

Informatik-Fachberichte 163

Herausgegeben von W.Brauer
im Auftrag der Gesellschaft für Informatik (GI)

Heinrich Müller

Realistische Computergraphik

Algorithmen, Datenstrukturen
und Maschinen



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo

Autor

Heinrich Müller
Institut für Betriebs- und Dialogsysteme
Universität Karlsruhe
Postfach 6380, 7500 Karlsruhe

CR Subject Classification (1987): I.3.7, F.2.2

ISBN-13: 978-3-540-18924-4 e-ISBN-13: 978-3-642-73416-8

DOI: 10.1007/ 978-3-642-73416-8

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Müller, Heinrich:

Realistische Computergraphik : Algorithmen, Datenstrukturen u. Maschinen /
Heinrich Müller. – Berlin ; Heidelberg ; New York ; London ; Paris ; Tokyo : Springer, 1988
(Informatik-Fachberichte; 163)

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Habil. -Schr.

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

Druck- und Bindearbeiten: Weihert-Druck GmbH, Darmstadt
2145/3140 – 543210

Vorwort

Die Manipulation und Darstellung räumlicher Szenen ist eines der schwierigsten, damit aber auch herausforderndsten Teilgebiete der graphischen Datenverarbeitung. Dieser Text gibt zum einen einen kompakten Überblick über den heutigen Stand, der durch das Einbeziehen von optischen Effekten in die Szenenmodellierung und die bildliche Darstellung geprägt ist. Zum anderen wird anhand der detaillierten Untersuchung der Erzeugung fotorealistischer Bilder durch das Strahlverfolgungsverfahren die Mächtigkeit der von der algorithmischen Geometrie heute gebotenen Werkzeuge zur Entwicklung effizienter Algorithmen demonstriert. Es wird so eine Verbindung zwischen der anwendungsbezogenen Computergraphik und den Grundlagenuntersuchungen der Algorithmen- und Datenstrukturtheorie hergestellt, die für beide Gebiete gleich fruchtbar und generell wünschenswert ist.

Das Strahlverfolgungsverfahren (Ray Tracing) ist ein als aufwendig geltendes, aber bezüglich Darstellungsqualität sehr leistungsfähiges Verfahren zur Erzeugung realistisch wirkender Rasterbilder aus räumlichen Daten. Sein zentrales geometrisches Problem ist es, für eine Menge von Strahlen in einer Menge geometrischer Szenenobjekte im Raum ein erstes getroffenes Objekt zu bestimmen. In dieser Arbeit werden die Komplexität dieses Problems, etwas verallgemeinert, untersucht und effiziente Datenstrukturen zu seiner Lösung angegeben. Folgende Strategien werden vorgeschlagen und analysiert:

- (1) Die Szenenobjekte werden in eine Datenstruktur vorverarbeitet, die dann mit beliebigen Strahlen abgefragt wird. Das ist die klassische Vorgehensweise bei der Bilderzeugung durch Strahlverfolgung.
- (2) Die Strahlen werden in eine Datenstruktur vorverarbeitet, die dann mit den Szenenobjekten abgefragt wird. Das ist eine Verallgemeinerung des Tiefenpufferverfahrens zur Sichtbarkeitsberechnung, bei dem die Vorverarbeitung allerdings trivial ist.
- (3) Sortiertes Abarbeiten der Objekte bei Mitführen der bisherigen Treffersituation. Das ist eine Verallgemeinerung des Prioritätsverfahrens zur Sichtbarkeitsberechnung.

