

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e. V.

Jahrgang 2011, Heft 2

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

Schriftleiter:
Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten,
Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Clement Atzberger, Andrew Frank,
Christian Heipke, Joachim Hill, Patrick Hostert, Hans-Gerd Maas, Wolfgang
Reinhardt, Franz Rottensteiner, Jochen Schiewe



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2011



Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Gegründet 1909

Die *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* (DGPF) e.V. unterstützt als Mitglieds- bzw. Trägergesellschaft die folgenden Dachverbände:



International Society
for Photogrammetry
and Remote Sensing

DAGM

Deutsche Arbeits-
gemeinschaft für
Mustererkennung e.V.



GeoUnion
Alfred-Wegener-Stiftung

Herausgeber:

© 2011 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsidentin: Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, Tel.: +49(0)345 55-26020
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2–18, D-48145 Münster, e-mail: klaus.komp@eftas.com

Published by:

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A,
D-70176 Stuttgart. Tel.: 0711 351456-0, Fax: 0711 351456-99, e-mail: mail@schweizerbart.de
Internet: <http://www.schweizerbart.de>

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

All rights reserved including translation into foreign languages. This journal or parts thereof may not be reproduced in any form without permission from the publishers.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Zeitschrift 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.

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition
Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer, Institut für Angewandte Informatik, Universität der Bundeswehr München, D-85577 Neubiberg, e-mail: Helmut.Mayer@unibw.de
Schriftleiter: Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Gebäude NA 7/133, D-44780 Bochum, e-mail: carsten.juergens@rub.de, Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten, HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr.1, D-22297 Hamburg, e-mail: thomas.kersten@hcu-hamburg.de, Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer, Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn, e-mail: Lutz.Pluemer@ikg.uni-bonn.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 107, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 198,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im regulären Subskriptionspreis enthalten.

Anzeigenverwaltung: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 0711 351456-0; Fax: 0711 351456-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, D-76227 Karlsruhe, Tel.: 0721 944020, Fax: 0721 9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

Printed in Germany by Tutte Druckerei GmbH, D-94121 Salzweg bei Passau

PFG – Jahrgang 2011, Heft 2 Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

BETHMANN, F. & LUHMANN, T.: Kleinste-Quadrate-Zuordnung mit erweiterten geometrischen Transformationen	57
JACOBSEN, K.: Geometric Property of Large Format Digital Camera DMC II 140	71

Berichte und Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen

Seminar „Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau“ am 14. Oktober 2010 am Karlsruher Institut für Technologie	81
1 st European LiDAR Mapping Forum (ELMF) vom 30. November – 1. Dezember 2010 in Den Haag, Niederlande	82

Mitteilungen

Renaissance der Stereoauswertung von Luftbildern	83
--	----

Hochschulnachrichten

Leibniz Universität Hannover, Dissertation MOHAMMAD TAVAKKOLI	85
Technische Universität München, Dissertation WEI YAO	86

Buchbesprechung

LUHMANN, T. (Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen)	87
BILL, R. (Grundlagen der GEO-Informationssysteme)	88

Veranstaltungskalender	90
------------------------------	----

Zum Titelbild	91
---------------------	----

Korporative Mitglieder	92
------------------------------	----

Zusammenfassungen der „Originalbeiträge“ und der Beiträge „Aus Wissenschaft und Technik“ (deutsch und englisch) sind auch verfügbar unter www.dgpf.de/neu/pfg/ausgaben.htm





Kleinste-Quadrate-Zuordnung mit erweiterten geometrischen Transformationen

FOLKMAR BETHMANN & THOMAS LUHMANN, OLDENBURG

Keywords: Kleinste-Quadrate-Zuordnung, Least-Squares Matching, Genauigkeit

Summary: *Least-squares Matching with Advanced Geometric Transformation Models.* Least-squares matching (LSM) for area-based image matching is a well known technique in photogrammetry and computer vision since more than two decades. Differences between two or more images can be modelled by estimating geometric and radiometric transformation functions within the functional model. Commonly the affine transformation is used as geometric transformation. Since this approach is not strict in terms of the projective imaging model, it is worthwhile to investigate alternative transformation models.

Based on special close-range applications this paper presents an advanced least-squares matching algorithm that uses the projective transformation model and polynomial transformations to handle geometric distortions between the images. In the first part a detailed description of the functional model is given for both approaches. In the second part the results of different tests are presented. The first test uses synthetic image data to investigate the 2D accuracy of the matching results (image coordinates). Within the second test a calibrated 3D reference body is used to investigate the 3D accuracy of point clouds that have been created with the PISA software for 3D free-form measurements by using the different matching approaches. All tests have shown that the polynomial transformation model yields to results with highest accuracy. The affine and the projective model yield to distinct systematic deviations, especially for the non-plane surface of the 3D reference body.

Zusammenfassung: Die photogrammetrische Bildzuordnung durch Kleinste-Quadrate-Zuordnung hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten als praktikable Methode zur subpixelgenauen Lösung des Korrespondenzproblems in den Bereichen Photogrammetrie und Computer Vision etabliert. Veröffentlichungen zum Thema basieren in der Regel auf der vereinfachten Annahme, dass sich die geometrische Beziehung zwischen einem Referenz- und n Suchfenstern durch die Affintransformation ausreichend gut beschreiben lässt. Motiviert durch spezielle Anwendungen mit einer kalibrierten Stereokamera in der Nahbereichsphotogrammetrie stellt der vorliegende Beitrag zwei Erweiterungen des Ansatzes hinsichtlich der zu verwendenden Geometrietransformationen vor: anstelle der Affintransformation werden die Projektivtransformation und die Polynomtransformation eingesetzt. Das funktionale Modell wird für beide Ansätze umfassend beschrieben. Die verschiedenen Ansätze werden anhand von synthetisch erzeugten Bilddaten sowie unter Verwendung eines kalibrierten Referenzkörpers untersucht. Die Tests zeigen, dass bei der hier gegebenen speziellen Aufgabenstellung mit je zwei konvergenten Messbildern höchste Zuordnungsgenauigkeiten mit dem Ansatz der Polynomtransformation erreicht werden und bei Verwendung der Affin- und Projektivtransformation z. T. deutliche systematische Abweichungen auftreten.

1 Einleitung

Die Entwicklung der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung (Least-Squares Matching – LSM) als bildraumbasiertes Zuordnungsverfahren durch geometrische und radiometrische An-

passung zweier oder mehrerer Bildausschnitte zu einem Referenzbild (Template) vollzog sich zu Beginn der 1980er Jahre. Die Formulierung der Zuordnung als Kleinste-Quadrate Aufgabe durch Beobachtung von Grauwertdifferenzen im eindimensionalen Fall (Verwendung

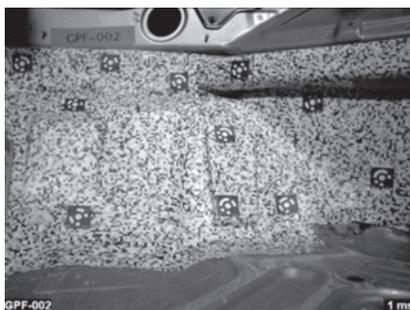
einer Bildzeile) unter Berücksichtigung von zunächst einem Translationsparameter findet sich bei FÖRSTNER (1982). Die Erweiterung der Methode auf den zweidimensionalen Fall (Verwendung von rechteckigen oder quadratischen Bildfenstern) und die Hinzunahme von zusätzlichen Geometrie- und Radiometrieparametern wurde von FÖRSTNER (1984), ACKERMANN (1984), PERTL (1984) und GRÜN (1985a) vorgenommen. Die genannten Autoren legen konsequent die Affintransformation als lineare Geometrietransformation zugrunde, teilweise mit dem Hinweis auf deren beschränkte Einsetzbarkeit unter der Voraussetzung, dass genügend kleine Bildfenster verwendet werden und die betrachtete Objektfläche partiell eben ist. In den folgenden Jahren sind zahlreiche interessante Modifizierungen vorgenommen worden, als Beispiele seien die Einführung von Nachbarschaftsbedingungen durch Formulierung von Lagekorrespondenzen für die Eckpunkte benachbarter Bildfenster (GRÜN 1985b) und die Erweiterung des Ansatzes auf die Mehrbildauswertung mit geometrischen Bedingungen von GRÜN & BALTSAVIAS (1988) genannt. Verallgemeinerungen hin zum objektraumbasierten Zuordnungsansatz finden sich z. B. bei WROBEL (1987), EBNER et al. (1987) oder SCHNEIDER (1991).

Die Praktikabilität des Verfahrens ist für ganz unterschiedliche Anwendungen, beispielsweise zur Erfassung komplexer Oberflächen (REMONDINO 2003) oder zur dynamischen Bildsequenzauswertung zur Deformationsanalyse in hochdynamischen Prozessen (BETHMANN et al. 2009), belegt.

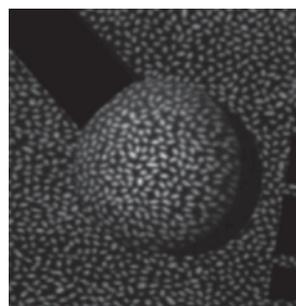
Motivation für die hier vorgelegte Arbeit sind spezielle Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie, bei denen stark gekrümmte Oberflächen mit konvergenten Stereoaufnahmen erfasst werden (Beispiele in Abb. 1). Hierbei können häufig nicht optimal aufgelöste Oberflächentexturen bereitgestellt werden. Folge dieser Aufnahme Konfigurationen sind perspektiv stark verzerrte Bilder.

Eine mathematisch strenge Beschreibung der geometrischen Beziehungen im LSM ist bei konsequenter Annahme von differenziell ebenen Oberflächenstücken und ebener Bildsensoren durch eine affine Koordinatentransformation gegeben. In Abhängigkeit des Bildmaßstabes können differenziell kleine Bildfenster jedoch aufgrund von Oberflächenkrümmungen oder nicht mehr auflösbaren Texturen (fehlenden Bildgradienten) nicht immer realisiert werden.

Die geometrisch strenge Abbildung größerer (nicht differenzieller) ebener Objektflächen ist durch Verwendung der ebenen Projektivtransformation gegeben (Gleichung (8)). Das funktionale Modell des LSM wird dann deutlich komplexer, da die Transformationsfunktionen nicht mehr linear sind. Zur Modellierung von Krümmungen, wie sie z. B. bei der Beobachtung von nicht-ebenen Objektflächen zu erwarten sind, bietet sich der Ansatz der Polynomtransformation (Gleichung (20)) an. Erste Ergebnisse dazu wurden in BETHMANN & LUHMANN (2010) publiziert, die in diesem Beitrag um Untersuchungen zur Abhängigkeit von Fenstergrößen erweitert werden.



a) Fußraum im Automobil



b) Messung einer Kugel nach VDI 2634/2

Abb. 1: Beispiele zur Anwendung von LSM bei stark gekrümmten Objekten im Nahbereich.

Im Folgenden wird zunächst die Aufstellung des funktionalen Modells detailliert für den Ansatz der Projektiv- und den Ansatz der Polynomtransformation (2. Grades) beschrieben. Anschließend wird untersucht, ob sich durch die Erweiterungen generell eine Steigerung der Zuordnungsgenauigkeit ergibt.

In Abschnitt 3.1 steht dabei die Untersuchung der 2D-Genauigkeit (Tests an synthetischen Bilddaten) im Vordergrund. Darüber hinaus wird der Zusammenhang zwischen der Größe der in der Bildzuordnung verwendeten Fenster und der erreichbaren Zuordnungsgenauigkeit untersucht.

Im Abschnitt 3.2 werden die erweiterten Ansätze in einen Algorithmus zur 3D-Freiformerfassung integriert. Es können dann Messungen an einem kalibrierten 3D-Referenzkörper durchgeführt und 3D-Soll-Ist-Abweichungen berechnet und visualisiert werden.

2 Das funktionale Modell

Gegeben seien die Bildfunktionen zweier gleich großer Bildausschnitte:

$$\begin{aligned} g'(x',y') & \quad (\text{Bild 1}) \\ g''(x'',y'') & \quad (\text{Bild 2}) \end{aligned}$$

Wesentliche Annahme bei der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung ist, dass sich die Bildfunktion des ersten Bildausschnittes nach Anwendung von zu definierenden geometrischen und radiometrischen Transformationen bis auf einen durch Rauschen verursachten Anteil rechnerisch in die Bildfunktion eines zweiten (bis n-ten) Bildausschnittes überführen lässt.

Die geometrische Transformation stellt dabei einen funktionalen Zusammenhang zwischen korrespondierenden Bildpositionen her, so dass sich die Koordinaten des zweiten Bildes als Funktionen der Koordinaten des ersten Bildes darstellen lassen:

$$\begin{aligned} x'' &= f_x(x',y') \\ y'' &= f_y(x',y') \end{aligned} \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung der Rauschanteile $e'(x',y')$ und $e''(x'',y'')$ lässt sich der geometrische Zusammenhang der beiden Bildfunktionen mit

$$\begin{aligned} & g'(x',y') + e'(x',y') \\ &= g''(f_x(x',y'), f_y(x',y')) + e''(x'',y'') \end{aligned} \quad (2)$$

beschreiben. Das Ergebnis der Transformation nach (1) ist nicht ganzzahlig, daher muss der Grauwert g'' über eine zu definierende Interpolationsfunktion bestimmt werden.

Für die Funktionen f_x und f_y lassen sich im Prinzip beliebige zweidimensionale Koordinatentransformationen einsetzen. Die detaillierte Beschreibung für die Projektiv- und die Polynomtransformation folgt in den Abschnitten 2.1 und 2.2.

Zur radiometrischen Transformation wird in der Regel eine lineare Grauwertstreckung durch Einführung zweier weiterer Parameter verwendet:

$$\begin{aligned} & g'(x',y') + e'(x',y') \\ &= r_0 + r_1 \cdot g''(f_x(x',y'), f_y(x',y')) + e''(x'',y'') \end{aligned} \quad (3)$$

Die Gleichung (3) stellt das funktionale Modell zur Formulierung der Aufgabe als eine Kleinste-Quadrate-Lösung dar. Ziel ist es, die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen den Bildfunktionen zu minimieren. Der funktionale Zusammenhang ist nicht linear, daher muss eine Linearisierung an Näherungswerten durchgeführt werden. Die Linearisierung für die Transformationsparameter der eingesetzten Geometrietransformationen ist in Abschnitt 2.1 (Projektivtransformation) und in Abschnitt 2.2 (Polynomtransformation) beschrieben. Die Linearisierung der Bildfunktion geschieht durch Bildung der Grauwertgradienten:

$$\begin{aligned} g_x &= \frac{\partial g''(x'',y'')}{\partial x''} \\ g_y &= \frac{\partial g''(x'',y'')}{\partial y''} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Grauwertgradienten müssen numerisch durch geeignete Methoden (z. B. Roberts-Gradient) bestimmt werden.

Nach Bildung der Grauwertdifferenzen und Substitution der Rauschanteile zu

$$v(x',y') = e'(x',y') - e''(x'',y'') \quad (5)$$

ist nun die Aufstellung eines Gleichungssystems mit den linearisierten Verbesserungsgleichungen möglich. Die Zuschläge für die Transformationsparameter lassen sich im Unbekanntenvektor $\hat{\mathbf{x}}$ die Differentialquotienten in der Designmatrix \mathbf{A} , die Verbesserungen im Vektor \mathbf{v} und die Grauwertdifferenzen im Beobachtungsvektor \mathbf{l} zusammenfassen. Es ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\underset{n,1}{\mathbf{l}} + \underset{n,1}{\mathbf{v}} = \underset{n,u}{\mathbf{A}} \cdot \underset{u,n}{\hat{\mathbf{x}}} \quad (6)$$

mit

n : Anzahl der Beobachtungen (= Anzahl der Pixel des Templates)

u : Anzahl der Unbekannten (6 bis 12 Geometrie- und 2 Radiometrieparameter)

Die Lösung des Systems nach der L2-Norm ergibt:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \quad (7)$$

Sollen alle Beobachtungen gleich gewichtet werden, wird die Gewichtsmatrix \mathbf{P} als Einheitsmatrix initialisiert. Unter Umständen ist es sinnvoll, eine Gewichtung einzuführen, die bestimmte Bereiche des Referenzbildes stärker gewichtet (z. B. die Fenstermitte). Die Gewichtung kann über definierte Gewichtsfunktionen erfolgen (PIECHEL 1991).

Die Lösung von (7) erfolgt iterativ. Da in den Differentialquotienten teilweise die Unbekannten enthalten sind, ist es erforderlich die A-Matrix in jeder Iteration neu aufzubauen.

Die Qualität der Näherungswerte – und hier insbesondere die der Translationsparameter – ist entscheidend für den Erfolg der Zuordnung. Erfahrungsgemäß sollten die Translationsparameter auf etwa ein Drittel der für die Zuordnung gewählten Fenstergröße bekannt sein.

