

Cong Lap HUYNH

Étude de stratégies de contact pour l'animation physique de personnages virtuels

Cong Lap HUYNH
Encadré par Nicolas Pronost et Thomas Bonis

Université Lyon 1, LIRIS, UMR5205, F-69622, France

Résumé. L'animation basée sur la physique utilise les lois de la physique mécanique classique afin de générer automatiquement des animations adaptées au contexte et à l'environnement dans le quel elles se produisent. La simulation physique requiert de bonnes bases en physique mécanique et un simulateur utilisant ce mécanisme doit répondre à de nombreux critères, notamment la précision, la vitesse, la stabilité... La partie la plus importante de ces simulateurs, le moteur physique, est responsable des critères ci-dessus. L'objectif de ce stage est d'étudier, d'implémenter et d'évaluer des méthodes d'estimation et de traitement de contact entre un personnage virtuel animé par la physique et son environnement dans différents moteurs physique. Nous proposons également des méthodes pour améliorer la gestion de ces contacts sur la base des critères ci-dessus. Pour cela, nous expérimentons et évaluons les données obtenues lors de collisions entre une personne virtuelle et un sol dans ces simulateurs. Nous mesurons l'évolution de nombreux facteurs comme la stabilité et la vitesse à partir des paramètres considérés comme importants (nombre de contacts, contrôleur de mouvement ...). Une comparaison sera faite entre les moteurs physiques - leurs forces et leurs faiblesses à travers une métrique que nous définirons.

Mots-clés : Animation basée sur la physique, moteur physique, gestion de contacts, contrôle de mouvement.

Abstract. Physics-based animation uses the laws of classical mechanical physics to automatically generate animations that are relevant to the context and environment in which they occur. Physical simulation requires a good foundation in mechanical physics and a simulator using this mechanism must meet many criteria, including accuracy, speed and stability. The most important part of these simulators, the physics engine, is responsible for the above criteria. In this internship we study, implement and evaluate methods of estimation and contact treatment between a virtual character animated by physics and the environment in different simulators with different physics engines. We propose methods to improve these contacts based on the above criteria. For that, we experiment and

Cong Lap HUYNH

evaluate the data obtained during collisions between a virtual character and the ground in these simulators. We measure the evolution of many factors as stability and speed from the parameters considered as important (e.g. number of contacts and motion controller). A comparison will be made between the engines - their strengths and their weaknesses through a metric that we will design.

Keywords: Physics-based animation, physics engine, contact management, motion control.

Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Contexte et problématique du stage.....	5
2.1 Introduction du projet OMEGA.....	5
2.2 État d’avancement du projet OMEGA.....	5
2.3 Problématique et questions du stage.....	6
3. État de l’art.....	9
3.1 Vue d'ensemble de l'approche de Simbicon.....	10
3.2 Modélisation de pieds multi-segments.....	12
3.3 3D Foot-Ground Model using Disk Contacts.....	13
3.4 Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries.....	14
4. Travail réalisé.....	15
4.1 Évaluation de la stabilité de la simulation en fonction du nombre de points de contact.....	20
4.2 Évaluation de la stabilité de la simulation en fonction du Soft Contact	21
4.3 Études sur Simbody.....	22
5. Bilan et perspective.....	26
6. Conclusion.....	27
7. Références.....	28

1 Introduction

Dans le cadre du second semestre du Master 2 d'Informatique, j'ai effectué mon stage de recherche d'une durée de six mois au sein de l'équipe SAARA (Simulation, Analysis, Animation For Augmented Reality) du LIRIS (Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information) UMR CNRS 5205. Ce travail se fait dans le cadre du projet ANR PRCI – OMEGA (Optimization-based forward musculoskeletal simulation of pathological gait), l'objectif principal du projet OMEGA est la conception et la réalisation d'un contrôleur de mouvement pour la simulation physique de marches pathologiques qui vise à développer une nouvelle génération de simulateur prédictif, basé sur le calcul de mouvements optimaux, avec la promesse de pouvoir prévoir et donc améliorer les stratégies thérapeutiques spécifiques à un patient dans de nombreux domaines de la médecine de l'Homme et en particulier en chirurgie orthopédique et traumatologique. Ce simulateur proposera des moyens numériques permettant de guider et de prédire des thérapies, et pourra servir d'aide aux approches empiriques actuelles qui s'appuient sur l'évolution des thérapies en fonction de données mesurées

Mon rôle a été d'étudier la gestion de contacts du simulateur développé actuellement qui utilise le moteur physique ODE, puis de proposer des solutions pour améliorer sa méthode de gestion de contacts entre le personnage virtuel animé et le sol. En parallèle, j'ai recherché et évalué d'autres moteurs physiques considérés comme plus performants qu'ODE (comme Simbody et Mujoco). D'autre part, j'ai implémenté d'autres méthodes assez efficaces pour obtenir de meilleurs forces de contact et comparé la qualité de la simulation des moteurs physiques afin de trouver le moteur physique le plus approprié pour ce projet de recherche. Cette comparaison est basée sur la précision, la stabilité et le réalisme physique parce que ce sont les critères importants dans le projet OMEGA.

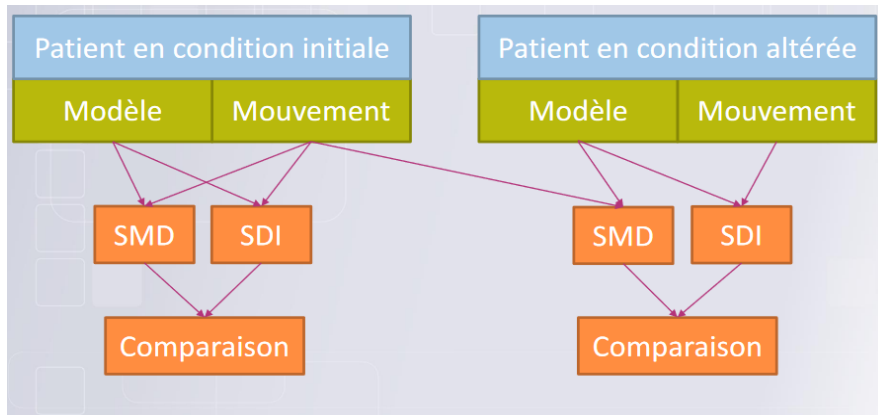
2 Contexte et problématique du stage

2.1 Introduction du projet OMEGA

OMEGA a pour projet de développer une nouvelle génération de simulateur prédictif, basé sur le calcul de mouvements optimaux, avec la promesse de pouvoir prévoir et donc améliorer les stratégies thérapeutiques spécifiques à un patient dans le domaine médical. Il proposera des moyens numériques permettant de guider et de prédire des thérapies, et pourra servir d'aide aux approches empiriques actuelles qui s'appuient sur l'évolution des thérapies en fonction de données mesurées. Des méthodes de simulation directe efficaces récemment développées, qui ont à ce jour été développées principalement pour la représentation du mouvement autonome humain dans l'industrie du divertissement et des jeux, sont appliquées dans un contexte médical. Un simulateur musculo-squelettique prédictif innovant est élaboré et mis en œuvre à cet effet. Bien que le simulateur pourrait à l'avenir être appliqué à un large éventail de troubles musculo-squelettiques, il est d'abord testé dans trois situations cliniques spécialement sélectionnées: genou et cheville contraints, pathologie du pied tombant, et amputation trans-fémorale équipée d'une prothèse contrôlée par microprocesseur. Ces trois situations cliniques ont été choisies car elles sont bien caractérisées, les modalités de traitement peuvent être modifiées de manière non invasive et sans risque pour les patients, et un nombre suffisant de patients est disponible. Bien que relativement simple, chacune de ces pathologies représente une réduction sérieuse de la qualité de vie chez les patients touchés. Des améliorations dans le traitement et en particulier dans l'adaptabilité des modalités de traitement aux besoins individuels des patients auront un impact important sur leur qualité de vie mais aussi sur les coûts associés aux traitements. Dans les trois scénarios, une plateforme spécifique est élaborée en environnement clinique, et validée en utilisant une combinaison de mesures cinématiques et cinétiques ainsi que des simulations dynamiques inverses servant de références et collectées sur des patients. L'une des applications futures des capacités prédictives du simulateur la plus évidente est le traitement de l'arthrose avancée de la hanche et du genou, c'est-à-dire arthroplastie totale de la hanche (THA) et du genou (TKA).

