [VDO99] VAUGHAN C., DAVIS B., O'CONNOR J. : *Dynamics of Human Gait (2nd edition)*. Kiboho Publisher, 1999.
- [VFV92] VAN DE PANNE M., FIUME E., VRANESIC Z. : Control techniques for physically-based animation. In *Proceedings of the Third Eurographics Workshop on Animation and Simulation* (1992).
- [YN03] YAMANE K., NAKAMURA Y. : Dynamics filter - concept and implementation of on-line motion generator for human figures. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19(3) (2003), 421–432.
- [ZH02] ZORDAN V., HODGINS J. : Motion capture-driven simulations that hit and react. In *SCA '02 : Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (2002), pp. 89–96.
- [ZMCF05] ZORDAN V., MAJKOWSKA A., CHIU B., FAST M. : Dynamic response for motion capture animation. *ACM Transactions on Graphics* 24 (3) (July 2005), 697–701.

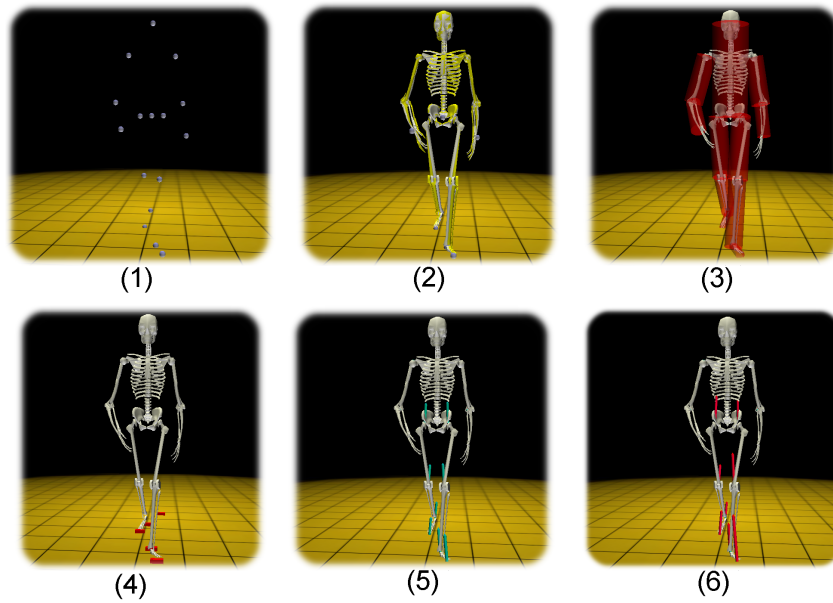


Figure 8: Quelques étapes clés de la méthode d'analyse de la dynamique. À partir d'un mouvement adapté (1), notre système projette le mouvement (2) sur un modèle mécanique du squelette incluant les informations de masses et d'inerties (3). Ensuite nous estimons les phases d'appui (4), et résolvons les lois de la dynamique, calculant ainsi les forces résultantes. Finalement nous validons (5) ou invalidons (6) le mouvement par comparaison avec la littérature et avec des données expérimentales.