2.1 Projektivtransformation

Im Folgenden wird die Linearisierung des funktionalen Modells beschrieben, wenn für die Geometrietransformation in (1) die Projektivtransformation eingesetzt wird. Der Ansatz der Projektivtransformation lautet:

$$x'' = f_x(x', y') = \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 y'}{1 + c_1 x' + c_2 y'}$$

$$y'' = f_y(x', y') = \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 y'}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (8)$$

Es sind acht Parameter zu bestimmen, wobei die Parameter a_0 und b_0 die relative Verschiebung der Bildausschnitte zueinander in x- und y- Richtung beschreiben. Der Zähler beschreibt eine Affintransformation, der Nenner enthält den Einfluss der Zentralprojektion. Werden die Transformationsfunktionen in (3) eingesetzt und linearisiert, ergeben sich die Verbesserungsgleichungen mit:

$$\begin{aligned} v(x', y') = & r_0^0 + r_1^0 \cdot g''^0(f_x(x'^0, y'^0), f_y(x'^0, y'^0)) \\ & + \left(\frac{\partial g''}{\partial a_0}\right)^0 da_0 + \left(\frac{\partial g''}{\partial a_1}\right)^0 da_1 + \left(\frac{\partial g''}{\partial a_2}\right)^0 da_2 \\ & + \left(\frac{\partial g''}{\partial c_1}\right)^0 dc_1 + \left(\frac{\partial g''}{\partial c_2}\right)^0 dc_2 \\ & + \left(\frac{\partial g''}{\partial b_0}\right)^0 db_0 + \left(\frac{\partial g''}{\partial b_1}\right)^0 db_1 + \left(\frac{\partial g''}{\partial b_2}\right)^0 db_2 \\ & + \left(\frac{\partial g''}{\partial c_1}\right)^0 dc_1 + \left(\frac{\partial g''}{\partial c_2}\right)^0 dc_2 \\ & + \left(\frac{\partial g''}{\partial r_0}\right)^0 dr_0 + \left(\frac{\partial g''}{\partial r_1}\right)^0 dr_1 - g'(x', y') \end{aligned} \quad (9)$$

Es ist zu beachten, dass die Differentialquotienten für die Parameter c_1 und c_2 jeweils zweimal enthalten, aber nicht identisch sind, da für beide Parameter jeweils einmal in f_x und einmal in f_y eine partielle Ableitung gebildet wird. Diese können zusammengefasst werden.

Die partiellen Ableitungen nach den Geometrieparametern setzen sich zusammen aus der Ableitung der äußeren Funktion (Bildfunktion, s. Abschnitt 2) und den inneren Funktionen (Geometrietransformationsfunktion). Die Differentialquotienten für alle zehn unbekanntenen Transformationsparameter lauten im Einzelnen:

$$\frac{\partial g''}{\partial a_0} = r_1 \cdot g_x \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (10)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_1} = r_1 \cdot g_x \cdot x' \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (11)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_2} = r_1 \cdot g_x \cdot y' \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (12)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_0} = r_1 \cdot g_y \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (13)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_1} = r_1 \cdot g_y \cdot x' \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (14)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_2} = r_1 \cdot g_y \cdot y' \cdot \frac{1}{1 + c_1 x' + c_2 y'} \quad (15)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial r_0} = 1 \quad (16)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial r_1} = g''^0(x'', y'') \quad (17)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial c_1} = -r_1 \cdot x' \left(g_x \cdot \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 y'}{(1 + c_1 x' + c_2 y')^2} + g_y \cdot \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 y'}{(1 + c_1 x' + c_2 y')^2} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial c_2} = -r_1 \cdot y' \left(g_x \cdot \frac{a_0 + a_1 x' + a_2 y'}{(1 + c_1 x' + c_2 y')^2} + g_y \cdot \frac{b_0 + b_1 x' + b_2 y'}{(1 + c_1 x' + c_2 y')^2} \right) \quad (19)$$

Analog zu (9) müssen die Verbesserungsgleichungen linearisiert werden. Die Differentialquotienten lauten im Einzelnen:

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{00}} = r_1 \cdot g_x \cdot 1 \quad (21)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{10}} = r_1 \cdot g_y \cdot x' \quad (22)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{10}} = r_1 \cdot g_x \cdot x' \quad (23)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{11}} = r_1 \cdot g_y \cdot y' \quad (24)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{11}} = r_1 \cdot g_x \cdot y' \quad (25)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{20}} = r_1 \cdot g_y \cdot x'^2 \quad (26)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{20}} = r_1 \cdot g_x \cdot x'^2 \quad (27)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{21}} = r_1 \cdot g_y \cdot x' \cdot y' \quad (28)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{21}} = r_1 \cdot g_x \cdot x' \cdot y' \quad (29)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{22}} = r_1 \cdot g_y \cdot y'^2 \quad (30)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial a_{22}} = r_1 \cdot g_x \cdot y'^2 \quad (31)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial r_0} = 1 \quad (32)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial b_{00}} = r_1 \cdot g_y \cdot 1 \quad (33)$$

$$\frac{\partial g''}{\partial r_1} = g''^0(x'', y'') \quad (34)$$

2.2 Polynomtransformation

Im Folgenden wird die Linearisierung des funktionalen Modells beschrieben, wenn für die Geometrietransformation in (1) die Polynomtransformation eingesetzt wird. Die allgemeine Form der Polynomtransformation lautet:

$$x'' = f_x(x', y') = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j a_{ji} \cdot x'^{j-i} \cdot y'^i$$

$$y'' = f_y(x', y') = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j b_{ji} \cdot x'^{j-i} \cdot y'^i \quad (20)$$

Der Parameter n legt den Grad der Funktion fest und führt für $n=1$ zu einer Affintransformation. Im Folgenden wird mit $n=2$ ein Polynom 2. Grades betrachtet. Es sind dann mit $a_{00}, a_{10}, a_{11}, a_{20}, a_{21}, a_{22}, b_{00}, b_{10}, b_{11}, b_{20}, b_{21}, b_{22}$ zwölf Parameter zu bestimmen, wobei die Parameter a_{00} und b_{00} die relative Verschiebung der Bildausschnitte zueinander in x - und y -Richtung beschreiben.

3 Untersuchungen

Im Folgenden werden zwei Tests zur Genauigkeitsuntersuchung beschrieben. Der erste Test (Abschnitt 3.1) hat zum Ziel, die Genauigkeit

der aus der Bildzuordnung resultierenden Bildkoordinaten zu ermitteln. Hierzu werden synthetische Bilddaten erzeugt, so dass Sollwerte für die im LSM zu schätzenden Parameter vorab bekannt sind. Auf diese Weise kann nicht nur die korrekte Implementierung der Algorithmen geprüft, sondern auch die Genauigkeit der Bildzuordnung über Soll-Ist-Vergleiche ermittelt werden. Bei der Durchführung der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung spielen verschiedene Faktoren eine Rolle, deren Variation das Verhalten des Verfahrens und das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Dazu gehören u. a.:

- Grauwertverteilung der Bildfunktionen (Textur, Gradienten)
- Fenstergröße des Templates
- Grad der Verzerrung der Bildausschnitte zueinander
- Qualität der Startwerte insbesondere für die Translationsparameter
- Wahl der Transformationsfunktionen für die Bildzuordnung

Im Folgenden soll zunächst die Untersuchung von Unterschieden in den Zuordnungsergebnissen, wie sie durch die Nutzung verschiedener Geometrietransformationsfunktionen verursacht werden, im Vordergrund stehen. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird im ersten Test daher zunächst nur die Transformationsfunktion variiert. Auf diese Weise wird deutlich, wie sich die verschiedenen Ansätze (affin, projektiv, polynomial) in Bildpaaren mit affiner, projektiver oder polynomialer Verzerrung verhalten. Im Anschluss daran soll – ebenfalls an synthetischen Bilddaten – der Einfluss der für die Bildzuordnung verwendeten Fenstergröße vor allem bei Verwendung des affinen Ansatzes in nicht affin verzerrten Bildpaaren untersucht werden. Nicht näher betrachtet wird der Einfluss unter-

schiedlicher Texturen, der Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein wird.

Für den zweiten Test (Abschnitt 3.2) werden die erweiterten Zuordnungsansätze in das Programm PISA (Photogrammetric Image Sequence Analysis) integriert, das zur photogrammetrischen Freiformerfassung speziell zur Auswertung von Bildsequenzen in Nahbereichsanwendungen entwickelt wurde. Die Genauigkeitsuntersuchung erfolgt unter Verwendung eines 3D-Flächenprüfkörpers (Abb. 9), dessen Oberfläche zuvor in übergeordneter Genauigkeit mit einem taktilen Koordinatenmessgerät bestimmt wurde. Die Prüfkörperoberfläche wird unter Verwendung der verschiedenen Zuordnungsansätze mit dem Programm PISA photogrammetrisch vermessen und die erzeugten Punktwolken werden gegen die Referenzoberfläche verglichen. Es lassen sich dann einerseits Genauigkeitsmaße ableiten und andererseits, z. B. durch farbcodierte Darstellung, Systematiken visualisieren. Eine umfassende Beschreibung des PISA-Verfahrens findet sich in BETHMANN et al. (2009).

3.1 Tests mit synthetischen Bilddaten

Für den ersten Test wird ein Bild (150×150 Pixel) mit vorgegebenen Parametern einmal projektiv und einmal polynomial verzerrt (Abb. 2), um damit die in den oben beschriebenen Nahbereichsanwendungen typischen Abbildungen zu simulieren.

Anschließend wird in den beiden Bildpaaren jeweils ein LSM unter Verwendung der Ansätze der Affin-, Projektiv- und Polynomtransformation durchgeführt (Fenstergröße 21×21 Pixel, Position des Templates im Bild 1: $x = y = 50$ Pixel). Abb. 3 zeigt die sukzessive Änderung des Bildfensters für die verschiedenen Zuordnungsansätze.

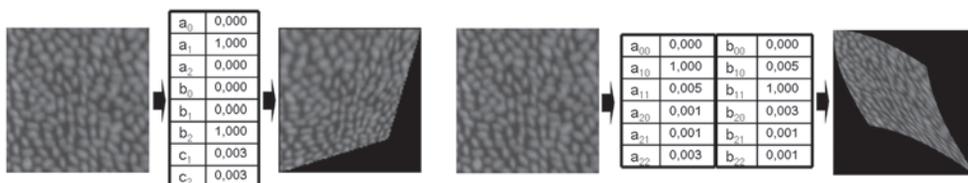


Abb. 2: Erzeugung synthetischer Bilddaten (projektiv und polynomial).

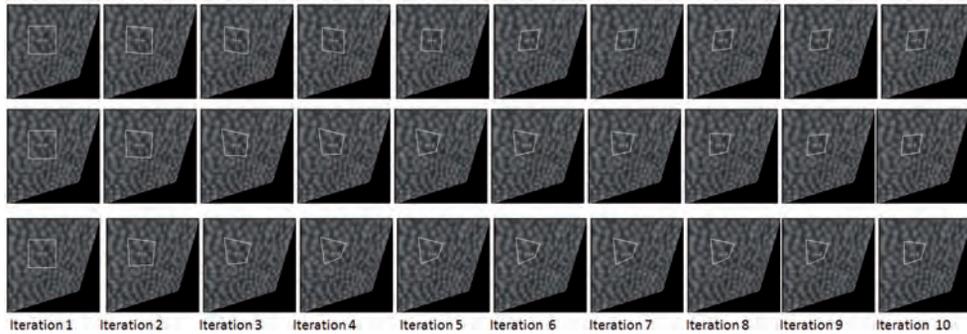


Abb. 3: Bildzuordnung für die Ansätze affin, projektiv und polynomial (von oben nach unten).

Die Diagramme aus Abb. 4 zeigen die Soll-Ist-Differenzen für die Translationsparameter a_0 und b_0 über jeweils 15 Iterationen für Fenstergrößen von 21×21 bzw. 11×11 Pixel, zunächst für das projektiv verzerrte Bildpaar.

Bei Verwendung des affinen Ansatzes und einer Fenstergröße von 21×21 Pixel bleibt nach etwa 7 Iterationen ein systematischer Offset vom Sollwert von etwa $1/10$ Pixel. Bei Verwendung der Projektivtransformation wird nach etwa 8 Iterationen der Sollwert erwar-

tungsgemäß erreicht. Bei Verwendung der Polynomtransformation wird der Sollwert ebenfalls erreicht, allerdings erst nach etwa 11 Iterationen. Bei Verwendung eines kleineren Bildfensters (11×11 Pixel) werden die Zuordnungsergebnisse erwartungsgemäß auch für den Ansatz der Affintransformation besser.

Die in Abb. 5 dargestellten Diagramme zeigen die Soll-Ist-Differenzen der Translationsparameter a_{00} und b_{00} nach Bildzuordnung im polynomial verzerrten Bildpaar. Das Ergebnis

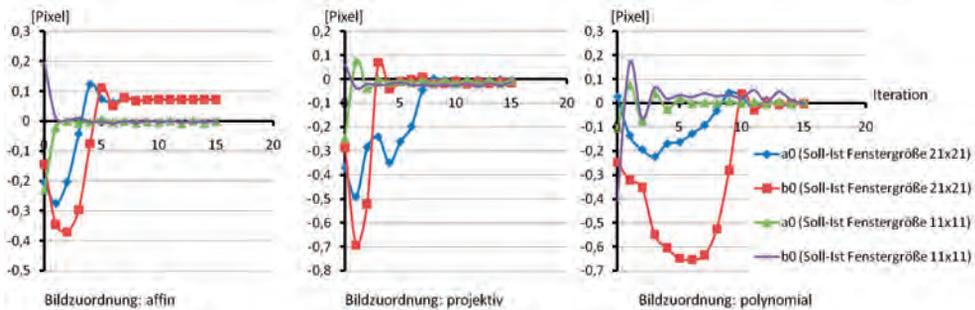


Abb. 4: Soll-Ist-Differenzen der Translationsparameter im projektiv verzerrten Bildpaar.

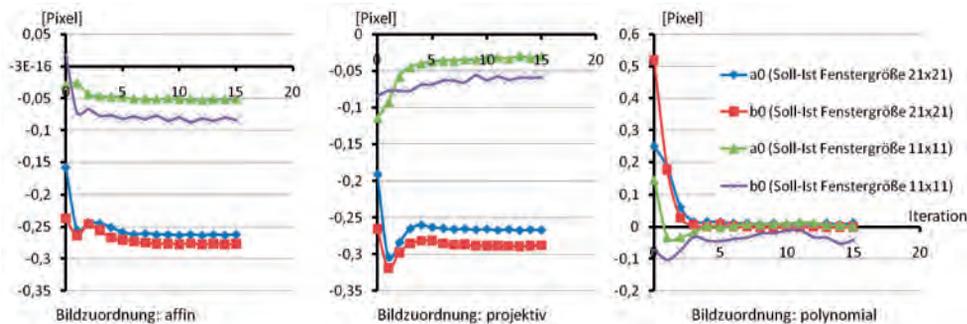


Abb. 5: Soll-Ist-Differenzen der Translationsparameter im polynomial verzerrten Bildpaar.

dieses Tests zeigt, dass sowohl bei Verwendung des affinen wie auch des projektiven Ansatzes und Bildfenstergrößen von 21 × 21 Pixel etwa gleich große systematische Restabweichungen vom Sollwert verbleiben (etwa 1/4 – 1/3 Pixel). Bei Verwendung des polynomialen Ansatzes wird der Sollwert erwartungsgemäß erreicht. Die Verwendung kleinerer Bildfenster (11 × 11 Pixel) führt auch hier zu einer Ver-

besserung der Zuordnungsergebnisse für den affinen und den projektiven Ansatz.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nur bei Verwendung des polynomialen Ansatzes für beide Tests der Sollwert unabhängig von der gewählten Fenstergröße erreicht wird.