2.2 État d'avancement du projet OMEGA

Le projet OMEGA développe actuellement un simulateur capable de reproduire un mouvement de marche spécifique à un patient. Plus spécifiquement, ce simulateur vise à reproduire un mouvement pour un patient atteint d'une pathologie et prédire le mouvement de marche dû à l'évolution de sa pathologie (voir Fig. 1).



*SMD : Simulation musculosquelettique directe
*SDI : Simulation en dynamique inverse

Figure 1 : Vue global du projet

2.3 Problématique et questions du stage

Avec les objectifs actuels de construire un simulateur, le projet OMEGA doit être construit sur un moteur physique qui répond à des critères importants dans un projet du secteur de la santé (précision, stabilité, réalisme physique de l'animation). Le simulateur développé actuellement dans le projet utilise le moteur physique ODE pour traiter les contacts. ODE est un moteur physique rapide et assez stable qui représente les contacts par une approximation: des points de contact. ODE ignore parfois certains points de contact afin de privilégier la vitesse d'exécution sur la précision de la simulation. De plus, la gestion approximative des contacts d'ODE peut produire des forces de contact non réalistes et parfois instables entre les pieds et le sol (voir Fig. 2).

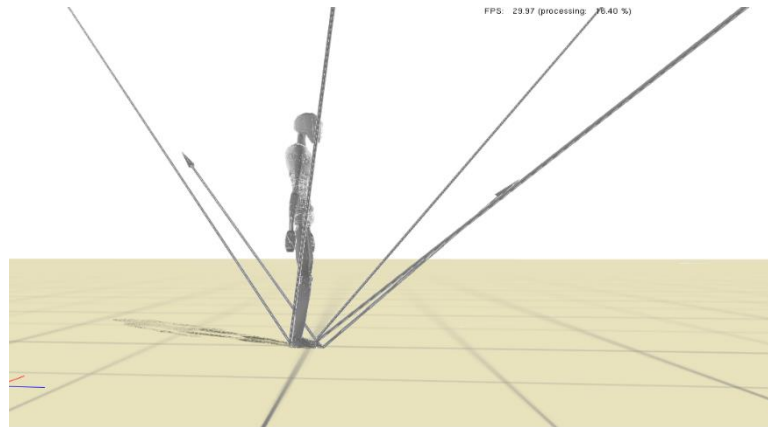


Figure 2: Dans le simulateur actuel utilisant ODE, la gestion approximative des contacts peuvent produire des forces de contact non réalistes et parfois instables

Dans la figure 2, les forces de contact entre les pieds et le sol sont représentées par des colonnes blanches. Nous observons un changement inhabituel et continu dans leur direction et leur ampleur, qui représente l'instabilité actuelle. Les forces de contact stables ont des valeurs et des directions très uniformes (voir Fig 14)

La gestion des contacts entre les pieds du personnage et le sol représente un challenge particulièrement difficile. Différentes méthodes ont été envisagées par le passé dont la plupart utilisent le contrôleur lui-même pour compenser les erreurs introduites lors du contact avec le sol (Références 17). Dans le cadre de ce stage, nous nous concentrons sur les contacts entre le personnage et le sol. L'objectif principal est de pouvoir quantifier l'influence de la méthode de gestion des contacts entre les pieds et le sol sur le réalisme physique et la stabilité des simulations, afin de choisir la plus adaptée. Plus spécifique, mes travaux effectués sont les suivants :

- Premièrement, en parallèle avec ODE nous étudions d'autres simulateurs et en particulier leur méthode respective de gestion des contacts. Dans notre cas, 2 simulateurs ont été ciblés : MoJoCo (<http://mujoco.org/>) et Simbody (simtk.org/projects/simbody). D'après une étude comparative (Références 19), MuJoCo est rapide et plus précis qu'ODE. Simbody est également plus précis et il apporte des outils permettant à l'utilisateur de choisir entre précision et rapidité.
- Deuxièmement, pour pouvoir évaluer ces moteurs physiques, nous définissons une métrique pour qualifier et quantifier l'influence de leurs méthodes de gestion de contact sur la qualité des simulations en nous inspirant de travaux comme (Chung2016 Références 21) (voir Fig. 3).

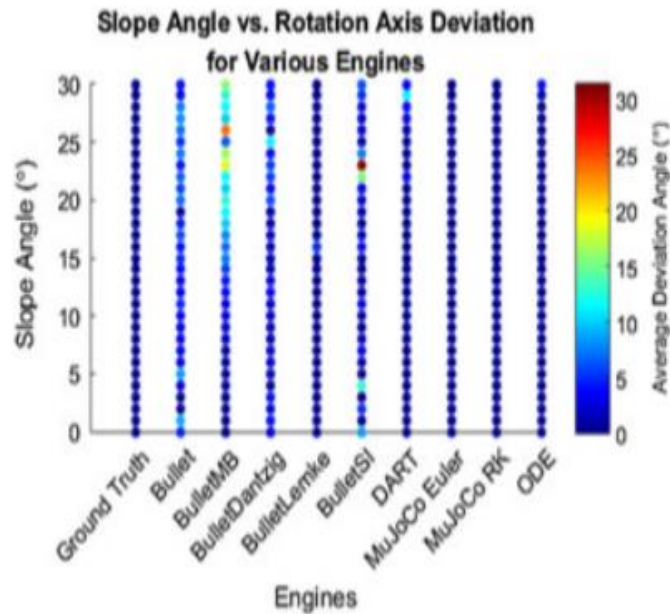


Figure 3: Résultats de la simulation de descente d'un cube avec différents moteurs physiques dans l'acticle de Chung. (a) Nombre de fois que le cube a dévalé la pente pour différents angles de pente et moteurs et (b) angle de déviation moyen de l'axe de rotation par rapport à leur axe.

Finalement, nous implémentons une métrique et comparons expérimentalement les simulateurs. Nous soulignons les forces et les faiblesses de chaque moteur physique sur les critères nécessaires afin de trouver le moteur physique le plus approprié pour les objectifs du projet de recherche.

Dans le cadre de mon stage, je me suis concentré sur les méthodes d'amélioration de la gestion des contacts dans le moteur physique actuel – ODE, la différence entre les autres moteurs physiques et les autres méthodes utilisées pour traiter les contacts spécifiques entre le pied d'un personnage virtuel et le sol.

Dans la suite de ce rapport, je vais présenter un état de l'art sur les différents points majeurs de mon travail. Je vais montrer plusieurs méthodes utilisées pour améliorer la gestion de contacts d'ODE et montrer les résultats obtenus. Ensuite, je présenterai la démarche d'évaluation que nous avons développée pour nos solutions, avant de terminer par une conclusion et des perspectives. Il convient de noter que certaines fonctionnalités ne sont pas encore entièrement développées à la date

Cong Lap HUYNH

d'écriture du rapport. Cependant leurs principes de fonctionnement ont déjà été établis et seront intégrées d'ici la fin du stage.

3 État de l'art

Mon stage a commencé avec le simulateur Simbicon (Simple Biped Locomotion Control - Références 1) qui intègre le moteur physique ODE. Le deuxième simulateur utilisé dans ce stage est Simbody. Dans cette partie, tout d'abord je commence par présenter les caractéristiques et les stratégies du moteur physique de ces deux simulateurs. Ensuite, j'étudie les différentes méthodes qui traitent les contacts entre le pied et le sol dans un simulateur basée sur la physique. Enfin, je proposerai quelques solutions pratiques afin d'améliorer ces deux simulateurs.

