



Institut für Photogrammetrie

Generische Strukturen zur Modellierung der Parameterschätzung

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)
der
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

Vorgelegt am
24. Januar 2000
von

Dipl.-Ing. Thomas Hau
aus Koblenz

Referent:

1. Korreferent:

2. Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner

Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Helfrich

Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Tag der mündlichen Prüfung:

5. Mai 2000

Geodäsie

Band 7

Thomas Hau

**Generische Strukturen zur Modellierung
der Parameterschätzung**

D 98 (Diss. Universität Bonn)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Hau, Thomas:

Generische Strukturen zur Modellierung der Parameterschätzung/

Thomas Hau. Aachen : Shaker, 2000

(Geodäsie ; Bd. 7)

Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 2000

ISBN3-8265-7621-7

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7621-7

ISSN 1438-4566

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 wurde am Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter angefertigt. Für die Förderung, die fachliche Unterstützung und die Betreuung der Dissertation möchte ich meinem "Doktorvater" Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner ganz herzlich danken.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Helfrich danke ich für die Unterstützung während meiner Arbeit am Institut und die unkomplizierte Übernahme des Korreferats.

Auch Herrn Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas der TU Dresden sei ganz herzlich für die wertvollen Ratschläge und die Übernahme der Gutachtertätigkeit gedankt.

Außerdem spreche ich allen Mitarbeitern des Instituts für Photogrammetrie der Universität Bonn für die kollegiale Zusammenarbeit meinen Dank aus. Besonders hervorzuheben ist die stete Bereitschaft zur Diskussion von Dr. Steffen Abraham und die gute Zusammenarbeit mit ihm.

Meinen Korrekturlesern Dr. Susanne Vespermann, Hildegard Hau-Strehle und Lothar Andereya sei ebenfalls gedankt. Für die fachliche Unterstützung bei der Korrektur danke ich weiterhin Dr. Eberhard Gülch und Hardo Müller.

Meiner Frau und meinen beiden Kindern bin ich zu großem Dank verpflichtet, da die Erstellung der Arbeit ohne ihr großes Verständnis und ohne den Verzicht auf den Ehemann und Vater nicht möglich gewesen wäre.

Zusammenfassung

Die Ausgleichsrechnung und Parameterschätzung ist aus dem Bereich der Geodäsie und Photogrammetrie aufgrund automatisierter Verfahren der Datenerfassung für vermessungstechnische Aufgabenstellungen und der daraus resultierenden oft hochredundanten Gleichungssysteme zur Bestimmung unbekannter Parameter nicht mehr wegzudenken. Die Anfänge der Ausgleichsrechnung gehen auf Gauß, Helmert und Markoff zurück und haben sich im Bereich der Geodäsie und Photogrammetrie bis heute weit entwickelt. So sind in der Literatur eine Vielzahl an Veröffentlichungen zu diesem Themengebiet zu finden. Die Strukturierungen der Arbeiten sind nahezu so vielfältig wie die Zahl der Publikationen.

Zur Lösung ausgleichungstechnischer Fragestellungen wird meistens die sicherlich am weitesten etablierte Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt, die unabhängig von der Verteilung der akquirierten Beobachtungen zur Ausgleichung verwendet werden kann. Die Algorithmen zur Lösung des aufgestellten Normalgleichungssystems können immer wieder genutzt werden, die Arbeiten zur Aufstellung des Normalgleichungssystems sind jedoch wieder neu zu leisten. Zwar findet man in der Literatur eine Reihe von Arbeiten zur Verallgemeinerung der Ausgleichsrechnung und Parameterschätzung, diese zielen aber in der Regel nur auf die Verallgemeinerung der Berechnungsvorschriften ab. Eine Entwicklung generischer, allgemeingültiger Strukturen für die Parameter und für die Beobachtungen, um den immer wiederkehrenden Aufwand zur Aufstellung des Normalgleichungssystems zu reduzieren, ist bislang nicht erfolgt.

Zentrales Anliegen der Arbeit ist daher zum einen die allgemeingültige, systematische Strukturierung aller zur Parameterschätzung erforderlichen Modelle und zum anderen die Ableitung von Strukturen für die Modelle der Parameter, der Beobachtungen und des mathematischen Modells, um den immer wiederkehrenden Aufwand zur Aufstellung des Normalgleichungssystems zu automatisieren. Insbesondere für das Parameter- und das Beobachtungsmodell werden generische Strukturen entwickelt, die eine Repräsentation beliebig komplexer Sachverhalte zur Schätzung ermöglichen. Es werden Strukturen für die Modelle und deren Verknüpfungen abgeleitet, so daß für die Lösung einer neuen Schätzaufgabe nur noch der deterministische Ansatz zu implementieren ist. Die übrigen Arbeiten zur Schätzung erfolgen automatisch. Realisiert wurden die fundamentalen Modelle in einem generischen Modul zur Parameterschätzung in der Programmiersprache C++.