Die Erweiterung des LSM um komplexere Geometrietransformationsfunktionen wirft

Statistik				Korrelationen									
	Soll [Pix]	Ist [Pix]	Soll-Ist [Pix]	Std.Abw.	a0	a1	a2	b0	b1	b2	c1	c2	
a0	38,46154	38,47887	-0,01733	0,01666	a0	1	0,656	0,277	0,102	0,642	0,249	0,668	0,257
a1	1,00000	0,79257	0,20743	0,01613	a1		1	0,333	-0,016	0,981	0,303	0,991	0,33
a2	0,00000	-0,01150	0,01150	0,01855	a2			1	0,522	0,294	0,983	0,351	0,991
b0	38,46154	38,44794	0,01359	0,02308	b0				1	-0,015	0,502	-0,005	0,519
b1	0,00000	0,02637	-0,02637	0,01702	b1					1	0,265	0,979	0,289
b2	1,00000	0,75354	0,24646	0,01937	b2						1	0,318	0,988
c1	0,00300	0,00291	0,00009	0,00042	c1							1	0,345
c2	0,00300	0,00195	0,00105	0,00048	c2								1

Verzerrung: projektiv

Zuordnung: projektiv

Statistik				Korrelationen													
	Soll [Pix]	Ist [Pix]	Soll-Ist [Pix]	Std.Abw.	a00	a10	a11	a20	a21	a22	b00	b10	b11	b20	b21	b22	
a00	38,46154	38,48140	-0,01986	0,01994	a00	1	0,03	-0,08	-0,6	-0,05	-0,37	0,119	0,075	0,042	-0,09	-0,04	-0,17
a10		0,68237		0,00220	a10		1	-0,23	-0,11	0,196	-0,08	0,107	0,305	-0,05	-0,08	0,102	-0,15
a11		-0,08887		0,00270	a11			1	0,059	-0,16	0,307	-0,09	-0,07	0,168	0,05	-0,24	0,183
a20		-0,00180		0,00038	a20				1	-0,09	-0,13	-0,09	0,008	-0,1	0,234	-0,11	0,12
a21		-0,00108		0,00041	a21					1	-0,05	-0,03	0,008	-0,15	-0,05	0,47	0,043
a22		-0,00029		0,00040	a22						1	-0,23	-0,16	0,148	0,21	0,129	0,191
b00	38,46154	38,43216	0,02938	0,03749	b00							1	-0,18	0,018	-0,58	-0,03	-0,62
b10		-0,08124		0,00375	b10								1	-0,07	0,198	-0,23	0,14
b11		0,67771		0,00320	b11									1	-0,06	0,146	-0,09
b20		0,00078		0,00069	b20										1	0,176	0,011
b21		-0,00181		0,00062	b21											1	-0,15
b22		-0,00146		0,00060	b22												1

Verzerrung: projektiv

Zuordnung: polynomial

Statistik				Korrelationen									
	Soll [Pix]	Ist [Pix]	Soll-Ist [Pix]	Std.Abw.	a0	a1	a2	b0	b1	b2	c1	c2	
a0	62,75000	62,82114	-0,07114	0,01439	a0	1	0,636	0,18	0,16	0,625	0,165	0,652	0,161
a1		1,15377		0,01402	a1		1	-0,118	-0,102	0,983	-0,132	0,992	-0,128
a2		0,28264		0,01499	a2			1	0,573	-0,128	0,982	-0,109	0,991
b0	62,75000	62,80981	-0,05981	0,01954	b0				1	-0,091	0,541	-0,095	0,569
b1		0,36179		0,01476	b1					1	-0,138	0,982	-0,138
b2		1,08090		0,01571	b2						1	-0,124	0,987
c1		-0,00001		0,00022	c1							1	-0,122
c2		-0,00102		0,00024	c2								1

Verzerrung: polynomial

Zuordnung: projektiv

Statistik				Korrelationen													
	Soll [Pix]	Ist [Pix]	Soll-Ist [Pix]	Std.Abw.	a00	a10	a11	a20	a21	a22	b00	b10	b11	b20	b21	b22	
a00	62,75000	62,74832	0,00168	0,01511	a00	1	0,03	-0,08	-0,6	-0,05	-0,37	0,119	0,075	0,042	-0,09	-0,04	-0,17
a10	1,00000	1,15170	-0,15170	0,00167	a10		1	-0,23	-0,11	0,196	-0,08	0,107	0,305	-0,05	-0,08	0,102	-0,15
a11	0,00500	0,35340	-0,34840	0,00205	a11			1	0,059	-0,16	0,307	-0,09	-0,07	0,168	0,05	-0,24	0,183
a20	0,00100	0,00146	-0,00046	0,00029	a20				1	-0,09	-0,13	-0,09	0,008	-0,1	0,234	-0,11	0,12
a21	0,00100	0,00036	0,00064	0,00031	a21					1	-0,05	-0,03	0,008	-0,15	-0,05	0,47	0,043
a22	0,00300	0,00236	0,00064	0,00031	a22						1	-0,23	-0,16	0,148	0,21	0,129	0,191
b00	62,75000	62,73931	0,01069	0,02841	b00							1	-0,18	0,018	-0,58	-0,03	-0,62
b10	0,00500	0,36105	-0,35605	0,00284	b10								1	-0,07	0,198	-0,23	0,14
b11	1,00000	1,14523	-0,14523	0,00243	b11									1	-0,06	0,146	-0,09
b20	0,00300	0,00343	-0,00043	0,00052	b20										1	0,176	0,011
b21	0,00100	-0,00061	0,00161	0,00047	b21											1	-0,15
b22	0,00100	0,00077	0,00023	0,00045	b22												1

Verzerrung: polynomial

Zuordnung: polynomial

Abb. 6: Standardabweichungen und Korrelationen der LSM-Parameter.

die Frage nach einer möglichen Überparametrisierung des funktionalen Modells auf. Dazu werden im Folgenden Standardabweichungen und Korrelationsparameter der geschätzten Koeffizienten für die erweiterten Ansätze analysiert (Abb. 6). Es zeigt sich, dass die Translationsparameter für beide Zuordnungsansätze geringe Korrelationen zu den anderen Parametern aufweisen und in allen Tests signifikant bestimmt werden. Der polynomiale Ansatz zeigt generell niedrige Korrelationen (max. $\pm 0,65$), während der projektive Ansatz bei bestimmten Parameterpaaren (z. B. a1-b1, a1-c1, a2-b2 usw.) durchweg hohe Korrelationswerte ($>0,9$) in allen Tests besitzt. Auffällig ist beim polynomialen Ansatz, dass trotz geringer Korrelationen und verhältnismäßig niedriger Standardabweichungen die Soll-Ist-Differenzen für einige Parameter teilweise hoch (z. B. b11 in Test mit polynomial verzerrtem Bildpaar) sind, jedoch ohne negative Auswirkung auf die Translationen.

Eine weitere interessante Untersuchung richtet den Fokus auf die eingangs erwähnte Annahme, dass die Verwendung des affinen Ansatzes zur Modellierung beliebiger Verzerrungen geeignet ist, wenn in der Bildzuordnung genügend kleine Fenster verwendet werden. Der Zusammenhang zwischen der Größe der Fenster und der erreichbaren Zuordnungsgenauigkeit soll im Folgenden untersucht werden. Dazu wird für die zwei in Abb. 2 beschriebenen Bildpaare (projektive und polynomiale Verzerrung) die Bildzuordnung mit dem affinen Ansatz durchgeführt, wobei die Größe der Fenster von 35×35 Pixel auf bis zu

11×11 Pixel verringert wird. Ebenso wird zum Vergleich in beiden Bildpaaren die Bildzuordnung mit dem polynomialen Ansatz durchgeführt. Die Ergebnisse der Soll-Ist-Vergleiche für die Translationsparameter a_0 und b_0 (bzw. a_{00} und b_{00}) werden in Abb. 7 in Abhängigkeit der Fenstergröße dargestellt.

Bei der Betrachtung der Diagramme wird deutlich, dass bei Verwendung des polynomialen Ansatzes unabhängig von der Fenstergröße Zuordnungsgenauigkeiten von $< 1/10$ Pixel erreicht werden, während bei Verwendung des affinen Ansatzes fenstergrößenabhängige systematische Abweichungen beobachtet werden können, die insbesondere im polynomial verzerrten Bildpaar große Werte annehmen ($1/2$ Pixel für Fenster der Größe 35×35 Pixel). Die Ergebnisse bestätigen, dass bei Verwendung kleiner Bildfenster mit dem affinen Ansatz auch nicht affine Zusammenhänge modelliert werden können. Interessant ist, dass der polynomiale Ansatz auch im projektiv verzerrten Bildpaar unabhängig von der Fenstergröße gute Ergebnisse liefert.

Limitierender Faktor bei der Minimierung der Fenstergröße in der Bildzuordnung ist das gewählte Transformationsmodell und damit zusammenhängend die Anzahl der zu schätzenden Unbekannten. Die theoretisch minimale Anzahl der Pixel des Bildfensters ist gleich der Anzahl der Unbekannten des gewählten Zuordnungsansatzes. In der Praxis ist die Verwendung minimaler Fenstergrößen in der Regel nicht möglich, da auch bei – selten vorhandener – idealer Textur, bedingt durch die Abtastung des Objektes unter Verwendung

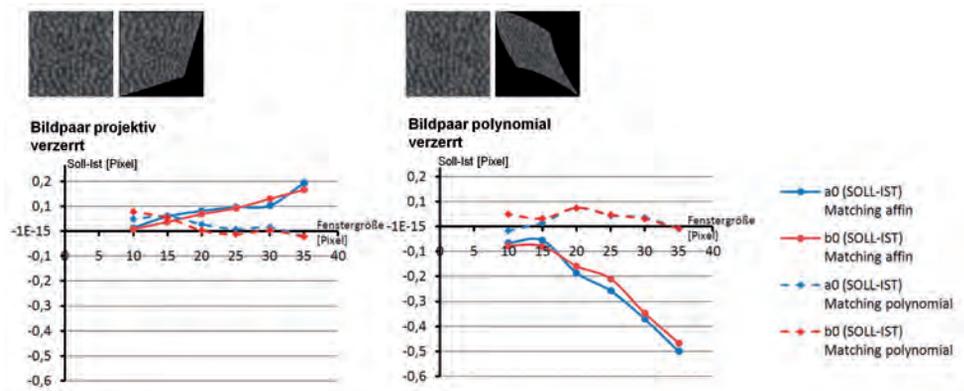


Abb. 7: Soll-Ist-Differenzen in Abhängigkeit der Fenstergröße.

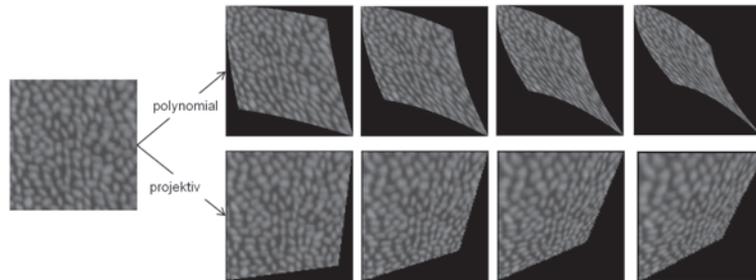


Abb. 8: Synthetische Bilddaten mit unterschiedlichen geometrischen Verzerrungen.

von Kameras mit begrenzter Auflösung, Informationen verloren gehen. Die Ergebnisse der vorgestellten Tests zeigen, dass mit dem Ansatz der Polynomtransformation (2. Grades) für alle getesteten Fälle unabhängig von der in der Bildzuordnung gewählten Fenstergröße die besten Zuordnungsgenauigkeiten erreicht werden.

Auch die Wiederholung der Tests mit Variation des Grades der Verzerrung (siehe Abb. 8) bestätigt dieses Ergebnis. Die hier dargestellten beispielhaften Verzerrungen entsprechen den in vielen Nahbereichsanwendungen zu beobachtenden Fällen mit starken Oberflächenkrümmungen und konvergenten Aufnahmeanordnungen, wie sie in Abschnitt 1 bereits erläutert worden sind.

3.2 Genauigkeitsuntersuchungen mit einem 3D-Flächenprüfkörper

In Test 2 wird der in Abb. 9 dargestellte 3D-Flächenprüfkörper mit zwei Highspeed-Kameras vom Typ MiniVis Eco 2 beobachtet (1.3 Mega-Pixel, $c_k = 12,5$ mm, $h = 700$ mm, $b = 600$ mm, Pixelgröße am Objekt ca. 0,7 mm,

Bildmaßstab $m_b \approx 60$). Die Kameras werden vorab kalibriert und über codierte Marken im Prüfkörperkoordinatensystem orientiert. Die Stereobilder werden im Programm PISA für die drei Zuordnungsansätze (affin, projektiv, polynomial) verwendet. Es wurde in der Bildzuordnung eine empirisch ermittelte und an die Textur angepasste Fenstergröße von 25×25 Pixel (etwa 18×18 mm am Objekt) verwendet. Die vergleichsweise große Fenstergröße ist erforderlich, um die hier verwendete Oberflächentextur noch hinreichend auflösen zu können.

Der Prüfkörper hat eine Flächenausdehnung von 500 mm \times 500 mm bei Höhenunterschieden bis zu 60 mm. Die Oberflächenform entspricht einer doppelten Sinusfläche (Detailinformationen in BETHMANN et al. 2010).

Mit einem Punktabstand am Objekt von etwa 3 mm werden Punktwolken von etwa 23.000 Punkten berechnet, die gegen die Referenzoberfläche verglichen werden. Die Darstellungen in Abb. 10 visualisieren die Abweichungen.

Die Messungen mit affinem und projektivem Ansatz führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen, daher werden in Abb. 10 nur die Er-

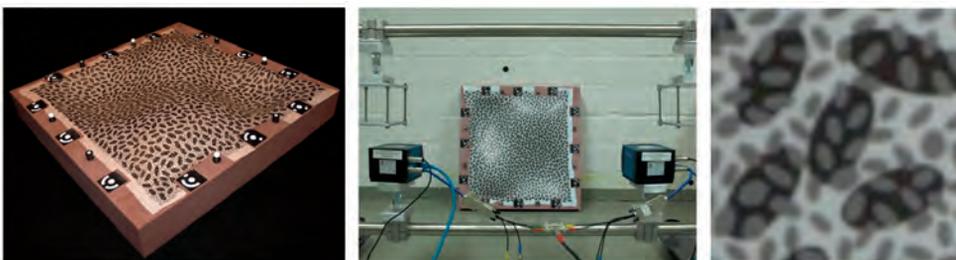


Abb. 9: 3D-Flächenprüfkörper und Versuchsaufbau mit MiniVis Kameras.

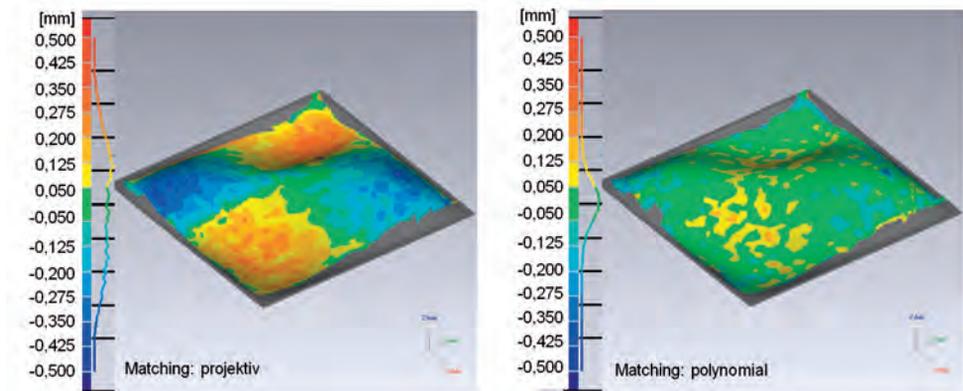


Abb. 10: 3D-Abweichungen nach Zuordnung (projektiv, polynomial).

Tab. 1: RMS-Werte und Punktdichte innerhalb von $\pm 0,050$ mm und $\pm 0,100$ mm.

	affin	projektiv	polynomial
RMS	0,222 mm	0,178 mm	0,056 mm
Punkte innerhalb $\pm 0,050$ mm	11%	15%	65%
Punkte innerhalb $\pm 0,100$ mm	30%	40%	95%

gebnisse der Messung mit projektivem Ansatz gezeigt. Systematische Abweichungen im Bereich der „Hügel“ (negative Abweichungen) und im Bereich der „Täler“ (positive Abweichungen) sind deutlich zu erkennen. Dieser Effekt zeigt sich auch in der Verteilung der Abweichungen im Histogramm (siehe Skala in Abb. 10). Die Abweichungen streuen breit und sind nicht normalverteilt. Nur im Bereich relativer Ebenheit liegen die Abweichungen innerhalb des Intervalls von $\pm 0,050$ mm. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die erreichten Genauigkeiten.

Bei Messung unter Verwendung des polynomialen Ansatzes verschwinden die systematischen Abweichungen. Der Prozentsatz der Punkte im Intervall von $\pm 0,050$ mm erhöht sich von 15% auf 65% und die mittlere quadratische Abweichung sinkt von 0,178 mm auf 0,056 mm (siehe Tab. 1).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt zwei Erweiterungen der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung hinsichtlich

der zu verwendenden geometrischen Transformationsfunktionen vor. Es werden Erweiterungen auf die Ansätze der Projektiv- und Polynomtransformation beschrieben. Ausgangslage dieser Untersuchung sind Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie mit stark gekrümmten Oberflächen und konvergierenden Aufnahmeanordnungen.