Simbicon et SimBody sont des simulateurs utilisant une simulation basée sur la physique. Tous les deux sont conçus pour le contrôle de la locomotion bipède. Simbicon est un simulateur utilisant ODE pouvant être utilisé pour générer une grande variété d'allures et de styles en temps réel, y compris la marche dans toutes les directions (en avant, en arrière, sur le côté, en tournant), la course, et le saut (voir Fig. 4)

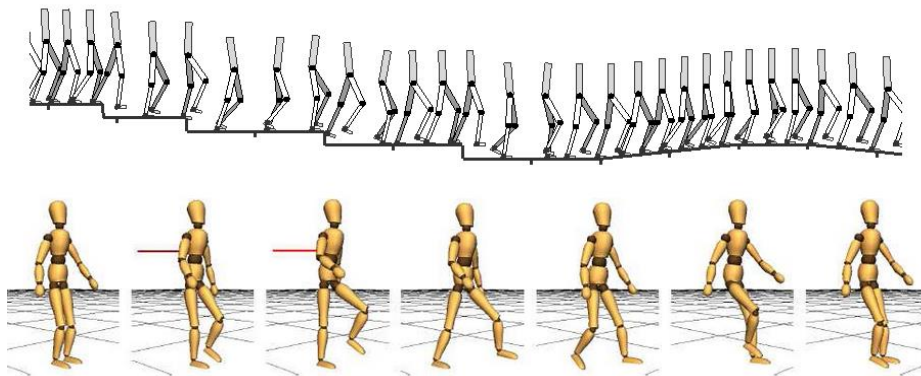


Figure 4 : Simulation en temps réel de personnages basée sur la physique avec Simbicon

La simulation basée sur la physique et le contrôle de la locomotion de bipèdes sont difficiles car les bipèdes sont des systèmes dynamiques, instables, sous-actionnés, et de grande dimension. Le mouvement animé est le plus souvent créé directement par les animateurs à l'aide d'images clés, ou en capturant, puis en traitant des mouvements humains. Cependant, ces approches ne parviennent pas à s'adapter au très grand nombre de mouvements possibles qui pourraient survenir dans un environnement réaliste. Un sous-ensemble d'approches algorithmiques prend en compte la physique. Ceux-ci

incluent des méthodes d'optimisation de trajectoire, ou, alternativement, développer des contrôleurs pour conduire des simulations dynamiques directes. Simbicon utilise des approches basées sur le contrôleur qui présentent l'avantage de pouvoir synthétiser le mouvement à des vitesses interactives et de produire du mouvement en utilisant des stratégies de rétroaction qui s'adaptent en permanence au monde réel selon les besoins.

3.1 Vue d'ensemble de l'approche de Simbicon (Références 1)

Simbicon fournit un cadre simple pour le contrôle bipède. Le point de départ est l'utilisation d'une simple machine à états finis ou d'un graphe de contrôle (voir Fig 5). Chaque état consiste en une pose du corps représentant les angles cibles par rapport à leurs liens parents pour toutes les articulations. Toutes les articulations individuelles tentent de se diriger vers leurs angles cibles à l'aide de contrôleurs à dérivée proportionnelle (PD) (voir Fig 6). Les transitions entre les états se produisent après des durées déterminées, ou, pour les autres états, après l'établissement d'un nouveau contact de pied. Les allures de marche peuvent être modélisées à l'aide de 4 états, alors que les allures de course peuvent être modélisées à l'aide de peu d'états.

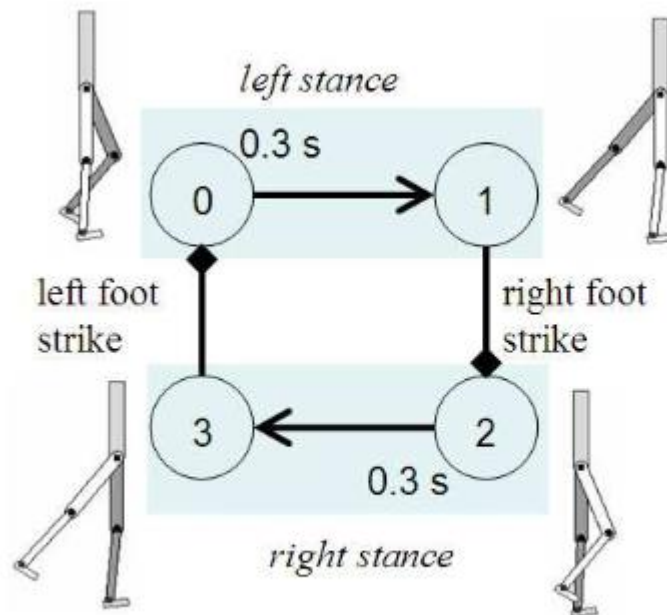


Figure 5 : Machine à états finis pour marcher

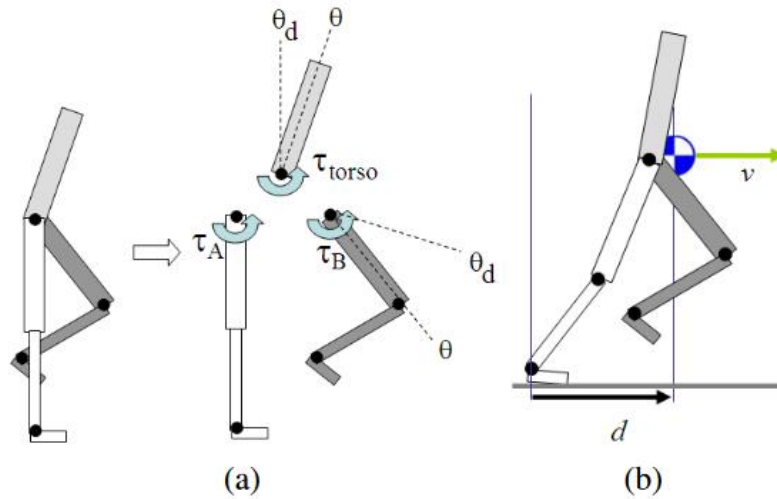


Figure 6 : Éléments de la stratégie de contrôle de l'équilibre: a) Relation entre les couples de torsion, les postures de hanche et les articulations de hanche; b) Position et vitesse du centre de la masse

La détection de collision dans Simbicon est un champ entièrement séparé utilisant la méthode Géométrie algorithmique (Références 22). Les approches standard pour la détection de collision sont VClip (Références 23), Culling (Références 24) ou Triangle mesh. L'ODE génère des points de contact, des normales de contact et des profondeurs avec une détection de collision continue pour empêcher l'interpénétration. Les primitives de collision actuelles sont les mailles sphérique, boîte, cylindre, capsule, plan, rayon et triangulaire (voir Fig 7)

	Ray	Plane	Sphere	Box	Capsule	Cylinder	Trimesh	Convex	Heightfield
Ray	No ^[2]	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Plane	-	No ^[2]	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No ^[2]
Sphere	-	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Box	-	-	-	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes ^[3]	Yes
Capsule	-	-	-	-	Yes	Yes ^[3]	Yes	Yes ^[3]	Yes
Cylinder	-	-	-	-	-	Yes ^[3]	Yes	Yes ^[3]	Yes
Trimesh	-	-	-	-	-	-	Yes	No	Yes
Convex	-	-	-	-	-	-	-	Yes	Yes
Heightfield	-	-	-	-	-	-	-	-	No ^[2]

Figure 7 : Tests de collision dans l'ODE

Cong Lap HUYNH

Dans cette section, nous nous intéressons aux méthodes de mesure et d'estimation des forces de réaction au sol créées par le contact du pied et le modèle de pied. Je présente les méthodes référencées dans ce stage

3.2 Modélisation de pieds multi-segments pour l'animation humaine (Références 3)

Cette méthode présente un modèle de pied multi-segments (voir Fig 8) et sa méthode de contrôle pour la simulation de comportements bipèdes réalistes. La force de réaction au sol est la seule source de contrôle pour un bipède qui se tient debout et marche sur ses pieds. Le pied est la partie du corps qui interagit avec le sol et produit un actionnement approprié du corps. L'anatomie du pied comprend 26 os et de nombreux muscles qui jouent un rôle important dans la transmission du poids, l'équilibre de la posture et l'aide à la déambulation. Auparavant, le modèle de pied était souvent simplifié en un ou deux corps rigides reliés par une articulation rotative. Cette méthode de modélisation propose un nouveau modèle de pied composé de plusieurs segments pour reproduire avec précision la forme du pied et ses fonctionnalités. Sur la base du nouveau modèle, nous pouvons développer un contrôleur de pose de pied capable de reproduire des postures de pied qui ne sont généralement pas obtenues avec des données de capture de mouvement.

