

Diss. ETH No. 19140

**Constraint-Based
Surface Processing**
for Geometric Modeling and Architecture

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
Michael Eigensatz
MSc CS, ETH Zurich
born 16 December 1979
citizen of Kriens, Lucerne

accepted on the recommendation of
Prof. Mark Pauly, examiner
Prof. Mario Botsch, co-examiner
Prof. Markus Gross, co-examiner
Prof. Helmut Pottmann, co-examiner

2010

Abstract

This thesis investigates the application and implementation of geometric constraints to manipulate, approximate, and optimize surfaces for modeling and architecture. In modeling, geometric constraints provide an interface to edit and control the form of a surface. We present a geometry processing framework that enables constraints for positional, metric, and curvature properties anywhere on the surface of a geometric model. Target values for these properties can be specified point-wise or as integrated quantities over curves and surface patches embedded in the shape. For example, the user can draw several curves on the surface and specify desired target lengths, manipulate the normal curvature along these curves, or modify the area or principal curvature distribution of arbitrary surface patches. This user input is converted into a set of non-linear constraints. A global optimization finds the new deformed surface that best satisfies the constraints, while minimizing adaptable measures for metric and curvature distortion that provide explicit control on the deformation semantics. This approach enables flexible surface processing and shape editing operations. In architecture, the emergence of large-scale freeform shapes pose new challenges to the process from design to production. Geometric constraints directly arise from aesthetic, structural, and economical requirements for the fabrication of such structures. A key problem is the approximation of the design surface by a union of patches, so-called panels, that can be manufactured with a selected technology at reasonable cost, while meeting the design intent and achieving the desired aesthetic quality of panel layout and surface smoothness. The production of curved panels is mostly based on molds. Since the cost of mold fabrication often dominates the panel cost, there is strong incentive to use the same mold for multiple panels. Various constraints, such as the limited geometry of mold shapes and tolerances on positional and normal continuity between neighboring panels, have to be considered. We introduce a paneling algorithm that interleaves discrete and continuous optimization steps to minimize production cost while meeting the desired geometric constraints and is able to handle complex arrangements with thousands of panels. The practical relevance of our system is demonstrated by paneling solutions for real, cutting-edge architectural freeform design projects.

Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit untersucht den Einsatz und die Implementierung von geometrischen Bedingungen zur Manipulation, Approximation und Optimierung von Flächen in der geometrischen Modellierung und in der Architektur. In der Modellierung bieten geometrische Bedingungen eine Schnittstelle, über welche die Form einer Fläche editiert und optimiert werden kann. Wir präsentieren ein Framework zur Geometrieverarbeitung, welches es ermöglicht, Bedingungen an Positions-, Metrik-, und Krümmungseigenschaften an beliebigen Stellen eines geometrischen Modells vorzuschreiben. Zielwerte für diese Eigenschaften können punktweise oder integriert über Kurven- und Flächenelemente spezifiziert werden. Der Benutzer kann zum Beispiel mehrere Kurven auf eine Fläche zeichnen, die Längen dieser Kurven oder die Normalenkrümmung entlang dieser Kurven vorschreiben oder er kann den Flächeninhalt sowie die Hauptkrümmungen auf beliebigen Flächenelementen modifizieren. Diese Benutzereingabe wird in eine Menge von nichtlinearen Bedingungen übersetzt. Eine globale Optimierung findet die neue, deformierte Fläche, welche die Bedingungen bestmöglich erfüllt. Gleichzeitig geben anpassbare Masse der Metrik- und Krümmungsverzerrung dem Benutzer explizite Kontrolle über die Deformationssemantik. Dieser Ansatz ermöglicht flexible Flächenverarbeitung und Formeditierung. In der Architektur stellt die vermehrte Verwendung von grossen Freiformflächen neue Herausforderungen an den Prozess vom Design zur Produktion. Geometrische Bedingungen entspringen direkt den ästhetischen, strukturellen und ökonomischen Anforderungen der Fabrikation von solchen Gebilden. Ein grundlegendes Problem ist dabei die Approximation der Designfläche durch eine Menge von Flächenelementen, so genannten Panele. Diese Panele sollten mit einer bestimmten Technologie mit angemessenen Kosten gefertigt werden können. Gleichzeitig sollte die Design-Idee und weitere wichtige Qualitätsmerkmale, wie das Layout der Panele und die Glattheit der Fläche, eingehalten werden. Die Produktion von gekrümmten Panele basiert grösstenteils auf Mulden (Press- oder Gussformen). Da die Fertigungskosten einer Mulde oft weit höher liegen als die Kosten, um mit der Mulde ein Panel zu erzeugen, ist es wichtig, eine Mulde für möglichst viele Panele wiederverwenden zu können. Verschiedene

Bedingungen wie die eingeschränkte Geometrie der Muldenform und Toleranzen für Positions- und Normalenkontinuität zwischen benachbarten Panels müssen dabei eingehalten werden. Wir stellen einen Panelisierungs-Algorithmus vor, der diskrete und kontinuierliche Optimierung kombiniert, um die Kosten zu minimieren und gleichzeitig die geometrischen Bedingungen einzuhalten. Der Algorithmus ist fähig, komplexe Anordnungen mit tausenden von Panels automatisch zu berechnen. Wir demonstrieren die praktische Relevanz von unserem System anhand aktueller Projekte der Freiformarchitektur.