

Dreidimensionales Computersehen

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Budapest

Hongkong

London

Mailand

Paris

Santa Clara

Singapur

Tokio

X. Jiang, H. Bunke

Dreidimensionales Computersehen

Gewinnung und Analyse
von Tiefenbildern

Mit 137 Abbildungen und 3 Tafeln



Springer

Dr. Xiaoyi Jiang
Prof. Dr. Horst Bunke

Universität Bern
Institut für Informatik und Angewandte Mathematik
Länggasstraße 51
CH - 3012 Bern

ISBN 978-3-642-64848-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme
Jiang, Xiaoyi: Dreidimensionales Computersehen: Gewinnung und Analyse von
Tiefenbildern; mit 3 Tafeln / X. Jiang; H. Bunke. -
Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand;
Paris; Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1997

ISBN-13: 978-3-642-64848-9 e-ISBN-13: 978-3-642-61447-7

DOI: 10. 1007/978-3-642-61447-7

NE: Bunke, Horst

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 jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1997

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlagen vom Autor
SPIN: 10127155 62/3020 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Im Laufe der letzten Jahre konnte eine Verschiebung der Forschungsschwerpunkte innerhalb der automatischen Bildanalyse von zweidimensionalen hin zu dreidimensionalen Problemstellungen festgestellt werden. Zwar kann eine Reihe von Aufgaben allein anhand zweidimensionaler Information in Grauwertbildern erfolgreich gelöst werden. Die ständige Erweiterung des Anwendungsspektrums der Bildanalyse hat jedoch verschiedene Aufgabenstellungen hervorgebracht, bei denen dreidimensionale Information von großem Nutzen oder gar unabdingbar ist. Diese Erkenntnisse haben die Gewinnung, Verarbeitung und Interpretation von Tiefenbildern zu einem der zentralen Forschungsthemen der automatischen Bildanalyse gemacht. Im Gegensatz zu den traditionell verwendeten Grauwertbildern repräsentieren die in einem Tiefenbild enthaltenen Daten den Abstand einzelner Punkte auf der Oberfläche der abgebildeten Objekte zum Sensor. Somit besitzen Tiefenbilder verschiedene Vorteile gegenüber Intensitätsbildern, insbesondere die explizite Darstellung der Gestalt dreidimensionaler Objekte.

Im Zuge des enormen Aufschwungs des Gebiets der Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern hat sich im Laufe der letzten Jahre eine immer größere Anzahl von Publikationen in Form von technischen Berichten sowie Beiträgen in Tagungsbänden und Fachzeitschriften angesammelt. Demgegenüber besteht jedoch ein akuter Mangel an einer systematischen und didaktischen Aufarbeitung eines derartig wichtigen Teilgebietes der Bildanalyse. Zwar erscheinen immer mehr Bücher über computergestützte Bildanalyse. Das Thema Gewinnung, Verarbeitung und Interpretation von Tiefenbildern wurde aber bisher – wenn überhaupt – nur am Rand behandelt. Mit dem vorliegenden Buch soll ein Beitrag geleistet werden, diese Lücke zu schließen.

Das vorliegende Buch bietet eine systematische Einführung in das Gebiet der Tiefenbildanalyse. Es behandelt sämtliche wichtigen Teilaspekte, beginnend mit der Gewinnung von Tiefenbildern durch passive und aktive Verfahren über Extraktion charakteristischer Flächenmerkmale und Segmentierung bis hin zur modellbasierten Objekterkennung. Daneben werden verschiedene konkrete Anwendungen der Tiefenbildanalyse vorgestellt.

Didaktisch ist das Buch so gestaltet, daß es sowohl dem Forscher als auch dem Praktiker erlauben soll, sich selbständig in die relativ neue Materie der Tiefen-

bildanalyse einzuarbeiten. Insbesondere wird angestrebt, das teilweise schwer zugängliche Material in einheitlicher Notation und verständlicher Form aufzubereiten. Auch wird Gewicht darauf gelegt, das Darstellungsniveau so zu halten, daß eine Computer-Implementation der beschriebenen Verfahren leicht möglich ist. Ferner enthält das vorliegende Buch ausführliche Hinweise auf ergänzende und weiterführende Literatur, die einen vollständigen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung ermöglichen.

Das vorliegende Buch wendet sich in erster Linie an Informatiker, Ingenieure und Naturwissenschaftler mit Schwerpunkt Bildverarbeitung oder Künstliche Intelligenz sowie an Fachleute aus potentiellen Anwendungsgebieten der dreidimensionalen Bildanalyse, die einen Einstieg in das Gebiet suchen oder bereits vorhandene Kenntnisse vertiefen wollen. Vom Leser werden Grundkenntnisse der Mathematik und einer höheren Programmiersprache erwartet, wie sie etwa dem Vordiplom in Informatik entsprechen.