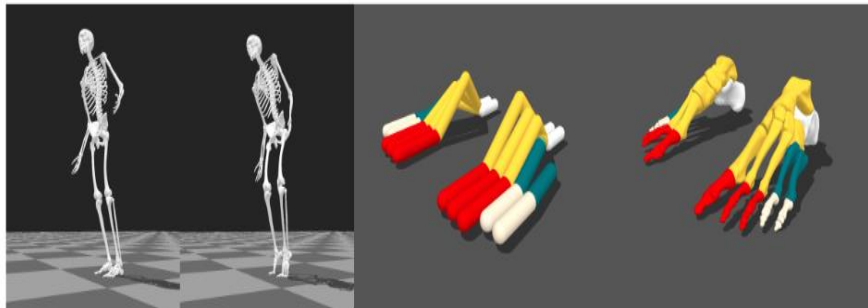


Figure 8- Références 3: Gauche: mouvement de la pointe des pieds, Centre: modèle de pied multi-segment en forme de capsule, Droite: modèle de pied squelettique divisé en cinq segments. Chaque segment est affiché dans une couleur différente. Chaque capsule est un os artificiel appartenant à un segment et utilisé comme unité de collision.

La principale contribution de cette méthode est qu'elle a créé un nouveau modèle de pied composé de plusieurs segments. En concevant un modèle de pied en plusieurs pièces, la forme des différents postures qu'un pied humain peut réaliser (voir Fig 9). De

Cong Lap HUYNH

plus, comme il existe de nombreux points de contact entre le pied et le sol, il est possible d'améliorer la stabilité du pied.

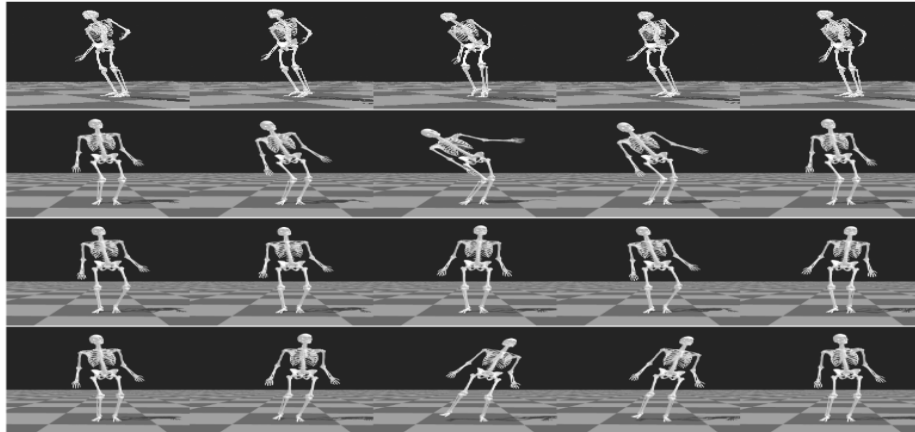


Figure 9: Ce modèle de pied à segments multiples permet de simuler différents mouvements du pied: pointe du pied, inclinaison, rotation du pied et centrage sur un pied.

Il existe 2 approches principales utilisant un modèle de contact de pied. La première méthode utilise un modèle de pied multi-segments avec l'avantage de la stabilité dans la simulation. Mais la modélisation des contacts est compliquée pour les grandes surfaces, où le contact ne peut être simplifié en un seul point. Un modèle de contact idéal doit trouver un équilibre entre précision et efficacité de calcul. Dans les méthodes suivantes, le pied est traité comme un simple corps et modélisé par une forme simple et utilise sa propre méthode pour mesurer et estimer les forces de réaction au sol.

3.3 3D Foot-Ground Model using Disk Contacts (Références 4)

Cette méthode présente une validation expérimentale préliminaire d'un modèle de contact de pied tridimensionnel (3D) représentant le talon et l'avant du pied à l'aide d'une paire de disques de contact (voir Fig 10). Les éléments de disque sont bien adaptés à la modélisation du pied car ils sont mécaniquement stables à plat sur le sol. Cette méthode évaluait le modèle de pied en comparant sa position de cheville à celle du sujet (mesurée à l'aide de marqueurs réfléchissants collés sur la peau et de caméras infrarouges) lorsque les deux pieds développaient les mêmes profils de force de réaction au sol (GRF) et de centre de pression (COP) (mesurés à l'aide d'une plateforme de force)

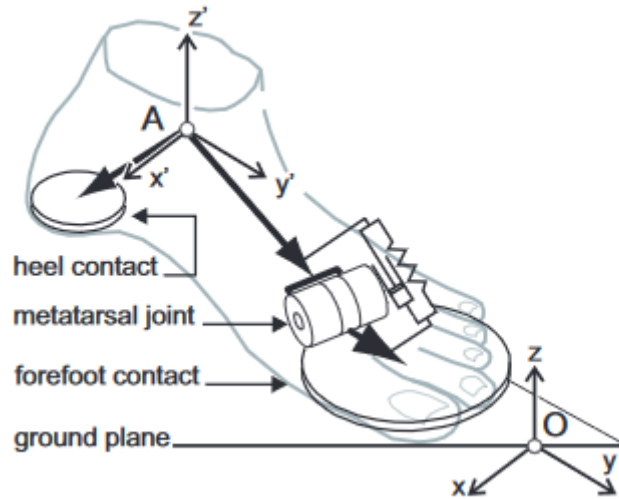


Figure 10 : Le pied interagit avec le sol à travers deux contacts de disque. Le disque de talon est attaché rigidement au repère de la cheville (repère A). Une articulation métatarsienne révolucionnaire permet au disque de l'avant-pied de tourner par rapport au disque de talon. Un ressort-amortisseur à l'articulation métatarsienne applique un couple dans le repère de la cheville.

3.4 Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries (Références 5)

Le contact volumétrique est basé sur un modèle de fondation élastique, qui modélise la surface comme une collection continue de ressorts, comme illustré dans la figure 11.

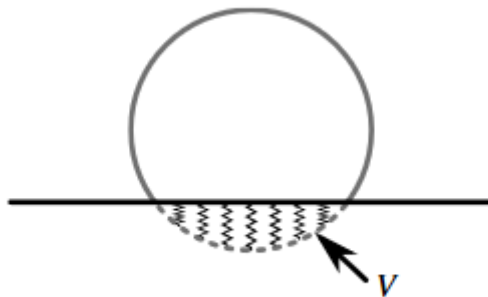


Figure 11 : Interaction volumétrique de la surface de contact

Cong Lap HUYNH

Étant donné que le contact volumétrique prend en compte la pression développée sur toute la surface de contact, il est plus précis que les modèles de contact ponctuel pour les géométries complexes et conformes. Cela signifie également que la pression sur la surface de contact peut être calculée naturellement avec un contact volumétrique, contrairement aux modèles à contact ponctuel. Les forces de contact peuvent être trouvées en tant que partie intégrante des contraintes développées sur la zone de contact. Si la géométrie de contact est représentée sous forme simplifiée, ce qui est généralement fait pour un contact volumétrique, les forces réparties sur la surface de contact peuvent être intégrées pour obtenir des équations analytiques des forces et couples équivalents au point résultant. Le contact volumétrique inclut un terme d'amortissement qui peut capturer une partie de la viscoélasticité du corps mou plantaire, mais la forme standard suppose une rigidité linéaire et peut perdre un peu de précision lors de la modélisation de matériaux avec une rigidité non linéaire. Outre la force normale, le contact volumétrique définit des équations pour la résistance au roulement, le frottement tangentiel et le frottement en rotation. Il en résulte un ensemble d'équations bien plus efficaces que les modèles de fondations élastiques discrets, et non significativement plus complexes que les modèles à contact ponctuel.