In zwei Testreihen konnte gezeigt werden, dass die Ansätze der Affin- und Projektivtransformation bei nicht-ebenen Oberflächen und größeren Bildfenstern zu deutlichen systematischen Abweichungen führen. Diese Systematiken hängen vor allem mit der in der Bildzuordnung verwendeten Fenstergröße zusammen (je kleiner die Fenster, desto geringer die systematische Abweichung). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass im Gegensatz zum affinen und projektiven Ansatz die Verwendung der Polynomtransformation (2. Grades) für alle getesteten Fälle gute Ergebnisse liefert und insbesondere zur Erfassung stetig gekrümmter Objektoberflächen sehr gut geeignet ist. Vor allem vor dem Hintergrund, dass in der Praxis in der Bildzuordnung aufgrund verschiedener Umgebungsbedingungen (Textur, Kameraauflösung etc.) häufig keine

beliebig kleinen Bildfenster verwendet werden können, scheint die Nutzung der Polynomtransformation empfehlenswert, deren praktische Eignung z. B. bei der Erfassung der Oberfläche eines Fahrzeugfußraums von den Autoren in (BETHMANN et al. 2010) belegt werden konnte.

Eine Erhöhung der zu schätzenden Parameterzahl führt zur Diskussion etwaiger Überparametrisierung und deren Auswirkung auf die Güte der hier relevanten Translationsparameter. Ein in die Ausgleichung integrierter Signifikanztest ist aus theoretischer Sicht wünschenswert, erhöht die erforderlichen Rechenzeiten jedoch beträchtlich. Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf zahlreichen realen und synthetischen Testreihen, in denen ausschließlich das Kriterium der Zuordnungsgenauigkeit (Translationsparameter) betrachtet worden ist. Dabei wurden für Nahbereichsanwendungen typische Aufnahmebedingungen realisiert, für die die Eignung der verschiedenen Geometriefunktionen untersucht worden ist.

Als Fazit kann festgestellt werden, dass die Affintransformation hinreichend genaue Ergebnisse liefert, wenn die vorhandene Oberflächentextur kleine (z. B. 11x11 bis 15x15) Fenstergrößen zulässt. Die Polynomtransformation 2. Grades ist dagegen auch bei größeren Fenstergrößen einsetzbar und modelliert dabei die im Fenster auftretenden Oberflächenformen hinreichend gut, sofern ein stetiger Krümmungsverlauf vorliegt. Insofern erreicht man damit eine signifikante Erweiterung des Einsatzpotentials des klassischen LSM-Ansatzes – bezogen auf die spezielle, hier geschilderte Aufgabenstellung. Die ebene Projektivtransformation zeigt keinen Vorteil gegenüber den beiden anderen Methoden. Für Anwendungen in der Luftbildauswertung erscheint der polynomiale Ansatz im LSM weniger geeignet. Bruchkanten (z. B. an Gebäuden) werden nur bei differenziell kleinen Fenstergrößen modelliert, sofern keine Zusatzinformationen wie Grauwertkonturen oder Modelldaten vorliegen.

5 Literatur

- ACKERMANN, F., 1984: Digital image correlation: performance and potential in photogrammetry. – *Photogrammetric Record* **11** (64): 429–439.
- BETHMANN, F., HERD, B., LUHMANN, T. & OHM, J., 2009: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. – *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.* **18**: 303–315.
- BETHMANN, F. & LUHMANN, T., 2010: Least-squares matching with advanced geometric transformation models. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5): 86–91.
- BETHMANN, F., HERD, B., LUHMANN, T. & OHM, J., 2010: Erfassung und Auswertung von dynamisch verformten 3D-Freiformflächen aus Stereobildsequenzen mit Störobjekten. – *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010*, 241–250.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W. & HEIPKE, C., 1987: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie. – *Bildmessung und Luftbildwesen* **55** (5): 194–203.
- FÖRSTNER, W., 1982: On the geometric precision of digital correlation. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **24** (3): 176–189.
- FÖRSTNER, W., 1984: Quality Assessment of object location and point transfer using digital image correlation techniques. – *International Archives of Photogrammetry* **25** (III): 169–191.
- GRUEN, A.W., 1985a: Adaptive least-squares correlation – a powerful image matching technique. – *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* **14** (3): 175–187.
- GRUEN, A.W., 1985b: Adaptive kleinste Quadrate Korrelation und geometrische Zusatzinformationen. – *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* **85** (9): 309–312.
- GRUEN, A.W. & BALSAVIAS, E.P., 1988: Geometrically constrained multiphoto matching. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **54** (5): 633–641.
- LUHMANN, T., BETHMANN, F., HERD, B. & OHM, J., 2008: Comparison and verification of optical 3-D surface measurement systems. – *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing* **37** (5B): 51–56.
- PERTL, A., 1984: Digital image correlation with the analytical plotter Planicom C-100. – *Internationa-*

- tional Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **25** (3B): 874–882.
- PIECHEL, J., 1991: Qualität der automatischen Höhenmessung in Stereobildern durch flächenbasierte Kernlinienkorrelation. – Deutsche Geodätische Kommission **C** (376).
- REMONDINO, F., 2003: 3D reconstruction of static human body with a digital camera. – Videometrics VIII, SPIE **5013**: 38–45.
- SCHNEIDER, C.T., 1991: Objektgestützte Mehrbildzuordnung. – Deutsche Geodätische Kommission **C** (375).
- WROBEL, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – Bildmessung und Luftbildwesen (BuL) **55** (3): 93–101.
- Adresse der Autoren:
Prof. Dr.-Ing. habil. THOMAS LUHMANN, Dipl.-Ing. FOLKMAR BETHMANN, Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, D-26121 Oldenburg, Tel.: +49-441-7708-3365, Fax: -3170, e-mail: vorname.name@jade-hs.de
- Manuskript eingereicht: September 2010
Angenommen: Januar 2011





Geometric Property of Large Format Digital Camera DMC II 140

KARSTEN JACOBSEN, HANNOVER

Keywords: Digital camera, geometry, large format CCD, systematic image errors

Summary: The *geometric property of large format digital camera DMC II 140* from Intergraph Z/I Imaging with 140 megapixels has been evaluated. This new camera is equipped with just one very large format CCD-array for the panchromatic band. The monolithic large format CCD does not require any stitching, enhancing the system accuracy. Test flights in three height levels with 5.7 cm up to 20.2 cm ground sampling distance (GSD) have been used for accuracy analysis of this camera. Very small systematic image errors confirm the excellent camera geometry. The root mean square differences at independent check points for the geometric critical height in the range of 0.7 GSD corresponds to the good image geometry.

Zusammenfassung: Die *geometrischen Eigenschaften der großformatigen Digitalkamera DMC II 140* von Intergraph Z/I Imaging mit 140 Megapixeln wurde untersucht. Diese neue Kamera ist für das panchromatische Bild mit nur einem sehr großen CCD-Sensor ausgestattet. Das homogene großformatige CCD erfordert keine Zusammenfassung von Teilbildern, was die Genauigkeit steigert. Bildflüge mit drei verschiedenen Flughöhen, entsprechend 5.7 cm bis 20.2 cm Objektpixelgröße, wurden für die Genauigkeitsanalyse der Kamera verwendet. Sehr kleine systematische Bildfehler bestätigen die ausgezeichnete Kamerageometrie. Die Quadratmittel der geometrisch kritischen Höhendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten von 0,7 Objektpixeln entsprechen der guten geometrischen Bildqualität.

1 Introduction

When the first large format digital cameras have been introduced, the dream of photogrammetrists was to replace the aerial film by one large CCD-array. This was not possible at those time and so large format digital system cameras, as the DMC (Intergraph Z/I Imaging) and UltraCam (Microsoft Photogrammetry, Vexcel Imaging), based on a group of CCD-arrays, have been built. This changed now; with the new large format CCD-arrays from DALSA 140 and 250 Mega pixels are available. The problems of slow frame rate and price/performance ratio have been solved. But it is also the question, how many pixels are required for the information contents included in a 230 mm × 230 mm photo. The first simple estimations were based on the operational resolution of 40 line pairs per mm and that one line pair should be presented by two pixels,

leading to 18400² pixels. Very fast it was recognized that this was not the correct manner for the comparison of the information contents because of the quite better contrast and lower noise of digital images. A comparison of details which could be extracted for topographic mapping from DMC, UltraCAM and ADS40 images as well as scanned aerial photos having different ground sampling distance (GSD), was leading to the result, that just 8520² pixels are required for the information contents of scanned aerial photos in relation to original digital images not degraded by lower effective resolution (JACOBSEN 2009). This does not mean, that photos should be scanned with 27 μm pixel size; under operational conditions 18 μm pixel size is satisfying but it allows the same object identification as original digital images with 1.5 times larger object pixel size. Beside the information contents, the geometric property of digital images is important.

The high geometric potential of original digital images has been demonstrated by the camera test of the German Society of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation (JACOBSEN et al. 2010). But not only the accuracy potential of block adjustment with self calibration, also the image geometry, presented by systematic image errors – the difference between perspective geometry and real image geometry –, has to be taken into account influencing the model handling, especially the height determination in stereo models. In addition the reliability of stitching multi sensor images operated in UltraCam syntopic mode under rough flight conditions should be guaranteed, what is not always the case. Under syntopic imaging we understand the use of a small difference in time of imaging to have the same projection center in space for any sub-camera of a camera systems with optics aligned in flight direction (LEBERL & GRUBER 2003).

The convergent arrangement of the first generation DMC four panchromatic sub-cameras allows a three-dimensional stitching by bundle solution. The stitching of the four in the same plane arranged sub-cameras with in total nine sub-images of the UltraCAM is quite more complex and as recent solution by the so called “monolithic stitching” the nine panchromatic sub-images are stitched to the homogenous geometry of the lower resolution green channel, solving some existing problems (LADSTÄDTER et al. 2010). Even if improved and more reliable, the stitching to a lower resolution reference image is not the optimal solution and is contradict to the syntopic mode because of the offset of the optics of the green channel across the flight direction. But in reality the offset of the projection centers from the synthetic projection center never played a remarkable role.

All the problems of stitching the high resolution panchromatic sub-images do not exist if just one homogenous CCD-array is used. Of course the flatness of the large size CCD has to be guaranteed – this is not always the case for mid-format, partially also small format CCDs, where special additional parameters had to be introduced to support especially the geometry within the image corners (JACOBSEN et al. 2010 and Fig. 3).

2 DMC II

With the introduction of the DMC II 140 in 2010 the real monolithic geometry is now available for the high resolution panchromatic channel. The DMC II 140 uses the new developed DALSA 140 Megapixel CCD, but this is not the end of the development. Now DALSA started with the production of a 252 Megapixel CCD. This is used in the DMC II 230. The existing optics of the DMC II cannot use the full size of the CCD, only 230 megapixels are active and so a new optics is under development at Carl Zeiss and shall be available in spring 2011 for the DMC II 250 (Tab. 1).

3 Test Flights with DMC II 140

For analyzing the geometric property of the DMC II 140, flights have been made over test field Aalen, Germany with 71 targeted control points having 2 cm up to 3 cm standard deviation in all three coordinate components. The test flights with 5.7 cm and 9.5 cm GSD have approximately 65% end lap (p) and side lap (q) together with crossing flight lines having the same overlap. Only the flight with 20 cm GSD has approximately 80% end lap and side lap and also crossing flight lines (Fig. 1). The

Tab. 1: Technical data of the DMC II versions with base-to-height-relation for 60% end lap.

Camera	number of pixels	focal length	pixel size	frame rate	b/h (p=60%)	GSD at h=1000 m	relation pan/MS
DMC II 140	12096 × 11200	92 mm	7.2 μm	2 sec	0.35	7.8 cm	1 : 2.0
DMC II 230	15104 × 14400	92 mm	5.6 μm	1.7 sec	0.35	6.1 cm	1 : 2.5
DMC II 250	17216 × 14656	112 mm	5.6 μm	1.7 sec	0.29	5.0 cm	1 : 3.2

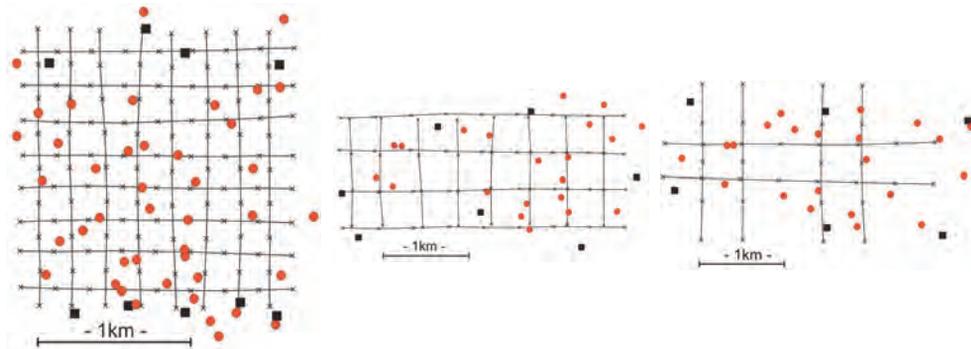


Fig. 1: Flight lines, control points (squares) and check points (red circles) of test flights; Left: 5.7 cm GSD, center: 9.5 cm GSD, right: 20.2 cm GSD.

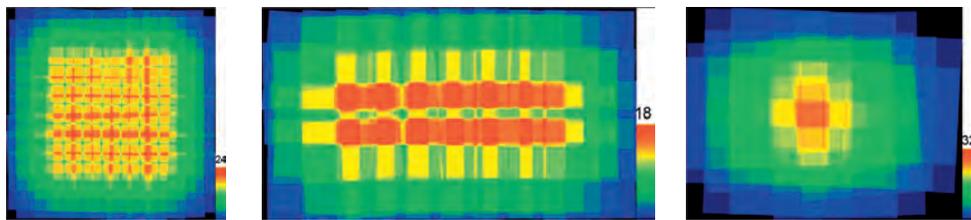


Fig. 2: Color coded overlap of images; left: 5.7 cm GSD – up to 24 images/point; center: 9.5 cm GSD – up to 18 images/point; right: 20.2 cm GSD – up to 32 images/point.

strong overlap is shown in Fig. 2. The flight conditions with sun elevations of 20° up to 25° and parts of remaining snow have not been optimal. Some control and check points have low contrast and in the flight with 20.2 cm GSD not all points could be identified.

The automatic aerial triangulation was made with ISAT. As control and check points man holes and targeted points are used. The object points have been measured in the first image where they appeared manually and in the other images by matching to the sub-matrix of the first image if possible. Only the panchromatic images have been investigated.

4 Image Geometry

The image geometry can be determined by bundle block adjustment with self calibration by additional parameters. Systematic image errors computed by bundle block adjustment show only the geometric effects which can be expressed by the used set of additional parameters; this requires also the analysis of the

bundle block adjustment residuals – the remaining image coordinate discrepancies. If all residuals are overlaid corresponding to their image position and averaged in image sub-areas, then this indicates the systematic image errors which have not been covered by the used set of additional parameters. The mean value of in the average 26 up to 53 residuals in the used 225 or 625 sub-areas shows only the systematic component, while the random component of the residuals is nearly eliminated by averaging. This can be seen in Fig. 7 where the vectors are computed independently, but neighbored vectors are strongly correlated.

The CCD of the DMC II 140 has a size of $80.6 \text{ mm} \times 87.1 \text{ mm}$. The σ_0 of the bundle block adjustments are below $1 \mu\text{m}$ and the remaining systematic image errors, determined by the residuals, are clearly below $0.5 \mu\text{m}$. In the image corner the view direction is 32.8° , requiring a flatness of the CCD below $1 \mu\text{m}$. From own experience and discussions with manufactures this is nearly impossible, but it can be determined by a calibration and respected during the image generation process.

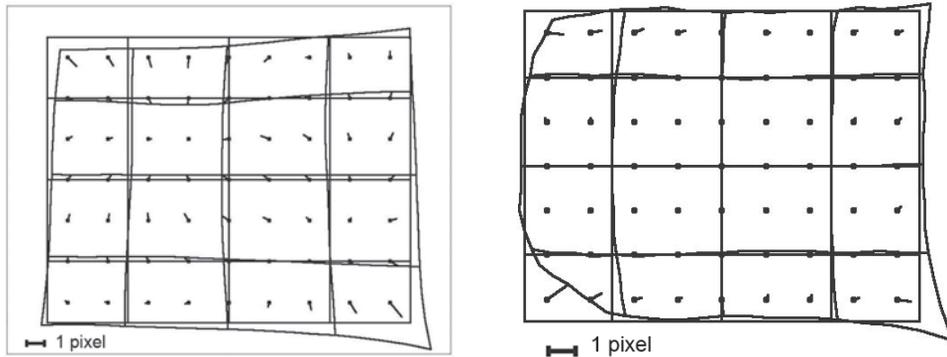


Fig. 3: Systematic image errors of a digital mid-format (36.8 mm × 49.2 mm, 6.8 μm pixel size) and a digital small-format (5.7 mm × 4.3 mm, 1.8 μm pixel size) camera (not Z/I Imaging and Vexcel Imaging) after eliminating the effect of radial symmetric distortion.

