



Doctoral Thesis

Interactive simulation of topological changes on deformable objects

Author(s):

Steinemann, Denis

Publication Date:

2008

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005787332> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18071

Interactive Simulation of Topological Changes on Deformable Objects

A dissertation submitted to
ETH Zürich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
Denis Steinemann
Dipl. Ing. Inf. ETH Zürich, Switzerland
born September 10, 1977
citizen of Hagenbuch, ZH, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Markus Gross, ETH Zürich, Switzerland, examiner
Prof. Dr. Miguel A. Otaduy, URJC Madrid, Spain, co-examiner
Prof. Dr. Ming C. Lin, UNC Chapel Hill, USA, co-examiner

2008



Abstract

Interactive environments featuring virtual objects that dynamically deform play an increasingly important role in many applications such as surgery simulation or computer games. Such environments require efficient and robust algorithms for various simulation tasks such as deformation, collision handling, as well as processing of topological changes.

This thesis explores novel algorithms and data structures that enable the fast and stable treatment of complex cutting operations on deformable models. The focus lies on versatile methods that alleviate or completely avoid intricate volumetric remeshing. This allows for geometrically flexible and robust object representations, algorithmically simple and efficient implementation, and visually attractive behavior, all in accordance with the requirements of typical target applications.

In the first part of this thesis, a hybrid method to cut tetrahedral meshes in the context of hysteroscopy simulation is presented. It combines subdivision of tetrahedra with adjustments of existing topology. This permits a close approximation of a given cut trajectory, while largely avoiding the creation of badly-shaped elements that may degrade deformation computations, and mesh complexity does not explode. This approach has been integrated as a key simulation component into a successful virtual reality training system for hysteroscopic interventions.

A more general novel method for cutting in a meshless, continuum-mechanics-based deformation model is presented in the second part of this thesis. This approach is suitable for a large range of applications that require arbitrary and stable cutting operations, ranging from computer animation to interactive medical simulation. The meshless nature of this method avoids the volumetric remeshing problems inherent to previous state-of-the-art cutting algorithms, operating mostly on tetrahedral meshes. Therefore, stability problems in subsequent deformation computations can be largely eliminated. Object surfaces and cut surfaces meshed from the movement of a cutting blade are represented by triangle meshes. This enables robust updates of particle neighborhood information stored in a lightweight visibility graph data structure, and challenging self-collision scenarios often present in cutting simulations can be handled in an efficient and stable manner.

While meshless methods feature great advantages when handling topological changes in high-quality simulation, deformation computations are often more involved, limiting their application in interactive environments. Therefore, in the third part of this thesis a new adaptive shape matching deformation method that is tailored for physically plausible interactive simulations such as video games is

presented. It features the extremely high efficiency and robustness common to geometrically motivated shape matching approaches, while at the same time it is flexible enough to handle topological changes without volumetric decompositions in a fast and stable manner, and its adaptive nature enables the efficient simulation of complex geometry.

Deformation methods relying on less structured geometry, such as those used in the second and third part of this thesis, allow for simpler treatment of topological changes. At the same time, however, other simulation parts such as collision processing may become more involved, as there is no readily-available space-partitioning volumetric mesh that permits efficient collision detection. Object surfaces must be used for this task, and these may have high complexity in visually interesting simulations. However, the actual surface deformation may well be captured by many fewer degrees-of-freedom. A method exploiting such linear-subspace deformations to compute surface bounds for meshless animation in the context of collision detection is presented in the last chapter of this thesis. The method has a cost which is linear in the number of simulation nodes, and may compute bounds orders of magnitude faster and/or tighter compared to previous methods, whose cost depends on surface complexity.

Kurzfassung

Interaktive Umgebungen mit virtuellen Objekten, die sich dynamisch deformieren, spielen eine immer grösser werdende Rolle in diversen Applikationen wie Chirurgesimulatoren oder Computerspielen. Solche Umgebungen benötigen effiziente und stabile Algorithmen für verschiedene Simulationsprozesse wie Deformation, Kollisionserkennung und -auflösung, und der Bearbeitung von topologischen Änderungen bei Schnitten oder Bruchsimulationen.