4 Travail réalisé

Nous commençons avec le simulateur Simbicon avec l'IDE Visual Studio. Dans ce simulateur, un personnage virtuel est configuré avec un plan au sol (voir Fig 12). Comme mentionné dans la partie précédente, Simbicon lit un fichier de graphe de contrôle de poses. Ces états consistent en une pose du corps représentant les angles cibles par rapport à leurs liens parents pour toutes les articulations. Simbicon génère des mouvements en essayant de se diriger vers leurs angles cibles à l'aide de contrôleurs à dérivée proportionnelle (PD). Nous utilisons un graphe de contrôle de pose de la marche.

Cong Lap HUYNH

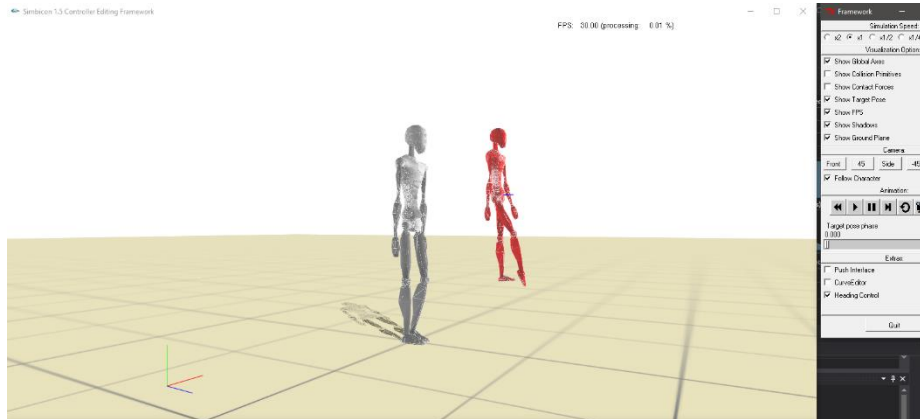


Figure 12 : Personnage virtuel avec un mouvement de marche dans Simbicon - La personne rouge présente les angles cibles dans la machine à états finis

Un problème s'est posé dès le début du stage dans ce simulateur - la gestion approximative des contacts dans Simbicon produisent des forces de contact non réalistes et parfois instables (voir Fig 2)

Tout d'abord, une méthode d'amélioration est proposée sur la recherche de pieds multi-segments pour l'animation humaine (Références 3). Suite à cette recherche, étant donné les nombreux points de contact entre le pied et le sol, il est possible d'améliorer la stabilité du pied. Simbicon utilise actuellement une boîte de contact pour le modèle de pied. L'idée est de remplacer la boîte de contact par un ensemble de points de contact, et nous observons le changement des forces de contact quand le nombre de points de contact change (voir Fig 13).

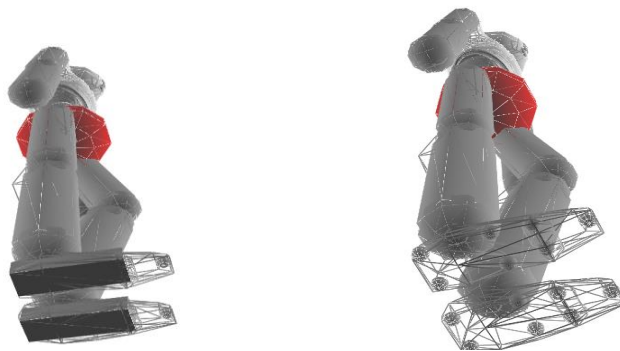


Figure 13. A : Modèle de pied de contact par défaut en boîte. B : Modèle de pied avec des points de contact

Cong Lap HUYNH

Les données de force de contact entre le pied et le sol sont enregistrées dans un fichier pour pouvoir comparer les changements de force en fonction du nombre de points de contact utilisés (voir Fig. 14 et 15).

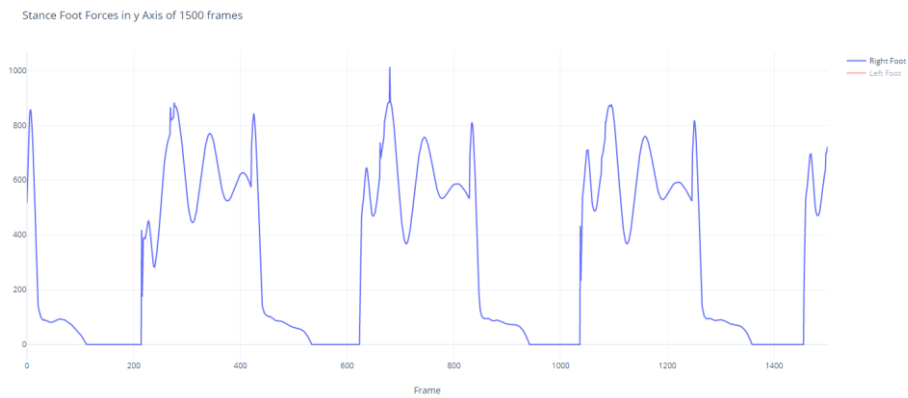


Figure 14 Force de contact de 3 pas avec 5 points de contact

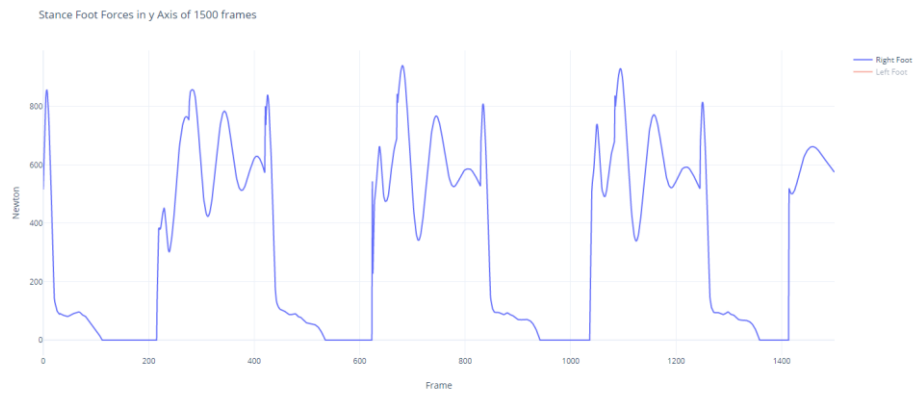


Figure 15 Force de contact de 3 pas avec 12 points de contact

Dans ces figures, la force de contact du modèle avec 5 points de contact montre des forces instables, montrées par des pics pointus. Après avoir augmenté le nombre de

Cong Lap HUYNH

contacts graduellement (de 5 à 21), ces pics diminuent et disparaissent progressivement avec le modèle de pied à 12 points de contact. C'est-à-dire qu'en augmentant le nombre de points de contact, nous pouvons améliorer la force de contact entre les pieds et le sol, avec la possibilité de supprimer les pics pointus instables des forces générées. Mais en outre, nous avons observé une augmentation significative des performances de l'ordinateur ainsi que de cette augmentation des points de contact. Avec 5 à 24 points de contact, l'utilisation du processeur augmente de 3% à 120%. Cela représente un compromis entre la stabilité et les performances de la machine avec cette méthode.

Il existe une autre méthode pour résoudre l'instabilité entre la force de contact entre le pied et le sol : les « Soft Contacts » (Références 6). Cette méthode montre que le fait d'ignorer l'effet des corps déformables sur le site de contact affecte négativement les algorithmes de contrôle, ce qui entraîne une réduction des mouvements des personnages et des mouvements non naturels. Suite du manuel utilisateur ODE (Références 7), les « Soft Contacts » sont présentés par 2 paramètres - Soft Constraint et Constraint Force Mixing. En ajoutant ces 2 paramètres, on peut simuler les Soft Contacts. Sur la figure 14, les résultats ont été considérablement améliorés par rapport aux résultats de la figure 1. Les forces de contact sont plus uniformes et changent linéairement. Il n'y a plus d'explosion des forces de contact (voir Fig 16)

