

3D-Digitalisierung und Rekonstruktion realer Objekte unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie

Dem Fachbereich Informatik
der Technischen Universität Darmstadt
eingereichte

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Inf. Univ. Peter J. Neugebauer

geboren am 21. Februar 1965 in Lage

Referenten der Arbeit: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. E.h. J.L. Encarnaçã
Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke
Prof. Dr.-Ing. G. Sakas
Tag der Einreichung: 10.10.2000
Tag der Prüfung: 24.11.2000

Darmstädter Dissertation
D 17

Berichte aus der Informatik

Peter Johannes Neugebauer

**3D-Digitalisierung und Rekonstruktion realer Objekte
unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Neugebauer, Peter Johannes:

3D-Digitalisierung und Rekonstruktion realer Objekte
unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie/

Peter Johannes Neugebauer. Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Informatik)

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-9606-4

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9606-4

ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) in Darmstadt. Danken möchte ich an dieser Stelle allen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. E.h. J.L. Encarnação, nicht nur für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit, sondern vor allem für die Schaffung der guten Arbeits- und Forschungsbedingungen, die ich während meiner gesamten Zeit am Institut vorgefunden habe. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke und Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Sakas für Ihre Kommentare zur Arbeit und die Übernahme der Zweitgutachten.

Besonders danken möchte ich den Studenten, die die Arbeit lange Zeit treu begleitet haben und den Aufbau des Systems mit viel Einsatz mit voran getrieben haben. Alireza Esmailpour, der bei der Geburt der Arbeit dabei war und in Windeseile eine Testumgebung und eine erste graphische Benutzungsoberfläche generiert hat. Carsten Schimpf, der bei der Neustrukturierung des Systems maßgeblich beteiligt war. Und sicher nicht zuletzt Konrad Klein, der bei der Vermessung der Statuen Feuer gefangen hat und der durch seinen unerbitterlichen Einsatz auch später einen wesentlichen Teil zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin möchte ich meinem ehemaligen Zimmerkollegen Sven Gürke für die vielen Diskussionen danken, die zur Erhellung vieler Sachverhalte beigetragen haben. Auch den anderen Kollegen aus der Reko-Gruppe, insbesondere Bernhard Ristow und Hagen Schumann, gilt mein Dank für die Unterstützung bei der Arbeit.

Nicht vergessen möchte ich die Studenten, die bei der Umsetzung der Arbeit, bei Tests und Anwendungen des Systems beteiligt waren. Dies waren Matthias Block, Martin Splinter, Florian Förster, Christoph Perick, Guido Bücker, Judith Feigi, Jürgen Hallpap, Michael Köhler, Robert Reiz, Andreas Ries, Thorsten Ringhof, Andreas Schneider und Enrico Trentini. Danke.

Kurzfassung

Die dreidimensionale Modellierung realer Objekte inklusive ihrer Textur stellt trotz der heute verfügbaren 3D-Sensoren immer noch eine herausfordernde Aufgabe dar, da die Objekte zu ihrer vollständigen Digitalisierung aus unterschiedlichen Ansichten dreidimensional vermessen und photographisch erfasst werden müssen. Das Ziel der Arbeit besteht deshalb darin, Objekte inklusive ihrer Textur durch Mehrbildintegration von Tiefenbildern und Photographien komplett zu erfassen und bis ins Detail zu modellieren. Dabei dürfen sowohl die 3D-Aufnahmen als auch die Photographien zur Erleichterung der Aufnahmesituation aus wahlfreien Aufnahmepositionen aufgenommen werden.

Ausgangspunkt der Arbeit bildet die Betrachtung der bildgebenden 3D-Sensoren, die als Ergebnis des Meßprozesses eine geordnete Punktwolke liefern. Die 3D-Sensoren werden abstrakt durch die in der Arbeit definierte Sensorgeometrie beschrieben. Mittels der Sensorgeometrie kann jedem Meßpunkt nicht nur ein Tiefenwert sondern zusätzlich auch eine individuelle Aufnahme-richtung zugeordnet werden.

