

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2007, Heft 3

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies

Schriftleiter:
Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Clement Atzberger, Ralf Bill, Eberhard Gülch,
Christian Heipke, Barbara Koch, Hans-Gerd Maas, Jochen Schiewe, Matthäus Schilcher
und Monika Sester



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2007



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.



Herausgeber:

© 2007 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsident: Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, Fachhochschule Oldenburg Ostfriesland Wilhelmshaven, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg, Tel.: +49-441-7708-3172, e-mail: Praesident@dgpf.de, www.dgpf.de
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 3 A, D-70176 Stuttgart. Tel.: 07 11/35 14 56-0, Fax: 07 11/35 14 56-99, 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

Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies, Closewitzer Str. 44, D-07743 Jena. e-mail: Klaus.Szangolies@t-online.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 und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 107, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 7 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 122,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Anzeigenverwaltung: Dr. E. Nägele, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 0711/35 14 56-0; Fax: 0711/35 14 56-99. 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 2007, Heft 3 Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge ISPRS - Kommission V - Symposium

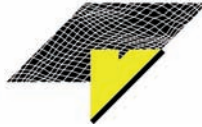
MAAS, H.-G. & SCHNEIDER, D.: Vorwort	153
VAN DEN HEUVEL, F.A., VERWAAL, R. & BEERS, B.: Automated Calibration of Fisheye Camera Systems and the Reduction of Chromatic Aberration	157
MAYER, H.: 3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences	167
MULSOW, C., SCHULZE, M. & WESTFELD, P.: An Optical Triangulation Method for Height Measurements on Instationary Water Surfaces	177
WENDT, A. & HEIPKE, CH.: Area-based Orientation of Brightness, Range and Intensity Images	187
ALSHAWABKEH, Y., HAALA, N. & FRITSCH, D.: Registrierung terrestrischer Bild- und LIDAR-Daten für die Dokumentation von Kulturdenkmälern	197
HOYER, K.W., KNIGHT, J., HOLZNER, M., GUALA, M. & KINZELBACH, W.: Simultaneous 3D-Flow Field and Compliant Wall Measurements in an Abdominal Aortic Aneurysm Flow using Scanning-PTV	207

Berichte

Berichte	
6. Oldenburger 3D-Tage vom 31.3. bis 1.2.2007	215
Hochschulnachrichten	
Technische Universität München, Dissertation	
B. WESSEL	216
Technische Universität Berlin, Dissertation	
M. RITTER	217
Universität Stuttgart, Masterkurs GEOENGINE	218
Persönliches	
Dipl.-Ing. RUDOLF LIEBE †	219
Buchbesprechung	
K. BALDENHOFER	219
Zum Titelbild	220



**Landesvermessungsamt
Baden-Württemberg**



Seit August 2005 verfügt das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg über einen kompletten, landesweiten Datensatz aus Laserscan-Befliegungen zur Einrichtung eines **Digitalen Geländemodells (DGM)**. Diese Daten besitzen einen Punktabstand von etwa 1,5 m und sind flächendeckend automatisch klassifiziert in Bodenpunkte und Hochpunkte. Durch eine interaktive Nachbearbeitung der Klassifizierung wird die Zuordnung in Bodenpunkte bzw. Hochpunkte geprüft und berichtigt. Daraus entsteht ein DGM mit einer Gitterweite von 1 m. Es ist geplant, dieses DGM bis Ende 2007 fertig zu stellen.

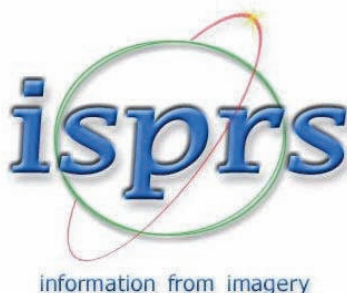
Aus den automatisch klassifizierten Bodenpunkten wurde für die gesamte Landesfläche ein vorläufiges DGM in einer Gitterweite von 25 m berechnet. Dieses Modell mit der Bezeichnung **DGM 25 V** ist als Ersatz zu

sehen für das bisher bestehende Digitale Höhenmodell.

Nach dem ersten Bildflug in Farbe für den Block B „Schwarzwald“ im Jahr 2005, liegen jetzt auch die Farbbilder für den Befliegungsblock C „Bodensee“ vor. Bis Anfang 2008 werden daraus **Digitale Orthophotos** in einer Bodenauflösung von 25 cm berechnet. Zur Entzerrung wird das neue Laserscan-DGM verwendet, wodurch die geometrische Genauigkeit der DOP wesentlich gesteigert wird.

Sämtliche Datenbestände, wie z. B. Rohdaten der Laserscanaufnahme, Geländemodelle in unterschiedlichen Gitterweiten, sowie Luftbilder und Orthophotos in digitaler bzw. analoger Form, können über das Internet (www.lv-bw.de) oder über das Leistungs- und Servicezentrum des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg (0711/123-3112, -2831) bezogen werden.

Landesvermessungsamt
Baden-Württemberg
Büchsenstraße 54, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711-123-2811, Fax: 0711-123-2979
www.lv-bw.de
e-mail: poststelle.vermbw@vermbw.bwl.de



Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
Kommission V: Close-Range Sensing – Analysis and Applications**
Präsident: Prof. HANS-GERD MAAS, hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Das Symposium „Image Engineering and Vision Metrology“ 2006 in Dresden*

Die aktuelle Ausgabe der PFG ist der Nahbereichsphotogrammetrie gewidmet. Die Auswahl der Beiträge des Themenheftes basiert auf Vorträgen, welche im Rahmen des ISPRS Kommission V Symposiums 'Image Engineering and Vision Metrology' vom 25. bis 27. September in Dresden gehalten wurden. Bei den hier publizierten Beiträgen handelt es sich um erweiterte, revidierte und ggf. übersetzte Fassungen von Symposiumsbeiträgen. Die Verschiedenartigkeit der Beiträge veranschaulicht das Spektrums der Arbeiten von ISPRS Kommission V.

Der Arbeitsschwerpunkt der Nahbereichsphotogrammetrie hat sich im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte, angetrieben durch Entwicklungen in der Sensortechnologie, der Algorithmik und der verfügbaren Rechnerleistung, in einen weiten Bereich neuer Anwendungsgebiete verlagert. Beispiele dafür sind industrielle Qualitätskontrolle, industrielle und autonome Robotik, Datenakquisition für virtuelle Realitäten oder bio-medizinische Bildanalyse. Ein zentraler Punkt der Arbeiten ist die Integration

bildgebender Sensorik mit zuverlässigen und genauen automatischen Auswertverfahren auf der Basis von Methoden der Bildanalyse und Statistik mit dem Ziel der Konfiguration hoch integrierter echtzeitfähiger Messsysteme. Hier finden wir häufig den Begriff 'Image Engineering', der für aufgabenspezifische Systemlösungen auf der Basis aktiver oder passiver Sensorik in Verbindung mit Signalisierungstechniken und/oder Beleuchtungsalgorithmen, kombiniert mit darauf optimierten Bildanalyseverfahren, steht.

Vielversprechende neue Anwendungsgebiete der Nahbereichsphotogrammetrie und der Optischen 3D-Messtechnik liegen beispielsweise in industriellen Design-, Produktions- und Kontrollprozessen. Aufwändige photogrammetrische Messsysteme in Verbindung mit Verfahren aus dem Bereich des Image Engineering erzielen hier Zuverlässigkeiten, die in automatischen Systemen zur hochgenauen Bestimmung der 3D-Koordinaten eine Relativgenauigkeiten in der Größenordnung von 1 : 100'000 der Objektdimension bei über 99,9 % korrekt gemess-

* Ein wissenschaftlicher Bericht über das Symposium von THOMAS KERSTEN ist gedruckt in PFG 7/2006, S. 574–575.

** Das Programm der Kommission V der ISPRS für den Zeitraum 2004–2008 wurde veröffentlicht in PFG 3/2005, S. 250–252.

senen Punkten erreichen. Aktive Kamera-Projektor-Systeme nach dem Triangulationsprinzip erlauben Oberflächenmessungen mit Messraten von mehr als einer Million Punkten pro Sekunde.

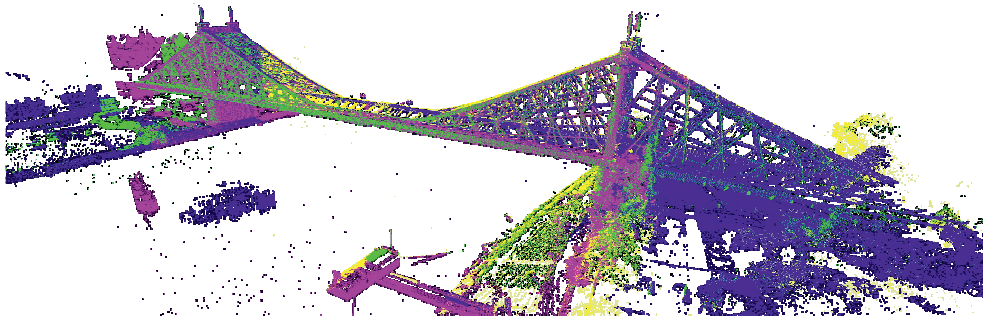
Laserscanner nach dem Triangulationsprinzip werden in industriellen Messsystemen seit etwa 20 Jahren eingesetzt. Mit der Marktreife terrestrischer Laserscanner, die auf Impulszeit- oder Phasenmessverfahren (oder Kombinationen aus beiden) basieren, hat sich die Reichweite und damit der Einsatzbereich von Laserscannern drastisch vergrößert. Aktuelle Modelle bieten Reichweiten bis zu über einem Kilometer und Messraten bis zu mehreren hunderttausend Punkten pro Sekunde. Damit ergeben sich nicht nur vielfältige neue Impulse für die Architekturphotogrammetrie und Denkmalaufnahme, sondern auch neue Anwendungsgebiete wie Facility Management oder die Dokumentation technischer Großanlagen. Laserscanner und Laserscannerdatenverarbeitung können als eine Brücke zwischen Photogrammetrie und Ingenieurgeodäsie angesehen werden, wobei das Instrumentendesign viele Komponenten konventioneller Tachymeter übernimmt, während die Verfahren zur Verarbeitung von Punktwolken – die gemessenen Punkte als ein Tiefenbild in einer TIN-Struktur betrachtend – von Bildverarbeitungs- und Bildanalyseverfahren abgeleitet sind. Die Fusion von Laserscannerdaten und Bilddaten hoch auflösender Kameras stellt hier ein naheliegendes und ergiebiges Forschungsfeld dar. Ebenfalls vergleichsweise neu sind 3D-Kameras, welche als monosensorielle bildsequenztaugliche Systeme simultan Grauwert- und Tiefeninformation aufnehmen. Weitere aktuelle Entwicklungen im Bereich der Sensorik finden sich in Form von Fish-eyesystemen zur Aufnahme hemisphärischer Bilder und von digitalen Panoramakameras zur Generierung von 360°-Panoramen mit Bildgrößen von bis zu einem Gigapixel, welche häufig unter dem Begriff 'omni-directional vision' zusammengefasst werden.

Viele Arbeiten in Kommission V haben die Generierung von Produkten der virtuel-

len Realität zum Ziel. Die Anwendungsgebiete reichen hier von der Kulturerbe-Dokumentation bis hin zur Computeranimation, Computerspielen und animierten Hollywoodfilmen. Zusätzlich zur Generierung texturierter 3D-Objektmodelle eröffnet die Aufnahme und Verarbeitung multi-okularer Bildsequenzen die vierte Dimension und damit vielfältige Anwendungen in der 3D-Bewegungsanalyse. Bildsequenzanalyse und Sensorfusion stellen auch die Grundlage des Einsatzes der Photogrammetrie in Bereichen wie Mobile Mapping und autonome Navigation dar. Als aktueller Massenmarkt ergibt sich hier die Realisierung von Fahrerassistenzsystemen, in deren Konzepten Kameras und Laserscanner viele Einsatzmöglichkeiten finden. Darüber hinaus eröffnet die Fusion von Sensorik, Sensordatenverarbeitung, CAD, GIS und Virtual Reality weite Forschungs- und Anwendungsfelder im Bereich Location Based Services und Augmented Reality.

Neben industriellen Anwendungen kann die bio-medizinische Bildanalyse als ein Anwendungsgebiet mit großem Wachstumspotential angesehen werden, auf dem die Photogrammetrie wertvolle Beiträge leisten kann. Neue Anwendungsgebiete finden sich hier auch in der Adaption photogrammetrischer Verfahren auf die Auswertung von Computertomographiedaten und in der Biometrie, wo photogrammetrische Verfahren in verschiedensten Bereichen – von der Rasterelektronenmikroskopie bis hin zur Automatisierung der Forstinventur – angewandt werden.

All diese Anwendungsbereiche haben das Profil der Photogrammetrie sehr stark verbreitert. Viele Arbeiten, die in den vergangenen Jahren als Forschungsprojekte auf Symposien der Kommission V vorgestellt wurden, haben danach den Weg in die Praxis gefunden. Sie haben, indem sie effiziente Lösungen für neuartige Messaufgaben anboten, der Photogrammetrie neue Märkte und den Photogrammetern neue Berufsfelder erschlossen. Dass dieser Prozess noch lange nicht abgeschlossen ist, dokumentierte auch die Ausstellung im Rahmen des Dresdner Symposiums, auf der 21 Firmen, darunter



Punktwolke der Elbe-Brücke „Blaues Wunder“ in Dresden-Loschwitz, aufgenommen mit dem Laserscanner Riegl Z420i.

eine ganze Reihe junger Neugründungen, ihre Produkte und Dienstleistungen vorstellten. ISPRS Commission V war immer auch eine Plattform für „Nicht-Photogrammeter“ – wissend, dass dieser Term im Grunde undefiniert ist und dass jeder, der sich mit der Extraktion quantitativer metrischer Information aus Bildern beschäftigt, ein Photogrammeter ist. Dies wird auch durch die Zusammensetzung der 250 Teilnehmer des Symposiums dokumentiert, welche sehr unterschiedliche Hintergründe aufwiesen. Die Absicht eines Symposiums, einen aktuellen Überblick über das Arbeitsgebiet zu geben und dabei Forscher, Entwickler, Anwender und Studierende aus verschiedenen Bereichen zusammenzubringen,

konnte damit umso müheloser erfüllt werden.

Diese Ausgabe der PFG enthält einige ausgewählte Beiträge aus dem Themenfeld der Kommission V. Sämtliche 120 Beiträge des Symposiums sind im www zugänglich unter <http://www.tu-dresden.de/ipf/symposium/proceedings> oder in Buchform zu beziehen von: GITC bv, P.O.Box 112, 8530 AC Lemmer, The Netherlands, Tel.: +31 (0) 514 56 18 54, Fax: +31 (0) 514 56 38 98, e-mail: mailbox@gitc.nl, Website: www.gitc.nl

HANS-GERD MAAS & DANILO SCHNEIDER,
Dresden

Automated Calibration of Fisheye Camera Systems and the Reduction of Chromatic Aberration

FRANK A. VAN DEN HEUVEL, RUUD VERWAAL & BART BEERS, Waardenburg/NL

Keywords: Camera calibration, fisheye camera, chromatic aberration, panorama, omni-directional imaging

Summary: This paper reports on the camera calibration procedure developed at CycloMedia and its modification for the reduction of chromatic aberration for further improvement of CycloMedia's main product: 360-degree panoramic images called Cycloramas. These Cycloramas are used for a variety of applications for a wide range of clients including municipalities, provinces, housing corporations, estate agents, and insurance companies.

For the production of Cycloramas CycloMedia has developed a car-mounted camera system that makes use of a fisheye lens. The adopted fisheye camera model and the procedure for automated camera calibration are presented in the paper. The calibration software performs a least-squares adjustment for the estimation of the camera parameters that describe the relation between the spatial direction of a ray and its projection in the image plane, i. e. the interior orientation.

The calibration procedure has been applied for each colour band of a test data set in order to reduce chromatic aberration. Colour artefacts were still present in the Cyclorama constructed using the per band calibration parameters. The conclusion is that the colour aberrations in the images under consideration cannot be reduced significantly with this approach and that not only lateral chromatic aberration plays a role. Furthermore, the nature of this chromatic aberration is to be studied in more detail in order to come to a final solution for its reduction.

Zusammenfassung: Automatische Kalibrierung von Fisheye-Kameras und Reduzierung der chromatischen Aberration. Der Artikel beschreibt ein Verfahren zur Kalibrierung von Fisheye-Kameras, das bei CycloMedia entwickelt wurde, sowie Untersuchung zur Verringerung der Effekte der chromatischen Aberration zur weiteren Verbesserung von CycloMedia's 360° Panorambildern. Diese sogenannten Cycloramas werden in der Praxis für ein Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, beispielsweise bei Gemeinden, Wohnungsbaugesellschaften, Immobilienmaklern und Versicherungsgesellschaften.