Die Entstehung des vorliegenden Buches geht auf das Forschungsprojekt "An intelligent multisensory robot vision system: Planning of vision tasks and object recognition based on CAD-models" zurück, das durch den Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung unterstützt wurde. Im Rahmen dieses Projektes konnten wir uns intensiv mit dem neuen und faszinierenden Gebiet der Tiefenbildanalyse auseinandersetzen und zuletzt auch durch eigene Arbeiten einen Beitrag zur Forschung leisten. An dieser Stelle sei dem Schweizerischen Nationalfonds für die Unterstützung des Projektes herzlich gedankt.

Wir bedanken uns bei unseren ehemaligen Kollegen U. Meier, Dr. R. Robmann und Dr. A. Ueltschi für die Mitwirkung am o.g. Projekt. Ferner möchten wir B. Achermann, U. Meier, Dr. B.T. Messmer und R. Röthlisberger unseren Dank für die aufmerksame Durchsicht des Manuskriptes aussprechen.

Danken möchten wir allen, die uns Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben, namentlich:

- Dr. F. Ade, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz
- Prof. J. Aloimonos, University of Maryland, College Park, USA
- Dr. B. Fisher, University of Edinburgh, Schottland
- Prof. P. Flynn, Washington State University, Pullman, USA
- Dr. M. Hebert, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, USA
- A. Hoover, University of South Florida, Tampa, USA
- Prof. R. Horaud, LIFIA-IMAG, Grenoble, Frankreich
- Prof. R. Krishnapuram, University of Missouri, Columbia, USA
- Dr. S.-P. Liou, Siemens, USA
- Prof. G. Medioni, University of Southern California, Los Angeles, USA
- Prof. R. Mehrotra, University of Missouri-St. Louis, St. Louis, USA
- Prof. F. Schmitt, ENST, Frankreich
- Dr. N. Shrikhande, Central Michigan University, Mount Pleasant, USA
- Prof. G. Stockman, Michigan State University, East Lansing, USA

- Dr. P. Vuylsteke, AGFA-Gevaert, Belgien
- Dr. Y. Yacoob, University of Maryland, College Park, USA
- Prof. N. Yokoya, Nara Institute of Science and Technology, Japan

Besonders hervorheben möchten wir Dr. B. Fisher. Er hat uns freundlicherweise das auf dem Umschlag gezeigte Tiefenbild mit einem Autoteil (siehe Anhang B) überlassen.

Unser aufrichtiger Dank gilt auch dem Springer-Verlag für das Interesse am vorliegenden Buch und die geduldige Betreuung während seiner Entstehung.

Bern, Dezember 1995

Xiaoyi Jiang, Horst Bunke

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bildanalyse	1
1.2	Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern	3
1.3	Aufbau des Buches	5
1.4	Allgemeine Literaturhinweise	6
2	Stereoverfahren zur Tiefenbestimmung	7
2.1	Prinzipielles Vorgehen beim Stereosehen	7
2.2	Stereogeometrie	8
2.2.1	Standard-Stereogeometrie	8
2.2.2	Kalibrierung der Stereogeometrie	12
2.3	Zuordnungsmerkmale	14
2.4	Zuordnungseinschränkungen für die Korrespondenzanalyse	16
2.5	Zuordnungsverfahren	21
2.5.1	Korrelationsverfahren	23
2.5.2	Relaxation	25
2.5.3	Dynamische Programmierung	28
2.6	Sonstige Stereoverfahren	31
2.6.1	Aktives Stereo	31
2.6.2	Trinokulares Stereo	32
2.6.3	Axiales Stereo	34
2.7	Literaturhinweise	36
3	Auswertung monokularer Tiefenhinweise	39
3.1	Form aus Schattierung	40

3.1.1	Rekonstruktion der Flächennormalen	43
3.1.2	Rekonstruktion der Tiefe	47
3.1.3	Photometrisches Stereo	48
3.1.4	Tiefenbestimmung aus Nadeldiagramm	51
3.2	Form aus Textur	53
3.3	Literaturhinweise	57
4	Aktive Tiefengewinnung	59
4.1	Laufzeitverfahren	60
4.1.1	Eigenschaften der Signale	61
4.1.2	Direkte Messung der Laufzeit	62
4.1.3	Laufzeitmessung durch Amplitudenmodulation	65
4.1.4	Laufzeitmessung mit Frequenzmodulation	68
4.1.5	Transformation ins kartesische Koordinatensystem	72
4.2	Triangulationsverfahren	73
4.2.1	Projektion von Lichtstrahlen	73
4.2.2	Projektion von Lichtebenen	76
4.2.3	Codierter Lichtansatz	82
4.2.4	Farbcodierte Projektion	87
4.2.5	Projektion binärer Muster	90
4.2.6	Triangulation mit zwei Kameras	93
4.2.7	Tiefenberechnung bei der Lichtebenenprojektion	95
4.2.8	Kalibrierung	99
4.2.9	Diskussion und Vergleich	101
4.3	Form aus strukturiertem Licht	102
4.4	Literaturhinweise	104
5	Vorverarbeitung	107
5.1	Glättung	107
5.1.1	Klassische Glättungsoperatoren	107
5.1.2	Morphologische Glättung	110
5.1.3	Gaußsche Glättung	111