Für die beiden ersten Vorgehensweisen werden untere und obere Schranken des Anfragezeit-Speicher(Vorverarbeitungszeit)-Tradeoffs für iso-orientierte Rechtecke als Szenenobjekte hergeleitet. Die unteren Schranken basieren auf einem aus dem Modell von Fredman für dynamische Abzählprobleme abgeleiteten Berechnungsmodell. Die Kernaussage ist, daß in diesem Modell ein Anfragezeitaufwand von $O(\text{polylog}n)$ bei einem Speicheraufwand von $O(n \text{ polylog}n)$ unmöglich, d.h. die Strahlanfrage relativ aufwendig ist. Die oberen Schranken werden durch Familien von Datenstrukturen erreicht, wobei diejenigen für (2) der unteren Schranke recht nahe kommen. Diese Datenstrukturen ergeben sich durch eine in allgemeiner Form vorgestellte Kompositionstechnik aus Punktlokalisationsstrukturen, Segmentbäumen, Konjugationsbäumen und Bereichsbäumen.

Die Strategie (3) führt auf einen Spacesweep-Algorithmus, der den durch Minimierung der Summe aus Vorverarbeitungs- und Gesamtanfragezeit errechneten Gesamtzeitaufwand der Lösungen nach (1) und (2) erreicht, allerdings bei geringerem Speicherverbrauch. Dieser Algorithmus erreicht seine Leistungsfähigkeit durch gutes Ausnutzen von räumlicher Kohärenz. Für

bewegte Szenen und die Erzeugung einer Bildfolge wird ein analoger Algorithmus (Timesweep) zur Ausnutzung der zeitlichen Kohärenz angegeben.

Der relativ hohe prinzipielle Aufwand legt die Untersuchung von Parallelisierungsmöglichkeiten nahe. Dieses führt zu verschiedenen Algorithmen, die am systolischen Berechnungsmodell orientiert sind. Ferner werden relativ einfache Datenstrukturen für sequentiell und vektoriell arbeitende Rechner vorgestellt, deren Worst-Case-Verhalten zwar schlecht ist, die sich aber im praktischen Einsatz gut bewährt haben.

Der vorliegende Text stellt meine von der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe angenommene Habilitationsschrift dar. Damit läßt sich vielleicht der manchmal etwas kompakte Stil entschuldigen, der wissenschaftlichen Arbeiten oft zu eigen ist. Besonders zu erwähnen ist die große Zahl von Studenten, die im Rahmen von Arbeitsgemeinschaften, Studienarbeiten, Diplomarbeiten und als Hilfsassistenten mit großem Engagement an den mehrjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mitgewirkt haben, in deren Rahmen diese Arbeit entstanden ist. Ferner danke ich den Professoren A. Schmitt, T. Ottmann und K. Mehlhorn für die Zeit, die sie der Begutachtung dieser Arbeit gewidmet haben.

Karlsruhe, Januar 1988

Heinrich Müller

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Realistisch wirkende Computergraphik	9
2.1 Modellieren	9
2.1.1 Räumliches geometrisches Modellieren	9
2.1.2 Optisches Modellieren	13
2.1.3 Ein Beispiel für eine Szenenbeschreibung	16
2.2 Bilderzeugung	21
2.2.1 Darstellung realistischer Computergraphik	21
2.2.2 Bilderzeugung	22
2.2.3 Diskretisierungsprobleme	28
2.3 Bildmanipulation	30
3. Geraden- und Strahlanfragen	31
3.1 Problemdefinition	31
3.2 Gitter- und Hüllenverfahren	37
3.3 Rechteckszenen	42
3.3.1 Polylogarithmischer Speicherverbrauch	42
3.3.2 Polylogarithmische Anfragezeit	53
3.3.3 Zeit-Speicher-Tradeoff	62
3.3.4 Dynamische Datenstrukturen	71
3.3.5 Makroszenen	78
3.3.6 Zusammenfassung	81
3.4 Allgemeine Szenen	82
4. Bilderzeugung	84
4.1 Bilderzeugungsstrategien	84
4.2 Spacesweep	89
4.3 Timesweep	94
5. Parallele Algorithmen und Maschinen	101
5.1 Vektorrechner	108
5.2 Systolische Algorithmen	115
5.2.1 Mengen aus Einzelobjekten	115
5.2.2 Das Aufzählproblem und CSG-Szenen	123
5.2.3 Makroszenen	128
5.2.4 Implementierungsbetrachtungen	131
Literatur	132