Für die Produktion von Cycloramas hat CycloMedia ein Kamerasystem mit einem Fisheye-Objektiv entwickelt. Das Kameramodell und das Verfahren für die automatisierte Kamerakalibrierung werden in diesem Artikel dargestellt. Die Software für die Kalibrierung benutzt eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung für die Schätzung der Kameraparameter, die die Relation zwischen der räumlichen Richtung eines Strahls und seiner Projektion in der Bildebene beschreiben. Das Kalibrierverfahren kann für jeden Farbkanal separat eingesetzt werden, um Effekte der chromatischen Abweichungen zu verringern. Die Resultate von Testmessungen zeigen allerdings, dass die Effekte der chromatischen Aberration mit diesem Ansatz nur partiell beseitigt werden können. Daher wird die chromatische Aberration inclusive ihrer nicht-radialen Anteile detaillierter betrachtet.

1 Introduction

1.1 Background

Boosted by the change from analogue to digital imaging, there is a growing interest

in panoramic imagery. This is not only due to the fact that tools for the creation of digital panoramas have become a commodity. The main advantage of panoramas, and especially of omni-directional or 360-degree panoramas, is found in the variety of their



Fig. 1: CycloMedia car with camera system.

applications. For many applications the image geometry plays a major role. Therefore, calibration of the camera-lens combination utilised for capturing the imagery is of utmost importance, especially for 3D measurement applications.

CycloMedia is a company that has omnidirectional panoramas, so-called Cycloramas, as its main product. The Cycloramas are created from two fisheye images with a field of view of 185 degree each. The camera is turned 180 degree between the two shots. The cycloramas are systematically acquired from all public roads with a standard interval of 10 meter. Furthermore, the imagery is geo-referenced and commonly delivered with tools for a seamless integration with the customers GIS-application. Currently, CycloMedia has 35 cars with a dedicated camera system mounted on the roof (Fig. 1). This system has been developed in-house, including the software for processing the

approximately 6 GB of image data daily delivered by each car.

A Cyclorama can contain image data for the full sphere stored in a panorama image of 4800×2400 pixels, corresponding to $360^\circ \times 180^\circ$. Thus, on the horizon, the angular resolution is 0.075° per pixel. For efficiency reasons the opening angle in vertical direction is reduced with 20% removing the major part of the car. An example is shown in Fig. 2. For each pixel the spatial orientation of the associated ray is known in the camera system and can be directly computed from its location in the image. Obtaining a panorama with this property from two partly overlapping fisheye images requires the camera-lens combination to be calibrated, i. e. the interior orientation is to be known. This calibration and its dependency on wavelength is the topic of this paper.

1.2 Previous work

In the last years there is a growing interest in panoramic imaging and photogrammetric use of panoramic imagery. This is reflected in the success of ISPRS workshops on this topic¹. Several papers have been published on the calibration of panoramic camera systems that make use of a fisheye lens. Some approaches are based on the use of straight line features (AMIRI PARIAN & GRÜN

¹ Website of the last workshop: <http://www2.informatik.hu-berlin.de/sv/pr/PanoramicPhotogrammetryWorkshop2005/>



Fig. 2: Sample Cyclorama.

2005), mostly a point field is used of which the 3D coordinates of the targets are known (KANNALA & BRANDT 2004, SCHNEIDER & SCHWALBE 2005, SCHWALBE 2005). The calibration method presented here is fully automated in the sense that it detects point features using image processing and automatically finds corresponding points between overlapping images. Spatial coordinates of the targets are not required. Furthermore, the calibration is automated which is the main improvement to the procedure as described in (VAN DEN HEUVEL et al. 2006).

Recently, some investigations into the elimination of lateral chromatic aberration have been conducted (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2005, LUHMANN 2006, SCHWALBE & MAAS 2006). These studies aim at image enhancement or photogrammetric measurement precision improvement. Only in (SCHWALBE & MAAS 2006) chromatic aberration of a fisheye camera system is considered. In all approaches a calibration procedure is applied separately for each colour band instead of only one band, usually green. Thus, a set of calibration parameters is determined for each colour band. In this paper we apply the same approach using the calibration method developed in-house.

1.3 Paper content

In section 2 the camera model adopted by CycloMedia is presented as well as the camera calibration procedure developed in-house. The precision of the calibration is demonstrated with an example. In section 3 the nature of chromatic aberration is explained and how we use our calibration procedure for determining lateral chromatic aberration. An example shows its limited applicability and how a significant reduction is obtained with a manual approach. The paper finishes with conclusions in section 4.

2 Automated camera calibration

2.1 The camera model

In (KANNALA & BRANDT 2004) an overview of different camera models is given. The per-

spective projection of a pinhole camera is described with:

$$r = f \tan \theta \quad (1)$$

where

r = distance image point – principal point

f = focal length

θ = angle between optical axis and incoming ray

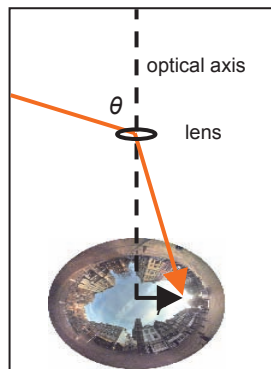


Fig. 3: Fisheye projection (schematic).

For a fisheye lens the straightforward so-called f -theta mapping (KUMLER & BAUER 2000) is most common and used here. This projection is also called equi-angular (SCHWALBE & MAAS 2006) and equidistance projection (KANNALA & BRANDT 2004):

$$r = f \cdot \theta \quad (2)$$

The parameters r and θ are depicted in Fig. 3. The design of the fisheye lens used here is approaching this relation within a tolerance of $\pm 6\%$, according to the specifications of the manufacturer. We model the deviations from the relation in (2) with a polynomial:

$$r = f \cdot \theta \cdot (1 + p_2\theta^2 + p_3\theta^3 + p_4\theta^4 + p_5\theta^5) \quad (3)$$

The number of parameters to be estimated (the order of the polynomial) can be set by the user. Next to the parameters f and p in (3), the camera model is complete with the parameters (x_p, y_p) representing the location

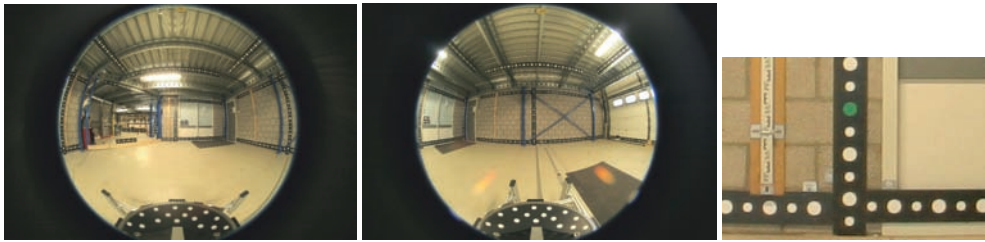


Fig. 4: Two sample calibration images and enlargement of center of left image.

of the principal point. For an image point with location (x, y) , r is computed as follows:

$$r = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} \quad (4)$$

To compute the spatial direction vector of a ray in space associated with an image point, an iterative procedure is applied based on equations (3) and (4) to find angle θ . The angle φ in the image plane found with:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y - y_p}{x - x_p}\right) \quad (5)$$

Equations (4) and (5) define the transformation from Cartesian to Polar co-ordinates in the image plane. The inverse of equation (3) represents the step to a spatial direction in spherical co-ordinates (φ, θ) .

2.2 The calibration procedure

Before the camera is calibrated the fisheye lens is mounted, focussed, and fixed in a specially designed frame in order to guarantee the long-term stability of the interior orientation. The procedure for the calibration of a fisheye camera consists of the following steps:

1. Acquisition of four images in a calibration room taken at 90° horizontal angles. The room contains approximately 500 circular targets, two sample images are shown in Fig. 4.
2. Automatic detection and localisation of the target images with sub-pixel precision.
3. Automated establishment of correspondence between the tie points of the four images.

4. Least-squares adjustment for camera parameter estimation. Apart from the camera parameters, a horizontal yaw angle is estimated for each image except one. Furthermore, one roll and one pitch parameter are estimated. The mathematical model consists of two observation equations per point measured: one for the horizontal and one for the vertical angle.

Target detection

For detection of point features several methods exist (VAN VLIET et al. 1988). We implemented a detection scheme based on finding closed contours. Making use of the green image band, gradients for each pixel are calculated in 4 directions (horizontal, vertical and 2 diagonals) using a Sobel kernel. Then the edge angle is defined along the smallest gradient of the set. The edge strength is the gradient value which is perpendicular to the smallest gradient value.

The next step is to check for each pixel whether it lies between 2 edges with opposite angles. If this is true in all 4 directions, the pixel is marked as a candidate for a target. Next, it is tested whether the edges of the candidate are connected to form a closed contour. The contour is found by following the edges. Then attributes for this candidate are gathered, like the location of the center of the contour, and the minimum and maximum distance of the center to the contour. Candidates where the difference of these distances exceed a threshold are rejected. Also other attributes are investigated, for instance the mean RGB values of the target, which are used to classify the targets as white or green. In the calibration room 40

of the 500 targets are green. Identification of these targets greatly simplifies the next step in the procedure: correspondence.

Correspondence and parameter estimation

For the identified green targets the spatial directions of the associated light rays is computed using rough approximations for the camera parameters and camera orientation angles. The accuracy of the computed horizontal and vertical angles is in the order of 0.1 radians. Targets in different images that have approximately the same spatial direction correspond to each other. Using the green targets only, the camera parameters are estimated with exception of the lens distortion, which cannot be estimated accurately from this sparse point field. With the resulting improved values of the camera parameters the spatial directions of all targets are computed with an accuracy better than 0.01 radians. Then for all targets correspondences are found in the same way as for the green targets. Again a least-squares adjustment is performed, now using all targets and estimating all camera parameters. Targets that show large residuals are removed one by one, until the largest residual drops below a threshold currently set to 1 pixel.

2.3 Example

The procedure above is regularly applied at CycloMedia for the calibration of her 35 camera systems. The results of the least-squares adjustment of a sample calibration are summarised in Tab. 1.

Roll and pitch are the angles of the camera system relative to the vertical rotation axis. The yaw of the first image is set to 270 degree. Only the green colour band of the imagery has been used. Note that more than the 500 artificial targets have been used, also other features than artificial targets are detected and help in improving the precision of the results. Furthermore, it is interesting to note the increase in standard deviation of the focal length f as a consequence of the introduction of the lens distortion par-

Tab. 1: Adjustment results: first step using green targets only, second step using all targets (formal standard deviation between brackets).

	1. Green targets only	2. All targets
# targets	34	698
σ estimated (pix)	0.18	0.24
Roll (deg)	-0.124 (0.011)	-0.123 (0.003)
Pitch (deg)	0.270 (0.050)	0.275 (0.010)
Yaw1 (deg)	90.101 (0.040)	90.107 (0.009)
Yaw2 (deg)	0.339 (0.037)	0.239 (0.008)
Yaw3 (deg)	180.209 (0.041)	180.213 (0.009)
x_p (pix)	1721.38 (0.92)	1721.70 (0.16)
y_p (pix)	1135.33 (0.96)	1134.87 (0.41)
f (pix/rad)	757.94 (0.15)	758.73 (0.60)
p_2	-	0.00017
p_3	-	-0.0419
p_4	-	0.0449
p_5	-	-0.0165

ameters p that show considerable correlation with the focal length f .

3 Chromatic aberration

3.1 What is chromatic aberration?

Chromatic aberrations are imperfections in the imaging properties of a lens due to the dependency of the refractive index of the lens material on the wavelength of the light. The two main types of chromatic aberrations are longitudinal (or axial) and lateral (or oblique) aberration (FIETE 2004) and (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2005).

Longitudinal aberration results in a focal length that is wavelength dependent. In other words, it is not possible to focus all wavelengths at one position of the image plane (Fig. 5). Lateral aberration results in a wavelength dependent radial displacement of an image point that, at least approximately, leads to a wavelength dependent image magnification (Fig. 6). In this paper we con-

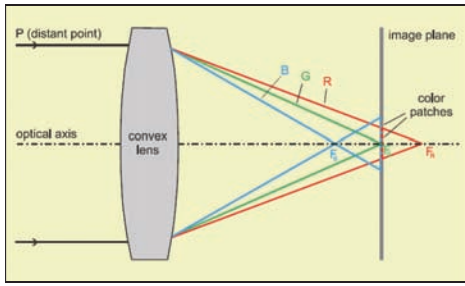


Fig. 5: Longitudinal aberration.

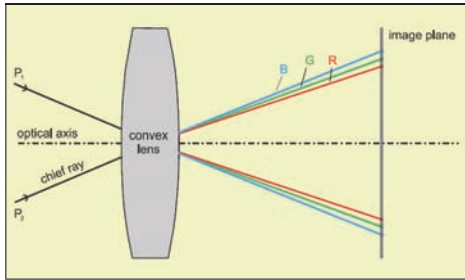


Fig. 6: Lateral aberration.

centrate on the latter type of aberration because it is the most prominent type in the imagery at hand.

3.2 Determining lateral chromatic aberration

As demonstrated in (KAUFMANN & LADSTÄDTER 2005), (SCHWALBE & MAAS 2005), and (HASTEDT et al. 2006), lateral chromatic aberration can be determined by applying a standard camera calibration to each of the three colour bands. The use of a separate set of camera calibration parameters for each colour band in further processing aims at the elimination of the visually apparent lateral aberration (Fig. 7; note that a calibration field with black targets on a white background was used and not the test field described in section 2). However, as shown in the example in the next section, this procedure was not successful for the imagery under consideration.

3.3 Example

Each colour band of four images with 90 degree horizontal angular separation has been measured with both the CycloMedia semi-automatic measurement tool and PhotoModeler's automatic target detection. The measurement results of 94, respectively

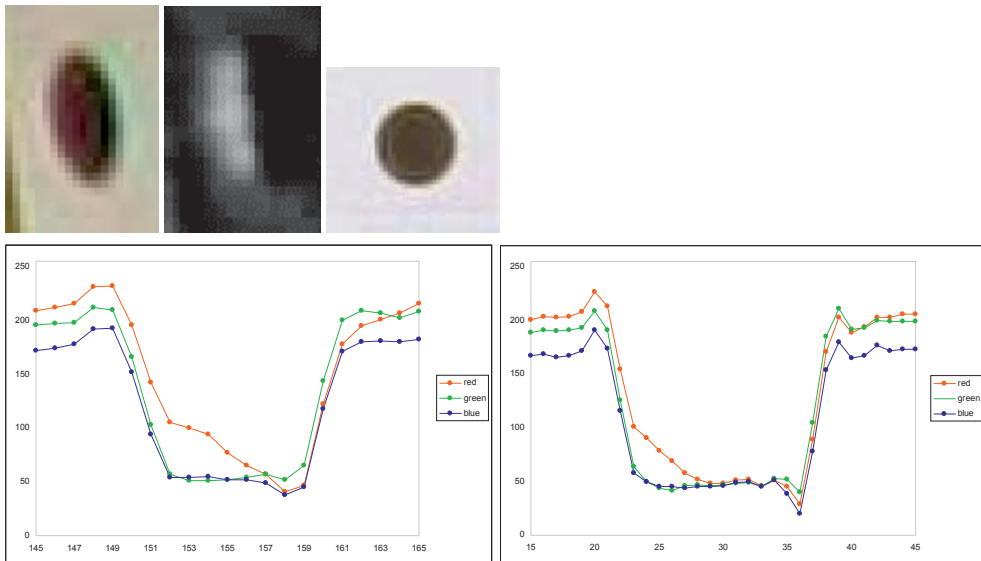


Fig. 7: Sample target (small) located close to the right image border, top-left: original, top-middle: red minus green band (stretched), top-right: target in image centre, bottom: RGB profile in column direction of a small and a large target.

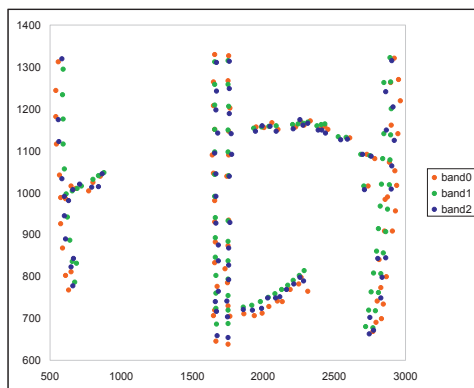


Fig. 8: Centroid point measurement; shift relative to green band1 is enlarged with a factor 100.

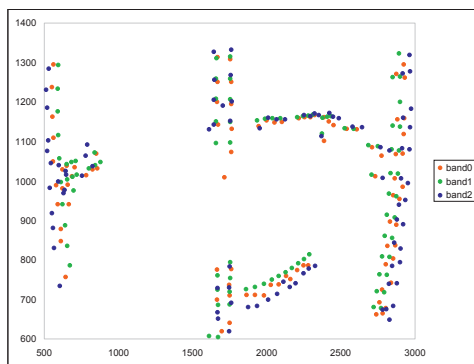


Fig. 9: Weighted centroid point measurement; shift relative to green band 1 is enlarged with a factor 100.