Die Leistungsfähigkeit, die Flexibilität und die Handhabung des implementierten Moduls zur Parameterschätzung werden anhand von Beispielen aus dem Bereich der Oberflächenerfassung mittels des Verfahrens der Streifenprojektion dokumentiert. Als Evaluierungsbeispiele werden ein neues Verfahren zur Orientierung und Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors mit minimaler geometrischer Objektinformation, sowie die Bestimmung einer Ausgleichsebene und einer Ausgleichskugel zum Nachweis der erreichbaren Güte des Verfahrens zur Orientierung und Kalibrierung des Sensors gewählt. Es werden jeweils die Strukturen der Beobachtungen und der Parameter und auch ihre Verknüpfungen miteinander im mathematischen Modell, das als Basis für die Schätzung gilt, beschrieben.

Diese Strukturen der fundamentalen Modelle lassen eine vollautomatische Parameterschätzung zu. Lediglich das deterministische Modell ist zu implementieren. Das Schätzmodul bietet somit auch den nicht auf dem Gebiet der Ausgleichsrechnung und Parameterschätzung spezialisierten Nutzern die Möglichkeit, Aufgaben mit Hilfe der Parameterschätzung zu lösen und öffnet so neue Perspektiven für die der Geodäsie und der Photogrammetrie fachfremden Disziplinen.

Abstract

In the field of geodesy and photogrammetry the methods of parameter estimation and adjustment theory have reached a high standard. Because of automated registration methods for measuring tasks and the resulting high redundancy in the equation systems that determine unknown parameters these methods could not be neglected in measuring techniques. The adjustment theory is based on Gauß, Helmert and Markoff and has permanently been developed further in geodesy and photogrammetry. In the relevant literature a multitude of publications on this subject can be found. The structures of the papers are almost as manifold as the number of existing publications.

In most cases the widely established method of least squares is used for solving adjustment tasks. It is independent of the distribution of acquired observations. The algorithms for solving the built normal equation can be used again and again, the building of normal equations, however, has to be performed always new. Of course, one can find some proposals in literature to generalise the adjustment theory and the methods of parameter estimation, but most of these only aim at the generalisation of calculation prescriptions. Generic and generally accepted structures for parameters and observations to reduce the recurrent requirements for building the normal equation have not been developed yet.

Therefore the central objective of this thesis is a generally accepted systematic structure for all necessary models for parameter estimation on the one hand and the derivation of structures for the models of the parameters and the observations and a mathematical model to automate the building of the normal equation on the other hand. For the parameter and observation model generic structures are especially developed. These provide a representation method for any complex facts of estimations. Structures for the models and their connection are defined so that only the deterministic model for an estimation task has to be implemented. The remaining estimation tasks are performed automatically. The fundamental models have been realised in a generic model for parameter estimation in the programming language C++.

The efficiency, the flexibility and the handling of the implemented module for parameter estimation are demonstrated through some examples from the field of surface reconstruction with the methods of fringe projection. As evaluation examples a new procedure for the orientation and calibration of a fringe projector with the help of minimal geometric object knowledge, the definition of an adjusted plane, and the determination of sphere parameters are chosen. The two adjustments of the geometric bodies are to prove the quality of the procedure of orientation and calibration of the sensor. In each example the structures of the observations and the parameters, and also their connection to each other in the mathematical model, which is the basis for the estimation, are described.

The structures of the fundamental models make a fully automatic parameter estimation possible. Only the deterministic model has to be implemented. This way, the estimation module also gives such users who are not familiar with the theory of parameter estimation the opportunity to solve their tasks. It offers new perspectives for disciplines other than geodesy and photogrammetry.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Einführung	15
1.2	Zielsetzung	18
1.3	Anforderungen an die Modellierung	19
1.4	Lösungsansatz	20
2	Theoretische und methodische Modellierungsgrundlagen und -werkzeuge	23
2.1	Modelle zur Parameterschätzung	23
2.1.1	Grundzüge der Parameterschätzung in linearen Modellen	23
2.1.2	Abhängigkeit des Schätzmodells von den Modellen zur Parameterschätzung	26
2.1.3	Erfordernis unterschiedlicher mathematischer Modelle	28
2.2	Methoden der objektorientierten Modellierung	30
2.2.1	Strategien zur Systementwicklung	30
2.2.2	Entwurfsmuster	32
2.2.3	Modellierungswerkzeuge	32
2.3	Modellierungselemente der Unified Modeling Language	33
2.3.1	Die Klasse als Basis der statischen Modellierung	34
2.3.2	Beziehungen zwischen den Klassen	35
2.3.3	Dynamische Modellierungswerkzeuge	37
3	Analyse und Design zur Strukturierung der fundamentalen Modelle	39
3.1	Analyse möglicher Aufgabenstellungen und Entwurf eines Objektmodells	39
3.1.1	Analyse möglicher Aufgabenstellungen	40
3.1.2	Ableitung von Repräsentationsstrukturen	48