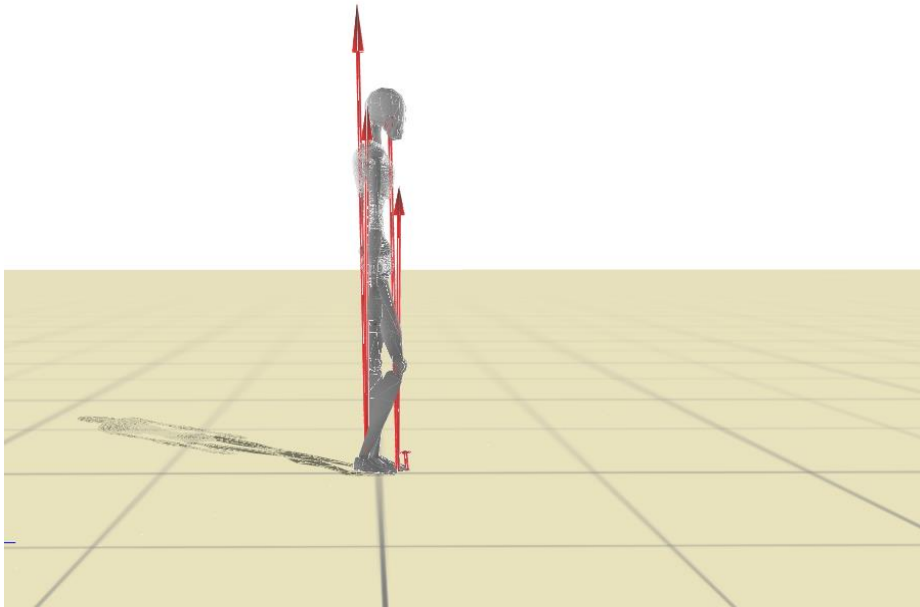


Figure 16 : Force de contact avec Soft Contact

Cong Lap HUYNH

Selon le manuel utilisateur (Références 7 partie 3.8), par défaut, les contacts dans ODE sont « durs » . Cela signifie qu'une contrainte spéciale de non-pénétration est utilisée chaque fois que deux corps entrent en collision, c'est-à-dire que les contraintes représentent des conditions qui ne sont jamais violées. ODE traite le matériau du pied et de la terre comme du métal. Cela signifie que la pénétration entre eux est nulle. En fait, la matière du pied est molle et le sol peut aussi l'être. C'est la raison pour laquelle, par défaut, la gestion approximative des contacts d'ODE produit des forces de contact non réalistes et parfois instables. De plus, l'utilisation de Soft Contact ne réduit pas les performances en CPU comme dans la méthode précédente.

Dans ce stage, nous définissons une métrique pour qualifier et quantifier l'influence de la méthode de contact sur la qualité des simulations. Avec les données obtenues à la section précédente, il devrait y avoir une méthode pour mesurer la qualité de la simulation. Une méthode consiste à utiliser des intégrales. Tout d'abord, j'ai mesuré et enregistré le contact entre le pied et le sol en 1500 pas de simulation (voir Fig. 17). Avec ces données, je calcule la dérivée première et la dérivée seconde (voir Fig. 18). La dérivée première représente la variation de la force de contact dans la simulation.

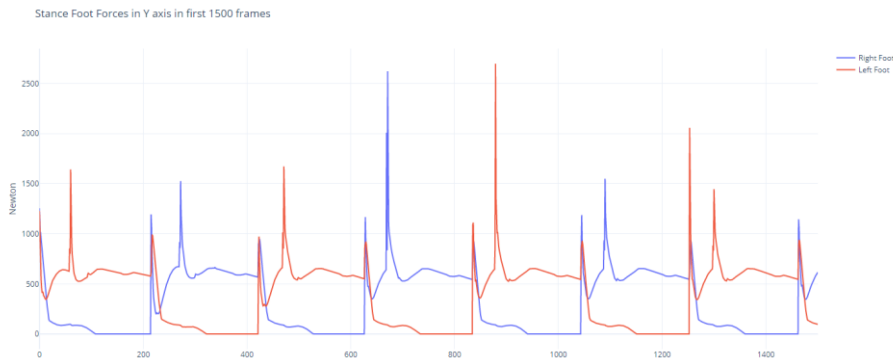
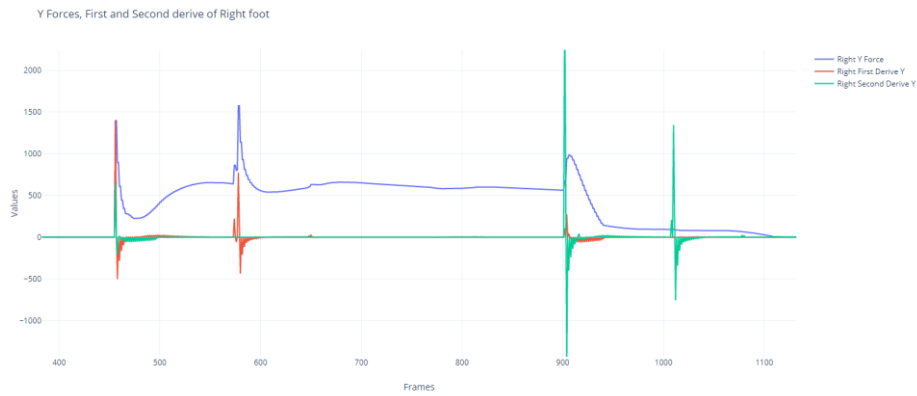


Figure 17: Données de force de contact enregistrées en 1500 pas de simulation - La ligne rouge représente le pied droit - la ligne bleue représente le pied gauche

Après avoir obtenu la dérivée, nous calculons l'intégrale de la dérivée seconde (voir Fig. 19). En théorie, plus la valeur d'intégration est petite, plus la variation de la force de contact est faible, ce qui indique que la stabilité est accrue.

Cong Lap HUYNH



*Figure 18 : La dérivée première et la dérivée seconde. Bleue : Force Y droite (vertical).
Rouge : La dérivée première. Verte : La dérivée seconde*



Figure 19 : Zone rouge : Intégrale de la force du pied droit sur l'axe des y (vertical)

Ensuite, à partir de cette méthode d'évaluation, nous essayons de trouver les paramètres les plus optimaux de la section précédente : le nombre de points de contact et la valeur de « Soft Contact » dans Simbicon.

4.1 Évaluation de la stabilité de la simulation en fonction du nombre de points de contact

Nous faisons les évaluations en augmentant le nombre de points de contact, puis nous utilisons la méthode intégrale pour évaluer la stabilité de la force de contact et trouver les points de contact optimaux pour atteindre le meilleur résultat (voir le Fig 20).

Cong Lap HUYNH

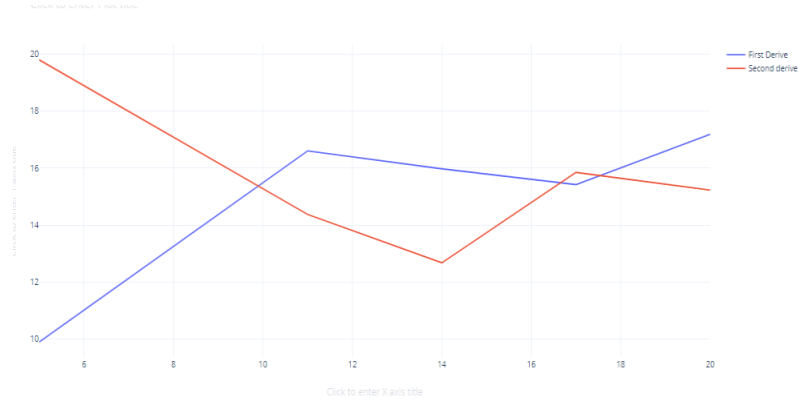


Figure 20 : Changement de l'intégrale de la dérivée première (rouge) et la dérivée seconde de la force de contact du pied droite basé sur le changement des points de contact

Dans la figure 20, nous commençons avec cinq points de contact et augmentons progressivement jusqu'à 20 points. La ligne rouge représente la valeur intégrale de la dérivée seconde. Nous observons que la stabilité de la force de contact diminue progressivement pour atteindre la valeur optimale à 14 points de contact.

4.2 Évaluation de la stabilité de la simulation en fonction du « Soft Contact »

Dans ODE, la simulation de Soft Contact est activée en ajoutant le paramètre CFM - Constraint Force Mixing (Références 7 partie 3.8) Comme l'évaluation précédente, nous faisons les évaluations en augmentant la valeur de ce paramètre, puis nous utilisons la méthode intégrale pour évaluer la stabilité de la force de contact et trouver la valeur optimale.