Fig. 10: Part of a spherical panorama after merging three colour bands processed with colour specific calibration parameters.

Tab. 2: Differences between colour bands for the two measurement methods.

Colour bands		Centroid x, y (pixel)	Weighted Centroid x, y (pixel)
Red – Green	RMS	0.31, 0.15	0.23, 0.16
	min.	-0.51, -0.49	-0.52, -0.87
	max.	0.64, 0.21	0.57, 0.15
	Δf (pix/rad)	+0.30	+0.20
Blue – Green	RMS	0.13, 0.10	0.53, 0.24
	min.	-0.32, -0.38	-1.08, -0.75
	max.	0.24, 0.24	0.79, 0.93
	Δf (pix/rad)	+0.03	+0.52

92 targets are shown in the figures below and the statistics in the change in focal length is computed with the lens distortion parameters fixed. The values used were estimated using the green band. It clearly shows the image magnification of the red and blue bands relative to green; at an angle of 90 degree between optical axis and incoming ray the largest mean shift is 0.82 pixel ($0.52 \cdot \pi/2$) found with the weighted centroid method in the blue band.

Six sets of camera parameters (one for each combination of three colours and two measurement methods) were estimated with CycloMedia’s adjustment software. The estimated standard deviation was close to 0.16 pixel for all adjustments. For each measurement method the RGB images were resampled to a spherical panorama, each with its own set of camera parameters. An example (based on the weighted centroid method) is shown in Fig. 10.

Comparison with a spherical panorama computed using a single set of calibration parameters based on the green band did not show any significant improvement. This is not surprising because the corrections applied are at the sub-pixel level, while the most visible colour aberration, i.e. the surplus of red in the black target (see Fig. 7),

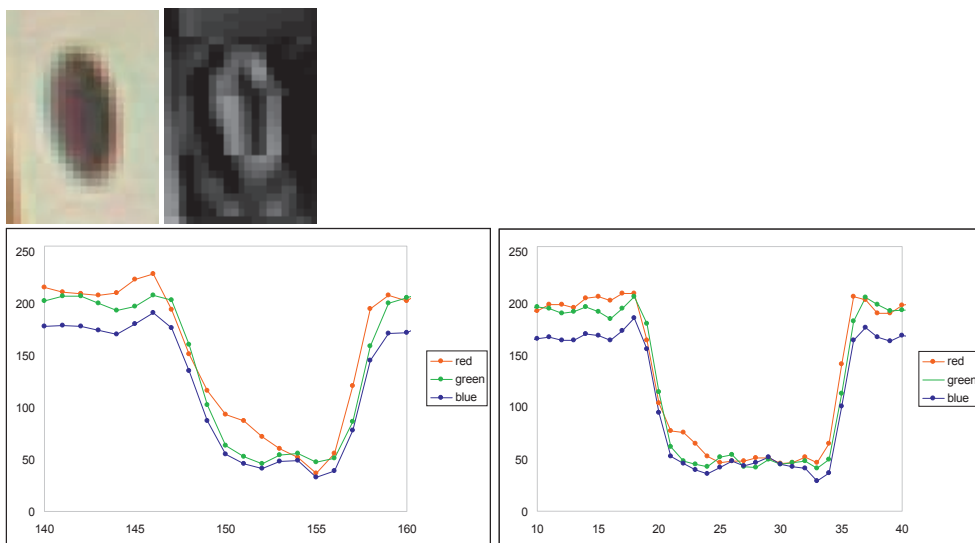


Fig. 11: Sample target (Fig. 7), top-left: after manual correction of chromatic aberration, top-right: red minus green band (stretched), bottom: RGB profile in column direction of a small and a large target.

spreads over 5 to 6 pixels in radial direction. This leads to the conclusion that for the visible colour aberration for the images under consideration, lateral chromatic aberration plays only a minor role.

3.4 Manual reduction of chromatic aberration

The question arises what causes the colour aberration apparent in Fig. 7. No scientific literature on the subject could be found, however, on the Internet a type of colour aberration called “purple fringing” is discussed (Wikipedia 2006). There is no agreement on the exact cause, but this colour aberration is frequently found in digital photography, especially with wide angle lenses, at large apertures, in the corners of the image (radial aberration), and in high contrast areas. Several image processing packages allow to manually correct for chromatic aberration. Commonly these packages allow to manually set a magnification for the red and blue colour band in order to improve the fit with the unaltered green band. We have tested Picture Window Pro 4.0. The

results on the targets of Fig. 7 are shown in Fig. 11.

A significant visual improvement has been obtained. However, from Fig. 11 it is clear that this does not fully correct the aberration. For a final solution more research into the nature of the problem is required.

4 Conclusions

The paper presents the camera calibration procedure developed by CycloMedia that ensures the geometric quality of her spherical panoramas called Cycloramas. The least-squares adjustment involved in the calibration shows the semi-automatic target measurement to be accurate to the sub-pixel level with 0.24 pixel estimated standard deviation. This implies that the angular precision of well identifiable targets measured in a Cyclorama is 0.018° or 3 mm at 10 m.

The calibration procedure has been applied for an estimation of a set of interior orientation parameters per colour band aiming at elimination of lateral chromatic aberration, firstly to improve the imagery visually, and secondly for improving the po-

tential measurement precision. This approach was not successful because the corrections found were below one pixel while the visible chromatic aberration stretches over more than 5 pixels. With adjusting the magnification of the red and blue band manually it was possible to improve the visual appearance of the imagery significantly, however, more research is needed into the nature of the problem in order to develop a final and automated solution.

References

- AMIRI PARIAN, J. & GRUEN, A., 2005: Panoramic Camera Calibration Using 3D Straight Lines. – Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, part 5/W8. ISPRS “Panoramic Photogrammetry Workshop”, Berlin, Germany, 24–25 February 2005.
- FIETE, R.D., 2004: Lens aberrations. – In: MC GLONE, J. CHRIS (ed.): Manual of Photogrammetry. Fifth edition, Section 4.1.6. – American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), ISBN 1-57083-071-1, 346–349.
- VAN DEN HEUVEL, F.A., VERWAAL, R. & BEERS, B., 2006: Calibration of fisheye camera systems and the Reduction of chromatic aberration. – Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, part 5. ISPRS symposium commission V, Dresden, Germany, September 2006.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLEBURG, W., 2006: Nutzung von RGB-Farbkanälen für die hochgenaue 3D-Punktmessung. – In: LUHMANN/MÜLLER (ed.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- KANNALA, J. & BRANDT, S., 2004: A generic camera calibration method for fish-eye lenses. – Proceedings 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004), 10–13.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R., 2005: Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration. – Proceedings of the XX International Symposium CIPA 2005, 26 September – 1 October 2005, Turin, Italy, Vol. 1, 403–408.
- KUMLER, J.J. & BAUER, M., 2000: Fisheye lens designs and their relative performance. – Proceedings of the Lens and Optical System Design and Engineering Conference of the SPIE Annual Meeting.
- LUHMANN, T., 2006: High precision photogrammetry using RGB colour information. – Proceedings ‘Coordinate Metrology Systems Conference CMSC2006’, July 2006.
- SCHNEIDER, D. & SCHWALBE, E., 2005: Design and testing of mathematical models for a full-spherical camera on the basis of a rotating linear array sensor and a fisheye lens. – In: GRÜN, A. & KAHMEN, H. (Eds.): Proceedings of ‘Optical 3D Measurement Techniques VII’, Vol. 1, 245–254.
- SCHWALBE, E., 2005: Geometric modeling and calibration of fisheye lens camera systems. – Proceedings 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36, Part 5/W8.
- SCHWALBE, E. & MAAS, H.-G., 2006: Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Abberation bei der Modellierung und Kalibrierung von Fisheye-Aufnahmesysteme. – In: LUHMANN (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. – Wichmann Verlag, Heidelberg.
- VAN VLIET, L.J., YOUNG, I.T. & BECKERS, A.L.D., 1988: An edge detection model based on non-linear Laplace filtering. – In: GELSEMA, E.S. & KANAL, L.N. (eds.): Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 63–73.
- WIKIPEDIA, 2006: Purple Fringing. http://en.wikipedia.org/wiki/Purple_fringing, Accessed: January 2007.

Addresses of the authors:

Dr. ir. FRANK A. VAN DEN HEUVEL
 Ir. RUUD VERWAAL
 Dr. ir. BART BEERS
 CycloMedia Technology B.V., P.O. box 68
 NL-4180 BB Waardenburg
 Tel.: +31-418-65-3972, Fax: +31-418-65-3314
 Internet: www.cyclomedia.com
 e-mail: {FvandenHeuvel, RVerwaal,
 BBeers}@cyclomedia.nl

Manuskript eingereicht: Januar 2007
 Angenommen: Januar 2007

3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences

HELMUT MAYER, Neubiberg

Keywords: Photogrammetry, 3D reconstruction, auto-calibration, markerless orientation, visualization

Summary: This paper focuses on the fully automatic generation of basic ingredients for high quality visualizations of urban areas characterized by vertical facade planes. We show that uncalibrated wide-baseline image sequences without using markers or ground control suffice for this task. At the core of our algorithms are least-squares matching, projective geometry based reconstruction, robust estimation based on random sample consensus – RANSAC, direct auto-calibration, projective and Euclidean bundle adjustment, plane to plane homographies, as well as the robust estimation of image mosaics. Results for the Hradschin in Prague, Czechia, Plaza Real in Barcelona, Spain, and the Zwinger in Dresden show the potential and shortcomings of the employed algorithms.

Zusammenfassung: 3D Rekonstruktion und Visualisierung von städtischen Szenen auf der Grundlage von unkalibrierten Bildsequenzen mit großer Basis. Dieses Papier zielt auf die vollautomatische Generierung von grundlegenden Bestandteilen für hochqualitative Visualisierungen von städtischen, durch vertikale Fassadenebenen charakterisierte Szenen ab. Es wird gezeigt, dass für diese Aufgabe unkalibrierte Bildsequenzen mit großer Basis ohne Verwendung von Messmarken oder Passpunkten ausreichen. Den Kern der vorgestellten Algorithmen bilden kleinste-Quadrate-Zuordnung, Rekonstruktion auf Grundlage projektiver Geometrie, robuste Schätzung basierend auf random sample consensus – RANSAC, direkte auto-Kalibrierung, projektive und euklidische Bündelgleichung, Ebene-zu-Ebene Homographien, sowie die robuste Schätzung von Bildmosaikern. Ergebnisse für den Hradschin in Prag, Tschechien, den Plaza Real in Barcelona, Spanien und den Zwinger in Dresden zeigen die Möglichkeiten aber auch die Defizite der verwendeten Algorithmen.

1 Introduction

Microsoft recently announced its Photosynth project (<http://labs.live.com/photosynth/>). Right now users can only view colored Euclidean three-dimensional (3D) point sets and images registered to average planes of 3D scenes. Yet, the project aims at that the user can include her/his photos of an uncalibrated camera, orient them in relation to the given 3D point sets and possibly also extend the 3D point sets. We are following a similar trail, but we restrict our-

selves to high precision 3D points and vertical planes in an urban setting.

Recent years have seen a couple of approaches for the fully automatic generation of 3D Euclidean models from uncalibrated image sequences, among the most advanced of which is (POLLEFEYS et al. 2004). The approaches usually consist of the robust estimation of a projective reconstruction and n-fold correspondences followed by auto-calibration and possibly dense depth estimation, all usually restricted to small images with a short baseline, e. g., from a video camera.

Opposed to this, we aim at applications where higher image resolutions in the range of several Megapixels are given as input, obtained, e. g., from consumer digital cameras costing only several hundred Euros. Because of the lower frame rates (one image can usually be taken on a sustained basis only about every second on average) and higher data volumes per image it is natural to take images with a wider baseline making the matching of points between the images severely more difficult. We show how employing high precision to become more reliable it is possible to obtain 3D reconstructions of rather difficult scenes with many occlusions and partly close to no 3D structure.

The focus of this paper is on urban scenes. Therefore, it is reasonable to use at least partly planes for the modeling and visualization of the scenes, particularly the vertical planes of the facades. As larger parts of our scenes are assumed to be captured in at least three images, it becomes on one hand necessary to fuse the information from the individual images on the detected planes. Yet, on the other hand, it gives us the opportunity, to separate by means of consensus between pixels taken from different images the information on the plane from off-plane information. This allows us to generate a “cleaned” version of the image on the plane without many of the occlusions in the individual images. This part has been inspired by (BÖHM 2004). Yet, opposed to the latter, we fully automatically and robustly generate the planes and from them the two-dimensional (2D) homographies, i. e., plane to plane mappings. We also integrate the planes into our 3D models and generate visualizations from them.

Impressive results in terms of visualization of urban scenes have been presented by DEBEVEC et al. (1996) by taking the image from the (real) camera closest to the current (virtual) viewpoint. Yet, the 3D model employed has been generated manually. Then, there is work for architectural scenes which goes far beyond what we are presenting here in the sense that much more knowledge about the structures and regularities of urban scenes is used. The most sophisticated

example is probably (DICK et al. 2004) employing a statistical generative model based on Markov Chain Monte Carlo (MCMC) sampling. Closer to our work as it is more geometry-based is (WERNER & ZISSERMAN 2002). Yet, compared to our work they employ perpendicular vanishing points for auto-calibration and 3D reasoning which restricts the work to scenes with three perpendicular main directions. They have also only shown results for image triplets.

In the remainder of this paper, we first present our approach for 3D reconstruction from wide-baseline image sequences (cf. Section 2). The obtained 3D Euclidean model is the basis for deriving vertical facade planes. For them facade images at least partly “cleaned” from occlusions are computed by means of median or consensus between the pixels projected onto the planes from different camera positions (cf. Section 3). In Section 4 we present additional results and we end up with conclusions.

2 3D Reconstruction

Our approach aims at wide-baseline image sequences made up of images of several Megapixels. We make the following assumptions for 3D reconstruction:

- The camera constant (principal distance) is constant. Yet this is not as restrictive as it may sound because we found that the influence of auto-focusing that one cannot switch off for some cameras we use can mostly be neglected for the distances typical for urban applications. We also assume that the principal point is close to the image center. This is the case for practically all digital cameras, and would only not hold if parts of images were used.
- The images are expected in the form of a sequence with at least three-fold overlap for all images.

Our basic idea to obtain a reliable result is to strive for a very high precision in the range of 0.05 to 0.3 pixels by means of least-squares matching and bundle adjustment. If the value is higher or lower depends in first

instance on scene geometry and geometrical quality/stability of the camera, but in second instance also on lighting conditions, etc. The overall reasoning is that it is (extremely) unlikely that a larger number of non-homologous points conspire to achieve a highly precise result by chance.

Based on this idea we start using Förstner points (FÖRSTNER & GÜLCH 1987). They are matched via cross-correlation. In color images the coefficient for the channel where the variance is maximum is taken. To deal with images rotated around the axis of the camera, we rotate each patch according to the direction obtained for the Förstner points. From the points accepted by matching we compute a histogram of the relative directions between the matched points. The angle for which the histogram is maximum is used to rotate all patches of the second image according to the reference image. Point pairs checked via correlation are refined via least-squares matching with an affine geometrical model. The latter is also used for three- and more-fold images. In all cases we compute the complete covariance information.

The highly precise points are the basis for a projective reconstruction employing fundamental matrices F and trifocal tensors T (HARTLEY & ZISSERMAN 2003). If calibration information is available, we use (NISTÉR 2004) to determine the Euclidean 3D structure for image pairs. As in spite of our efforts to obtain reliable matches we obtain partly less than 10% of correct homologous points for difficult scenes, we employ Random Sample Consensus – RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) for the estimation of F and T . Because we do not only have rather low numbers of correct matches (inliers), but as these inliers are also partly very unevenly distributed over the image and thus not all of them lead to a correct model, i. e., a model representing all inliers with the inherent, yet unknown achievable geometric accuracy, we employ a variant of the locally optimized RANSAC scheme of CHUM et al. (2003). While they take a larger number, i. e., 50%, of random samples from the maximum set of inliers derived at a certain stage to derive

an improved estimate, we take the whole maximum set and employ robust bundle adjustment (HARTLEY & ZISSERMAN 2003, MIKHAIL et al. 2001). The latter is done two times always using the outcome of the bundle adjustment to derive new sets of inliers.

The employed bundle adjustment is suitable for the projective as well as the Euclidean case. We model radial distortion with a quadratic and a quartic term. Bundle adjustment takes into account the full covariance information derived by least-squares matching. We estimate the precision of the residuals and use them in two ways to make the adjustment robust: First, we reweight the observations based on the ratio of the size of the residual and its variance. Second, after convergence we throw out all points with a ratio beyond three, a value found empirically.

