

Thèse
pour obtenir le grade de
Docteur de l'INPG

Spécialité : Imagerie, Vision et Robotique

Préparée au sein du laboratoire *i*MAGIS-GRAVIR/IMAG-INRIA. UMR CNRS C5527
dans le cadre de l'École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologie de l'information, Informatique
présentée et soutenue publiquement par

Gilles DEBUNNE

le 15 décembre 2000.

Animation multirésolution
d'objets déformables en temps-réel
Application à la simulation chirurgicale

Directrice de thèse : Marie-Paule CANI

Composition du jury :

Roger	MOHR	Président
Bruno	ARNALDI	Rapporteur
Daniel	THALMANN	Rapporteur
Christophe	CHAILLOU	Examinateur
Mathieu	DESBRUN	
Alan H.	BARR	
Marie-Paule	CANI	

SOMMAIRE

Notations	5
Introduction	7
1 Travaux antérieurs	11
2 Notions d'élasticité linéaire	33
3 Premier modèle multirésolution	45
4 Nouveaux opérateurs différentiels	63
5 Modèle multirésolution hiérarchique	91
6 Interface avec l'utilisateur	103
Conclusion	111
A Rappels sur les opérateurs différentiels	117
B Les méthodes d'intégration	119
C Green-Lagrange en pratique	123
Table des matières	127
Table des figures	131
Bibliographie	135

Notations

Nous allons être amenés à utiliser bon nombre d'équations dans cette thèse. Nous nous sommes efforcés de suivre un système de notations qui devrait en simplifier la lecture.

Les grandeurs scalaires seront désignées en italiques (s), les vecteurs et champs vectoriels, de dimension 3 dans notre cas, seront en gras (\mathbf{v}) tandis que les matrices et autres tenseurs seront représentés par des lettres grecques ou calligraphiques (ϵ, A).

Les exposants permettront d'identifier les points où est mesurée la grandeur : $\mathbf{p}^i, \mathbf{v}^i, \mathbf{a}^i$ seront respectivement les position, vitesse et accélération du point i .

Les indices désigneront quant à eux la composante : v_i est la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur \mathbf{v} . Les lettres i et j seront des indices muets prenant implicitement les valeurs 1, 2 ou 3. On pourra aussi écrire directement v_x, v_y, v_z pour désigner les trois composantes de \mathbf{v} .

Nous utiliserons pour désigner les dérivées d'une grandeur scalaire s par rapport à la variable x l'expression $s_{,x}$. Ainsi $v_{x,y} = \frac{\partial v_x}{\partial y}$. La notation s'étend aux vecteurs et $\mathbf{v}_{,y}$ sera le vecteur dont chaque composante est la dérivée par rapport à y de la composante associée de \mathbf{v} .

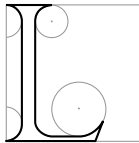
L'annexe A rappelle quelques notions sur les opérateurs vectoriels (**grad**, **div**, ...) et introduit des notations plus poussées. Des notes en bas de page indiquent quand s'y reporter durant la lecture du document.

Enfin, nous utiliserons les *italiques* à l'intérieur du texte pour introduire de nouvelles terminologies ou pour accentuer l'importance de certains mots.

Introduction

Telle est ma quête,
suivre l'étoile.
Peu m'importent mes chances,
Peu m'importe le temps.

Jacques BREL, *La quête*



L'ANIMATION de scènes en synthèse d'images est une technique maîtrisée, largement utilisée pour les effets spéciaux cinématographiques et les jeux vidéos. Elle se limite toutefois la plupart du temps à l'animation du déplacement d'objets rigides. Chercher, comme on va le faire dans cette thèse, à calculer *automatiquement* les déformations d'un objet, qui plus est en *temps-réel*, est un problème encore ouvert. Il faut pour cela mettre en œuvre des optimisations, dont la multirésolution fait partie.

Contexte

Quand on parle d'animation, aussi bien dans les jeux vidéos que dans l'industrie cinématographique, on désigne généralement la création du mouvement d'un personnage ou d'un objet qui va se déplacer dans la scène. Animer des personnages ou des objets est un véritable métier et consiste habituellement à générer les courbes de contrôle qui vont définir la trajectoire (l'angle d'une articulation du personnage ou la position d'une main au cours du temps), tout en y faisant passer l'émotion, les expressions, les mimiques voulues par le scénario [Las87]. C'est un travail fastidieux qui demande une longue pratique avant d'être maîtrisé et de nombreux essais pour arriver au résultat voulu.

L'animation par *modèle physique* consiste à générer *automatiquement* le mouvement d'un objet, de façon réaliste, en simulant les lois physiques qui gouvernent son mouvement. On parle alors de modèles *générateurs* par opposition aux procédés *descriptifs* décrits auparavant. Ces techniques, moins malléables que les précédentes, commencent à se développer dans l'industrie. Ainsi dans le dernier¹ épisode de *Star Wars*, les trajectoires des milliers de débris qui volent et s'éparpillent après le crash d'un des engins de la course dans le désert ont été calculés directement. L'animation de la veste de Geri dans *Geri's game* est elle aussi calculée automatiquement d'après les mouvements du personnage [BW98, Rob98b], tout comme celle de l'eau dans *Fourmiz* [FM96, Rob98a]. Notons que les réalisateurs, qui cherchent plus un effet visuel qu'une simulation exacte, veulent pouvoir modifier le résultat de la simulation pour obtenir telle ou telle caractéristique, ce qui ne peut se faire qu'en contraignant la simulation [PSE⁺00, CF00].