Unter spezieller Berücksichtigung der Sensorgeometrie wird in der Arbeit eine komplette Verfahrenskette zur Rekonstruktion realer Objekte entworfen. Die entwickelte Verfahrenskette setzt sich aus folgenden Schritten zusammen: 3D-Digitalisierung, Registrierung von Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem, Herstellung der Datenkonsistenz innerhalb eines Bildverbunds, Definition der Objektoberfläche, Gewinnung einer Oberflächentriangulation und Texturierung der 3D-Modelle aus unregistrierten Photographien.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Technik	3
1.3	Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	7
1.4	Übersicht und Gliederung der Arbeit	9
2	Das universelle 3D-Sensormodell	13
2.1	Meßprinzipien gängiger 3D-Sensoren	16
2.1.1	Triangulationsverfahren	17
2.1.2	Streifenlichtprojektion	20
2.1.3	Laufzeit- und Modulationsverfahren	26
2.1.4	Taktile Flächendigitalisierung	29
2.2	Die Sensorgeometrie	30
2.2.1	Anforderungen an die Datenrepräsentation	30
2.2.2	Das Sensorkoordinatensystem	31
2.2.3	Funktionale Definition spezieller Koordinatensysteme	34
2.2.4	Das Sensorkoordinatensystem im allgemeinen Fall . .	35
2.2.5	Definition und Eigenschaften	36
2.2.6	Drehsinn des Koordinatensystems	38
2.2.7	Orthogonalität	42
2.3	Das parametrisierte Sensorkoordinatensystem	43
2.3.1	Spezialisierung für geradlinige Abtastrichtung	45
2.3.2	Eigenschaften des orthogonalen Sensorkoordinatensy- stems	48
2.3.3	Datenreduktion durch Interpolation	55
2.3.4	Die inverse Transformation	58
2.3.5	Eingeschränkte Koordinatensystemstransformationen .	62

2.3.6	Allgemeine Koordinatensystemtransformationen . . .	63
2.4	Das Datenmodell	68
2.4.1	Interpolationsschemata	69
2.4.2	Grenzbereiche der Interpolation	74
2.4.3	Detektion von Sprungkanten	76
2.4.4	Bewertung der Interpolationsschema	77
2.4.5	Meßfehler und statistisches Datenmodell	78
2.5	Innere und äußere Orientierung	80
2.5.1	Innere Orientierung	80
2.5.2	Äußere Orientierung	82
2.6	Austauschformate	82
2.6.1	Sensorgeometrie	83
2.6.2	Meßdaten	84
2.6.3	Beispiele	85
2.7	Zusammenfassung	86
3	Registrierung und Redundanznutzung	87
3.1	Registrierung	88
3.1.1	Punktbasierte Registrierung	90
3.1.2	Mehrbild-Registrierung	94
3.1.3	Registrierung von zwei Bildgruppen	103
3.1.4	Robuste Registrierung	105
3.1.5	Ausschlußkriterien und robuste Optimierung	107
3.1.6	Lösung des speziellen nichtlinearen Fehlerquadratproblems	112
3.1.7	Statistische Betrachtungen	114
3.1.8	Abbruchkriterium	115
3.1.9	Auflösungshierarchie	117
3.1.10	Vermeidung von Nebenminima	118
3.2	Redundanznutzung	119
3.2.1	Korrespondenzfindung und Korrekturwerte	120
3.2.2	Robuste Kombination der Korrekturwerte	123
3.2.3	Ausmaskieren redundanter Bereiche	127
3.2.4	Datenkonsistenz und Statistik	129
3.2.5	Beispiel	129
3.3	Zusammenfassung	130