As our images are in the range of several up to possibly tens of Megapixels, it is important to initially constrain the search space for matching. Yet, because we do not want to constrain the user more than given in the assumptions at the begin of the section, we cannot assume that the movement is only vertically or horizontally or that it is even in a certain range. Particularly for urban scenes with very close and far away objects disparities can be rather large, in the extreme case the image size. We thus take as initial search space the full image, but reduce the image in a pyramid and do the first search on a pyramid level with a size of approximately 100×100 pixels. Here, full search can be done efficiently. Matching and projective reconstruction lead to fundamental matrices and thus epipolar lines on the highest level, restricting the search on the next level considerably. Once trifocal tensors have been determined, the search space becomes a small area in the third image. Trifocal tensors are computed for the second highest level in all cases and additionally on the third highest level if the image size exceeds one Megapixel.

To orient whole sequences, we link triplets based on 3D homographies computed from projection matrices for images common be-



Fig. 1: Six images of the Hradshin in Prague, Czechia.



Fig. 2: 3D points, colored according to the pixels, and cameras (green pyramids, the tip symbolizing the projection center and the base giving the direction of the camera) derived from the images given in Fig. 1.

tween triplets. (E. g., the triplets (1,2,3) and (2,3,4) have the images 2 and 3 in common.) Additionally, we project already known 3D points into the newly linked image to generate $i + 1$ -fold points, with i being the current number of images a point is visible in. After these steps we bundle adjust the sequence. Once all projection matrices and 3D points have been computed, we track the points generated on the second or third highest level of the pyramid down to the original resolution again via least-squares matching in all images.

If no calibration information is given, we directly auto-calibrate the camera employing the approach proposed by POLLEFEYS et al. (2004). It uses only very weak and general information about cameras to constrain the solution, e. g., that the principal point corresponds to the center of the image and that the camera constant is somewhere in-between one-third and three. Auto-calibration is done only once a high quality projective reconstruction has been obtained on the original resolution via projective bundle ad-

justment. We found that the latter is mandatory, as lower precisions lead to incoherent implicit calibrations of the projective reconstructions, often leading to unacceptable results. Finally, we employ Euclidean bundle adjustment to obtain a highly-precise calibrated 3D model consisting of points and projection matrices including full covariance information.

If the image sequence consists of a loop, i. e., the first and the last images are the same, we extend the end of the sequence up to the second image. By this means, we get a 3D overlap between the begin and the end which we use to close the loop, thus avoiding a gap between last and first image and evenly distributing the deformation of the whole sequence by error propagation.

An example is given in Fig. 1 and 2 showing a part of the Hradshin in Prague, Czechia. The back-projection error of the calibrated bundle is $\sigma_0 = 0.16$ pixels in the given 2 Megapixel images. Several hundred six-fold points have been computed. One can see that the right angles in the center of

the building have been derived very accurately.

3 Planes and Images on Planes

We assume that an urban scene consists of a considerable number of vertical lines. We can thus orient the 3D Euclidean model vertically based on the vertical vanishing point derived from the vertical lines and the given calibration information. The vertical vanishing point is robustly detected again using RANSAC, the user only providing the information if the camera has been very approximately held horizontally or vertically, thus, avoiding to mix up the vertical with a horizontal vanishing point. After detecting the vanishing point, we polish it by means of least-squares adjustment. To make the computation of the vertical direction more robust, we compute vanishing points for a couple, usually if possible five images, derive from all of them the vertical direction of the whole model employing the known rotation of the individual camera, and then finally take the medians in x - and y -direction as the vertical direction.

The vertically oriented model is the basis for the determination of vertical facade planes once again using RANSAC. For this step one threshold defining the maximum allowed distance of points from the plane has to be given by the user. This is due to the fact that we could determine meaningful thresholds for approximating planes from the covariance matrices via model selection, but this would only take into account the measurement accuracy and not the semantically important construction precision of facade planes.

To make it more robust and precise, we employ the covariance information of the 3D points computed by bundle adjustment by not counting the number of inliers as for standard RANSAC, but testing the distances to a hypothesized plane based on the geometric robust information criterion – GRIC (TORR 1997). Additionally, we check if the planes are at least approximately vertical and we allow only a limited overlap of about five percent between planes. The latter

is needed, because of points situated on intersection lines between planes.

From the parameters for the facade planes as well as the projection matrices we compute homographies between the planes and the images. A mapping by a homography H between homologous points x and x' in homogeneous coordinates on a given plane and the image plane of a camera, respectively, is given by

$$x' = Hx. \quad (1)$$

The camera is parameterized as

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{pmatrix} \quad (2)$$

and the plane, the points lie on, with the four-vector

$$\pi = (\mathbf{n}^T, d)^T. \quad (3)$$

We parameterize the plane in 2D by setting that component of the first three components of the plane with maximum value to zero. By this means we obtain the mapping in the direction closest to the normal. We index the maximum value with m and the other two with j and k . Then H is determined as ($i \in 1, 2, 3$)

$$H = \begin{pmatrix} H_{i1} \\ H_{i2} \\ H_{i3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{ij} - \pi_j \cdot P_{im} / \pi_m \\ P_{ik} - \pi_k \cdot P_{im} / \pi_m \\ P_{i4} - \pi_4 \cdot P_{im} / \pi_m \end{pmatrix}. \quad (4)$$

For the actual mapping of images to a plane one needs to know from which images a plane can be seen. For it, the information is employed, which 3D points have led to a particular plane, as for the 3D points it is known from which images they were derived. The plane is thought to be visible from the union of the sets of images of all 3D points belonging to a plane. We compute an average image as well as the bias in brightness for each image in comparison to it, also accounting for radial distortion.

The final step is the generation of facade images if possible “cleaned” from artifacts generated by occlusions. The basic informa-

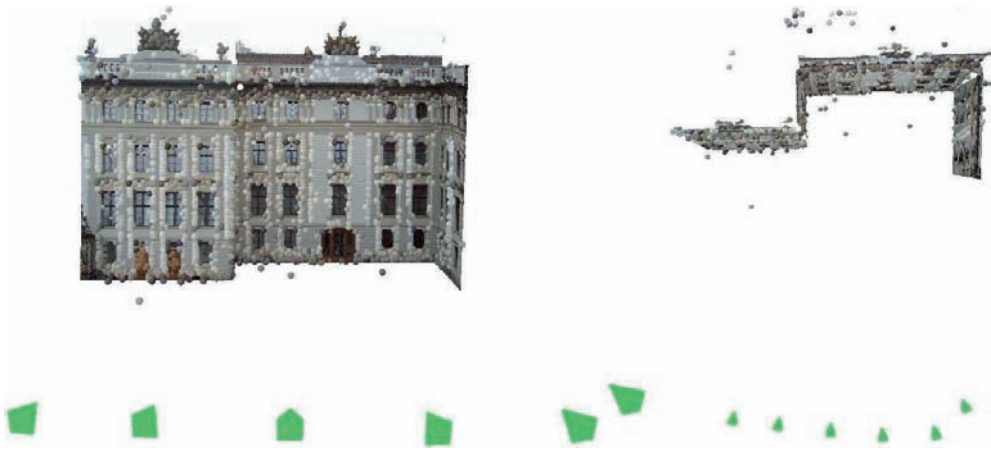


Fig. 3: 3D points, colored according to the pixels, facade planes and cameras (green pyramids; cf. Fig. 2) derived from the images given in Fig. 1 and the 3D model in Fig. 2.



Fig. 4: Facade image derived from the six images given in Fig. 1 – left: average; center: median; right: consensus.

tion are the projected images normalized via the determined biases in brightness. The cleaning is done by two means, first by sorting the (gray- or color) values and taking the median and second by utilizing the basic idea of BÖHM (2004). The latter consists in determining an optimum value by means of the consensus between the values for a particular pixel. As BÖHM (2004) we do not randomly select the values as in RANSAC, but we take the value for a pixel for each image it can be seen from as estimate and then take as the inliers all values which consent with

it. The final result is the average of the inliers.

Results for our running example are given in Fig. 3 and 4. From the former one can see that the planes nicely fit to the points. The latter shows the advantages of median and consensus over simple averaging where, e. g., the flag pole at the right hand side is shown several times as a ghost image. The different characteristics of median and consensus are shown more in detail in the additional example in the next section.

4 Additional Results

We took a set of 29 uncalibrated images of Plaza Real in Barcelona, Spain with a Sony P 100 5 Megapixel camera. The basic idea was to walk around the fountain in the center of Plaza Real. A 3D model is computed (cf. Fig. 5) with $\sigma_0 = 0.18$ pixels after bundle adjustment. As we did not mark our positions when taking the images, the circle around the fountain is more a spiral. Opposed to previous results published in MAYER, we now could close the loop. The right angles have been determined very well in spite of the relatively large areas where we could not match due to occlusions mostly by the palm trees.

The facade image for the left facade in Fig. 5 derived from the ten images shown in Fig. 6 is given in Fig. 7. First, the average image shown at the bottom makes clear by means of the circular streaks how large the influence of radial distortion is for some of the images. (Please note that the images with the largest distortions look onto the plane

from the side, strongly amplifying the effect.) Overall, one can see that the average is not acceptable. This is due to the ghost images of the occluding objects, but also because of a not precise enough estimation of the bias of the brightness between the average image and the individual images. The latter stems from the unmodeled occlusions which lead to estimating wrong biases from pixels representing different objects. The latter problem could only be dealt with by robustly recursively estimating biases and occluding objects, which is non-trivial and on our agenda for further research.

Opposed to the average, the median and the consensus do much better, even though both are not able to penetrate the vegetation in many instances. If the vegetation is dense, this is not possible at all, but the problem could partly be alleviated by means of more images from different positions. Concerning median and consensus, there are only some, yet characteristic differences. One of the largest can be seen left of the center. The first leaf of the palm tree is mostly eliminated by

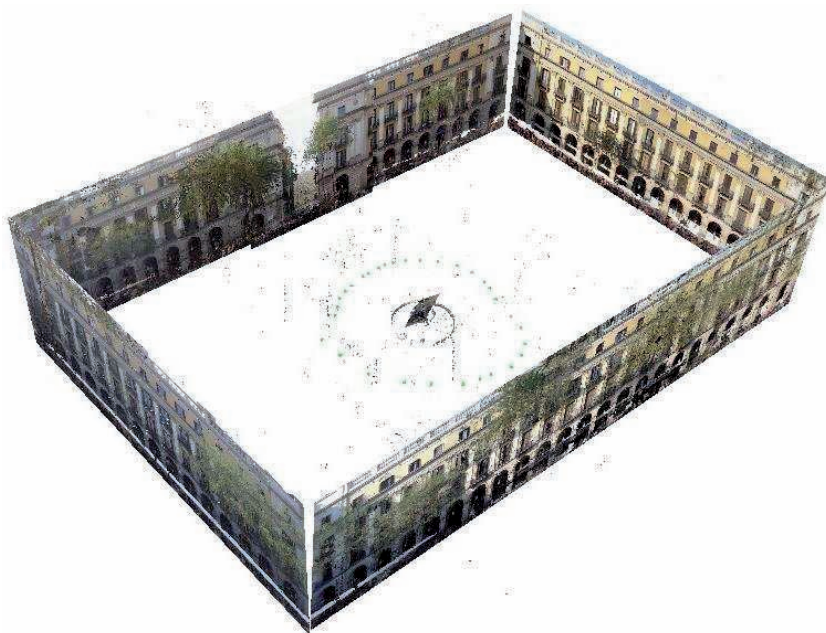


Fig. 5: 3D points, facade planes, and cameras (medium sized circle around the fountain in the center) derived from nothing but uncalibrated images, ten of them showing the facade on the left hand side given in Fig. 6.

the consensus, but not by the median, as the former has a weaker basic assumption and can thus deal with more than 50% of outliers.

In Fig. 8 an additional example is presented generated from ninety images of the Zwinger in Dresden. It shows shortcomings

of using only planes for modeling the surfaces. The left and the right part consist of curved surfaces and the gates on the left and the right side are highly 3D structured and thus cannot be adequately modeled by planes.



Fig. 6: Ten images of Plaza Real in Barcelona from which the facade images given in Fig. 7 have been derived.

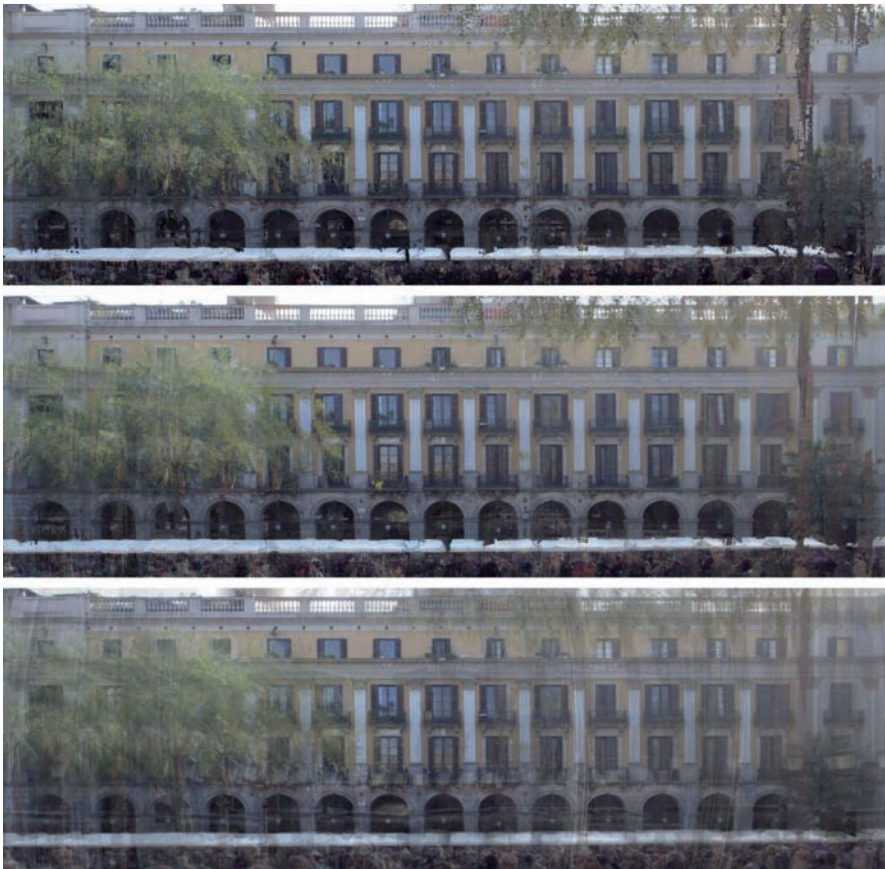


Fig. 7: Facade image derived from the ten images given in Fig. 6 – top: consensus; center: median; bottom: average.

5 Conclusions

We have shown how combining projective reconstruction with robust techniques and bundle adjustment propagating covariance information can be used to fully automatically generate textured 3D models of urban scenes from nothing but (possibly uncalibrated) perspective images also for larger

numbers of wide-baseline images. These still incomplete 3D models can be the basis for high quality visualizations. Though, at the moment lots of additional manual efforts are needed for a practically satisfying outcome.