¹Premier pour les puristes.

Cette thèse porte sur l'animation par modèle physique d'objets *déformables* et non plus rigides. Ce domaine est étudié depuis plus de 10 ans mais n'est pas encore très utilisé dans l'industrie audiovisuelle où ces objets sont assez rares et où il est plus commode de générer manuellement leur mouvement.

Il n'en est pas de même lorsqu'un utilisateur veut pouvoir *interagir* avec l'objet et voir immédiatement le résultat de ses actions sur l'objet, comme ce pourrait être le cas dans un jeu vidéo. Le coût des calculs à mettre en œuvre serait alors prohibitif et on aurait probablement recours à des séquences précalculées, ce qui limiterait les mouvements possibles et le réalisme.

On ne peut se permettre de telles simplifications dans une application médicale temps-réel comme un simulateur chirurgical et il faut donc mettre en place de nouvelles solutions.

Motivations

On sait calculer très précisément les déformations d'un objet complexe, et c'est par exemple ainsi que sont mises au point les ailes des avions, pour lesquelles le test grandeur nature validant leur conception n'intervient qu'en fin d'étude pour vérifier les calculs. Mais de telles simulations sont très gourmandes en temps de calcul, même sur des ordinateurs très puissants, et l'on est à plusieurs ordres de grandeur d'une simulation ne serait-ce qu'interactive. On différenciera le *temps-réel* qui garantit le respect de la synchronisation entre la simulation et l'affichage et les simulations *interactives* qui assurent seulement une fréquence de rafraîchissement de plusieurs hertz (au moins 15 ou 20 pour une animation fluide). Nous reviendrons sur ces définitions à la Section 11.2 du chapitre suivant.

Le contexte applicatif de cette thèse est celui de la réalisation d'un simulateur chirurgical d'opérations laparoscopiques². Ce type d'opérations, en très fort développement actuellement, consiste à opérer le patient à l'aide d'outils et d'une caméra introduits au travers de petites incisions, en suivant l'opération sur un écran. Cette technique a de nombreux avantages : minimisant le traumatisme postopératoire, elle convient au patient comme à l'hôpital qui peut le libérer plus rapidement et ainsi faire des économies.

Le problème est que cette technique est assez peu intuitive et d'un apprentissage difficile pour le chirurgien : il n'a plus la notion de profondeur née de la stéréoscopie et l'outil étant axé sur l'abdomen du patient, il lui faut par exemple le déplacer à gauche pour qu'il aille à droite, et encore, si la caméra est horizontale. Cette technique requiert de nombreuses opérations (on estime leur nombre à une cinquantaine) avant que le chirurgien ne puisse l'utiliser en salle d'opération, les entraînements se faisant sur cadavres ou sur cochons, et finalement, dans une certaine mesure, sur les premiers patients.

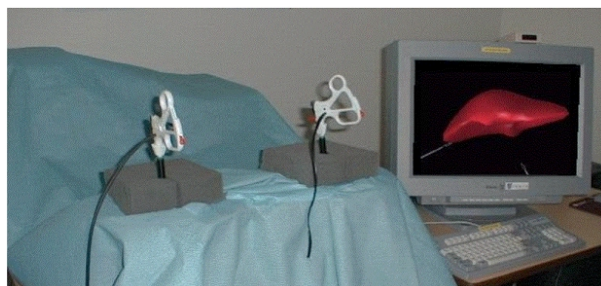


FIG. 1: Équipement d'une salle de simulation laparoscopique ©Épidaure - INRIA.

L'intérêt d'un simulateur informatique est alors évident. Le chirurgien ne regardant durant l'opération que son écran de contrôle, il s'agira simplement de générer en images de synthèses le comportement d'organes virtuels réagissant aux gestes du chirurgien. Ceux-ci seront transmis à l'ordinateur par un appareil doté de capteurs de position et qui pourra de plus exercer sur l'instrument manipulé un retour d'effort, commandé par l'ordinateur, reproduisant ainsi les forces naissant du contact entre l'outil et l'organe virtuels.

Outre son intérêt éthique, un tel simulateur peut être enrichi de fonctionnalités pédagogiques, en proposant par exemple une série d'exercices de difficulté croissante, voire la simulation de situations d'urgence, en mesurant l'efficacité du chirurgien à les gérer. Il est également viable sur le plan économique car utilisable en permanence et ne nécessitant pas d'équipement particulier. Enfin, utilisé avec des données provenant d'un

²On parle aussi de péritonéoscopie.

patient réel, il permettrait un entraînement pour une opération difficile et spécifique. On pourra se reporter à www.spectrum.ieee.org/pubs/spectrum/0700/surg.html pour d'autres détails sur la laparoscopie.