For the user this is not visible and only improved images are generated. Standard mid-format cameras, sometimes also small format digital cameras, do not include such an improved camera calibration and sometimes not an optimal mounting of the CCDs, leading to deformation of image corners (Fig. 3), which only can be compensated by special additional parameters (JACOBSEN et al. 2010). If CCDs are connected at the corners or glued with the whole size to the camera body, the different thermal coefficient of the CCD, usually fixed on ceramics, and the camera body may cause a deformation of the CCD.

The investigation of the data sets was made with the Hannover program system for bundle block adjustment BLUH. It has a basic set of 12 additional parameters extended by special

additional parameters for the system cameras as first generation DMC and UltraCam (JACOBSEN 2007) and the mentioned parameters for determining deformations of the image corners. Earth curvature and refraction correction has been taken into account before block adjustment.

With blocks having crossing flight lines systematic image errors can be determined nearly without influence of ground control points (GCP). Systematic image errors are not changing during one flight, but they may vary for different flying elevation, mainly caused by influence of the temperature. This reduces the analysis of the systematic image errors to block adjustments using all images of the three different ground resolutions separately.

Tab. 2: Technical data of block adjustments.

GSD	images	image points	average points/image	average image points/object point
5.7 cm	144	33457	232	7.5
9.5 cm	68	16656	245	6.6
20.2 cm	36	9828	273	8.0

Tab. 3: Size of systematic image errors.

GSD	Total effect of systematic image errors		without radial symmetric component		radial
	root mean square	maximal	root mean square	maximal	maximal
5.7 cm	0.3 μm	1.3 μm	0.1 μm	0.3 μm	1.0 μm
9.5 cm	0.2 μm	1.5 μm	0.1 μm	0.5 μm	0.6 μm
20.2 cm	0.6 μm	3.1 μm	0.2 μm	0.8 μm	2.3 μm

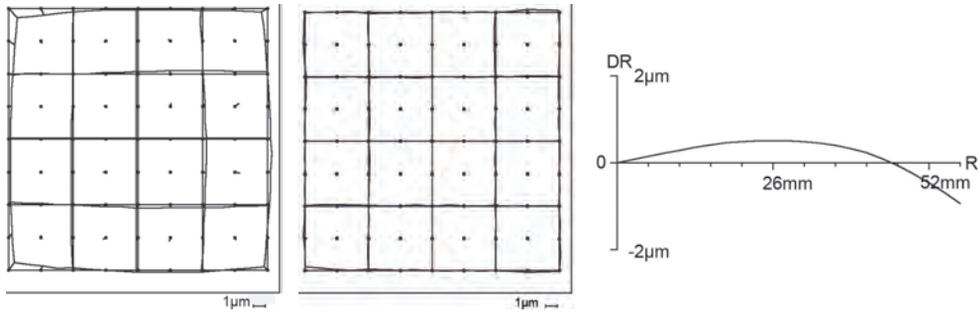


Fig. 4: Systematic image errors DMC II 140 with 5.7 cm GSD – left: whole effect, center: without radial symmetric distortion, right: radial symmetric lens distortion.

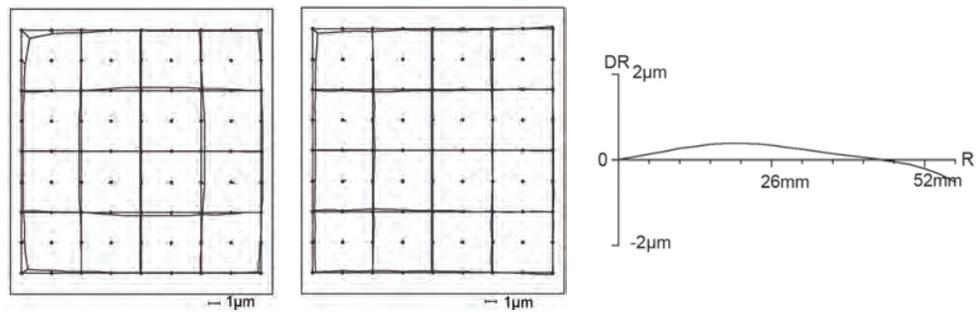


Fig. 5: Systematic image errors DMC II 140 with 9.5 cm GSD – left: whole effect, center: without radial symmetric distortion, right: radial symmetric lens distortion.

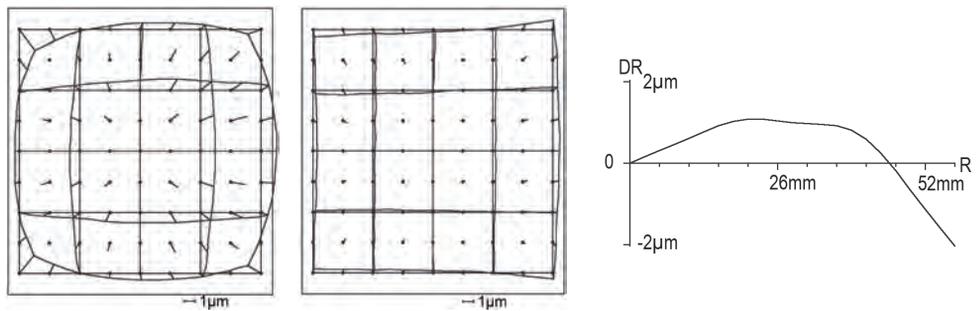


Fig. 6: Systematic image errors DMC II 140 with 20.2 cm GSD – left: whole effect, center: without radial symmetric distortion, right: radial symmetric lens distortion.

As shown in Figs. 4 up to 6, the systematic image errors do not change the character depending upon the flying height, only the dominating radial symmetric effect is changing. The change of the radial symmetric component with the flying height is a typical well known effect for all cameras. As with other data sets and other cameras the not radial symmetric components are larger for higher flying

heights (Fig. 8). In general the root mean square systematic image errors of the DMC II 140 are very small (Fig. 8), the root mean square effect of $0.2\ \mu\text{m}$ up to $0.6\ \mu\text{m}$ correspond to 0.03 up to 0.08 pixels and after eliminating the radial symmetric component from the systematic errors to 0.01 up to 0.03 pixels. Even the maximal values are very small and would not cause problems during model han-

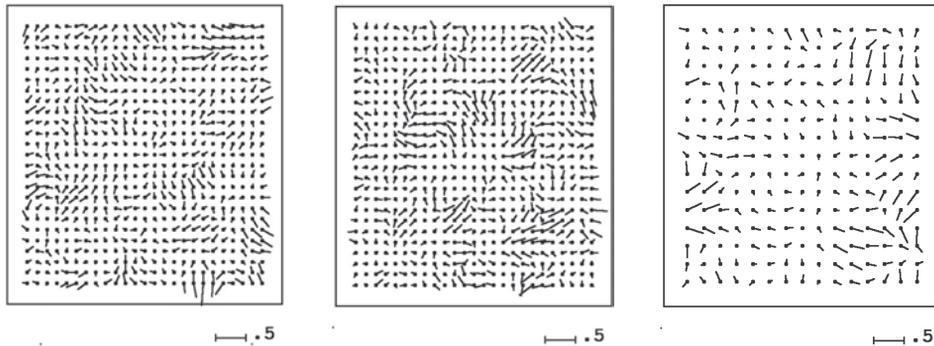


Fig. 7: Remaining systematic image errors of bundle block adjustments with self calibration by 12 additional parameters; left: related to 5.7 cm GSD; center 9.5 cm GSD; right: 20.2 cm GSD [μm].

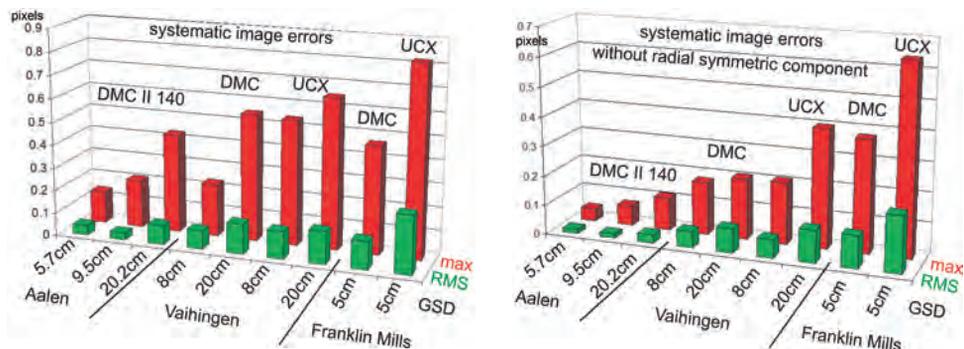


Fig. 8: Root mean square (RMS) and maximal (max) systematic image errors [pixel size] of flights over test areas Aalen, Vaihingen and Franklin Mills; Left: whole effect, right: without radial symmetric component.

dling with program systems not able to respect systematic image errors.

The analysis of the remaining systematic image errors after block adjustment with self calibration show only negligible values (Fig. 7). It is based on 33457, 16656 respectively 9828 residuals for the three different flying heights. Because of the smaller number of residuals for the 20 cm-GSD-block, the analysis for this block is reduced to 15^2 image sub-areas, while for the other blocks 25^2 sub-areas are used. In the average the individual vectors are based on 53, 26 respectively 43 residuals, causing a reduction of random errors and showing nearly only the systematic component. As root mean square size of the remaining systematic image errors after block adjustment for the 5.7 cm-GSD-block $0.14 \mu\text{m}$ (0.020 pixels), for the 9.5 cm-GSD-block $0.17 \mu\text{m}$ (0.024 pixels) and for the 20.2 cm-GSD-block

$0.25 \mu\text{m}$ (0.035 pixels) is reached. Such remaining systematic image errors below 0.035 pixels are negligible and unusual small – there is no indication of any remarkable remaining systematic component. So it is not justified to improve the used set of additional parameters.

Systematic image errors of blocks flown with 60% side lap and crossing flight lines are not influenced by control points and can be compared from one test field to the other. In Fig. 8 systematic image errors of flights over the test fields Aalen, Vaihingen (JACOBSEN et al. 2010) and Franklin Mills (PASSINI & JACOBSEN 2008) are shown as fractions of the pixel size. On the left hand side of Fig. 8 the whole size and on the right hand side the systematic image errors without influence of radial symmetric component are shown. The radial symmetric component is dominated by the optics,

influenced by temperature gradient. So the systematic image errors without the radial symmetric component represent the image geometry including stitching effects of system cameras. The comparison of the DMC II 140 with the first generation DMC and the UltraCamX demonstrate the small size of systematic image errors of the DMC II 140. The information about the also used analog cameras in the test fields Vaihingen and Franklin Mills are not included in this presentation because they are two to four times larger as the largest value shown in Fig. 8. Similar it is with the mid-format cameras AIC and DigiCam.

5 Object Point Accuracy

Bundle block adjustments using the Hannover program system BLUH with six to eight GCPs (Fig. 1) have been made with all block configurations. The block configuration did not require a support by GPS/IMU. Depending upon the data set between 48 and 19 check points have been used for the quality analysis (Fig. 1). The complete blocks with crossing flight lines and side laps in the range of 60% (fourfold blocks) are very stable, but they are not presenting the usual coverage of operational blocks. For being more realistic, also blocks only with flight lines in one direction (double blocks) and blocks only with flight lines in one direction and 24% up to 37% side lap (single blocks) have been handled. The block adjustments have been computed without self calibration, with self calibration using the standard set of 12 additional parameters of BLUH (JACOBSSEN 2007) and with the standard set together with the eight special additional parameters for improving the image corners (parameters 81 up to 88) (JACOBSSEN et al. 2010). Program system BLUH is automatically reducing the number of additional parameters to the required set based on a combination of T-test, correlation coefficient and total correlation. So even if the following tables are listing 12 or 20 additional parameters, only a reduced number of this has been used in the final iteration.

The bundle block adjustments of the test blocks flown with the DMC II 140 with 5.7 cm, 9.5 cm and 20.2 cm GSD show very good re-

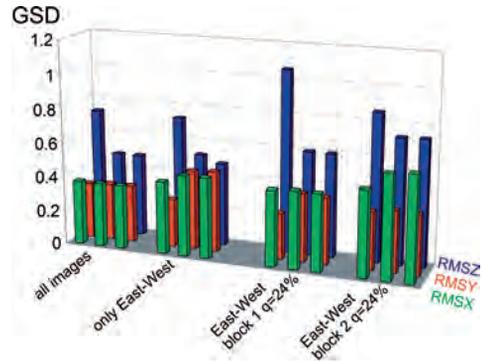


Fig. 9: Bundle block adjustments with 5.7 cm GSD, root mean square differences at check points, left columns: without additional parameters, center column: additional parameters 1 – 12, right hand column: additional parameters 1 – 12 + 81 – 88. Whole block with 144 images, with $p=q=65\%$ 72 images, with $q=37\%$ 36 images.

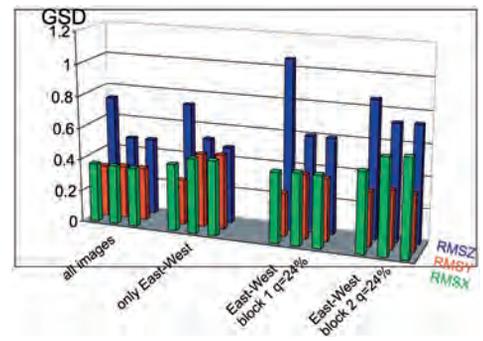


Fig. 10: Bundle block adjustments with 9.5 cm GSD, root mean square differences at check points, left columns: without additional parameters, center column: additional parameters 1 – 12, right hand column: additional parameters 1 – 12 + 81 – 88. Whole block with 68 images, only East-West 34 images, with $q=34\%$ 17 images.

sults, but some limitations are caused by the test field. The a priori standard deviation of the control and check point coordinate components are in the range of 2 cm up to 3 cm and this is the accuracy achieved with the X- and Y-coordinates of the flight with 5.7 cm GSD. It explains why for this resolution the number of images used for the block adjustments do not have any influence to the X- and Y-component (Figs. 9 and 12). The vertical accuracy should be not as good as the horizontal, but this is re-

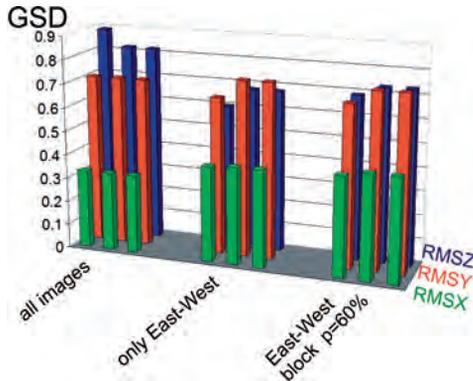


Fig. 11: Bundle block adjustments with 20.2 cm GSD, root mean square differences at check points, left columns: without additional parameters, center column: additional parameters 1 – 12, right hand column: additional parameters 1 – 12 + 81 – 88. Whole block with 36 images, only East–West 18 images, only East–West with $p=60\%$ 9 images.

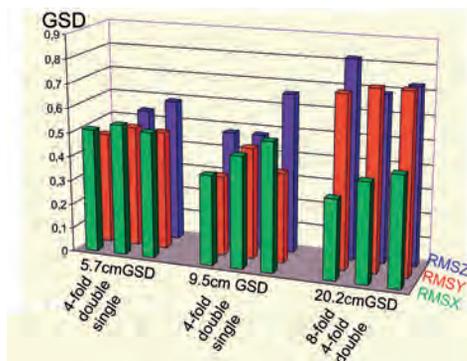


Fig. 12: Comparison of root mean square differences at check points of block adjustments with self calibration.

verse for the 5.7 cm-GSD-block using all images – indicating the limitation by the check point accuracy. The influence of the self calibration and the number of used images can be seen for the height values of the 5.7 cm-GSD-blocks and the blocks with 9.5 cm GSD. There is no advantage of the special additional parameters 81 – 88 improving the image corners. Caused by the high number of images per point, the influence of the check point accuracy and the limited size of not radial symmetric image errors, the reached object point accuracy can be achieved with just the

three radial symmetric additional parameters of program BLUH.

The 9.5 cm-GSD-block shows more clearly the dependencies of the root mean square discrepancies at independent check points (Fig. 10). The self calibration, at least with the radial symmetric parameters, is required for the height, but because of the very small systematic image errors it has no influence to the horizontal components. Of course the results achieved with all images are better than with just a subset of images, but as usual for test blocks with changing control point combinations, the reached accuracy relations are more close to 1.0 as corresponding to the theory that with more images a clearly better object point accuracy should be reached.