One way to proceed is to add detailed geometry by employing semantic information, e. g., by 3D extraction of the win-

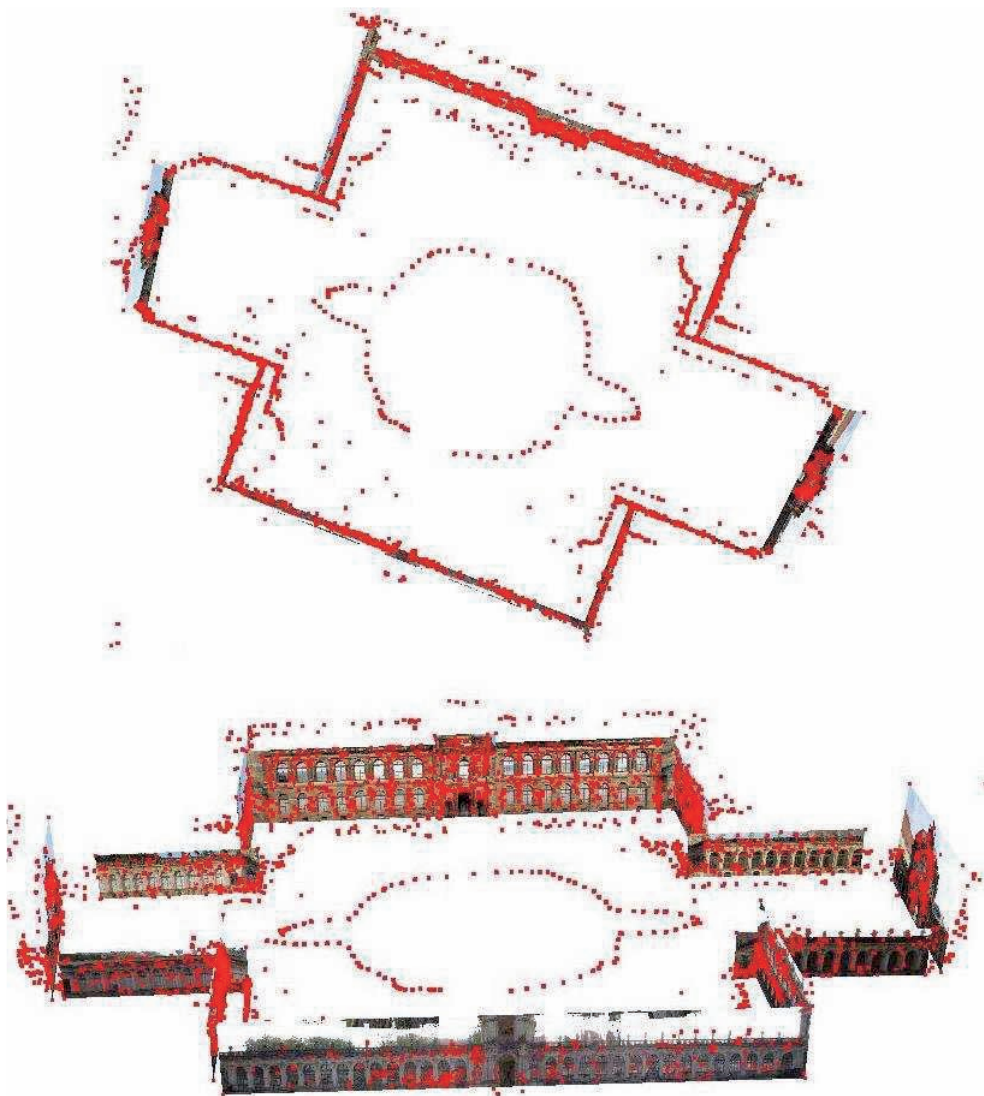


Fig. 8: 3D model of Zwinger, Dresden: 3D points and cameras in red – the 90 cameras form a circle with two bulges on the left and the right side in the center. Top: view from top, bottom: view from the side.

dows on the facades (MAYER & REZNIK 2006).

We have experimented with plane sweeping (WERNER & ZISSERMAN 2002), here based on least-squares, to improve the plane parameters derived by RANSAC, but found that for stronger occlusions it is difficult to estimate the bias in brightness. Robust estimation combining, e. g., consensus, with bias determination could be a way to proceed.

We also want to make better use of the information of the planes, e. g., by extending and intersecting planes and checking the newly created planes via homographies, thereby closing gaps. We plan to employ the intersection lines to improve the determination of the vertical direction. Finally, we have started to experiment with the approach by SCHNABEL et al. (2006), which allows to model point clouds by additional shapes such as cylinders, spheres, and cones.

References

- BÖHM, J., 2004: Multi Image Fusion for Occlusion-Free Façade Texturing. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume (35) B5, 867–872.
- CHUM, O., MATAS, J. & KITTLER, J., 2003: Locally Optimized RANSAC. – Pattern Recognition – DAGM 2003, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 249–256.
- DEBEVEC, P., TAYLOR, C. & MALIK, J., 1996: Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry- and Image-Based Approach. – Technical Report CSD-96-893, Computer Science Division, University of California at Berkeley, Berkeley, USA.
- DICK, A., TORR, P. & CIPOLLA, R., 2004: Modelling and Interpretation of Architecture from Several Images. – International Journal of Computer Vision 60 (2): 111–134.
- FISCHLER, M. & BOLLES, R., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. – Communications of the ACM 24 (6): 381–395.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features. – ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, 281–305.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2003: Multiple View Geometry in Computer Vision. – Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- MAYER, H., 2006: 3D Reconstruction and Visualization of Urban Scenes from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume (36) 5, 207–212.
- MAYER, H. & REZNIK, S., 2006: MCMC Linked with Implicit Shape Models and Plane Sweeping for 3D Building Façade Interpretation in Image Sequences. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume (36) 3, 130–135.
- MIKHAIL, E., BETHEL, J. & MCGLONE, J., 2001: Introduction to Modern Photogrammetry. – John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.
- NISTÉR, D., 2004: An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 26 (6): 756–770.
- POLLEFEYS, M., VAN GOOL, L., VERGAUWEN, M., VERBIEST, F., CORNELIS, K. & TOPS, J., 2004: Visual Modeling with a Hand-Held Camera. – International Journal of Computer Vision 59 (3): 207–232.
- SCHNABEL, R., WAHL, R. & KLEIN, R., 2006: Shape detection in point clouds, Technical Report CG-2006-2, Universität Bonn.
- TORR, P., 1997: An Assessment of Information Criteria for Motion Model Selection. – Computer Vision and Pattern Recognition, 47–53.
- WERNER, T. & ZISSERMAN, A., 2002: New Techniques for Automated Architectural Reconstruction from Photographs. – Seventh European Conference on Computer Vision, Volume II, 541–555.

Address of the author:

Prof. Dr.-Ing. HELMUT MAYER, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, D-85577 Neubiberg, Tel.: +49-89-6004-3429, Fax: +49-89-6004-4090, e-mail: Helmut.Mayer@unibw.de

Manuskript eingereicht: Januar 2007

Angenommen: Januar 2007

An Optical Triangulation Method for Height Measurements on Instationary Water Surfaces

CHRISTIAN MULSOW, MATTHIAS SCHULZE & PATRICK WESTFELD, Dresden

Keywords: Close range Photogrammetry, Hydrology, triangulation, water surfaces, laser light sheet

Zusammenfassung: *Eine Methode zur optischen Triangulation für die Bestimmung von Oberflächenprofilen von Flüssigkeiten.* Die Bestimmung von Oberflächenprofilen von Flüssigkeiten ist eine Grundaufgabe in der experimentellen Hydromechanik. Die spiegelnden Eigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen verhindern jedoch die Anwendung herkömmlicher Oberflächemessverfahren. In der Oberflächenmesstechnik weit verbreitet sind optische Triangulationsverfahren, welche auf der Projektion einer Laserlichtschicht auf ein Objekt und der Beobachtung der resultierenden Laserlinie basieren. Diese Systeme erlauben eine schnelle sowie genaue Erfassung von Oberflächengeometrien mit einem relativ geringen Hard- und Software-Aufwand.

Die Möglichkeit der Adaption des Grundprinzips innerhalb eines Messsystems für die Bestimmung von Wasseroberflächen sollten in einem Projekt am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Dresden untersucht werden. Als Projektpartner fungierte die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), einem potentiellen Anwender derartiger Systeme. Als zusätzliche Anforderung wurde die Erfassung von dynamischen Veränderungen der Objektfläche benannt, da das zu entwickelnde System von der BAW zur Messung von bewegten Wasseroberflächen eingesetzt werden soll.

Als Messprinzip wurde eine Weiterentwicklung der optischen Triangulation unter Ausnutzung der Reflektionseigenschaften von Flüssigkeitsoberflächen angewandt. Dabei wird eine Laserlichtschicht auf eine Flüssigkeitsoberfläche gerichtet und nach der Reflektion an der Oberfläche auf zwei hinter einander angeordnete senkrechte Ebenen projiziert. Die projizierten Laserlinien werden durch eine Kamera beobachtet und anschließend detektiert. Die erkannten Linien können subpixelgenau in den Aufnahmen gemessen und die Werte dann durch ein am Institut entwi-

Summary: Optical triangulation methods based on a laser light sheet and digital camera are used as a surface measurement technique in a wide range of applications. They allow a fast and accurate determination of surface profiles, while consisting of relatively simple hardware and software configurations. The definition and analysis of surface profiles on reflective materials plays an important roll in experimental hydromechanics. The Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (IPF) at Dresden University of Technology, in cooperation with the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), initialised a project to develop and implement a method to measure water-surface profiles based on laser light sheet projection. As the developed system will be installed and used in a laboratory to capture moving water surfaces, a registration and recording of dynamic phenomena is requested additionally.

The study presented in the paper describes a further development of the optical triangulation based on laser light by using reflection properties of mirror-like surfaces. For this task, a laser sheet is projected onto the water surface and reflected onto a set of two vertical planes, which are arranged parallel behind each other. The resulting laser lines are observed by a camera and measured by subpixel operators. Water surface level and gradient can be derived from these lines by using a mathematical model, which was developed at IPF. The integration of a step motor to vary the incidence angle of the laser plane allows on the one hand the efficient calibration of the whole system and on the other hand the sequential measurement of different surface profiles from one system position. In this configuration, the temporal dynamic of the surface variation is just limited by the frame rate.

The article presents the basic principle, potential and limitations of the method. Besides the

ckeltes mathematisches Modell in Oberflächenhöhen und -neigungen überführt werden. Die Integration eines Schrittmotors zur variablen Einstellung der Laserebenenneigung ermöglicht zum einen die effiziente Kalibrierung des Gesamtsystems und zum anderen die sequentielle Messung von mehreren Profilen bei gleich bleibender Position des Messsystems. Die erfassbare zeitliche Dynamik der Oberflächenänderung ist dabei nur durch die Aufnahmezeit der Kamera begrenzt.

Der Beitrag stellt das Grundprinzip der Messmethode, die geometrische Modellierung sowie einen darauf basierenden Ansatz zur strengen Kalibrierung des Systems vor.

geometrical and mathematical model, the procedure of a strict system calibration is outlined, and the results of a practical test are shown and discussed.

1 Introduction

The application of scaled physical models is an often used method to solve complex problems in connection with project planning in river engineering (ATV-DVWK 2003, BLOCK 1936). Due to the improved computer technique, hydromechanics phenomena can be simulated and analysed theoretically in mathematical models nowadays. Beside these theoretical approaches, practical experiments on modelled systems like water channels (see Fig. 1) are still necessary (GODDING et al. 2003). One of the most important measurand to define hydromechanics phenomena in a model is the vertical position of the water level. Its determination is usually done by punctual water gauge measurements. Different methods such as monitoring the vertical motion of a floater or ultrasonic height measurements in

cylinders, which are connected with the channel bed via conduits, can be used.

These methods are limited concerning their temporal and spatial resolution and may affect the hydromechanic behaviour of the model (MULSOW et al. 2005). Because of the inadequacies of present methods a system is needed to measure water levels area-wide, contactless and with both high temporal and spatial resolution. A high degree of automation is a further requirement to such system. For this reason, photogrammetry, as a provider for non-contact measurement solutions, was chosen for this application. In cooperation between the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (IPF) Dresden and the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) a project was initialised to develop and build up a system which is capable to fulfil all aspects above.



Fig. 1: Laboratory channels (Source BAW).

2 Measuring Principle

The estimation of water surfaces cannot be realized with traditional photogrammetric methods for surface measurement, because these methods assume diffuse-reflective textured surfaces. At first view, the mirroring properties of fluid surfaces are prejudicial to define direct its surface by optical triangulation based on laser light, but an adoption of this approach gives the solution for the discussed measurement task (MAAS et al. 2003).

According to the traditional acquisition of surfaces of objects via laser light sheet in combination with one or more cameras, the IPF developed a system which projects a laser light sheet onto the fluid surface. Because of the reflection and transmission properties of fluids, no analysable laser line can be observed on the surface. To visualise the intersection line on the object surface, the laser light sheet has to be reflected and projected in an indirect way onto a plane which is orientated vertically to the surface (see Fig. 2).

A camera can observe the resulting laser line. Therewith a measurement of the water level change is possible. (MAAS et al. 2003) confirmed the applicability of the basic principle and the high accuracy potential of the technique. For the determination of variances in water level by using a digital video camera with 1024×768 pixel sensor and a recorded 70 cm wide profile an accuracy of 0.03 mm was achieved (MAAS et al. 2003).

However, the technique requires a quiet water surface. If this is not taken into account, water-level induced effects cannot be separated from slope-induced effects (see Fig. 3). The abovementioned constraint is fulfilled only in a few cases in experimental researches.

Consequently, it is necessary to modify the basic configuration of the system. If the projected laser line will be observed in accumulated image sequences rather than in a single image, it is possible to compensate small and regular waves (MULSOW et al. 2005). Processing maxstore images obtained from short image sequences may reduce the errors resulting from water surface tilts in

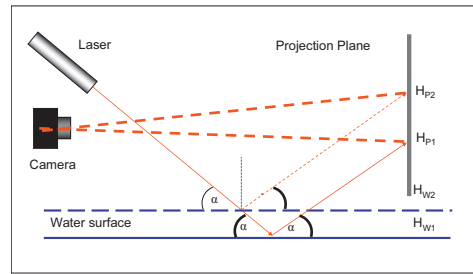


Fig. 2: Optical triangulation using a vertical projection plane.

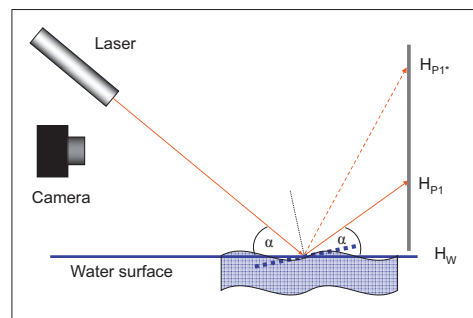


Fig. 3: Effect of water movement on height measurement.

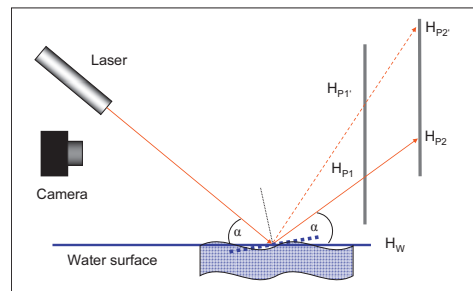


Fig. 4: System with two projection planes.

single images by a factor of six. Nevertheless, the precision of the water level measurement is still three times worse as compared to measurements on quiet surfaces (MAAS et al. 2003). A consequent solution to the discussed wave problem can be achieved by the integration of a second projection plane into the architecture of the system. This allows a rigorous geometrical solution for

the surface determination (see Fig. 4). Now a complete reconstruction of the reflected laser light sheet can be performed. The thus modulated reflected laser sheet can be used for the calculation of the fluid profile by intersecting it with the projected laser layer. Besides the elevation values, the normal vector of the fluid surface in their actual profile points can be derived from the measured values simultaneously.

The basic requirements are the priori knowledge about the spatial relationships among the several system elements themselves (projection area and laser light layer) and the reference area (air-fluid level in initial position).

3 System Architecture

As shown in Fig. 5, the front projection plane is designed as a vertical grid. Some sections of the laser light sheet are caught by the grid parts, the remaining sections pass through the front plane in an unaffected manner and are mapped on the second plane behind. This system design turned out to be superior to using semi-transparent material for the first projection plane, as this would be accompanied by an undesired widening of the laser light sheet.

Thus, a complete projection of the laser light sheet onto both planes was abandoned, which means that a full reconstruction of the whole profile is not possible. Instead, the profile is represented by the intersection points of the joint vector between the corresponding end points of the respective laser light lines and the projected laser light sheet (see Fig. 6).

The number of profile points is two times the number of gaps in the front projection plane.

Furthermore, this discretisation facilitates the subsequent 3D reconstruction. In the case of the line-wise analysis, it would be necessary to intersect a deformed plane with the projected laser light plane, which would be a rather complex and singularity-prone procedure. Using the end points of line segments on both planes, the task is re-



Fig. 5: Experimental system layout.

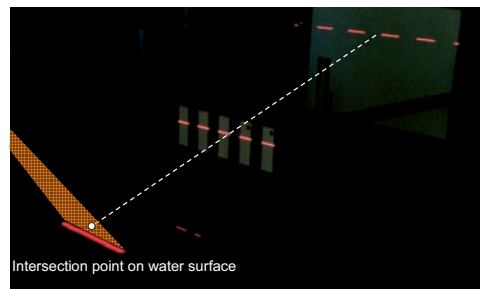


Fig. 6: Laser light sheet refracted to the channel bed ground (left) and reflected through the vertical grid (centre) onto the vertical projection plane (right).

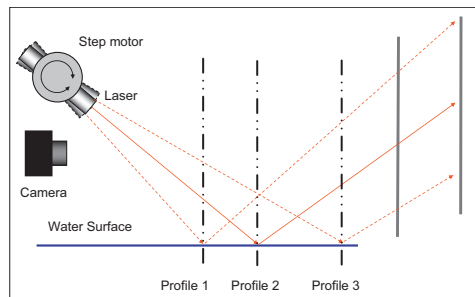


Fig. 7: System with step motor.

duced to the intersection of a vector with the laser light sheet.

The point displacement of the discretisation of the fluid profiles depends on the width and distance of the front plane fields. These parameters should be chosen in a way

that an overlay of projections on the rear projection plane as a consequence of lateral water level changes is impossible.

A Firewire camera Sony XC700 performs the image acquisition. A homogenous laser light sheet is generated by a 35 mW diode-laser with a Powell lens (dihedral angle of 45°).