4	Objektdefinition und Skulpturierung	133
4.1	Flächenrepräsentationen	134
4.1.1	Parameterformen	134
4.1.2	Implizite Flächendefinitionen	135
4.1.3	Eigenschaften physikalisch realisierbarer Objekte	137
4.2	Implizite Definition der Objektoberfläche	141
4.2.1	Definition der Distanzfunktion	141
4.2.2	Berücksichtigung von Masken	145
4.2.3	Kontinuierliche Erweiterung der Distanzfunktion	147
4.3	Schnittpunktbestimmung	151
4.4	Direkte Skulpturierung	154
4.4.1	Diskretisierung der Distanzfunktion	155
4.4.2	Phantomobjekte	156
4.4.3	Duale Segmentierung der Volumendaten	158
4.5	Effiziente Skulpturierung	161
4.5.1	Repräsentationsvarianten	162
4.5.2	Skulpturierung unter Verwendung eines Octrees	163
4.6	Beispiel	166
4.7	Zusammenfassung	166
5	Triangulierung der Oberfläche	169
5.1	Polygonalisierte Flächendarstellungen	170
5.1.1	Simplizialkomplexe	170
5.1.2	Polyeder	172
5.1.3	Dreiecksnetze	176
5.1.4	Integritätskriterien	178
5.1.5	Datenstrukturen	181
5.2	Uniforme Ausgangstriangulierung	185
5.2.1	Marching Cubes	185
5.2.2	Rückprojektion	187
5.2.3	Generierung der Nachbarschaftsbeziehungen	188
5.3	Genauigkeit des Dreiecksnetzes	189
5.3.1	Adäquatheit der Repräsentation	190
5.3.2	Globaler Approximationsfehler	194
5.3.3	Lokale Schätzung der Approximationsgenauigkeit	195
5.4	Elementare Basisoperationen	196
5.4.1	Kantenkollaps	197
5.4.2	Kantenteilung	200
5.4.3	Kantentausch	201

5.5	Globale Operatoren für die Rekonstruktion	203
5.5.1	Eliminierung kurzer Kanten	204
5.5.2	Optimieren der Netztopologie	205
5.5.3	Glättung und Rückprojektion	209
5.5.4	Interpolation nicht vermessener Bereiche	211
5.5.5	Adaptive Verfeinerung	213
5.5.6	Polygonreduktion	222
5.5.7	Anwendung der Operatoren	224
5.6	Diskussion	226
5.6.1	Unvollständig vermessene Löcher	226
5.6.2	Selbstdurchdringungen	227
5.6.3	Fehlerhafte Topologierepräsentation	228
5.6.4	Selbstverdeckungen	229
5.6.5	Polygonreduktion kontra adaptive Dreiecksunterteilung	229
5.7	Rekonstruktionsbeispiele	230
5.7.1	Wagner-Büste	230
5.7.2	Backenzahn	233
5.7.3	Der Münzprägler	234
5.8	Zusammenfassung	236
5.9	Ausblick	237
6	Rekonstruktion der Textur	239
6.1	Stand der Technik	240
6.2	Übersicht	242
6.3	Kameramodell	243
6.4	Registrierung	245
6.4.1	Gewinnung der Näherungslösung	245
6.4.2	Zielfunktionen der Optimierung	246
6.4.3	Merkmalsberechnung	251
6.4.4	Kombination der Fehlermetriken	256
6.4.5	Parametersubstitutionen	257
6.4.6	Numerische Optimierung der Zielfunktionen	258
6.4.7	Auflösungshierarchie	260
6.5	Textursynthese	261
6.5.1	Robuste Kombination der Texturen	261
6.5.2	Ortho-Texturen	264
6.5.3	Interpolation undefinierter Bereiche	267
6.6	Rekonstruktionsbeispiele	269
6.7	Zusammenfassung	269

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	IX
7 Zusammenfassung	275
8 Ausblick	281
A Rechenregeln aus der Vektorrechnung	283