Under the not optimal flight condition, the ground resolution of 20.2 cm is too large for the available targets in the test area Aalen. Some control and check points could not be identified and the exact identification of the other was difficult (Fig. 11). By this reason the root mean square differences achieved with the 20.2 cm-GSD-block cannot be used for quality estimation, nevertheless this is not influencing the analysis of the systematic image errors. By simple theory the accuracy determined at check points should be independent upon the ground resolution, but Fig. 12 demonstrates the dependency of the results upon the test field itself, caused by the accuracy of the check point coordinates and difficulties of target identification.

6 Conclusion

The advantage of a monolithic CCD for the image geometry of the DMC II 140 is obvious. With the exception of very small radial symmetric image errors, slightly changing with the flying height, the systematic image errors are nearly negligible and smaller as for other cameras. This leads to a remarkable accuracy level of the block adjustments. In general the root mean square height differences at check points, even for single blocks, in the range of 0.7 GSD and better is excellent for a camera with a base to height relation (b/h) for 60% end lap of 0.35 or $h/b=2.8$. The root mean square differences in X and Y are not corre-

sponding to the vertical root mean square differences divided by 2.8 caused by the more complex situation of blocks with stronger image overlap and the limitations of the test field itself. Nevertheless the reached root mean square differences at check points for X and Y in the range of 0.4 up to 0.5 GSD is still very good. This leads to promising expectations for the DMC II 230 and 250.

References

- JACOBSEN, K., 2007: Geometric Handling of Large Size Digital Airborne Frame Camera Images. – Optical 3-D Measurement Techniques VIII, ETH Zürich **2007**: 164–171.
- JACOBSEN, K., 2009: Potential of large format digital aerial cameras. – Map World Forum, Hyderabad, GIS Development; www.gisdevelopment.net/technology/emerging/mwf09_Karsten_AerialCameras.htm (Dec. 14th 2010).
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C. & SPRECKELS, V., 2010: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. – PFG **2/2010**: 83–97.
- LEBERL, F. & GRUBER, M., 2003: Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam. – Photogrammetric Week **2003**: 67–76.
- LADSTÄDTER, R., GRUBER, M. & WIECHERT, A., 2010: Monolithic Stitching: One sensor geometry for multiple sensor camera. – ASPRS 2010 Annual Conference San Diego.
- PASSINI, R. & JACOBSEN, K., 2008: Geometric Analysis on Digital Photogrammetric Cameras. – ASPRS 2008 Annual Conference Portland.

Address of the Author:

Dr.-Ing. KARSTEN JACOBSEN, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-2485, Fax: -2483, e-mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: November 2010

Angenommen: Januar 2011



Berichte von Veranstaltungen

Seminar „Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau“ am 14. Oktober 2010 am Karlsruher Institut für Technologie

Am 14. Oktober 2010 fand am Geodätischen Institut (GIK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zum dritten Mal das Fortbildungsseminar „Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau“ unter Leitung von Prof. MARIA HENNES statt. Zielsetzung des regelmäßig stattfindenden Seminars ist es, die Kommunikation zwischen geodätischer Messtechnik und Anwendungen im Maschinenbau zu fördern. Das Hauptaugenmerk der Messtechnik liegt hierbei auf der Anwendung optischer Systeme.

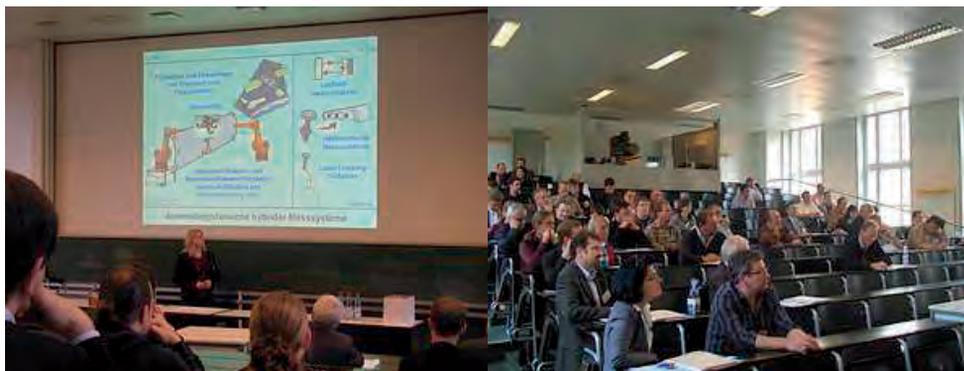
Die Veranstaltung war in drei Blöcke aufgeteilt. Während im ersten Block der Schwerpunkt auf neuen Forschungsergebnissen lag, wurden im zweiten Abschnitt Fallbeispiele aus der Praxis präsentiert. Im dritten Teil wurden den Teilnehmern durch Hands-on-Demonstrationen moderne, laserbasierte Systeme nähergebracht.

Nach einer herzlichen Begrüßung von Prof. HENNES eröffnete Dipl.-Phys. KERSTIN SCHENK, TU Hamburg-Harburg, die Vortragsreihe mit einem Beitrag über die Optimierung optischer Messsysteme durch deren Kombination. Anschließend zeigte Dipl.-Ing. MARCO RIESE, TU

Dresden, Ergebnisse und Erfahrungen bei der Umsetzung einer Kalibriermethode für Lasertracker nach VDI Richtlinie 2617. Im dritten Vortrag, gehalten von Dipl.-Ing. CHRISTOPH HERRMANN, KIT, wurde ein am GIK entwickeltes Adaptersystem (A-TOM) zur Erweiterung des Arbeitsbereiches optischer Systeme vorgestellt und erste Ergebnisse bezüglich der damit erreichbaren Genauigkeit präsentiert.

Nach einer kurzen Kaffeepause, in der verschiedene Firmenaussteller ihre neuen Produkte vorstellten, wurde die Vortragsreihe fortgesetzt mit Untersuchungsergebnissen neuer optischer Messsysteme, insbesondere bezogen auf kinematische Anwendungsfälle. Dr.-Ing. BORIS JUTZI, KIT, zeigte hierzu den Einsatz einer aktiven Kamera zur 3D-Erfassung bei dynamischen Vorgängen, während Dipl.-Ing. TIM BRECHER, TU Hamburg-Harburg, auf die Automatisierbarkeit bei Bauteilvermessungen anhand eines Laserradars einging. Frau cand. geod. FRANZISKA BERNHART, GIK, stellte Potentiale von Weitwinkelreflektorsystemen vor, die im Einsatz mit Lasertrackern zur Erweiterung des Arbeitsbereiches dienen sollen. Im letzten Vortrag vor der Mittagspause präsentierte Dr.-Ing. CLAUDIA DEPENTHAL ihre am GIK erzielten Untersuchungsergebnisse zum Thema iGPS im kinematischen Einsatz.

Im zweiten Teil der Veranstaltung lag der Fokus der Vorträge auf praktischen Anwen-



Impressionen vom Workshop „Optische Messtechnik für Anwendungen im Maschinenbau“ am KIT.

dungsfällen, wie dem Einsatz von Lasertrackern und 6DOF Equipment zur Roboterpositionierung, vorgetragen von Dipl.-Ing. CHRISTOPH HERRMANN, GIK, sowie der Vermessung im Sub-Millimeter-Bereich innerhalb des Forschungsprojektes KATRIN (Vortragender: Dr.-Ing. MANFRED JURETZKO, GIK). Dipl.-Ing. CHRISTOPH MERSMANN, RWTH Aachen, schloss die zweite Session mit einem Vortrag über die Anwendung von Bildverarbeitungsmethoden zur Überprüfung von Faserverbundwerkstoffen ab.

Schon in den Pausen zwischen den einzelnen Sessions bestand die Möglichkeit, sich bei Vertretern verschiedener Firmen über deren Messsysteme zu informieren. Zusätzlich dazu wurden den Seminarteilnehmern im dritten und letzten Teil der Veranstaltung anhand von Hands-on-Demonstrationen modernste Lasertechnologien wie Lasertracker, Laserradar sowie Laserscanner präsentiert. Durch die Vorführungen, bei denen die Zuhörer teilweise auch selbst Hand anlegen durften, erhielten sie einen sehr praxisnahen Einblick in die Anwendung dieser neuen Technologien.

Wie schon in den Jahren zuvor kamen auch dieses Mal die Teilnehmer sowohl aus dem universitären Bereich als auch von unterschiedlichen Firmen, so dass unter den insgesamt 51 Teilnehmern ein reger Austausch zwischen Industrie und Forschung ermöglicht wurde. Die Kaffeepausen und der Mittagsimbiss boten hierfür ausreichend Gelegenheit und außerdem genug Erholung, um wieder konzentriert an den anschließenden Vorträgen teilzunehmen. In meinen Augen war die Veranstaltung sehr gelungen. Die Vorträge waren durchweg von hoher Qualität und sehr informativ, die Organisation funktionierte reibungslos (Unterlagen, Zeiteinteilung, Verpflegung). Ich freue mich schon auf die nächste Veranstaltung im Frühjahr 2012!

VERENA WILLERT, Darmstadt

1st European LiDAR Mapping Forum (ELMF) vom 30. November – 1. Dezember 2010 in Den Haag, Niederlande

The first European LiDAR Mapping Forum (ELMF) was organized in Den Haag (The Netherlands) by Intelligent Exhibitions Ltd, the same organization which organizes the International LiDAR Mapping Forum (ILMF) which will take place in 2011 in New Orleans, USA, on 7–9 February. The ELMF attracted 530 attendees from 46 countries. Amazingly, 88% of these attendees had never been to one of the last three International LiDAR Mapping Forum events held in the USA, so this is definitely a sign that LiDAR is really an attractive field. The conference featured 50 exhibiting companies and 13 technical sessions with oral presentations. A one-day workshop called “Basic to LiDAR” was also held in parallel to the technical sessions. The workshop aimed at providing novice operators, managers, and potential purchasers of range-based equipment with an understanding of the basic principles, fundamental benefits, and technology associated to LiDAR.

The conference opened with the keynote address of Prof. GEORGE VOSSelman with the talk “Mapping on point clouds” which gave a clear view on range-based point clouds as a valuable data source for mapping projects. The 42 oral presentations were then scheduled in sessions according to the following topics: data integration, data fusion, data processing, coastal zone and bathymetric LiDAR, GIS and data modeling, mobile mapping, applications (subsidence control, surveying of archaeological sites, visual effects, change detection, data collection, etc.). GOTTFRIED MANDLBURGER (TU Vienna) presented the OPALS system, a collection of research tools for LiDAR data processing, registration, filtering, and segmentation. STEPHAN LANDTWING (bsf swissphoto AG) presented the LiDAR survey of the Zurich airport for obstacle data collection, reporting the completeness, accuracy, and efficiency of the approach. HELEN BURMAN ROST (Blom Sweden) presented the national LiDAR project run by the Swedish National Land Survey for the production of a new national elevation model.

JOEL BURKHARD (FHNW Basel) reported about point cloud-based 3D city modeling and their integration into the virtual globe i3D. GERWIN DE HAAN (TU Delft) showed some approaches for the interactive visualization of massive airborne LiDAR datasets. IAN ANDERSON (Halcrow Group Ltd) presented the survey of coastal areas with boat-mounted mobile laser scanning. GRAHAM HUNTER (3D Laser Mapping) reported an interesting comparison between terrestrial and mobile laser scanning in landslide monitoring. In the final technical session, devoted to technology developments and trends, RON ROTH (Leica Geosystems) and BRENT GELHAR (Optech Inc.) discussed similarities and differences between multiple-return (or high-pulse-rate or discrete-return) and full-waveform LiDAR scanning. The former technology has a limited use for forestry and 3D mapping of vertical structures, the latter is more suited for complex 3D targets and vegetation mapping/analysis. Multiple-return airborne technology has in any case evolved to a new level bridging some applications of conventional topographic mapping and 3D modeling of complex structures. Full-waveform

technologies may instead be considered still an overkill approach due to the high vertical measurement sampling rate, the huge data volume and the lack of ready-to-use tools for data handling.

In the exhibition area, most of the commercial packages for aerial and terrestrial range data processing were presented with demos. Seven mobile mapping vehicles were also on display: the Topcon IP-S2, the Riegl VMX-250, the Streetmapper 360, the Sineco Lynx Mobile Mapper, the Tecon Mobile Mapper, the Pasco/Mitsubishi MMS-X640, and the MDL Dynascan.

The conference proceedings are available online only for the registered participants and accessible in a protected page.

For sure the ELMF provided an excellent opportunity to gain knowledge about the new developments and applications in the mapping field with range sensors. The trend is to have a huge point cloud which can be afterwards treated as unstructured data in the same way as classical photogrammetric results.

FABIO REMONDINO, Trento, Italien

Mitteilungen

Renaissance der Stereoauswertung von Luftbildern

Die Landesvermessungsverwaltungen Deutschlands beauftragen turnusmäßig Bildflüge für die aktuelle Führung der landschaftsbeschreibenden Geobasisdaten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystemes ATKIS® und der Topographischen Landeskartenwerke. Aus den Bildflügen werden Luftbilder hergestellt, orientiert und Orthophotos (ATKIS®-DOP) berechnet.

Aus der rasanten Entwicklung im dreidimensionalen (3D)-Spiele und 3D-Medienbereich und durch die kostengünstige Bereitstellung der notwendigen Hard- und Software ergeben sich Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Nutzung stereoskopischer Luftbilddauswertungen und -präsentationen. Das heißt, die 3D-Welt ist im Geodatenbereich in den Fokus

gerückt und erschließt ein riesiges Feld von neuen Anwendungsmöglichkeiten.

Worin liegen die Vorteile der stereoskopischen Verwendung?

- Es wird das originale Luftbild verwendet.
- Die orientierten Luftbilder stehen relativ schnell nach dem Bildflug zur Verfügung.
- Durch die hohe Längsüberdeckung der Luftbilder wird jedes Objekt in mehreren Bildern interpretierbar.
- Jedes Objekt wird 3D betrachtet, was zu einer erheblich gesteigerten Interpretationssicherheit führt.
- Es ist eine Auswertung mit hoher 2D und 3D geometrischer Genauigkeit möglich.
- Die räumliche Auswertung von Bildern ermöglicht die Messung der Höhe von Objekten. Dadurch können Objekte für 3D-Modelle, z. B. Gebäudemodelle, erfasst und überprüft werden.

Was wird zur stereoskopischen Verwendung der Luftbilder benötigt?

1. Rechner

Die benötigten Rechner sind auf dem Markt zu günstigen Konditionen verfügbar. Die große Nachfrage aus dem Anwendungsbeereich Computerspiele, Medienwiedergabe etc. hat zu Computern geführt, die für die Stereoauswertung mehr als ausreichend sind.

2. Monitore zur Stereobetrachtung

Für die Monitore zur Stereobetrachtung gibt es zwei Funktionsweisen:

Für professionelle Anwendungen wird ein System mit zwei gekoppelten Flachbildschirmen genutzt, wobei auf jedem Monitor jeweils ein Luftbild permanent präsentiert wird. Mit passiven Polarisationsbrillen werden diese beiden Bilder gleichzeitig und damit als Stereomodell betrachtet. Das System ist besonders für langes und präzises Arbeiten gut geeignet, da es weniger ermüdet. Die Preise sind in letzter Zeit deutlich gesunken und liegen je nach Bildschirmgröße bei ca. 3.000 € bis 5.000 €. Die Polarisationsbrillen sind sehr preisgünstig. Es können mehrere Personen gleichzeitig das Stereomodell betrachten.

Aus dem 3D-Spiele- und 3D-Medienbereich kommt der Stereoflachbildschirm, der mit einer Bildwiederholfrequenz von 120 Hz arbeitet und zwei Bilder abwechselnd mit einer Frequenz von je 60 Hz darstellt. Zur Stereobetrachtung wird eine Shutterbrille benötigt, die von einem Emittter gesteuert wird. Die benötigte 3D-Funk-

tionalität ist bei neueren Graphikkarten meist schon enthalten. Ein großer Vorteil liegt in der Verwendung von nur einem Bildschirm und den günstigen Anschaffungskosten von weniger als 1.000 € für einen 22“-Bildschirm, Graphikkarte, Emittter und Shutterbrille.

3. Software zur stereoskopischen Betrachtung und Auswertung

Die Softwareprodukte für die stereoskopische Anwendung sind bereits zahlreich am Markt verfügbar. Besonders die Anbindung an GIS-Systeme durch Stereoviewer hat zu einer Weiterentwicklung geführt, die inzwischen dem Anwender einen hohen Bedienkomfort bietet.