CFM valeur	0.0001	0.0003	0.0005	0.0007	0.0008	0.0009	0.001	0.002
Intégrale 1	11.43	10	10.3415	9.86289	9.64268	8.9878	9.97742	142.20
Intégrale 2	22.8	20.71	20.683	19.72	19.2854	17.9 Optimal	19.9548	284.4 Très mauvais

Tableau 1 : Valeurs de la dérivée première et de la dérivée seconde en fonction du changement de valeur du CFM

Cong Lap HUYNH

Dans la Table 1, nous commençons avec une valeur de CFM = 0.0001 et augmentons progressivement jusqu'à 0.002. Nous observons que la stabilité de la force de contact augmente progressivement et que la meilleure valeur (minimum) est obtenue pour CFM = 0.0009. En fait, selon le manuel ODE (Références 7 partie 3.8), la valeur maximale de CFM à utiliser est de 0.001. Si la valeur de CFM est supérieure à cette valeur, la force de contact sera extrêmement instable (voir 7ème colonne du tableau).

4.3 Études sur Simulateur Simbody

Ensuite, nous avons étudié le simulateur Simbody. Nous nous concentrons sur les caractéristiques de Simbody que Simbicon ne prend pas en charge. Tout d'abord Simbody est conçu pour la recherche biomédicale. Les simulations de simbody sont classées comme des simulations hybrides (Références 9), ce qui signifie qu'elles consistent à la fois en une évolution continue dans le temps et en des événements discrets. La progression d'un tel système dans le temps est gérée par un algorithme appelé « stepper » temporel, constitué d'un intégrateur numérique permettant d'avancer dans les parties lisses de la simulation et de détecter les événements en attente, et d'un gestionnaire d'événements permettant de gérer ces événements. Tous les intégrateurs de Simbody sont capables de produire une sortie continue (dense) (Références 10, 11), ce qui signifie qu'ils peuvent interpoler efficacement et avec précision les valeurs d'état à tout moment au cours d'une étape. Cette capacité importante permet de découpler le choix de la taille de l'étape de l'intervalle de rapport souhaité.

Contrôle de la précision - Une caractéristique très importante de Simbody est nécessaire pour le projet OMEGA est la capacité de contrôler la précision

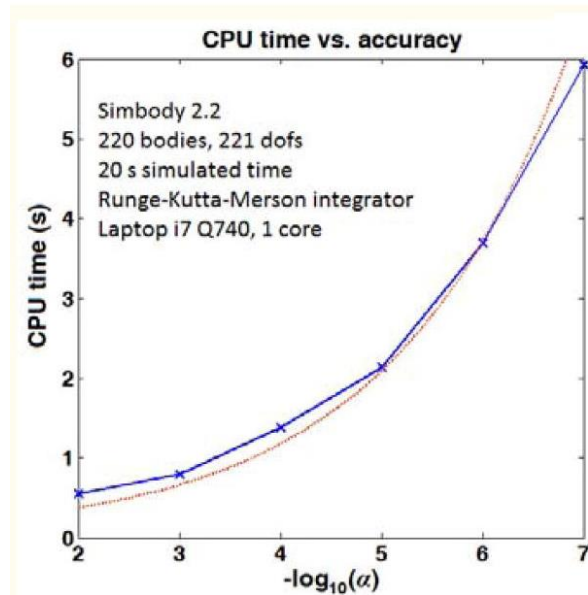


Figure 21 : Temps CPU en fonction de précision

La figure 21 montre une évaluation du temps de calcul et de la précision dans Simbody, citée dans le document - Multibody dynamics for biomedical research (Références 9). Le système simulé comprenait 11 chaînes de 20 corps utilisant des articulations rotatives orientées de manière aléatoire, attachées à une base oscillante commune. Des vitesses initiales aléatoires ont été attribuées à tous les degrés de liberté, avec des vitesses suffisamment basses pour éviter les mouvements chaotiques, de sorte que toutes les simulations aient des trajectoires identiques. Le nombre de pas (et donc de temps CPU) requis par un intégrateur de 4^{ème} ordre doit être proportionnel à $\alpha - 1/4$. La ligne rouge tracée est $0,118 \alpha - 1/4$. Notez que les temps de calcul absolus peuvent varier considérablement pour des systèmes de taille similaire présentant des caractéristiques différentes. Ceci est uniquement destiné à servir d'exemple de performance relative par rapport à la précision. Plus d'informations sur la précision dans Simbody peuvent être trouvées dans références 12.

Contact modeling (Références 9) - Simbody fournit deux modèles de contact conformes qui prennent en compte les déformations pour générer des forces de contact. L'une est basée sur la théorie du contact Hertz (Références 13-14) qui génère analytiquement des forces et des déformations précises basées sur la théorie de l'élasticité linéaire, mais limitée à de simples objets géométriques. Le second est le modèle de fondation élastique (Références 14-15), qui utilise des maillages pour représenter des surfaces géométriques arbitrairement compliquées en contact, mais calcule les déformations et les forces à l'aide d'un modèle élastique simplifié. Les détails et les capacités de ces deux méthodes sont disponibles dans Références 12. Pour chaque

Cong Lap HUYNH

élément de contact, cette méthode produit une force composée de trois effets: rigidité, dissipation et friction.

$$\mathbf{f}_{contact} = \mathbf{f}_{stiffness} + \mathbf{f}_{dissipation} + \mathbf{f}_{friction}$$

En general, Simbody est très approprié pour simuler les forces de contact et de déformation. Dans la section précédente, le seul moyen de simuler un Soft Contact dans Simbicon est d'utiliser la valeur CFM. Cette valeur est limitée de 0 à 0.001, et apporte seulement une amélioration partielle de l'instabilité de la force de contact dans le simulateur.

À la fin de ce stage, nous implémentons la méthode "Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries" (Références 5) dans le simulateur Simbicon, montré dans la section "État de l'art". Actuellement, nous utilisons des modèles de pied avec des points de contact (voir Fig 11.B). Comme mentionné précédemment, le modèle de pied avec points de contact est capable d'améliorer la stabilité de la force de contact entre les pieds et le sol. Mais aussi dans le même temps considérablement réduit les performances du processeur. Parce que ces modèles de contact peuvent considérablement augmenter la complexité des équations du système multicorps, en particulier si la surface de contact est relativement grande. Volumetric contact modelling est explorée en tant que modèle efficace pour le contact pied-sol.

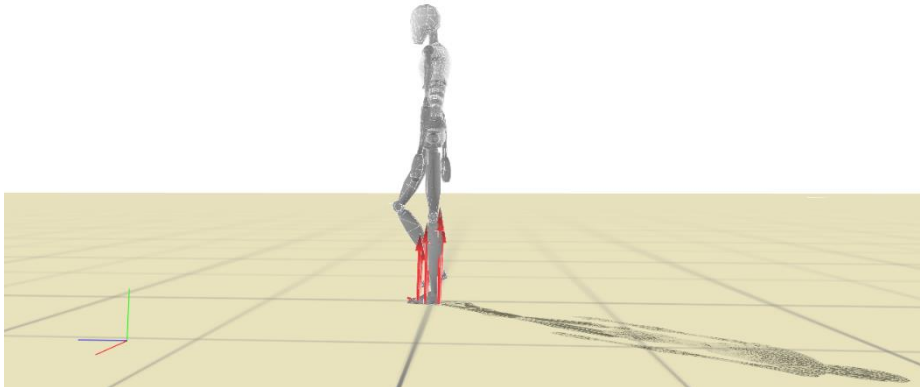


Figure 22 : Mesurer la force de contact avec la méthode Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries

Cong Lap HUYNH

La figure 22 représente le résultat obtenu avec cette méthode. Les colonnes rouges présentent les forces normales de contact entre les pieds et le sol. Nous essayons actuellement d'utiliser la méthode d'évaluation intégrale mentionnée dans la section précédente pour évaluer la stabilité de cette méthode par rapport au modèle du pied avec les points de contact. Cette méthode démontre un avantage en vitesse de calcul en simulation. Le modèle peut fonctionner 100 fois plus rapidement qu'en temps réel (dans une simulation inverse à 128 ips) et correspondre à la force normale expérimentale et à l'emplacement du centre de pression avec moins de 7% d'erreur quadratique moyenne (Références 5).