To warrant a high rigidity of the system, the component mounting frame was designed in a robust manner. To focus attention on the stability of the projection planes as well as their relative arrangement, it became necessary to assume that the projection areas are planes in mathematical sense and the position and orientation are known. Firmly fixed circular targets with given coordinates allow the transmission of the line observations into the 3D space.

As an additional component, a stepping motor, on which the laser light unit is fixed, was integrated into the system. This type of combination allows variable settings of the incidence angle of the laser light sheet. This way a sequential measurement of several parallel profiles is possible and requires no position change of the measurement unit (see Fig. 7).

4 Modeling and Calibration

Unlike one-plane laser light sheet projection systems, the calibration of such a configuration is rather complex and requires additional parameters, as mentions above. This includes the determination of the true motor rotation axis, the orientation of the laser plane with respect to a certain incidence angle of the motor and the systems reference to a still water surface. The mathematical model is not based on a set of observed equations rather on a system of constraint equations. The model describes the variable projection of the laser light sheet on to the planes with a set of 14 parameters (see Tab. 1):

Input values are the 3D coordinates of the end points of the laser light lines. These are calculated from their image coordinates, the 3D coordinates in the frame system as well as the image coordinates of the circular targets via perspective transformation.

Tab. 1: Parameters.

Parameter	Description
A_i, B_i, C_i, D_i	parameters of plane i ($i = 1 \dots n$)
φ_i	rotation angle of the motor
V_x, V_y, V_z	Direction of the motor rotating axis
R_x, R_y, R_z	Origin of the motor rotating axis
N_x, N_y, N_z	Normal direction of the reference plane for the rotation angle ($\varphi = 0$)
A_w, B_w, C_w, D_w	Parameters of quiet water surface

This approach breaks down the main problem into single aspects. All end points, which result from the projection of the light sheet in one stepper motor position, represent a plane i :

$$0 = A_i \cdot x + B_i \cdot y + C_i \cdot z - D \quad (1)$$

With the following formula

$$0 = A_i^2 + B_i^2 + C_i^2 - I \quad (2)$$

as a constraint to prevent over-parameterisation.

All planes are rotated around the step motor axis by a rotation angle φ_i . At first the change of the normal vector of the plane is modelled as a function of the motor axis orientation (V_x, V_y, V_z), the reference normal vector (N_x, N_y, N_z) and φ_i :

$$A_i = V_x \cdot (1 - \cos \varphi_i) \cdot K + N_x \cdot \cos \varphi_i + (V_y \cdot N_z - V_z \cdot N_y) \cdot \sin \varphi_i$$

$$B_i = V_y \cdot (1 - \cos \varphi_i) \cdot K + N_y \cdot \cos \varphi_i + (V_z \cdot N_x - V_x \cdot N_z) \cdot \sin \varphi_i$$

$$C_i = V_z \cdot (1 - \cos \varphi_i) \cdot K + N_z \cdot \cos \varphi_i + (V_x \cdot N_y - V_y \cdot N_x) \cdot \sin \varphi_i$$

$$\text{with } K = N_x \cdot V_x + N_y \cdot V_y + N_z \cdot V_z \quad (3)$$

To prevent over-parameterisation the following constraints have been included:

$$\begin{aligned} 1 &= N_x^2 + N_y^2 + N_z^2 \quad \text{and} \\ 1 &= V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \end{aligned} \quad (4)$$

The origin of the motor rotation axis is mathematical described by the expression:

$$\begin{aligned} 0 &= B_i \cdot R_Y + C_i \cdot R_Z - D_i \quad \text{with} \\ R_X &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

The eccentricity of the laser light sheet with respect to the motor rotation axis can be neglected, as the eccentricity of the actual setup is much lower than the expected accuracy of the whole system.

The parameters of the quiet water surface are not included in the model, because the geometrical system layout does not allow the proper estimation of their parameter values. The parameters are calculated separately in a post process. The estimation is based on measurements on quiet water on a certain height, which is used as the reference level.

The implemented approach lacks a separate handling of each observation. Instead, groups of observations within each constraint equation are used as input data set. Consequently, loading and testing for single observation is difficult.

Based on this model a calibration procedure was implemented. Image sequences of different incidence angles of the laser sheet on the projection planes are taken as basis for the calibration. The resulting line segments on the vertical grid and the rear plane as being projected directly, thus without reflection from the water surface can be analysed automatically from these images. An angular rotation sensor can determine the motor position at a precision of 0.001° . The reference between the image and the incidence angle is realised by numbering the images. The detected laser line end points can be transformed into the 3D frame system with a precision of 0.2 mm on the vertical grid and 0.3 mm on the rear plane.

The mathematical estimation of the calibration parameters is implemented as least-squares adjustment in the Gauss-Markov-model.

5 Measurement

The complete analysis procedure takes place in a fully automatic way in an integrated software package. The system calibration

starts with the detection and subpixel measurement of the frame targets. Afterwards the whole measurement range is scanned sequentially. This means that both direct as well as indirect projections will be captured. Determining the maxstore (storage of the maximum gray value of an image assembly) for every image speckle effects of the laser can be reduced. In the images, the laser lines can be detected via a modified Hough-Transformation. Subsequently, the appropriate laser ends are determined with subpixel accuracy and corresponding laser ends of the front and the rear plane are connected for every image. After this, the calibration parameters can be calculated with the help of the approach as described in chapter 4. The total time for the calibration process, including stepper motor motion, is about one minute.

The actual water surface height profile measurement can be started after the calibration of the system. The procedure follows similar principles as the calibration (see Fig. 8).

The measurement range covered during the calibration is taken as a basis for the actual realtime surface measurement. Thus, the image analysis task can be reduced to the detection, measurement and tracking of the laser line end points with subpixel accuracy operators. Subsequently, the 3D coordinates of the according water surface profile points can be calculated by spatial intersection of the vector between the corresponding laser ends on the two planes with the laser light sheet. Fig. 9 shows two examples.

6 Theoretical Accuracy Analysis

The accuracy of a determined 3D point coordinate on the water surface is affected by many factors. An estimation for the accuracy can be calculated from the system parameters and the input quantities:

- Accuracy of image space measurements: < 0.2 pixels;
- Accuracy translated in to the object space, depending on the resolution of the camera

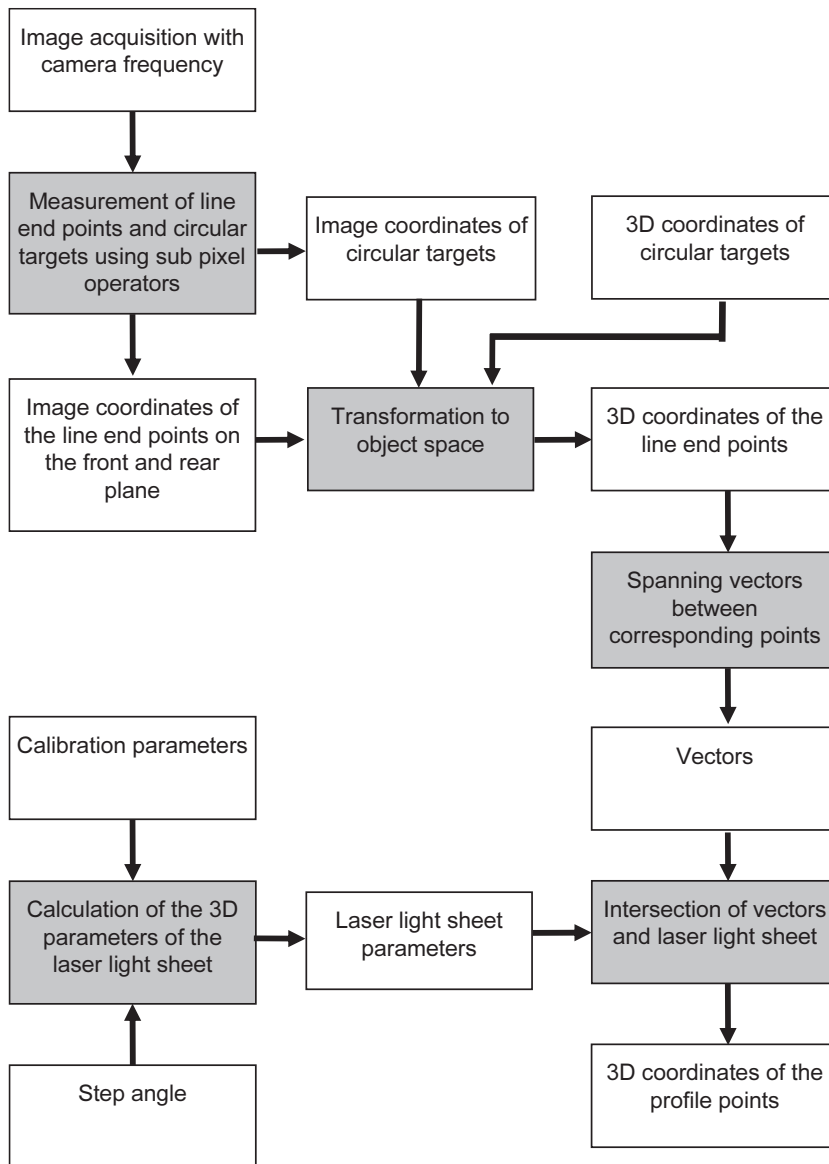


Fig. 8: Measurement workflow.

and the mapped area: < 0.2 mm in on the vertical front grid (X- and Z Direction) and < 0.3 mm on the rear plane.

- Accuracy of the circular target positions representing the projection plane geometry (3D): 0.05 mm (negligible).
- 3D accuracy of the line end points after transformation (see also chapter 4 and 5): 0.3 mm (vertical front grid) to 0.5 mm (rear plane).
- Accuracy of the laser light sheet parameters (calculated from the calibration parameters and the incidence angle): 0.1% resulting in a false estimated laser projection line on the planes of 0.5 mm.

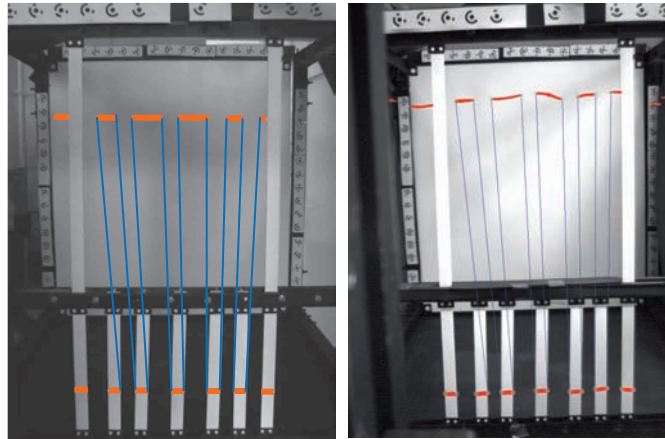


Fig. 9: Corresponding laser ends (left: quiet surface; right: dynamic surface).

- Accuracy of a vector (between corresponding line end points), calculated from a constant term and a linear factor (see also Fig. 10):

$$\sigma_V = \sigma_R \cdot s_2 + \sigma_{LP} \tag{6}$$

- σ_R ... accuracy of direction
- σ_{LP} ... accuracy of line end point (3D)
- s_2 ... distance between a point on water and vertical grid.

- Estimated accuracy of a direction between the front grid and the rear plane:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{LP_front} + \sigma_{LP_rear}}{s} \tag{7}$$

The accuracy of a water surface profile point obtained as intersection point between a vector and the laser light sheet can now be estimated:

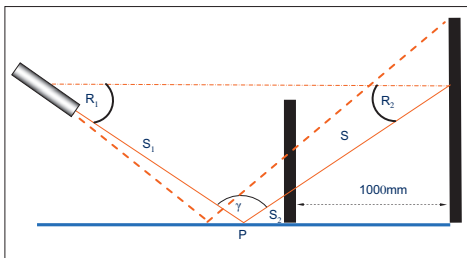


Fig. 10: Geometrical conditions in the system.

$$\sigma_P = \frac{1}{\sin \gamma} \cdot \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \cdot \frac{\sigma_{LP_front} + \sigma_{LP_rear}}{s} + \sigma_{LP_front} \tag{8}$$

When inserting the parameters of the actual system with

- γ ... 90–120°
- s_1 ... 300–250 mm
- s_2 ... 100–150 mm
- s ... 1200 mm
- σ_{LP_front} ... 0.3 mm
- σ_{LP_rear} ... 0.5 mm

an absolute precision of 0.5–0.6 mm for a point on the water surface can be estimated. The relative precision (precision of a measured level change) is much better, because the last term of (8) can be omitted and several system parameters are correlated. Therefore, a measurement accuracy of 0.3 mm can be estimated. It must be pointed out, that the accuracy is not constant over the whole measuring range. Formula (8) shows that the distance between the intersection line on the water and the vertical grid is a deciding parameter for the measurement accuracy. This parameter value changes with to the incidence angle of the laser light sheet and with water level height. The parameter s_2 has to be as small as possible as

well as the parameter s_1 . The distance between the laser and the water surface is defined from the beam width of the laser lens and the aimed measuring width.

Another important aspect is the distance between the vertical grid and the rear plane. This parameter should be as wide as possible, because of lever arm effect on the spanned vector. This claim is limited by the system requirement of a most possible size.

7 Results

To determine the practical accuracy of the system the water level in a test basin was sequentially risen by adding exactly 100 ml per step resulting in a level change of 3.20 mm. The measurement was carried out on quiet water level. Tab. 2 shows the results of one experiment.

A relative accuracy of water level difference was achieved by about 0.20 mm in all steps and is thus below the results of the one plane system (0.1–0.2 mm) shown in (MAAS et al. 2003). The strict solution of the surface problem goes along with loss of accuracy. Further experiments are planned and will be carried out to analyse and describe the effect of moving water surface on accuracy and potential of this method.

Tab. 2: Test results (example).

Angle [°]	Point 1 [mm]	Point 2 [mm]	Point 3 [mm]	Point 4 [mm]
71,96	3,18	3,15	3,15	3,48
72,42	3,30	3,05	3,24	3,15
73,03	3,35	2,89	3,11	3,30
73,56	3,34	2,92	3,20	3,24
73,98	3,24	2,95	3,17	3,06
74,44	3,07	3,30	3,09	3,10
Mean	3,25	3,04	3,16	3,22

In this experiment the water surface was scanned in two different levels which are presented by six profiles. Each angle value stands for a certain profile. The height differences in each profile point are listed in the table above. When comparing the results with the reference value of 3.20 mm, a mean deviation of 0.12 mm can be calculated.

8 Conclusion

The presented system shows an adaptation to the general principal of the optical triangulation on mirroring surfaces. A modification in system set-up and analysis was necessary. First results proved the principal capability of this approach to measure air-liquid surfaces. But limitations of this solution were obviously and will require further improvement of the analysing strategy and the system's setup. The strict solution to define moving water surfaces is realised and verified in one system.

As this approach is strictly depending on surface reflection, any disturbance on the water like swimming materials or water turbulences will cause measurement errors.

Acknowledgements

This work was funded by the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) in Karlsruhe (Germany). The authors would like to thank BERND HENTSCHEL (BAW) and HANS-GERD MAAS (IPF) for the helpful suggestions.

References

- ATV-DVWK, 2003: Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. – ATV-DVWK-Arbeitsgruppe WW-2.4, März 2004.
- BLOCK, W., 1936: Die Photogrammetrie im Dienste des Wasserbaus, des Schiffbaus und der Meereskunde. – Bildmessung und Luftbildwesen, 2/1936, pp. 62–75.
- GODDING, G., HENTSCHEL, B. & KAUPERT, K., 2003: Videometrie im Wasserbaulichen Versuchswesen. – Wasserwirtschaft WAWI, 4/2003, S. 36–40.
- MAAS, H.-G., HENTSCHEL, B. & SCHREIBER, F., 2003: An optical triangulation method for height measurements on water surfaces. – In: EL HAKIM, S. (Ed.): Videometrics VIII (Electronic Imaging 2003). – SPIE Proceedings Series Vol. 5013, pp. 103–109.
- MULSOW, C., PUTZE, T., MAAS, H.-G. & HENTSCHEL, B., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines optischen Messsystems zur Bestimmung von bewegten Wasserspiegelmodellen. – Proceedings Oldenburger 3D-Tage 2005, S. 30–37.

