

Model-based Online 3D Reconstruction from Image Sequences

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Rat der Fakultät für Mathematik und Informatik
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Dipl.-Inf. Olaf Kähler

geboren am 24. November 1979 in Nürnberg

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch, Christian-Albrechts-Universität Kiel

Tag der letzten Prüfung des Rigorosums: 18. August 2009

Tag der öffentlichen Verteidigung: 4. September 2009

Kähler, Olaf:

Model-based Online 3D Reconstruction from Image Sequences

ISBN 978-3-941274-25-9

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2009

©Optimus Mostafa Verlag

URL: www.optimus-verlag.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes in Deutschland ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Reconstruction of 3D Scenes	2
1.2	Contributions	4
1.3	Work Outline	6
2	Mathematical Background	9
2.1	Geometry	9
2.1.1	Homogeneous Coordinates	10
2.1.2	Geometric Entities in Projective Space	10
2.1.3	Transformations	15
2.1.4	Camera Models	18
2.1.5	Two-View Geometry Models	22
2.2	Statistical Estimation	26
2.2.1	Maximum Likelihood Estimator	28
2.2.2	Maximum A Posteriori Estimator	28
2.2.3	Gaussian Noise	29
2.2.4	Independent Identically Distributed Noise	30
2.3	Numerical Optimization	31
2.3.1	General Optimization Problems	32
2.3.2	Linear Observation Models	33
2.3.3	Non-Linear Observation Models	34
3	State of the Art	39
3.1	Tracking	39
3.1.1	Problem Formulation	40
3.1.2	Refinements and Approximations	42
3.2	Offline Reconstruction	46
3.2.1	Factorization by Sturm and Triggs	47
3.2.2	Factorization by Rother	48

3.3	Self-Calibration	51
3.3.1	Absolute Quadric Method	51
3.3.2	Rotating Camera	52
3.3.3	Planar Self-Calibration	53
3.4	Online Reconstruction	55
3.4.1	Linear Online Reconstruction	55
3.4.2	Recursive Estimation	57
3.5	Bundle Adjustment	59
4	Direct Reconstruction	63
4.1	Related Works	63
4.2	Combined Tracking and Reconstruction	65
4.2.1	Likelihood Function	65
4.2.2	Prior Information	66
4.2.3	Derivatives of the Error Function	68
4.2.4	Online Framework	69
4.2.5	Parameterization Details	70
4.3	Convergence and Local Minima	73
4.3.1	Shape of the Error Function	73
4.3.2	Consequences for the Minimization	77
4.4	Efficient Implementation	79
4.4.1	Analysis of Run Time	79
4.4.2	Reduction of Run Time	80
4.4.3	Parallel Implementation	83
4.5	Experimental Evaluation	83
4.5.1	Setup	83
4.5.2	Stability	86
4.5.3	Robustness to Noise	88
4.5.4	Prior Information	90
4.5.5	Run Time Behavior	91
4.5.6	Comparison	95
5	3D Tracking	99
5.1	A Counting Argument	100
5.2	Constrained Homography Estimation	105
5.2.1	Shashua-Constraint	105
5.2.2	Zelnik-Manor-Constraint	107
5.2.3	Reconstruction as Constraint	108
5.3	Constrained Parameterizations	109
5.3.1	Epipolar Subspace Parameterization	109
5.3.2	Geometric Parameterization	110

5.4	Experimental Evaluation	111
5.4.1	Setup	111
5.4.2	Comparison	112
5.4.3	Distribution of Tracking Errors	114
6	Automatic Scene Reconstruction	117
6.1	Image Sequences	117
6.1.1	Detecting Camera Translation	118
6.1.2	Detecting Planar Regions	123
6.1.3	Plane Segmentation	124
6.2	Depth Images	127
6.2.1	Detection of Planes	128
6.2.2	Plane Segmentation	129
6.3	Detection, Tracking and Reconstruction	130
6.4	Experimental Evaluation	131
6.4.1	Camera Translation	131
6.4.2	Plane Segmentation	133
7	Application Areas	137
7.1	Robot Navigation	137
7.2	Visual 3D Modeling	139
8	Summary and Conclusions	145
8.1	Overview of Presented Approaches	145
8.2	Conclusions	146
8.3	Future Work	147
A	Notation	151
A.1	Tensor Notation	151
A.2	Quaternions	156
A.3	Derivatives	158
A.4	Linear Algebra	159
B	Linear Parameter Estimation	163
B.1	Estimation of Homographies	163
B.2	Estimation of Epipolar Geometry	164
B.3	Triangulation	165
B.4	RANSAC and DLT	166
C	Derivatives of Homographies	167
	Bibliography	169

List of Own Publications	181
Index	183
List of Figures	185
List of Tables	187