In den deutschen Landesvermessungsverwaltungen kommen vorrangig folgende Softwareprodukte zum Einsatz bzw. werden z.Zt. getestet:

- DTMaster der Fa. INPHO/TRIMBLE
- Stereoanalyst der Fa. ERDAS (auch für ArcGIS)
- ImageStation StereoDisplay der Fa. Intergraph Z/I Deutschland GmbH
- StereoDraw der Fa. Racurs

Für Anwender ist besonders interessant, dass

- das notwendige photogrammetrische Fachwissen in der Software integriert ist und er sich um viele Einzelheiten nicht kümmern muss,
- große Bildverbände geladen werden können und für die Auswertung nahtlos und orientiert zur Verfügung stehen,
- ein zügiges verzögerungs- und ruckfreies 3D-Auswerten möglich ist.



Monitore zur Stereobetrachtung mit passiven Polarisationsbrillen (links) und Shutterbrille (Mitte), Luftbildausschnitt (rechts)

4. Orientierte Luftbilder

Orientierte Luftbilder sind Luftbilder mit allen erforderlichen Parametern für eine stereoskopische Auswertung, wie Daten zur inneren und äußeren Orientierung. Geeignetes Luftbildmaterial mit der notwendigen Überdeckung ist bei den deutschen Landesvermessungsverwaltungen verfügbar. Es handelt sich um hoch aufgelöste digitale Luftbilder (ca. 20 cm Bodenauflö-

sung) mit hoher Farbbrillanz und großem Detailreichtum. Es sind Echtfarbenbilder (RGB), Colorinfrarotbilder (CIR) oder 4-Kanal-Bilder (RGBI) mit den notwendigen Orientierungselementen.

SVEN BALTRUSCH, Schwerin
AdV Arbeitskreis Geotopographie, Projektgruppe „ATKIS®-DOP“

Hochschulnachrichten

Leibniz Universität Hannover

Herr M. Sc. MOHAMMAD TAVAKKOLI promovierte am 24.9.2010 an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover mit der Arbeit „*Multi-temporal classification of crops using ENVISAT ASAR data*“ zum Dr.-Ing.

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Hannover, Koreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester, Hannover, Prof. Dr.-Ing. UWE SÖRGEL, Hannover, Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, München.

Kurzfassung

Eine Vielzahl landwirtschaftlicher Anbauverfahren wirken sich auf das menschliche Leben und die Umwelt aus. Traditionelle lokale Messungen sind teuer und zeitaufwändig. Probedaten gelten ausschließlich für die punktuelle Messlage. Im Rahmen eines ESA-Pilotprojekts (AO335) wurden Methoden untersucht, um eine zuverlässige, kosteneffiziente und ständige Überwachung der Anbauverfahren zu ermöglichen. Ein landwirtschaftliches Gebiet im Bereich „Fuhrberger Feld“, nahe Hannover (Deutschland) wurde als Untersuchungsgebiet ausgewählt.

ENVISAT ASAR Amplitudenbilder mit VV/VH Polarisation wurden in dieser Arbeit verwendet. Darüber hinaus wurden Probedaten durch Feldbesichtigungen gesammelt. Diese dienten sowohl als Trainingsdaten als auch als Referenz für die Genauigkeitsabschätzung. Die verfügbaren Daten deckten die landwirtschaftliche Saison 2004 ab. Umfang-

reiche Feldbesichtigungen fanden auf mehr als 50 Feldern statt. Diese erfolgten zeitgleich zu den Bildaufnahmen mittels ENVISAT. Die Testfelder umfassten die typischen Arten der verschiedenen Pflanzen der Region. Der methodische Ansatz für das Monitoring besteht in der überwachten Klassifizierung von multitemporalen ENVISAT ASAR Daten.

In dieser Arbeit wurden Klassifikationsgenauigkeiten verschiedener Kombinationen von Vorverarbeitung, Datenkombination und Klassifikatoren getestet. Einfluss von Speckleunterdrückung und Kalibrierung auf die Klassifikation wurden ebenfalls getestet. Die Anpassung der Daten auf einen Anbaukalender in Verbindung mit den zwei Klassifikatoren Maximum Likelihood (MLC) und Support Vector Machines (SVM) wurde untersucht.

Die Auswertung der Klassifikationsmethoden basiert auf Fehlermatrizen und Kappa-Statistiken. Die Ergebnisse zeigen, dass die auf den Anbaukalender angepassten Daten und zusammengeführten Signaturen, basierend auf Kulturen, mit der MLC Klassifikation eine allgemeine Genauigkeit von über 80% erreichen. Eine Anpassung auf den Anbaukalender verbessert die Genauigkeit der SVM-Klassifikation nicht. Diese Methode benötigt eine gesonderte Berechnung der Klassifikationen für die verschiedenen Kulturarten. Damit werden unabhängige Ergebnisse für jede Klasse generiert. Es können sich dabei in einigen Gebieten Konflikte aus den unterschiedlichen Klassifizierungen ergeben. Es wurde eine Methode zur Kombination der Ergebnisse entwickelt, welche basierend auf die Abschätzungsmetho-

de des Klassifizierungsprozesses die Konflikte löst. Die Kombinationsmethode zeigte gute Ergebnisse, dabei wurde die Genauigkeit der Klassifikation für einzelne Klassen konstant gehalten. Es konnte zudem gezeigt werden, dass Speckle-Filter und der verwendete Klassifikator unterschiedliche Effekte auf das Ergebnis des Verfahrens zur Klassifizierung haben.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe „Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover“ (ISSN 0174-1454) als Heft Nr. 289 erschienen.

Technische Universität München

Herr Dipl.-Ing. WEI YAO promovierte am 3. 12. 2010 an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen (Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung) der Technischen Universität München mit der Arbeit „*Extraction and Velocity Estimation of Vehicles in Urban Areas from Airborne Laserscanning Data*“ zum Dr.-Ing.

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. STEFAN HINZ, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine zweistufige Strategie zur Verkehrsüberwachung in urbanen Bereichen durch Auswertung von Single-Pass Airborne Laserscanning (ALS)-Daten vorgestellt und untersucht. Dabei werden in der ersten Stufe zunächst die Fahrzeuge extrahiert und in der folgenden Stufe deren Bewegungszustand analysiert.

Für die Fahrzeugextraktion werden zwei Methoden vorgeschlagen. Bei der ersten Methode wird davon ausgegangen, dass alle Straßenabschnitte in der untersuchten Szene Bestandteil der Bodenfläche sind. Die Laserdaten werden von der Punktwolke in eine Rasterdarstellung gewandelt. Basierend auf Analyse der Höhenverteilung wird zunächst durch ein iteratives Verfahren die Bodenfläche inklusiv der Fahrzeuge von anderen Objekten wie Gebäuden und Vegetation separiert. Anschließend erfolgt eine morphologische Segmentie-

rung, um die Fahrzeuge von der Bodenfläche zu isolieren. Bei der zweiten Methode wird davon ausgegangen, dass Straßenabschnitte auch auf Brücken oder Überführungen liegen. Durch einen adaptiven „Mean Shift“-Ansatz wird eine 3D-Segmentierung der Punktwolken durchgeführt. Dabei werden auf Basis der lokalen Struktur Punktwolken, die Fahrzeuge darstellen könnten, direkt von allen anderen Objekten getrennt. Die Unterscheidung von Fahrzeug und Hintergrund erfolgt durch eine Klassifikation mit einer Support Vektor Maschine. Bei Szenen mit dichten Fahrzeuganordnungen wie sie bei Parkplätzen auftreten, wird weiterhin eine Gruppierung größerer Objekte durch „Normalized Cuts“ durchgeführt und eine Kombination mit der ersten Methode angewendet.

Bei der Bewegungsanalyse wird basierend auf den extrahierten Punktwolken der Fahrzeuge zunächst ein Bewegungsstatus bestimmt und bei den als bewegt klassifizierten Fahrzeugen nachfolgend die Geschwindigkeit geschätzt. Zur Bestimmung des Bewegungsstatus wird die Form der Fahrzeugpunktwolke durch ein Parallelogramm approximiert und aufgrund der Parameter aus Längen/Breitenverhältnis und Scherwinkel klassifiziert. Die Klassifikation besteht in einer Binärentscheidung, die durch Auswertung mit einer Lie Group Metrik erfolgt. Schließlich wird die Geschwindigkeit der sich bewegenden Fahrzeuge auf Grundlage der Deformationsstruktur bestimmt. Prinzipiell kann bei dieser Schätzung die Bewegungsrichtung aus der Straßenanordnung als Vorkennntnis berücksichtigt werden. Mit dieser Information wurden drei Ansätze zur Geschwindigkeitsbestimmung untersucht. Liegen keine Information zur Straßenausrichtung vor, werden Geschwindigkeit und Richtung durch Lösung eines linearen Gleichungssystems ermittelt.

Die Ansätze wurden mit vier Laserdatenansätzen von drei verschiedenen Städten untersucht. Für die Bewertung der Detektionsergebnisse wurden Referenzdaten manuell erstellt. Um die Schätzung der Bewegung zu bewerten, wurden die bei zwei Szenen gleichzeitig aufgenommenen Videosequenzen ausgewertet. Die Ergebnisse der beiden Methoden zur Fahrzeugextraktion haben gezeigt, dass bei der ersten Methode eine hohe Voll-

ständigkeit (bis 87%) bezüglich der Erkennung von Fahrzeugobjekten erreicht wird, während das zweite Verfahren eine hohe Genauigkeit bezüglich der Fahrzeuggeometrie liefert. Für die Bewegungsdetektion wurde durch simulierte Punktwolken die Erkennung in Abhängigkeit der Punktdichte, dem Beobachtungswinkel und der Geschwindigkeit untersucht. Untersuchungen zur Genauigkeit der Geschwindigkeitsschätzung zeigen eine

starke Abhängigkeit von dem Verhältnis der Fluggeschwindigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Beobachtungswinkel. Die besten Schätzungen aus den Experimenten zeigen eine Abweichung der Geschwindigkeit von ungefähr 10% im Vergleich zu den Geschwindigkeitsschätzungen aus den Videosequenzen. Die Dissertation ist verfügbar unter: www.pf.bv.tum.de/pub/2010/yao_phd10_dis.pdf.

Buchbesprechung

THOMAS LUHMANN: Nahbereichs-photogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3. Auflage, Wichmann-Verlag / VDE-Verlag, Berlin und Offenbach

Der Begriff „Nahbereichsphotogrammetrie“ steht mittlerweile als ein Synonym für die vielfältigen bildgebenden Messverfahren im Bereich optischer 3D-Messtechnik. THOMAS LUHMANN dokumentiert dies nachhaltig in der 3. Auflage seines gleichnamigen Buches, die sich als völlig neu bearbeitet und erweitert darstellt. Auffällig wird dies im direkten Vergleich mit der 2. Auflage: im Format und Layout nahezu gleich, weist das Buch mit seinen 668 Seiten einen um ca. 100 Seiten erweiterten Umfang auf. Eine Vielzahl der Abbildungen liegt nun im Vierfarbdruck vor.

Ein erster Blick in das Inhaltsverzeichnis lässt erkennen, dass der Autor in seinem Werk die bewährte Gliederung der vorhergehenden Auflagen nahezu beibehalten hat, diese jedoch an unzähligen Stellen einer „Nachjustierung“ unterzogen wurde. Die sich hieraus ergebende Chronologie des Textes entspricht deutlich besser dem darzustellenden Gesamtprozess der Nahbereichsphotogrammetrie.

Nach einer Einführung in das Thema (Kap. 1) ist Kap. 2 den mathematischen Grundlagen gewidmet. Das durch eine Vielzahl von Formeln geprägte Kapitel vermittelt Themen, wie Koordinatensysteme und -transformationen, geometrische Elemente und Ausgleichungsverfahren, in einer eingängigen Form, aufge-

lockert durch Abbildungen und erläuternde Rechenbeispiele.

Das mit „Aufnahmetechnik“ überschriebene Kap. 3 ist komplett überarbeitet worden. Hervorzuheben sind die „Physikalischen Grundlagen“ des Abbildungsprozesses, „Komponenten zur Bilderfassung“ (mit Grundlagen zu optoelektrischen Bildsensoren) und die sehr detaillierte Darstellung von Aufnahmesystemen. Das umfangreiche Repertoire nutzbarer Bildsensoren und ihrer systemtypischen Eigenschaften wird hier vorgestellt. Bildbeispiele, die sowohl Systeme als auch Anwendungen zeigen, ergänzen diese Darstellungen sinnvoll und vermitteln einen sehr guten Eindruck über die Mannigfaltigkeit aktuell verfügbarer Aufnahmesysteme. Dass auch der Themenkomplex „Signalisierung und Beleuchtung“ von eminenter Bedeutung – und Teil des Gesamtsystems ist – wird zum Ende des Kapitels erläutert. Sehr eindrucksvoll ist in diesem Kontext, wie vielfältig die physikalische Definition eines „Messpunktes“ ausfallen kann und welchen Einfluss sie auf den Gesamtprozess ausübt.

Analytische Auswerteverfahren bilden den Inhalt des 4. Kapitels. Auch dieses ist in weiten Bereichen neu strukturiert und beschreibt Verfahren zur Auswertung von Einzel- und Stereobildern, bis hin zu Bildverbänden. Dem zentralen Thema der Bildtriangulation durch Bündelblockausgleichung wird der notwendige breite Raum (ca. 50 Seiten) gewährt. Aber auch neue Themen, wie „Panoramaphotogrammetrie“ werden in ihren Grundlagen dargestellt, ebenso wie „Mehrmedienphotogram-

metrie“ und „Phasenbasierte Messverfahren“ (Streifenprojektion).

Den Methoden der digitalen Bildverarbeitung widmet sich Kapitel 5. Hier werden die Grundlagen und Verfahren vorgestellt, die eine weitestgehend automatisierte Verarbeitung digitaler Bilder ermöglichen und wesentlich den Erfolg bildgebender Messverfahren begründen.

Die Umsetzung der bisher vorgestellten Basistechnologien in entsprechende praxisorientierte Messsysteme, und damit einhergehenden Messaufgaben, ist Inhalt des Kapitels 6. Ein- und Mehrbildmesssysteme, Systeme zur Oberflächenerfassung, zur Messung dynamischer Vorgänge sowie Messsysteme auf mobilen Plattformen zeugen von der Flexibilität des photogrammetrischen Ansatzes. Ein abschließender, kurzer Beitrag zu „Lasermesssystemen“ dokumentiert, dass es sich auch hierbei um Sensorik auf der Grundlage bildgebender Verfahren handelt.

Die folgenden Kapitel 7 (Projektplanung und Optimierung) und 8 (Anwendungsbeispiele) verdeutlichen den Praxisbezug des vorliegenden Buches. Projektplanung, Qualitätskriterien zur Bewertung einer Messung (Kenngrößen) sowie Strategien zur Kamera-Kalibrierung stellen wesentliche Elemente durchzuführender Messprojekte dar. Wie vielfältig diese ausfallen können, lässt das Kapitel der Anwendungsbeispiele erahnen. Es ist im Vergleich zu vorherigen Auflagen deutlich angewachsen, kann und will aber auch nur einen eingeschränkten, temporären Blick auf die sich kontinuierlich entwickelnden Projekte der Praxis geben.

Gleiches gilt für das abschließende Literaturverzeichnis, das nach Themen sortiert, wertvolle Hinweise auf den immer größer werdenden Bereich fachnaher Publikationen gibt.

Mit der vorliegenden 3. Auflage hat THOMAS LUHMANN sein Standardwerk „Nahbereichsphotogrammetrie“ in vielen Bereichen sorgfältig überarbeitet und inhaltlich aufgewertet. Die Arbeitsprozesse der Nahbereichsphotogrammetrie werden, beginnend bei den Grundlagen bis hin zu individuellen Projekten, strukturiert und verständlich dokumentiert. Das Buch ist somit ein „must-have“ für alle am Thema Interessierten.

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Hattingen

RALF BILL: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. 5., völlig neu bearbeitete Auflage, Wichmann-Verlag / VDE-Verlag, Berlin und Offenbach

Es ist fast zwanzig Jahre her, dass ich begann, mich professionell mit GIS-Technologie zu beschäftigen. Und natürlich fiel mir damals gleich die erste Auflage der „Grundlagen der Geo-Informationssysteme“ von RALF BILL und DIETER FRITSCH in die Hände, die gerade erschienen war. Als jemand, der bis dahin nicht mit Geodaten zu tun gehabt hatte, kam mir dieses Lehrbuch – wohl das erste umfangreichere deutschsprachige Werk zu diesem Themenkomplex – gerade recht. Sicherlich bin ich nicht der einzige, für den es im Laufe der Zeit den Status eines Klassikers gewonnen hat.

Nimmt man die neu erschienene 5. Auflage (seit der 4. Auflage nur noch mit RALF BILL als einzigem Autor) in die Hand, so fallen zunächst zwei Dinge auf. Erstens ist das bislang zweibändige Werk nunmehr in einem (804 Seiten starken) Band zusammengefasst. Und zweitens stößt man beim Durchblättern erfreulicherweise sofort auf die plakativen Beispiele und Abbildungen, die einen die Jahre hindurch begleitet haben und die immer wieder hilfreich waren, um Kollegen, Kunden oder Studierenden GIS-spezifische Sachverhalte zu erläutern.