Address of the authors:

Dipl.-Ing. CHRISTIAN MULSOW,
e-mail: christian.mulsow@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. MATTHIAS SCHULZE
e-mail: matthias.schulze@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. PATRICK WESTFELD
e-mail: patrick.westfeld@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Institut für Photo-
grammetrie und Fernerkundung (IPF), 01069
Dresden, Tel.: +49-351-463-39701,
www.tu-dresden.de/ipf/photo

Manuskript eingereicht: Januar 2007

Angenommen: Januar 2007

Area-based Orientation of Brightness, Range and Intensity Images

AXEL WENDT, Oldenburg und Hannover & CHRISTIAN HEIPKE, Hannover

Keywords: Close range photogrammetry, orientation, surface matching, reconstruction, data fusion, terrestrial laser scanning

Summary: Within the scope of a common evaluation of brightness, range and intensity images, this article introduces a new area-based approach to achieve the simultaneous orientation of these multiple data types. The actual innovation is a model for the combined least-squares adjustment, which is an extension of object space image matching with ranges and intensities as additional observations. The complete mathematical model is specified and discussed. For a representation of complex object surfaces, the simultaneous consideration of multiple surface patches is described. In the experiments, the general feasibility of this approach is proven with a real data set consisting of terrestrial laser scanner and camera data. It is demonstrated, that by simultaneously refining the object surface, the suggested approach yields better results compared to using constant surface information, and that brightness images can be oriented relative to laser scanner data including range and intensity images.

Zusammenfassung: *Flächenbasierte Orientierung von Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern.* Mit der Zielsetzung der gemeinsamen Auswertung von Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern wird ein neuer flächenbasierter Ansatz zur simultanen Orientierung der unterschiedlichen Datenarten vorgestellt. Das Neue dabei ist ein Modell zur kombinierten Kleinste-Quadrate Ausgleichung, das eine Erweiterung der objektraumbasierten Bildzuordnung darstellt. Die Entfernungen und Intensitäten werden als zusätzliche Beobachtungen in das Modell miteinbezogen. Das vollständige mathematische Modell wird vorgestellt und diskutiert. Zur Verarbeitung komplexer Oberflächen werden zusätzlich mehrere Oberflächenausschnitte berücksichtigt. In den Experimenten wird die generelle Anwendbarkeit des Ansatzes anhand realer Daten eines terrestrischen Laserscanners und einer Kamera nachgewiesen. Weiter wird gezeigt, dass die simultane Oberflächenrekonstruktion die Orientierungsbestimmung verbessert, und dass Helligkeitsbilder relativ zu Laserscannerdaten, bzw. Entfernungs- und Intensitätsbildern orientiert werden können.

1 Introduction

Documentation of building facades is useful in a variety of applications such as architecture, cultural heritage recording, virtual reality and urban planning. Currently, the standard technique for data capture is terrestrial photogrammetry. In recent times terrestrial laser scanning has gained considerable attention. Also combined sensor systems have been developed, which deliver range and intensity images from a laser scanner and brightness images from a firmly attached ca-

mera. In general, the relative orientation between the two sensors of a combined system, consisting of three translations and three rotations, is pre-calibrated and thus known.

These optical measurement techniques provide brightness, range and intensity images. Brightness images contain texture information, range images directly yield geometric information of the depicted scene, see Fig. 1. The intensity images are additionally obtained from the laser scanner and contain the energy of the laser signal, which is reflected back towards the sensor. Due to their

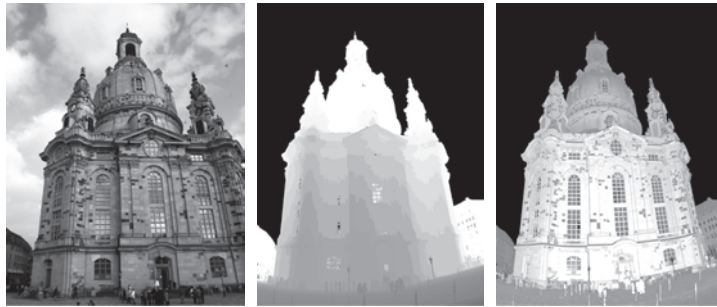


Fig. 1: The potential of different image types. From left to right: Brightness, range and intensity image.

partly different and partly similar characteristics these data types complement each other, but also contain some redundant information.

As is well known, image orientation is a prerequisite for any photogrammetric task involving the transformation between the different sensor data. A new object-based approach for the simultaneous orientation of multiple sensors is presented in this paper. Preliminary work can be found in WENDT & HEIPKE (2005).

Related work

For the area-based orientation of images taken from different positions several approaches have been developed in photogrammetry and computer vision. A general overview of the orientation of brightness images is given by HEIPKE (1997). In the context of this paper only object based image matching algorithms are relevant. These algorithms are published in detail in the literature, e. g. EBNER et al. (1987), WROBEL (1987) and HELAVA (1988). The functional model includes the sensor and orientation parameters and the parameters of the surface function. KEMPA (1995) demonstrates the estimation of the image orientation beside the surface reconstruction. ROSENHOLM & TORLEGARD (1988) and STRUNZ (1993) show how to orient aerial images with surfaces in object space. These approaches for brightness image orientation are also relevant for intensity images.

For a general overview concerning range data orientation refer e. g. to WILLIAMS et al. (1999) and GRÜN & AKCA (2004). Several approaches have been presented based on the Iterative Closest Point (ICP) algorithm introduced by BESL & MCKAY (1992), CHEN & MEDIONI (1992) and ZHANG (1994). The algorithm directly works with point clouds in object space and assumes that one point set is a subset of the other. The basic idea of the ICP algorithm is that the closest points approximate the true point correspondences. Modifications of this algorithm were developed for multiple point cloud orientation and for increasing the accuracy and reliability of the results, e. g. by giving each point of the cloud additional attributes, like texture (JOHNSON & KANG 1997). A further extension of the ICP algorithm with regard to the surface description is given by GRÜN & AKCA (2004), where the authors represent the point cloud as a patch-wise surface function. AKCA (2005) introduces an extension of this surface matching approach by using additional intensity values and other surface based data. KRAUS et al. (2006) modify the least-squares matching for strip adjustment and quality control for airborne laser scanner data by introducing a template matching approach, using height, intensity and slope information.

One weakness of the approaches of range and brightness orientation is the limited use of multi-source data. Additional data is mostly treated as an attribute of the master data source. In our research we deal with

data sets of objects recorded with more than one sensor type and multiple views simultaneously. The goal is to use the full potential of the recorded data for the orientation estimation.

2 The new orientation concept

In this section a new, general approach for the simultaneous orientation of multiple images is introduced. The orientation concept is based on the combination of object based image matching and the exploitation of range and intensity images.

2.1 The functional model

For the model description, the definition of the various coordinate systems, the orientation of the individual sensors in object space, the transformation between sensor space and object space and the definition of the object surface must be introduced, see Fig. 2.

In sensor space of the brightness image, the coordinate system $[x', y', z']$ is defined with the origin in the projection centre. For the range image, the sensor system origin $[x^L, y^L, z^L]$ is defined as the centre of the terrestrial laser scanner. In both sensor systems, the x- and y-axis are defined in the row and column direction of the image. The intensity image is related to the same sensor system as the range image. The object surface $Z(X, Y)$ is given in the object space coordinate system $[X, Y, Z]$, e. g. in a grid, defined by four node points for each grid

cell and an interpolation function, e. g. bilinear. Within each grid cell a predefined number of surface elements for the grey values $G(X, Y)$ and the intensity values $I(X, Y)$ is defined, see Fig. 2. The exterior orientation of the sensor referring to object space is given by $O^C(\mathbf{T}^C, \mathbf{R}^C)$ for the brightness image and $O^L(\mathbf{T}^L, \mathbf{R}^L)$ for the laser data. The parameters of the orientation consist of three translations $\mathbf{T}(t_x, t_y, t_z)$ and three rotations around the X, Y and Z axis, respectively, captured in the rotation matrix $\mathbf{R}(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33})$. The relation of a brightness value $g'(x', y')$ in sensor space to the corresponding grey value $G(X, Y)$ of a surface element (X, Y) in object space is also outlined in Fig. 2. The brightness is a function of the image coordinates, which in turn depend on the object coordinates and the image orientation via the collinearity equations.

$$g'(x', y') = G(X, Y) \quad (1)$$

with

$$x' = -c \frac{r_{11}^C \Delta X + r_{21}^C \Delta Y + r_{31}^C \Delta Z}{r_{13}^C \Delta X + r_{23}^C \Delta Y + r_{33}^C \Delta Z} \quad (2)$$

$$y' = -c \frac{r_{12}^C \Delta X + r_{22}^C \Delta Y + r_{32}^C \Delta Z}{r_{13}^C \Delta X + r_{23}^C \Delta Y + r_{33}^C \Delta Z} \quad (3)$$

and

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - t_X^C \\ \Delta Y &= Y - t_Y^C \\ \Delta Z &= Z(X, Y) - t_Z^C \end{aligned} \quad (4)$$

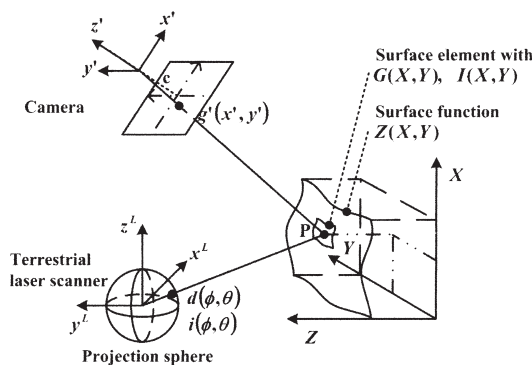


Fig. 2: Parameters of the functional model.

The brightness values in image space vary depending on the light source, surface reflectance and further parameters. Therefore, an illumination and a reflection model have to be included in equation (1). In the case of small parts on the surface a linear transfer function between the brightness value g' and the grey value G in object space is assumed to be sufficient. Equation (1) then reads:

$$t_0^{g'} + t_1^{g'} \cdot g'(x', y') = G(X, Y) \quad (5)$$

with linear transfer parameters for offset $t_0^{g'}$ and scale $t_1^{g'}$.

The range values of the laser scanner are expressed as distances d in a direction (ϕ, θ) relative to the $[x^L, y^L, z^L]$ system. ϕ is the angle between the x^L -axis and the direction of d projected into the x^L, y^L plane and θ the angle between the direction of d and z^L -axis. The observed range d must then be identical to the distance s between the observed surface point and the origin of the laser scanner:

$$d(\phi, \theta) = s \quad (6)$$

with

$$\phi = \arctan\left(\frac{y^L}{x^L}\right) \quad (7)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x^L)^2 + (y^L)^2}}{z^L}\right) \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{(X - t_X^L)^2 + (Y - t_Y^L)^2 + (Z(X, Y) - t_Z^L)^2}{(Z(X, Y) - t_Z^L)^2}} \quad (9)$$

In order to express ϕ and θ as functions of the object space coordinates $[X, Y, Z]$ and thus establish a relationship between a range value d and the $[X, Y, Z]$ system, the transformation between the range image sensor system and the object space system is necessary:

$$\begin{pmatrix} x^L \\ y^L \\ z^L \end{pmatrix} = (\mathbf{R}^L)^2 \begin{pmatrix} X - t_X^L \\ Y - t_Y^L \\ Z(X, Y) - t_Z^L \end{pmatrix} \quad (10)$$

The intensity value i is also a function of its image coordinates which depend on the object coordinates and the image orienta-

tion via the collinearity equations. The relation of an intensity value $i(\phi, \theta)$ to the corresponding reflectance value $I(X, Y)$ of a surface element (X, Y) in object space is given by:

$$i(\phi, \theta) = I(X, Y) \quad (11)$$

In this case the intensity value i is a function of the same image coordinates as the range value. Thus, equations (7), (8) and (10) are also relevant for the functional description of (11). In the same way as the brightness values, also the intensity values in image space vary depending on surface reflectance and further parameters. Again, it is assumed that a linear transfer function is sufficient to consider these effects. Equation (11) then reads:

$$t_0^i + t_1^i \cdot i(\phi, \theta) = I(X, Y) \quad (12)$$

In case of locally noisy or missing image information the introduction of additional constraints for stabilising the object surface is useful. Otherwise, such information may result in wrong surface parameters, and information gaps can lead to singularities in the normal equations. The constraints can be used to minimise curvature, e. g. as suggested by TERZOPOULOS (1988). In their discrete form they read:

$$C_X = (Z_{r,c-1} - 2Z_{r,c} + Z_{r,c+1}) \quad (13)$$

$$C_Y = (Z_{r-1,c} - 2Z_{r,c} + Z_{r+1,c})$$

$$C_{X,Y} = \begin{pmatrix} Z_{r,c} - Z_{r+1,c} - Z_{r,c+1} + \\ Z_{r+1,c+1} \end{pmatrix}$$

with r, c the node point in the row r and column c . C_X , C_Y represents the equations in the direction of the coordinate axis and $C_{X,Y}$ in the diagonal direction. We have implemented these constraints as additional observation equations.

2.2 Combined sensor system

In the case of a combined sensor system the relative orientation between the camera and the laser scanner coordinate systems is given by:

$$\mathbf{e} = \mathbf{T}^L - \mathbf{T}^C \tag{14}$$

$$\mathbf{R}_C^L = \mathbf{R}^L(\mathbf{R}^C)^{-1} = \mathbf{R}^L(\mathbf{R}^C)^T \tag{15}$$

with \mathbf{e} the eccentricity vector between the perspective centres of the camera and laser scanner and \mathbf{R}_C^L the rotation matrix between the two coordinate systems. As the camera is firmly attached to the laser scanner, \mathbf{e} and \mathbf{R}_C^L are known from a calibration step.

2.3 Simultaneous consideration of multiple surface patches

So far, the surface in object space has been described with one surface patch only, cf. Fig. 2. In the case of large or complex 3D objects this description may not be sufficient. In this new orientation approach multiple surface patches are introduced, as is shown in Fig. 3.

Each patch j represents a part of the surface with a separate surface function described in a local coordinate system $[X^{Sj}, Y^{Sj}, Z^{Sj}]$; with $j = 1, \dots, n$. These patches should be located in areas of geometric surface variation or good brightness texture. The size of each patch can be chosen individually. Without loss of generality the object coordinate system $[X, Y, Z]$ is defined in the first patch, and the orientations of the

other patches with respect to the first one are described by the values $\mathbf{O}^{Sj}(\mathbf{T}^{Sj}, \mathbf{R}^{Sj})$. For instance, the transformation of the point V^{Sn} of the n^{th} surface patch coordinate system $[X^{Sn}, Y^{Sn}, Z^{Sn}]$ into the object space coordinate system is given by:

$$\begin{pmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \end{pmatrix} = \mathbf{T}^{Sn} + \mathbf{R}^{Sn} \begin{pmatrix} X_V^{Sn} \\ Y_V^{Sn} \\ Z_V^{Sn} \end{pmatrix} \tag{16}$$

2.4 Adjustment approach

In the following, the image orientations O , the parameters of the surface function $Z(X, Y)$ as well as the grey values $G(X, Y)$ and reflectance values $I(X, Y)$ of the surface elements, are considered as unknowns. The resulting non-linear observation equations read:

$$\hat{v}_C = \hat{G}(X, Y) - (t_0^{g'} + t_1^{g'} \cdot g'(\hat{O}^C, \hat{Z}(XY))) \tag{17}$$

$$\hat{v}_L = s(\hat{O}^L, \hat{Z}(X, Y)) - d(\hat{O}^L, \hat{Z}(XY)) \tag{18}$$

$$\hat{v}_I = \hat{I}(X, Y) - (t_0^i + t_1^i \cdot i(\hat{O}^L, \hat{Z}(XY))) \tag{19}$$

with v_C, v_L, v_I the adjustment residuals. For reasons of simplicity, equations are only given for one surface patch, an extension to

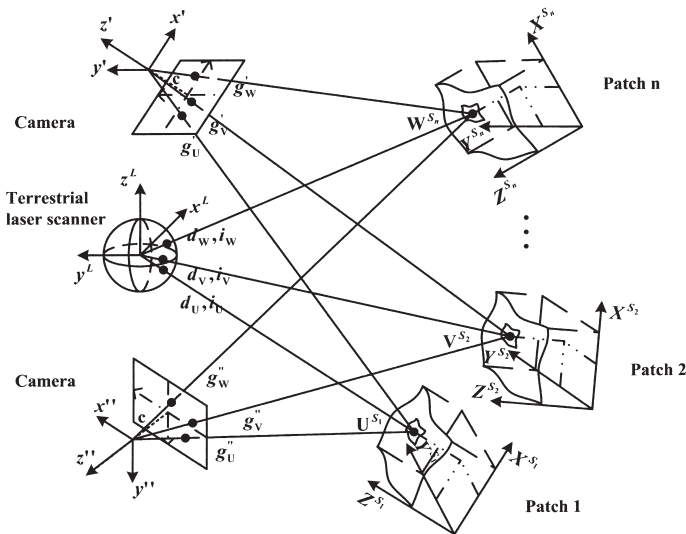


Fig. 3: Simultaneous consideration of multiple surface patches.

multiple patches is straight forward. Also, the additional observation equations for stabilising the surface (see equation (13)) must be added to obtain a solution.

Next, equations (17), (18) and (19) have to be linearised with respect to the unknowns. The adjustment is then solved iteratively using standard formulae. In the case of a combined sensor system data set, the exterior orientation of the brightness images is replaced by the orientations of the laser scanner using equations (14) and (15).