On se place donc ici dans un contexte d'application temps-réel, ce qui exigera des concessions sur la qualité de la simulation produite. Pour optimiser l'utilisation du temps de calcul, on se propose de mettre en place une méthode tirant parti de la *multirésolution*.

Simulation multirésolution

Le terme de multirésolution, qui n'existe pas officiellement dans la langue française, désignera dans cette thèse le fait de simuler un même phénomène (en l'occurrence l'animation d'un objet déformable) à plusieurs échelles. Le but des approches multirésolution est de choisir, au bon moment, au bon endroit, quelle est l'échelle qui donne le meilleur compromis qualité - rapidité de calcul.

Cette technique est très largement répandue dans cet autre domaine de la synthèse d'images qu'est la *radiosité hiérarchique*. L'éclairage des éléments d'une scène est représenté à plusieurs résolutions, ce qui permet par exemple de subdiviser précisément un grand mur à l'endroit où une ombre est projetée pour avoir des détails, mais de ne considérer que le mur dans son ensemble, en ayant perdu par moyenne l'information d'ombre, lorsqu'il s'agit de calculer quelle quantité de lumière il reflète sur un objet lointain. On perd ici en précision ce que l'on gagne en temps de calcul en évitant de calculer toutes les interactions entre les parties du mur et les objets distants.

Dans le cadre de l'animation d'objets déformables, la multirésolution va consister à mélanger les différentes *discrétisations* d'un même objet. Celui-ci va en effet être représenté, non pas comme un milieu continu, mais comme un ensemble discret de points, plus ou moins nombreux. Un très grand nombre de points générera un mouvement très subtil, chaque petite zone ayant son comportement propre, au prix de très longs temps de calcul. A l'opposé, peu de points seront simulés rapidement, mais le mouvement sera plus grossier. On a intérêt à combiner ces simulations : les parties proches de l'outil, qui subissent de fortes déformations et sur lesquelles le regard est concentré méritent une simulation précise. Au contraire, les parties lointaines peuvent avoir un mouvement très grossier sans trop altérer la qualité de la simulation. En utilisant différentes discrétisations (on parlera aussi de différentes *résolutions*), on optimisera l'utilisation du temps de calcul imparti entre deux affichages successifs de l'animation. On se référera à la Section 10 du chapitre suivant pour des explications plus détaillées ainsi que pour l'introduction de quelques définitions associées.

Objectifs de cette thèse

Cette thèse propose plusieurs approches d'animation multirésolution qui chercheront à atteindre plusieurs objectifs :

- Le *réalisme visuel* est le premier d'entre eux. Il tolère certaines imperfections dans l'animation dont la multirésolution va tirer parti, mais requiert néanmoins, dans un contexte chirurgical, un réalisme physique important. Notons que la partie réaliste du *rendu* de l'organe ne fait pas directement partie de nos objectifs.
- La garantie d'une *animation temps-réel* est l'autre difficulté de ces travaux. On ne parle pas seulement ici de fréquence d'affichage élevée, mais aussi de corrélation entre le temps ressenti par l'utilisateur et celui simulé par la machine : entre deux images affichées à une seconde d'intervalle, la machine doit effectivement avoir calculé le comportement du matériau durant une seconde, ni plus ni moins. Cet objectif est bien évidemment antagoniste du précédent et il faudra donc faire des compromis.
- Dans une moindre mesure, les modèles proposés devront être *aisément paramétrables*. On veut en particulier pouvoir utiliser les mesures qui peuvent être faites sur différents matériaux réels et les donner en paramètres au modèle pour en simuler le comportement.
- Le simulateur que l'on va créer devra également être suffisamment *générique* en ce sens qu'on peut vouloir l'utiliser pour modéliser un grand nombre de comportements différents, sur une grande variété d'objets.

Organisation du document

Ce document est divisé en 6 chapitres. Le premier présente un état de l'art des méthodes existant actuellement en animation de modèles déformables. Après une description générale, nous nous intéresserons plus particulièrement aux modèles permettant une simulation interactive ainsi qu'à ceux utilisant des modèles multirésolution.

Le Chapitre 2 décrit les modèles mis au point par les physiciens pour décrire les déformations des matériaux continus, que l'état de l'art aura montrés comme adaptés à nos buts.

Le Chapitre 3 propose un premier algorithme multirésolution utilisant ces modèles et basé sur une découpe en octree de l'espace.

De nouvelles façons de résoudre les équations différentielles impliquées sont présentées et discutées au Chapitre 4. Une utilisation multirésolution de ces formules est détaillée au Chapitre 5 avec l'introduction d'une nouvelle méthode permettant l'utilisation conjointe de plusieurs maillages volumiques d'un objet.

Le Chapitre 6 explique les problèmes liés à l'interface : comment lier la surface de l'objet au modèle simulé et transmettre un retour d'effort à l'utilisateur.

Nous concluons par un résumé des contributions et par des pistes de recherche future, suivi de trois annexes détaillant certaines des notions utilisées dans le document.