Nur wenige der damals behandelten Themen scheinen der Zeit zum Opfer gefallen zu sein. Selbstverständlich wurden verschiedene Dinge aktualisiert, und einige Themen haben im Laufe der Zeit an Bedeutung verloren oder gewonnen, so dass der Fokus ein wenig anzupassen war. Und dann sind da natürlich auch neue Themenbereiche entstanden. Exemplarisch seien an dieser Stelle nur die Entwicklungen im Umfeld des World Wide Web, mobile Technologien, oder die internationalen Standardisierungsaktivitäten des *Open Geospatial Consortiums (OGC)* bzw. der *International Organisation for Standardisation (ISO)* sowie die 2007 in Kraft getretene INSPIRE-Richtlinie der Europäischen Union genannt.

Im Einführungskapitel hat sich nicht allzu Wesentliches geändert. Der GIS-Begriff wird definiert, nachfolgend werden insbesondere

Aspekte der Objektbildung, wesentliche GIS-Komponenten sowie verschiedene GIS-Ausprägungen beschrieben.

Im Kapitel 2 werden Hard- und Software-Aspekte in Geo-Informationssystemen erläutert. Das Kapitel wurde vom Autor auf den Stand der Zeit gebracht.

Neu ist das 3. Kapitel, das sich mit dem Thema „Raum und Zeit in GIS“ auseinandersetzt. Nach einer Definition der Wissenschaftsdisziplin Geodäsie werden Annäherungen an die Erdfigur ebenso behandelt wie Koordinatenreferenzsysteme, Kartennetzwürfe oder Raum-Metriken. Am Ende des Kapitels wird kurz die Behandlung zeitlicher Aspekte in GIS angerissen.

Ebenfalls neu ist Kapitel 4, das sich dem überaus wichtigen Themenkomplex Interoperabilität und Offenheit von GIS widmet. Die hohe praktische Relevanz dieses Themas kann an dieser Stelle nicht deutlich genug hervorgehoben werden. Ausgangspunkt der Darstellung sind die aus dem Umfeld der praktischen Informatik bekannten Modellierungskonzepte gemäß der „Unified Modeling Language“, kurz UML. Fraglich bleibt, inwieweit die einführende Darstellung Lesern, die weder mit der UML noch mit Konzepten der Objektorientierung vertraut sind, weiterhelfen wird. (Gerade hierzu ist allerdings anderswo sehr brauchbare Einführungsliteratur verfügbar, auf die im Bedarfsfall zurückgegriffen werden sollte!) Im Weiteren wird auf die wichtigen Themen Normung (insbesondere im Umfeld ISO/OGC) und Geodateninfrastrukturen (inkl. GDI-DE und INSPIRE) eingegangen. Das Kapitel schließt mit der „Digital Earth“-Vision des ehemaligen US-Vizepräsidenten AL GORE, wobei dem Autor inhaltlich der Brückenschlag zu den verbreitetsten „Earth-Viernern“ sowie aktuellen Themen wie Sensornetzwerken oder CityGML (eingesetzt im Umfeld der 3D-Modellierung von Stadt- und Landschaftsobjekten) gelingt.

Die altbewährten Kapitel 5 bis 8 sind gegenüber den früheren Auflagen erweitert und aktualisiert worden. Kapitel 5 beschäftigt sich eingehend mit der Erfassung von Geodaten (Erfassungsmethoden, Datenquellen, Metainformation/Datenqualität). In Kapitel 6 wird detailliert auf Aspekte der Datenmodellierung

eingegangen. Hier findet sich in gewohnter Manier fundierte Information zu den grundlegenden Datenmodellen in GIS und deren Software-internen Repräsentationen. Kapitel 7 widmet sich raumbezogenen Datenanalysemethoden. Hier werden die klassischen GIS-Funktionen behandelt wie u.a. Verschneidung, Nachbarschaftsanalysen, Pufferzonen-Generierung, Netzwerkanalyse (z.B. Suche kürzester Wege), Interpolation oder geostatistische Verfahren. Kapitel 8 befasst sich mit der Präsentation raumbezogener Daten. Hierbei wird sowohl auf Aspekte der Computer-Grafik als auch der kartografischen Gestaltung eingegangen.

Im letzten, vom Autor aktualisierten und vervollständigten Kapitel werden konkrete GIS-Anwendungen beschrieben. Das breite Spektrum der Anwendungsbereiche wird hierbei sehr gut abgedeckt.

Praktikern und Wissenschaftlern im GIS-Umfeld ist das Buch sicherlich zu empfehlen. Als Nachschlagewerk würde ich es in meinem Bücherregal nur ungern missen. GIS-Neueinsteiger werden umfassende Hinweise zu weiterführender Literatur, Tagungen/Messen, Kontaktstellen, etc., im deutschsprachigen Raum gegeben. Studierenden der Geoinformatik oder angrenzender Disziplinen kann das Buch als Lehrveranstaltungsbegleitende Lektüre empfohlen werden. Viele Teile eignen sich durchaus für das Selbststudium. Lehrenden im Umfeld der Geoinformatik werden zahlreiche wertvolle Impulse gegeben. Neben den plakativen Beispielen und Abbildungen seien hier auch die Übungsaufgaben (für die auch Lösungen angegeben werden) genannt.

Mit der Neuauflage dieses Klassikers wurde ein praktisch brauchbares und empfehlenswertes Nachschlagewerk vorgelegt. Es bleibt zu hoffen, dass die nächste Auflage des (mit 88 € allerdings nicht gerade preiswerten) Werkes nicht wieder 11 Jahre auf sich warten lässt. Gerade mit Blick auf die sich schnell entwickelnden Technologien z.B. im Umfeld des World Wide Web wären wesentlich kürzere Aktualisierungszyklen begrüßenswert! Insofern mein persönlicher Wunsch an den Autor: Bitte am Ball bleiben und weiter so!

BENNO SCHMIDT, Bochum

Veranstaltungskalender

2011

- 4.–8. April: **8th IAA Symposium on Small Satellite for Earth Observation** in Berlin. www.dlr.de/iaa.symp
- 11.–13. April: **JURSE 2011** - Joint Urban Remote Sensing Event (URBAN 2011 + URS 2011) in **München**. www.jurse2011.tum.de
- 13.–15. April: **EOGC 2011** - 3rd Conference on Earth Observation for Global Changes in **München**. www.eogc2011.tum.de
- 13.–15. April: **30. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF** in Mainz. www.dgpf.de/neu/jahrestagung/informationen.htm
- 3.–8. Mai: **Gi4DM - GeoInformation for Disaster Management** in **Antalya**, Türkei. www.gi4dm2011.org/
- 12.–13. Mai: **7. GIS-Ausbildungstagung 2011** in Potsdam. gis.gfz-potsdam.de/
- 18.–19. Mai: ISPRS WG I/4 **International Conference on Sensors & Models in Remote Sensing & Photogrammetry** in **Tehran**, Iran. www.smpr2011.com/
- 23.–26. Mai: **SPIE Optical Metrology - Videometrics, Range Imaging, and Applications** in **München**. spie.org/x6506.xml
- 26.–29. Mai: ISPRS ICWG V/I joint ICA/ISPRS/FIG **International Symposium on Lidar & Radar Mapping: Technologies & Applications (LIDAR & RADAR 2011)** in **Nanjing**, China. www.lidar2011.org/
30. Mai – 01. Juni: **Symposium Königslutter 2011**. Info/Anmeldung: www.angewandte-kartographie.de
30. Mai – 02. Juni: **31st EARSeL Symposium** in **Prague**, Tschechien. www.earsel.org/symposia/2011-symposium-Prague/
- 13.–16. Juni: **7th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT11)** in **Cracow**, Polen. www.mmteracow2011.pl/
- 14.–17. Juni: ISPRS WG IV/2 **Workshop on High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information** in **Hannover**. www.commission4.isprs.org/wg2/
- 15.–17. Juni: **GEOINFORMATIK 2011** in **Münster**. www.geoinformatik2011.de/
23. Juni: **4. Hamburger Forum für Terrestrisches Laserscanning** an der HafenCity Universität **Hamburg**. www.geomatik-hamburg.de/tls/tls2011/tls_2011.html
- 26.–27. Juni: ISPRS WG V/4, III/2+4, IV/4+8 joint **Workshop on 3D City Modelling & Applications** in **Wuhan**, China. www.lmars.whu.edu.cn/3DCMA2011/
- 3.–8. Juli: **25th International Cartographic Conference (ICC2011)** in **Paris**, Frankreich. www.icc2011.fr/
- 18.–20. Juli: ISPRS WG II/3 **International Symposium of Spatio-Temporal Analysis & Data Mining** in **London**, Großbritannien. standard.cege.ucl.ac.uk/workshops/STDM2011/
- 29.–31. August: ISPRS WG V/3 **Laser Scanning 2011** in **Calgary**, Kanada. www.ucalgary.ca/laserscanning2011/
- 5.–9. September: **53. Photogrammetrische Woche** an der Universität **Stuttgart**. www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/index.html
- 12.–16. September: **XXIIIth International CIPA-HD Symposium** in **Prague**, Tschechien. cipa.icomos.org/index.php?id=9
- 14.–16. September: ISPRS ICWG I/V **International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g)** an der **ETH Zürich**, Schweiz. www.uav-g.ethz.ch

27.–29. September: **INTERGEO 2011** in **Nürnberg**. Infos: www.intergeo.de/de/deutsch/index.php

5.–7. Oktober: **Photogrammetric Image Analysis 2011 (PIA11)** in **München**. www.pia11.tum.de

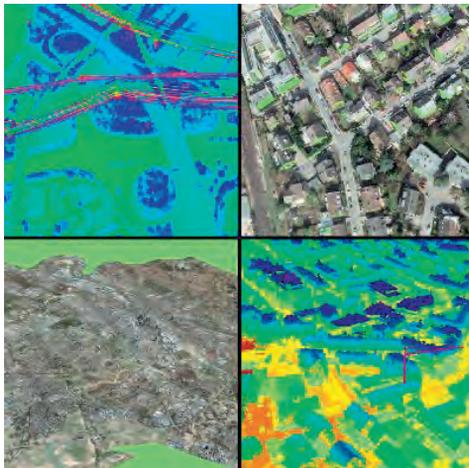
2012

24. August - 3. September: **XXII ISPRS Congress 2012** in **Melbourne**, Australien. www.isprs2012-melbourne.org/

Zum Titelbild

Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken

LiDAR-(Light Detection and Ranging) Technologie wird für die digitale Erfassung von Städten und Landschaften eingesetzt. Das Titelbild besteht aus verschiedenen Ansichten einer aus LiDAR-Daten abgeleiteten massiven 3D-Punktwolke der Stadt Frankfurt am Main.



Das Bild unten links zeigt die erfassten Daten für das Stadtgebiet im Überblick. Die vom Stadtvermessungsamt Frankfurt bereitgestellten LiDAR-Daten beinhalten über 7 Milliarden Punkte. Diese Größe der Daten stellt eine Herausforderung für die effiziente Verarbeitung und Visualisierung dar. Mit Hilfe von Verfahren zur Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken ist dennoch eine interaktive Exploration des gesamten Datenbestandes möglich. Das Bild oben rechts zeigt exemplarisch eine Detailansicht der 3D-

Punktwolke, in der Gebäude, Straßenzüge und Vegetation erkennbar sind. Die Farbinformationen wurden auf Basis von Luftbildern ermittelt. Aufgrund der hohen Genauigkeit eignen sich 3D-Punktwolken besonders gut für die flächendeckende Rekonstruktion von digitalen 3D-Stadtmodellen. Die Visualisierung der Originaldaten erschließt neue Anwendungsfälle und Möglichkeiten zur ad-hoc Analyse. So kann beispielsweise die bestehende Bebauung durch das Hervorheben von Strukturen in einer 3D-Punktwolke mit Hilfe von Farbverläufen visualisiert werden (Bild unten rechts). Im oberen linken Bild sind Hochspannungsleitungen durch das Einfärben der 3D-Punktwolke auf Basis von Höheninformationen hervorgehoben.

Aufgrund des verbreiteten und flächendeckenden Einsatzes von LiDAR-Technologie und dem damit verbundenen hohen Datenaufkommen spielt die interaktive echtzeitfähige Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken zunehmend eine wichtige Rolle. Sie ermöglicht insbesondere neue Anwendungen im Bereich der visuellen Analyse und Exploration und schafft systemtechnische Voraussetzungen für die Echtzeit-Verarbeitung von LiDAR-Daten.

Weitere Informationen

Prof. Dr. JÜRGEN DÖLLNER und RICO RICHTER, M.Sc.

Fachgebiet Computergrafische Systeme
Hasso-Plattner-Institut an der
Universität Potsdam

Prof.-Dr.-Helmert-Str. 2-3
14482 Potsdam

Tel: +49 (0)331 5509 3910

e-mail: rico.richter@hpi.uni-potsdam.de

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
 AICON 3D Systems GmbH
 Alpha Luftbild GmbH
 aphos Leipzig AG
 Becker GeoInfo GmbH
 Bernhard Harzer Verlag GmbH
 Blom Deutschland GmbH
 Brockmann Consult
 bsf swissphoto
 Büro Immekus
 CGI Systems GmbH
 con terra GmbH
 Creaso GmbH
 DEFINIENS AG
 DELPHI IMM GmbH
 Deutsches Bergbau-Museum
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
 ESRI Geoinformatik GmbH
 EUROPEAN SPACE IMAGING
 Eurosense GmbH
 fokus GmbH
 g.on experience gmbh
 GAF GmbH
 GeoCad GmbH
 GeoCart Herten GmbH
 GeoContent GmbH
 Geoinform. & Photogr. Engin. Dr. Kruck & Co. GbR
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
 GEOSYSTEMS GmbH
 GGS - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
 Hansa Luftbild AG
 IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
 ILV Ing.-büro für Luftbildausw. und Vermessung
 Imetric 3D GmbH
 Infoterra GmbH
 INVERS - Industrievermessung & Systeme
 J. Linsinger ZT-GmbH
 Jena-Optronik GmbH
 KAZ Bildmess GmbH
 Leica Geosystems GmbH
 Luftbild Brandenburg GmbH Planer + Ingenieure
 Luftbilddatenbank-Würzburg
 Messbildstelle GmbH
 Microsoft Photogrammetry
 MILAN Geoservice GmbH
 PHOENICS GmbH
 PMS - Photo Mess Systeme AG
 RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Photogrammetrie
 technet GmbH
 TerraVista Umweltdaten GmbH
 TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH
 Trimble Germany GmbH
 trimetric 3D Service GmbH
 Wichmann, VDE Verlag GmbH
 Z/I Imaging Ltd.

Behörden

Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Bundesmin. für Ernäh., Landw. u. Verbraucherschutz
 DB Netz AG
 Hess. LA für Bodenmanagement und Geoinformation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Inst. für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Geoinformation u. Landentw., Baden-Württem.
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
 LB f. Küstenschutz, Nationalpark u. Meeresschutz, SH
 Landesvermessung und Geobasisinformation Nieders.
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungsprä. Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31
 Stadt Düsseldorf, Vermessungs- und Katasteramt
 Stadt Köln, Amt für Liegensch., Verm. und Kataster
 Stadt Wuppertal, Verm., Katasteramt und Geodaten
 Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde
 FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation
 FH Mainz, Inst. f. Raumbez. Inform.- und Messtechn.
 FH Oldenburg, Inst. für Angew. Photogr. und Geoinf.
 HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik
 HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
 HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik
 HS Karlsruhe, FB Geoinformationswesen
 HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie
 Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut
 RWTH Aachen, Geodätisches Institut
 TU Bergak. Freiberg, Inst. f. Markscheid. u. Geodäsie
 TU Bergak. Freiberg, Inst. für Geologie, RSG
 TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
 TU Braunschweig, Inst. für Geodäsie und Photogr.
 TU Clausthal, Inst. für Geotechnik und Markscheidew.
 TU Darmstadt, Inst. für Photogrammetrie und Kartogr.
 TU Dresden, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.
 TU München, FG Photogrammetrie und Fernerk.
 TU Wien, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.
 Uni Bonn, Inst. für Photogrammetrie
 Uni Göttingen, Inst. für Waldinv. und Waldwachstum
 LUH Hannover, Inst. für Kartogr. und Geoinformatik
 LUH Hannover, Inst. für Photogrammetrie und GeoInf.
 Uni Heidelberg, IWR Interdis. Zentr. f. Wiss. Rechnen
 Uni Karlsruhe, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.
 Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften
 Uni Kiel, Geographisches Institut
 Uni Stuttgart, Inst. für Photogrammetrie
 Uni Würzburg, Geographisches Institut
 Uni zu Köln, Geographisches Institut