

Diss. ETH No. 20015

Flexible, Unified and Directable Methods for Simulating Deformable Objects

A dissertation submitted to
ETH Zurich

for the Degree of
Doctor of Sciences

presented by
Sebastian Martin
Dipl. Informatik-Ing., ETH Zurich, Switzerland
born 30. October 1980
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Markus Gross, examiner
Prof. Dr. Mario Botsch, co-examiner
Prof. Dr. Eitan Grinspun, co-examiner

2011

Abstract

Deformable objects are omnipresent in our everyday life. In order to create believable virtual worlds in computer graphics that capture and creatively extend our familiar perception of reality, it is indispensable to reflect physical deformation behavior in a faithful, yet simple and efficient manner. In this thesis we revisit and extend FEM-based simulation techniques in each of its main components in order to achieve more *flexible* numerical handling, to *unify* the specialized geometry-dependent simulation codes, and to provide artists with better *directability* of simulation outcomes.

The first part focuses on different *discretization* schemes in order to enable arbitrary polyhedral elements as simulation primitives for FEM, achieve convergent meshless simulations requiring just simple point sets as discretization structures, and enable feature preservation at sub-element scales. The novel methods result in considerably simpler handling of topological changes in the case of cutting or fracturing events, or when refining resolution in adaptive simulations. This discretization flexibility is achieved by employing recent advances in geometric interpolation schemes that enable the definition of suitable simulation subspaces.

In the second part we focus on *specialized simulation* codes for different types of object geometries. Building up on the meshless approach of the first part, we follow the method of resultant-based formulation to its logical extreme and derive a higher-order integration rule, or elaston, measuring stretching, shearing, bending, and twisting along any axis. The theory and accompanying implementation do not distinguish between forms of different dimension (solids, shells, rods), nor between manifold regions and non-manifold junctions. Consequently, a single code accurately models a diverse range of elastoplastic behaviors, including buckling, writhing, cutting and merging.

The third part of the thesis then concentrates on *constitutive relation* — how material responds to deformation — and proposes an example-based approach for simulating complex elastic material behavior. Supplied with a few poses that characterize a given object, the system starts by constructing a space of preferred deformations by means of interpolation. During simulation, this example manifold then acts as an additional elastic attractor that guides the object toward its space of preferred shapes. Added on top of existing solid simulation codes, this example potential

effectively allows us to implement inhomogeneous and anisotropic materials in a direct and intuitive way. Due to its example-based interface, the method promotes an art-directed approach to solid simulation.

Zusammenfassung

Deformierbare Körper sind in unserem täglichen Leben allgegenwärtig. Um in der Computer Grafik glaubhaft virtuelle Welten zu generieren, welche unserer gewohnten Wahrnehmung der Realität auch gerecht werden, ist es daher unumgänglich, auch ihr physikalisches Verhalten möglichst wahrheitsgetreu, jedoch auch einfach und recheneffizient abzubilden. Diese Doktorarbeit erweitert moderne FEM-basierte Simulationstechniken in ihren drei Hauptfeldern, um die numerische Handhabung der Diskretisierungsgeometrie *flexibler* zu gestalten, um die verschiedenen Geometrie-abhängige Simulationscodes zu *vereinheitlichen*, und um Benutzer den Ausgang von Simulationen besser *voraussagen* zu lassen.

Im ersten Teil fokussiert sich die Arbeit auf neue Diskretisierungsansätze, um erstens allgemeine polyhedrale Elemente als Simulationsprimitive für FEM verfügbar zu machen, um zweitens konvergente punkt-basierte Simulationen zu ermöglichen, die nur eine einfache Punktmenge als Diskretisierungsstruktur benötigen, und um drittens Erhaltung von feinskaligen Details auf Sub-Element Ebene zu erreichen. Bei Applikationen wie dem Schneiden oder Zerreißen von elastischen Materialien, oder recheneffizienten adaptiven Simulationen, erlauben die neuen Methoden eine wesentlich einfachere Handhabung der Diskretisierungsstruktur. Diese verbesserte *Flexibilität* in der Diskretisierung wird dadurch ermöglicht, dass neue geometrische Interpolationsverfahren verwendet werden, um die nötigen Simulations-Unterräume aufzuspannen.

Im zweiten Teil konzentrieren wir uns auf spezialisierte Simulationsmethoden für die *verschiedenen Klassen von Objektgeometrien*. Auf dem punkt-basierten Ansatz des ersten Teils aufbauend, folgen wir den klassischen reduzierten Formulierungen zu ihrem logischen Schluss und leiten ein Integrationsschema höherer Ordnung her, dem Elaston, welches die Messung von Streckung, Scherung, Biegung und Verdrehung in jede Raumrichtung erlaubt. Die Theorie und entsprechende Implementierung macht keinen Unterschied zwischen Formen unterschiedlicher Dimensionen (Voluminas, Flächen oder Kurven), oder Verbindungen zwischen mannigfaltigen und nicht-mannigfaltigen Regionen. Konsequenterweise kann ein einziger Code ein breites Spektrum von elastoplastischem Verhalten modellieren, wie zum Beispiel dem Knicken, Schneiden oder Verschmelzen.

Der dritte Teil der Arbeit konzentriert sich auf *Materialgesetze*, welche den Zusam-

menhang zwischen Deformation und Materialantwort modelliert, und stellt einen Beispiel-basierten Ansatz zur Modellierung komplexer elastischer Materialverhalten vor. Anhand einer Handvoll Beispielposen, welche charakteristische Objektdeformationen beschreiben, erstellt unser System mittels eines Interpolationsverfahrens zuerst einen Raum präferierter Deformationen. Während der Simulation wirkt dieser Beispielraum als zusätzlicher elastischer Attraktor, welcher das Objekt Richtung Beispielraum lenkt. In Zusammenarbeit mit einem konventionellen Simulationscode erlaubt uns das Beispielpotential, inhomogene und anisotrope Materialien zu modellieren. Die Beispiel-basierte Schnittstelle ermöglicht dem Anwender darum, kontrollierbare Simulationen deformierbarer Körper auf intuitive Weise zu erstellen.