5.1.4	Binomialfilterung	113
5.1.5	Adaptive Glättung	114
5.1.6	Vergleich von Glättungsmethoden	116
5.2	Störungsabschätzung und Schwellwertbestimmung	118
6	Bestimmung charakteristischer Flächenmerkmale	121
6.1	Grundlagen der Differentialgeometrie	121
6.1.1	Räumliche Kurven	121
6.1.2	Flächen	123
6.1.3	Digitale Berechnung der Flächenmerkmale	130
6.2	Numerische Berechnung der Flächenmerkmale	131
6.3	Analytische Berechnung der Flächenmerkmale	132
6.3.1	Lineare Regression	133
6.3.2	Approximation mittels orthogonaler Polynome	139
6.3.3	Approximation durch Eigenvektoren	142
6.4	Robuste Flächenapproximation	144
6.4.1	Selektive Flächenapproximation	144
6.4.2	Methoden aus der robusten Statistik	146
6.5	Literaturhinweise	152
7	Segmentierung	155
7.1	Kantenbasierte Segmentierung	155
7.1.1	Ableitungsbasierte Kantendetektion	157
7.1.2	Kantendetektion mittels morphologischer Residuenanalyse	159
7.1.3	Kantendetektion mittels Residuenanalyse	163
7.1.4	Moment-basierte Kantendetektion	165
7.2	Regionenbasierte Segmentierung: Algorithmische Paradigmen . .	169
7.2.1	Split-and-Merge	171
7.2.2	Regionenexpansion	174
7.2.3	Clusteranalyse	175
7.2.4	Sonstige Ansätze	179
7.3	Segmentierung in planare Flächen	180

7.3.1	Split-and-Merge basierend auf Quadtree	180
7.3.2	Split-and-Merge basierend auf Delaunay-Triangulation	182
7.3.3	Clustering in planare Strukturen	185
7.3.4	Gruppierung der Abtastzeilen	188
7.4	Segmentierung in gekrümmte Flächen	192
7.4.1	Split-and-Merge Verfahren	192
7.4.2	Clusteranalyse	197
7.4.3	Iterative Oberflächenapproximation von variablem Grad	200
7.4.4	Hypothese-Verifikations-Verfahren	204
7.5	Detektion von Rotationsflächen	209
7.6	Flächenklassifikation	212
7.6.1	Ebenentest	213
7.6.2	Unterscheidung zwischen quadratischen Flächen	213
7.6.3	Bestimmung der Flächenparameter	216
7.6.4	Modellbasierte Flächenklassifikation	218
7.7	Vergleich von Segmentierungsmethoden	220
7.8	Symbolische Szenenbeschreibung	225
7.9	Literaturhinweise	225
8	Objekterkennung	227
8.1	Aufteilung der Szene	229
8.2	Lokale Zuordnung: Konsistenzbedingungen	231
8.2.1	Gerichtete Geraden	231
8.2.2	Flächen	234
8.3	Globale Zuordnung: Korrespondenzanalyse	235
8.3.1	Diskrete Relaxation	237
8.3.2	Maximale Cliques	241
8.3.3	Baumsuche	244
8.3.4	Partielle Baumsuche	254
8.3.5	Suche in indexierten Tabellen	256
8.3.6	Akkumulation im Transformationsraum	259
8.3.7	Maßnahmen zur Effizienzsteigerung	262

8.4	Globale Zuordnung: Verifikation	265
8.4.1	Merkmalsbasierte Verifikation	266
8.4.2	Bildbasierte Verifikation	267
8.4.3	Ausdehnung der Objekthypothesen	269
8.4.4	Bewertung und Annahme der Objekthypothesen	272
8.5	Transformationsbestimmung	273
8.5.1	Verkettung elementarer Transformationen	274
8.5.2	Getrennte Bestimmung von Rotation und Translation	276
8.5.3	Kombinierte Bestimmung von Rotation und Translation	287
8.6	Indexierung	290
8.7	Modellgenerierung	291
8.8	Literaturhinweise	293
9	Anwendungen	297
9.1	Formprüfung	297
9.2	Sortieren von Objekten	299
9.2.1	Sortieren nach der Objekterkennung	300
9.2.2	Sortieren von unbekanntem Objekten	301
9.3	Navigation autonomer Fahrzeuge	304
9.4	Analyse von Gesichtsbildern	308
9.4.1	Lokalisieren von Gesichtsmarkmalen	308
9.4.2	Gesichtserkennung	312
9.5	Literaturhinweise	313
A	Mathematische Morphologie	315
B	Tiefenbildsammlungen	319
	Literaturverzeichnis	325
	Sachverzeichnis	356