

Diss. ETH No. 15135

Continuous Reconstruction, Rendering, and Editing of Point-Sampled Surfaces

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Matthias Zwicker

Dipl. Informatik–Ing. ETH

Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich

born March 18, 1973

citizen of Waldkirch, St. Gallen

accepted on the recommendation of

Prof. M. H. Gross, examiner

Prof. L. McMillan, co-examiner

Dr. H. Pfister, co-examiner

2003

A B S T R A C T

The mathematical representation of surfaces is at the core of most computer graphics problems. In particular, the design of modeling and rendering algorithms for computer graphics applications is largely determined by the specific surface representation that is chosen. A variety of mathematical models has been developed for such applications, ranging from parametric to implicit surfaces. In this thesis, we propose to use *nonuniform point samples* to continuously reconstruct, render, and interactively edit surfaces. Based on results from classical signal processing theory, we develop core methods for *reconstructing, filtering, and resampling* nonuniformly point-sampled surfaces. From these concepts, we derive algorithms for high quality, antialiased rendering and interactive surface parameterization.

The term *point sample* denotes a sample of a surface, including information about the surface *geometry* and the surface *appearance*. A point-sampled surface consists of a set of point samples without connectivity information, where the points are distributed nonuniformly in space. Point-sampled surfaces are attractive for computer graphics applications because they are easily acquired using range sensing techniques and because they are efficient for modeling and rendering due to their simple structure.

This thesis starts by reviewing fundamental signal processing theory, paying particular attention to an analysis of the aliasing phenomenon. We then derive the concept of resampling filters as an efficient antialiasing strategy. Next, we shift our attention to nonuniformly sampled signals and discuss a local filtering approach to nonuniform sampling and reconstruction.

Extending these local filtering techniques and combining them with resampling filters, we introduce a parametric representation of point-sampled surfaces. We show how to interpret rendering as resampling a parameterized surface, and we derive an antialiased rendering algorithm for point-sampled surfaces. In addition, we present an adaptation of the algorithm suitable for hardware acceleration, and we present an efficient, hierarchical data structure tailored for point-based rendering. We also develop a resampling filter for volume data and design an efficient splatting algorithm for volume rendering.

Finally, we present a framework for interactive editing of point-sampled surfaces. We extend the concept of two-dimensional photo editing to three-dimensional objects by providing two fundamental operations on point-sampled surfaces, namely surface parameterization and surface resampling. Both these operators are based on the parametric representation of point-sampled surfaces. With these building blocks, we show how to implement editing operations such as painting, texturing, carving, displacement mapping, and filtering. Further, we explain a constrained minimum distortion parameterization algorithm that allows the user to perform sophisticated texturing operations. We also provide an efficient strategy for solving the resulting linear equation system using a nested iteration approach.

ZUSAMMENFASSUNG

Die mathematische Beschreibung von Flächen steht im Zentrum von vielen Problemen der Computer Grafik. Insbesondere wird der Entwurf von Algorithmen zur Modellierung und zur Darstellung von Flächen stark durch die Auswahl einer bestimmten Flächenrepräsentation beeinflusst. Für solche Anwendungen ist eine Vielzahl von mathematischen Modellen entwickelt worden, seien dies parametrische oder implizite Flächen. In dieser Arbeit werden *Punkt-Samples* verwendet, um Flächen glatt zu rekonstruieren, zu visualisieren und zu bearbeiten. Ausgehend von Resultaten aus der Signaltheorie werden grundlegende Verfahren zur Rekonstruktion, Filterung, und Abtastung solcher Flächen entwickelt. Aus diesen Verfahren werden weiter Algorithmen zur Darstellung und Parametrisierung der Flächen abgeleitet.

Mit dem Begriff *Punkt-Sample* wird ein Abtastwert einer Fläche bezeichnet, welcher Informationen sowohl über die Geometrie als auch das Aussehen (z.B. die Farbe) der Fläche enthält. Eine punkt-basierte Fläche besteht aus einer Menge von Punkt-Samples ohne Nachbarschaftsinformation unter den Punkten, wobei die Punkte mit unregelmässigen Abständen im Raum verteilt sind. Punkt-basierte Flächen sind attraktiv für Anwendungen der Computer Grafik, weil sie mittels Distanzmessgeräten leicht gewonnen werden können, und weil sie dank ihrer einfachen Struktur effizientes Modellieren und schnelle zwei-dimensionale Darstellung erlauben.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die glatte Rekonstruktion, die Darstellung und das interaktive Bearbeiten von punkt-basierten Flächen. Zuerst werden einige Grundbegriffe der Signaltheorie besprochen, wobei dem Phänomen des Aliasing vertiefte Beachtung geschenkt wird. Dann wird das Konzept des Resampling Filters als wirkungsvolle Antialiasing Methode hergeleitet. Schliesslich werden unregelmässig abgetastete Signale diskutiert und es wird eine lokale Filtermethode beschrieben, welche unregelmässiges Abtasten und Rekonstruieren von Signalen erlaubt.

Indem diese Technik des lokalen Filterns erweitert und mit der Idee des Resampling Filters kombiniert wird, wird die parametrische Beschreibung von punkt-basierten Flächen eingeführt. Es wird gezeigt, wie die zwei-dimensionale Darstellung solcher parametrischer Flächen als Resampling der Flächen interpretiert werden kann. Weiter wird ein Algorithmus zur Darstellung mit Antialiasing entwickelt, und es wird eine Variante davon vorgeschlagen, welche durch Grafikhardware beschleunigt werden kann. Es wird auch eine Datenstruktur zur Speicherung der Flächen entwickelt, welche auf diese Algorithmen abgestimmt ist. Schliesslich wird die Antialiasing-Technik auch auf Volumendaten angewandt.

Zum Schluss wird ein Konzept zur interaktiven Bearbeitung von punkt-basierten Flächen vorgestellt. Das Konzept beruht auf zwei Hauptkomponenten, nämlich Parametrisierung und Resampling der Flächen. Damit können Operationen wie das Bemalen, Texturieren oder Schnitzen von Flächen implementiert werden.