5 Bilan et perspective

5.1 Bilan

Durant ce stage, nous sommes intéressés par trois objectifs au début. Tout d'abord, nous nous concentrons sur l'étude de la stratégie de contact de ODE avec le simulateur Simbicon. Nous essayons d'améliorer la stabilité et le réalisme de la simulation dans le simulateur Simbicon. Le premier problème, la force de contact instable et parfois instable dans Simbicon est assez bien résolue en utilisant la méthode Soft Contact. La méthode d'utilisation du modèle de pied avec des points de contact a permis d'améliorer certaines forces de contact dans le projet OMEGA. Alors que la méthode d'utilisation du modèle de pied avec plusieurs points de contact ne peut effacer que certaines forces explosives et utiliser beaucoup de ressources de la CPU, la méthode Soft Contact peut considérablement améliorer l'instabilité de la force. contacter, mais toujours garder les performances du processeur.

Le deuxième objectif de ce stage est de définir une métrique pour qualifier et quantifier l'influence sur la qualité des simulations. Les méthodes intégrales sont utilisées pour évaluer la variation de la force de contact sur une période donnée. Ainsi, nous pouvons évaluer la stabilité de la force de contact avec cette méthode., en supposant que plus la valeur d'intégration est petite, plus la stabilité de la force de contact est grande. A partir de cette méthode d'évaluation, nous pouvons trouver les valeurs optimales dans les méthodes appliquées (Points de contact, valeurs Soft Contact ...). Depuis lors, les problèmes de stabilité dans le projet OMEGA peuvent être améliorés.

Un autre simulateur a été étudié en parallèle avec Simbicon - Simulator Simbody. En fait, il y a 2 simulations proposées dans ce stage - Simbody et Mujoco. Mais Mujoco est une machine de simulation utilisée à des fins commerciales. Malheureusement, nous n'avons pas les fonds nécessaires pour effectuer des recherches sur cette machine de simulation. Les recherches de Simbody montrent sa pertinence pour le projet OMEGA. Simbody est conçu pour la recherche biomédicale. Par conséquent, Simbody prend en charge un compromis entre précision et temps de calcul. En manipulant la force de contact, Simbody prend en charge 2 approches différentes pour mesurer et calculer la force de contact lorsqu'une collision se produit entre deux objets. La première méthode utilise un modèle de pied complexe - avec l'avantage d'une grande précision, mais qui doit être échangé entre la précision et les performances du processeur. En revanche, La deuxième méthode utilise modèles simples, avec un taux de calcul beaucoup plus rapide, mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour obtenir la précision souhaitée.

La méthode du "Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries" est appliquée à la fin du stage et se trouve actuellement en phase de mise en œuvre. Cette

Cong Lap HUYNH

méthode utilise la deuxième approche du modèle de pied, utilisant des modèles simples (sphérique, plan ellipsoïde) pour estimer la force de contact entre le pied et le sol, avec l'avantage de la vitesse de calcul par rapport à la méthode par défaut d'ODE (les forces qui sont appliquées par chaque joint)

5.2 Perspective

À la fin du stage, la méthode "Volumetric Contact Model of Ellipsoid-Plane Geometries" est mise en œuvre avec des résultats positifs. Les évaluations seront mises en œuvre sur cette méthode et peuvent être appliquées dans le projet OMEGA. Une méthode avec une approche similaire peut être appliquée dans un proche avenir (3D Foot-Ground Model using Disk Contacts - Références 4). À plus long terme, le moteur physique SimBody est proposé pour remplacer le moteur physique ODE, en raison de ses nombreux avantages en simulation dans la partie 4.3.

6 Conclusion

Les résultats de nos travaux sont satisfaisants et répondent à la problématique du stage. Les connaissances de ce stage peuvent être appliquées pour améliorer le projet OMEGA à bien des égards. Certaines des suggestions ne sont malheureusement toujours pas appliquées en raison de problèmes de temps ou de budget. Par exemple, un sujet concerne la possibilité d'intégrer le moteur physique Simbody dans le simulateur Simbicon. Enfin, avec ce stage, j'ai l'occasion de travailler et d'apprendre un simulateur 3D. Dans le domaine de la recherche en informatique, ce type de simulateur peut également être étudié pour l'animation de créatures virtuelles. Ils sont largement utilisés dans l'industrie du jeu vidéo en 3D (Unity, Unreal, Blender...). Et dans le domaine commercial, nous pouvons aussi imaginer des applications futures dans les domaines de l'animation pour le cinéma ou les jeux vidéo. J'ai pu, grâce à ce stage, améliorer mes compétences en la langue de programmation C/C++ sous environnement Windows. Ce stage me donne donc beaucoup d'expérience nécessaire pour un futur travail dans le domaine de l'image 3D.

7 Références

1. SIMBICON: Simple Biped Locomotion Control, KangKang, Yin Kevin, Loken Michiel van de Panne
2. Measured and estimated ground reaction forces for multi-segment foot models
Dustin A. Bruening, Kevin M. Cooney, Frank L. Buczek, James G. Richards
3. Multi-Segment Foot Modeling for Human Animation, Hwangpil Park, Ri Yu, Jehee Lee
4. A 3D Foot-Ground Model using Disk Contacts M. Millard and A. Kecske-méthy
5. Boos, M., McPhee, J.: Volumetric modeling and experimental validation of normal contact dynamic forces. *J. Comput. Nonlinear Dyn.* 8(2), 021006 (2013)
6. Controlling Physics-Based Characters Using Soft Contact Sumit Jain C. Karen Liu
7. ODE user manual - <http://ode.org/wiki/index.php?title=Manual>
8. Simbody Theory Manual
9. Simbody: multibody dynamics for biomedical research Michael A. Sherman, Ajay Seth, and Scott L. Delp
10. Hairer E, Nørsett SP, Wanner G. Solving ordinary differential equations I: nonstiff problems. 2. Berlin; New York: Springer-Verlag; 1993
11. Hairer E, Ostermann A. Dense output for extrapolation methods. *Numerische Mathematik.* 1990;58(1): 419–439
12. Sherman M. Simbody Theory Manual. Simbios Center at Stanford University; 2011

Cong Lap HUYNH

13. Hertz H. On the contact of elastic solids. *J Reine Angew Math.* 1882;92: 156–171
14. Johnson KL. *Contact mechanics.* Cambridge shire; New York: Cambridge University Press; 1985
15. Blankevoort L, Kuiper JH, Huiskes R, et al. Articular contact in a three-dimensional model of the knee. *Journal of Biomechanics.* 1991;24(11):1019–1031
16. MuJoCo - Advanced physics simulation - <http://mujoco.org/>
17. [Coros2010] : Coros, S., Beaudoin, P., & van de Panne, M. (2010). Generalized biped walking control. *ACM Transactions on Graphics*, 29(4), 1
18. Lee2014] : Lee, Y., Park, M. S., Kwon, T., & Lee, J. (2014). Locomotion control for many-muscle humanoids. *ACM Transactions on Graphics*, 33(6), 1–11
19. [Erez2015] : Erez, T., Tassa, Y., & Todorov, E. (2015). Simulation tools for model-based robotics: Comparison of Bullet, Havok, MuJoCo, ODE and PhysX. *Proceedings -IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015–June*, 4397–4404
20. [Carensac2018] : Carensac, S., Pronost, N., & Bouakaz, S. (2018). Physics-based control of walking virtual characters in low frequency simulations. In *Proceedings of the 31st International Conference on Computer Animation and Social Agents -CASA 2018* (pp. 77–82). New York, New York, USA: ACM Press
21. [Chung2016] : Chung, S.-J., & Pollard, N. (2016). Predictable behavior during contact simulation: a comparison of selected physics engines. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 27(3–4), 262–270
22. Computational geometry - https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_geometry
23. V-Clip: Fast and Robust Polyhedral Collision Detection, Brian Mirtich
24. Back-face culling - https://en.wikipedia.org/wiki/Back-face_culling