3.1.3	Konkretisierung der Strukturen für ein Design der fundamentalen Modelle	57
3.1.4	Überblick über die Klassen zur Parameterschätzung	66
3.2	Design des Parametermodells	69
3.2.1	Die Klassen des Parametermodells	70
3.2.2	Basisklasse der Parameter	71
3.2.3	Die übergeordnete Klasse der Parameter	74
3.2.4	Klasse zur Repräsentation des generischen Teils des Parametermodells	75
3.2.5	Klasse der Parametergruppen	75
3.2.6	Klasse der Parameterelemente	76
3.3	Design des Beobachtungsmodells	77
3.3.1	Die Klassen des Beobachtungsmodells	78
3.3.2	Basisklasse der Beobachtungen	80
3.3.3	Die übergeordnete Klasse der Beobachtungen	81
3.3.4	Klasse zur Repräsentation des generischen Teils des Beobachtungsmodells	82
3.3.5	Klasse der Beobachtungsgruppen	83
3.3.6	Klasse der Beobachtungselemente	84
3.4	Das mathematische Modell	84
3.4.1	Das deterministische Modell	85
3.4.2	Das stochastische Modell	85
3.5	Das Optimierungsmodell	86
3.5.1	Die Klassen des Optimierungsmodells	87
3.5.2	Basisklasse des Optimierungsmodells	87
3.5.3	Klasse zur Optimierung nach der Methode der kleinsten Quadrate	88
3.6	Das Schätzmodell	93
3.6.1	Übersicht über die Klassen des Schätzmodells	93
3.6.2	Die Basisklasse des Schätzmodells	94
3.6.3	Die individuellen Klassen	95
3.7	Design weiterer Klassen	97
3.7.1	Klasse der Modellverknüpfungen	97
3.7.2	Design der Restriktionsklassen	100
3.7.3	Klasse symmetrischer Matrizen	101

3.7.4	Klasse zur Repräsentation statistischer Größen	102
3.7.5	Klasse der Teilkoeffizientenmatrizen und Teilbeobachtungsvektoren	103
3.7.6	Klasse des Gesamtparametervektors	105
3.7.7	Klasse des Gesamtbeobachtungsvektors	106
4	Operationeller Einsatz des generischen Schätzmoduls	107
4.1	Grundlagen zur Orientierung und Kalibrierung eines Streifenprojektions- sensors	107
4.1.1	Einordnung des vorgestellten Kalibrierverfahrens	107
4.1.2	Das eingesetzte Meßprinzip der Streifenprojektion	109
4.1.3	Das Abbildungsmodell für Kamera und Projektor	112
4.2	Orientierung und Kalibrierung des Gesamtsensors	113
4.2.1	Vorabkalibrierung der CCD-Kamera	114
4.2.2	Automatische relative Orientierung beider Sensorkomponenten . . .	114
4.2.3	Kalibrierung des Gesamtsensors	117
4.3	Die Kalibrierung auf Basis der fundamentalen Modelle	121
4.3.1	Kalibrierung des Gesamtsensors	121
4.3.2	Ebenenausgleichung	132
4.3.3	Kugelausgleichung	136
4.3.4	Diskussion der Ergebnisse	140
5	Zusammenfassung und Ausblick	143
5.1	Zusammenfassung	143
5.2	Ausblick	145
A	Beschreibung der mathematischen Modelle	147
A.1	Ausgleichung nach bedingten Beobachtungen	148
A.2	Gauß-Markoff-Modell	150
A.3	Gauß-Markoff-Modell mit Restriktionen	151
A.4	Gauß-Helmert-Modell	153
A.5	Gauß-Helmert-Modell mit Restriktionen	155
B	Ergänzungen zur Implementierung der fundamentalen Modelle	157
B.1	Zusätzliche Parameter in der Ausgleichung	157

B.2	Redundanzanteile	158
B.3	Ausreißertest	158
B.4	Sequentieller Aufbau des Normal- gleichungssystems	160
B.5	Lösungsschemata für die Parameterschätzung	161
B.6	Abbruchkriterium für die Schätzung	162
Literatur		165