Diese Dissertation untersucht neue Algorithmen und Datenstrukturen, die es erlauben, schnelle und stabile Schneideprozeduren auf deformierbaren Modellen durchzuführen. Der Fokus liegt dabei auf vielseitigen Methoden, die komplizierte volumetrische Unterteilungen von bestehender Geometrie vollständig bzw. in hohem Masse vermeiden. Dies erlaubt geometrisch flexible und robuste Objektpräsentationen, algorithmisch einfache und effiziente Implementationen, und visuell ansprechende Simulationen, um die Bedingungen der typischen Zielapplikationen zu erfüllen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird eine hybride Methode vorgestellt, um Tetraedernetze zu schneiden. Diese Methode wurde im Kontext der Hysteroskopie-Simulation entwickelt. Sie kombiniert die Unterteilung von Tetraedern mit Anpassungen von bereits existierender Topologie. Dies erlaubt es, einen Schnitt nahe an eine gegebene Schnittfläche zu approximieren, während gleichzeitig dünne oder sogar degenerierte neue Tetraeder vermieden werden, die Deformationsberechnungen instabil machen könnten. Die Methode bildet einen wichtigen Bestandteil eines bestehenden, erfolgreichen Hysteroskopie-Simulators.

Eine neue, vielseitig einsetzbare Methode für Schneideprozeduren in einem netzlosen, partikelbasierten Deformationsmodell, das auf den Gesetzen der Kontinuumsmechanik basiert, wird im zweiten Teil dieser Dissertation präsentiert. Diese Methode kann für ein breites Spektrum von Applikationen benutzt werden, in denen beliebige und stabile Schneideoperationen benötigt werden, wie zum Beispiel Computeranimationen oder interaktive medizinische Simulationen. Die netzlose Beschaffenheit dieser Methode erlaubt es, auf Subdivisionen von Tetraedern gänzlich zu verzichten, womit alle damit verbundenen Probleme, die frühere netzbasierten Methoden hatten, vermieden werden können. Es muss kein konsistentes Netz erhalten werden, und Stabilitätsprobleme bei darauffolgenden Deformationsberechnungen können grösstenteils umgangen werden. Objektflächen und Schnittflächen, die durch die Bewegung eines Schneidewerkzeugs

bestimmt werden, sind mit Dreiecksnetzen repräsentiert. Dies erlaubt es, Nachbarschaftsinformation zwischen Simulationspartikeln effizient und stabil anzupassen. Diese Information wird in einem Sichtbarkeitsgraphen gespeichert, der eine einfache Speicherung und Aktualisierung erlaubt. Zudem können mit der expliziten Oberflächenrepräsentation Selbstkollisionen, die in Schneidesimulationen oft auftreten, robust und schnell behandelt werden.

Während netzlose Deformationsmethoden grosse Vorteile im Zusammenhang mit topologischen Änderungen haben, so sind sie doch oft teurer als netzbasierte Ansätze und deshalb nur bedingt in interaktiven Umgebungen einsetzbar. Aus diesem Grund wird im dritten Teil dieser Dissertation ein neues, geometrisches Deformationsmodell für physikalisch-plausible Simulationen wie Spiele, aber auch Chirurgesimulationen vorgestellt. Der Ansatz besitzt dieselbe Effizienz und Robustheit wie frühere geometrisch-basierte Methoden, ist aber gleichzeitig flexibel genug, um topologische Änderungen ohne volumetrische Element-Unterteilungen schnell und stabil behandeln zu können. Zudem erlaubt die Methode die adaptive Simulation von komplexen Objekten.

Deformationsmethoden wie in Teil zwei und drei dieser Dissertation, die nicht auf netzbasierte Objektgeometrien angewiesen sind, erlauben eine vereinfachte Behandlung von topologischen Änderungen. Gleichzeitig werden jedoch andere Simulationsteile, wie die Kollisionserkennung, erschwert, da keine konsistenten, volumetrischen Objektdiskretisierungen existieren, die eine effiziente Kollisionsbehandlung erlauben würden. Deshalb müssen für diesen Zweck die Objektoberflächen benutzt werden, die jedoch eine hohe Komplexität haben können in visuell interessanten Simulationen. Die Oberflächendeformation jedoch kann oft mit verhältnismässig wenigen Freiheitsgraden beschrieben werden. Im vierten Teil dieser Arbeit wird deshalb eine Methode präsentiert, die solche reduzierten linearen Deformationen nutzen kann, um Oberflächenschranken für Kollisionserkennung in netzlosen Animationen effizient zu berechnen. Die Methode hat eine Laufzeit, die linear in der Anzahl Simulationspartikel ist, und kann Schranken berechnen, die um Grössenordnungen schneller und/oder enger sind als mit früheren Methoden, deren Laufzeit direkt von der Komplexität der Oberfläche abhängt.