3 Experiments

Experimental testing of the new approach was carried out to demonstrate that:

- Simultaneous adjustment of the different input images and the surface parameters increases the accuracy of sensor orientation for a combined sensor system,
- Individual brightness images can be oriented relative to range and intensity images.

The experiments have been performed using real data. We work in a local object space coordinate system with the origin in one of the laser scanner viewpoints. For the assessment of the results, the root mean square (RMS) values of the different groups of ob-

servations in object space are considered. Additionally, the standard deviations of the unknowns of one viewpoint, representing the tendency of all viewpoints, are listed.

3.1 The test data set

The orientation is carried out with three viewpoints of the data set *Dresdner Frauenkirche* including brightness, range and intensity images. The data set was recorded with the laser scanner Riegl LSM-Z420i with a mounted Nikon D100 camera. These two sensors can be attached to each other to provide a combined sensor systems, but they can also be operated separately; both options were used in our tests. Effects, like differences in contrast, varying baselines and varying sensor to object distances are present in the data set. For the experiment involving the combined sensor system, calibration values for \mathbf{e} and \mathbf{R}_C^L were determined by a standard procedure recommended by the manufacturer. Sensor orientation values estimated with a feature based orientation concept according to WENDT (2007) were introduced as initial values. For the orientation test twelve surface patches distributed on the facade were chosen, cf. Fig. 3. The average distance between the laser scanner stations and the facade amounts to 45 m.

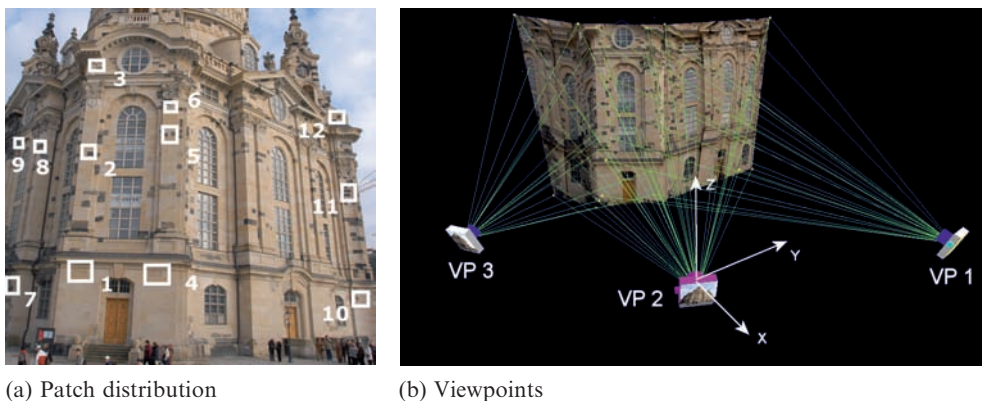


Fig. 4: Test data setup. (a) shows the surface patch distribution on the facade. Patches 1 to 6 in the centre are observed from 3 viewpoints and patches 7 to 9 and 10 to 12 on either side from 2 viewpoints. (b) shows a sketch of the data acquisition incl. some image rays. From each viewpoint brightness, range and intensity images were captured. Further, the origin of the object space coordinate system (defined in viewpoint 2) together with the coordinate axes is depicted.

These patches lie in approximately planar areas with adequate texture. The size of the patches is chosen according to planarity and texture on the facade and ranges from $0.60\text{ m} \times 0.72\text{ m}$ to $1.20\text{ m} \times 1.20\text{ m}$. The patches are modeled with a geometric grid size of 0.12 m . The resolution of the range and intensity image is about 0.04 m and of the brightness image about 0.02 m in object space. These values were used to select the size of the surface elements in object space, i.e. the geometric grid mesh of $0.12\text{ m} \times 0.12\text{ m}$ consisted of 6×6 surface elements for the grey values and of 3×3 surface elements for the intensity and the distance data. The accuracy for a single range measurement is specified with 0.01 m by the manufacturer. The test, with its planar geometric characteristics represents a typical case in facade modelling. The data set contains problematic aspects: the range images are a little noisy and the intensity images contain a lot of noise. All images include occlusions, because of the different perspective views. These effects are considered by introducing different weights for the observations and the stabilizing functions for the surface reconstruction: The range and brightness observations are used with the weight of 1, the intensity observations with a weight of $1/1000$. The stabilizing functions were considered with a weight of $1/10$. These weights were chosen after analysing a number of experimental tests, they reflect the relative accuracy of the related observations. In the following three adjustments are carried out:

1. Combined sensor system orientation, surface known
2. Combined sensor system orientation, surface unknown
3. Individual sensor orientation, surface unknown.

In case 1, the surface of the patches is given by the range image of the second viewpoint, and is not refined within the adjustment. For the orientation brightness, range and intensity images are used simultaneously. In case 2, the surface and the orientation parameters of the combined sensor system

viewpoints are estimated simultaneously using all three image types. In case 3, the camera is treated as an individual sensor. All three brightness images are oriented relative to the range and intensity images without making use of the calibration values.

All calculations were successful. The iterations were stopped when each change of unknowns caused less than $1/10$ pixel change in image space. In Tab. 1 the resulting root mean square values of the grey, the distance, and the intensity values in object space from the three adjustment runs are shown. Additionally, the minimum and maximum height changes of case 2 and case 3 compared to case 1 are listed. Tab. 2 summarises the theoretical standard deviations of the orientation parameter of the first viewpoint in all three cases.

The simultaneous reconstruction of the surface (case 2) compared to the given surface (case 1) leads to an accuracy improvement for the brightness, range and intensity

Tab. 1: RMS values of the different groups of observations in object space and height changes of the surface patches.

	RMS C [0 ... 255]	RMS L [m]	RMSI [0 ... 1]	min/max ΔZ [m]
1	12.9	0.017	0.008	–
2	6.4	0.013	0.005	–0.080/0.048
3	4.5	0.015	0.006	–0.030/0.037

Tab. 2: Theoretical standard deviations of the orientation parameters of the first viewpoint.

	1	2	3 scanner	3 camera
S_{Tx} [m]	1.58e-004	1.16e-004	4.74e-004	2.85e-004
S_{Ty} [m]	4.01e-004	2.93e-004	6.33e-004	3.45e-004
S_{Tz} [m]	5.14e-004	3.77e-004	14.18e-004	3.55e-004
S_{Rx} [rad]	1.87e-006	1.38e-006	5.11e-006	2.50e-006
S_{Ry} [rad]	5.71e-006	4.20e-006	15.23e-006	4.11e-006
S_{Rz} [rad]	3.92e-006	2.86e-006	7.61e-006	3.79e-006

values. Also, the theoretical standard deviations of the estimated orientation parameters could be improved. The height changes of the surface patches are within the range of -0.080 m and 0.048 m. In case 3, where the camera sensor is treated separately from the laser scanner the RMS value for the brightness decreases further, but they increase for the range and intensity values, probably due to the horizontal direction of the surface normals of the more or less planar patches. Thus, in particular, in the Z-direction (the vertical direction, cf. Fig. 4) and the rotation around the Y-axis, being highly correlated to the translation in Z, less orientation information is available, resulting in larger theoretical standard deviations. In contrast, the brightness images contain also orientation information in the Z-direction and for the rotation around Y. This is confirmed by the standard deviations for the orientation parameters. The height changes are between -0.030 m and 0.037 m. The differences compared to case 2 are compensated by the orientation parameters of the sensors: The relative orientation parameters between the camera and the laser scanner deviate from the calibration values in the dimension of the height differences (about 0.04 m in e). The most accurate orientation results are obtained in case 2, where all observations are used to reconstruct the surface and estimate the orientation parameters of a combined sensor system simultaneously.

4 Conclusions

In this paper a new area-based approach for the simultaneous orientation of brightness, range and intensity images and the object surface has been presented, given input data from a terrestrial laser scanner and a digital camera. The approach is based on a non-linear least squares adjustment and extends the object-based image matching method. Using data depicting the Frauenkirche in Dresden the approach is shown to yield good results using multiple surface patches. Further, if orientation and surface are reconstructed simultaneously from all input

data, more accurate results are obtained as compared to only computing the orientation. It is also demonstrated that individual brightness images not connected to the laser scanner can be orientated relative to the range and intensity images. In future work more investigations into the pre-requisites concerning texture and geometric surface roughness, the necessary distribution of surface patches and the convergence radius and the numeric stability of the suggested solution will be performed. Another research target is to apply this approach to data sets with varying characteristics to assess the flexibility and generality of the suggested approach.

Acknowledgement

The authors would like to thank Mr. NIKOLAUS STUDNICKA from RIEGL GmbH for providing the data set *Dresdner Frauenkirche*.

References

- AKCA, D., 2005: Registration of point clouds using range and intensity information. – In: GRÜN, A., GOOL, L.V., PATERAKI, M. & BALTSAVIAS, M. (Eds.): International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage. – Taylor & Francis, Leiden pp. 115–126.
- BESL, P. & MCKAY, N., 1992: A method for registration of 3-D shapes. – IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 14(2): 239–256.
- CHEN, Y. & MEDIONI, G., 1992: Object modelling by registration of laser scanner data. – Image and Vision computing, 10(3): 145–155.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W. & HEIPKE, C., 1987: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. – BuL 55(5): 194–203.
- GRÜN, A. & AKCA, D., 2004: Least squares 3D surface matching. – IAPRS, 34(5/W16), (on CD-ROM).
- HEIPKE, C., 1997: Automation of interior, relative, and absolute orientation. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 52: 1–19.
- HELAVA, U.V., 1988: Object-space least-squares correlation. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(6): 711–714.

- JOHNSON, A. & KANG, S., 1997: Registration and Integration of Textured 3-D Data. – International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 234–241.
- KEMPA, M., 1995: Hochaufgelöste Oberflächenbestimmung von Natursteinen und Orientierung von Bildern mit dem Facetten-Stereosehen. – Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt.
- KRAUS, K., RESSL, C. & RONCAT, A., 2006: Least squares matching for airborne laser scanner data. – In: GRÜNDIG, L. & ALTAN, O. (ed.): Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days ‘Geodesy and Geoinformation in the Service of our Daily Life’ ISBN 3-9809030-4-4, p. 7.
- ROSENHOLM, D. & TORLEGARD, K., 1988: Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54(10): 1385–1389.
- STRUNZ, G., 1993: Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen. – Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 408, München.
- TERZOPOULOS, D., 1988: The computation of visible-surface representations. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence* 10(4): 417–438.
- WENDT, A. & HEIPKE, C., 2005: A concept for the simultaneous orientation of brightness and range images. – In: GRÜN, A., GOOL, L.V., PATERAKI, M. & BALTSAVIAS, M. (eds.): International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, May 22–27, Taylor & Francis/Balkema, Leiden, pp. 451–457.
- WENDT, A., 2007: A concept for feature based data registration by simultaneous consideration of laser scanner data and photogrammetric images. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. (in print)
- WILLIAMS, J., BENNAMOUN, M. & LATHAM, S., 1999: Multiple view 3D registration: A review and a new technique. – *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, Tokyo, pp. 497–502.
- WROBEL, B., 1987: Facets stereo vision (fast vision) – a new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. – In: *Fast Processing of Photogrammetric Data*. ISPRS Intercommission conference, pp. 231–258.
- ZHANG, Z., 1994: Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. – *International Journal of Computer Vision* 13(2): 119–152.

Addresses of the authors:

Dipl.-Ing. AXEL WENDT

Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg

Tel.: 0441-7708-3606, Fax: 0441-7708-3170

e-mail: a.wendt@fh-oldenburg.de; und

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover

Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover

Prof. Dr.-Ing. CHRISTIAN HEIPKE

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover

Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover

Tel.: 0511-762-2482, Fax: 0511-762-2483

e-mail: heipke@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Januar 2007

Angenommen: Januar 2007

Registrierung terrestrischer Bild- und LIDAR-Daten für die Dokumentation von Kulturdenkmälern

YAHYA ALSHAWABKEH, NORBERT HAALA & DIETER FRITSCH, Stuttgart

Keywords: Close range photogrammetry, cultural heritage, terrestrial photography, terrestrial laserscanning, LIDAR data

Abstract: *Registration of terrestrial image and LIDAR data for cultural heritage documentation.* High quality 3D models of cultural heritage sites can be generated efficiently by terrestrial laser scanning, which allows the accurate and dense measurement of surface geometry. In addition to the geometric data collection, texture mapping based on additionally collected digital imagery is particular important for this type of application. This requires a combined processing of range and image data sets. For this purpose, they have to be registered or aligned by a suitable transformation to a common reference coordinate system. The involved transformation parameters can be determined based on corresponding elements to be extracted from the different data sets. In the article an efficient edge detection algorithm is presented, which allows for the automatic segmentation of such primitives even in complex scenes. In order to achieve a high quality 3D photo-realistic model this alignment process has to be followed by an automatic texture mapping, which is discussed in the second part of the paper. The presented algorithms are demonstrated in the framework of a project aiming at the generation of a 3D virtual model of the Al-Khasneh, a well-known monument in Petra, and a Roman Theatre in ancient Jerash city, Jordan.

Kurzfassung: Terrestrisches Laserscanning zur Erfassung von 3D Modellen hat sich unter anderem auch als Standardverfahren für die Dokumentation von Kulturdenkmälern durchgesetzt. Speziell für diese Anwendung ist neben der geometrischen Modellierung die qualitativ hochwertige Texturierung der Objektoberflächen durch zusätzlich erfasste Bilder von besonderem Interesse. Damit ist als erster Auswerteschritt die Transformation der Bild- und Laserdaten in ein gemeinsames Koordinatensystem erforderlich. Um für diese Registrierung korrespondierende Elemente zwischen den unterschiedlichen Datensätzen bereitzustellen, wurde ein Segmentierungsverfahren zur Extraktion von Kantenelementen entwickelt. Anschließend ermöglicht eine Sichtbarkeitsanalyse die automatische Texturierung des vermaschten 3D Modells. Die im Rahmen des Projektes implementierten Verfahren werden beispielhaft für die Dokumentation von zwei Kulturdenkmälern in Jordanien genutzt.

1 Einleitung

Terrestrisches Laserscanning ermöglicht eine schnelle, zuverlässige und flächendeckende Erfassung dichter 3D Punktwolken für die effiziente Erfassung von 3D Modellen. Während die Laufzeitmessung reflektierter Laserpulse eine effektive Rekonstruktion der Objektgeometrie erlaubt, ist

für eine Reihe von Anwendungen eine zusätzliche Bereitstellung von Bilddaten erforderlich. Dies gilt insbesondere für Anwendungen zur Dokumentation von Kulturdenkmälern und historischen Bauten. In diesem Bereich werden die erfassten 3D Modelle häufig zur Erstellung hochwertiger Visualisierungen genutzt, was die Verfügbarkeit geeigneter Bildtexturen voraussetzt.

Einige kommerziellen Laserscanner integrieren hierfür bereits eine digitale Kamera und ermöglichen so eine simultane Erfassung von Farbwerten für die gemessenen 3D Punkte. Durch den festen Einbau der Kamera werden jedoch die möglichen Aufnahme-standpunkte auf die Standpunkte des Laserscanners beschränkt. Zudem kann die Erfassung von Laserdaten vor allem für komplexe Objekte und Plätze relativ zeitaufwendig sein. Bei Anwendungen im Freien können sich so erhebliche Änderungen der Lichtverhältnisse ergeben. Die dadurch verursachten radiometrischen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Bildern wirken sich dann störend auf den visuellen Eindruck des texturierten Modells aus. Aus diesen Gründen ist häufig zur optimalen Texturierung eine zeitlich und räumlich getrennte Erfassung von Bildern mit einer unabhängigen Kamera von Vorteil.

Die Trennung von Laserscanner und Kamera macht jedoch eine aufwändigere Auswertung erforderlich. Während eine integrierte Kamera bei einer ausreichenden Kalibrierung des Gesamtsystems die direkte Verknüpfung der Bilder mit den erfassten 3D Punkten ermöglicht, erfordert die unabhängige Erfassung eine Registrierung der Bild und LIDAR Daten als ersten Auswerteschritt. Dabei werden die Datensätze mittels identischer Elemente zusammengeführt. Zu diesem Zweck werden in dem vorgestellten Ansatz dreidimensionale lineare Strukturen durch ein kantenbasiertes Segmentierungsverfahren aus den LIDAR Daten extrahiert um sie anschließend ihren zweidimensionalen Entsprechungen im Bild zuzuordnen. Nach der Bestimmung der Kameraorientierung durch solche 2D-3D Korrespondenzen kann die Bildtextur direkt auf die zugehörigen 3D Oberflächenelemente projiziert werden. Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass die Textur nur auf den Oberflächenelementen aufgebracht wird, die in der jeweiligen Aufnahme tatsächlich sichtbar sind. Die hierfür notwendige Verdeckungsanalyse ist für einfache Objektgeometrien einfach lösbar. Bei der Dokumentation von Kulturdenkmälern werden jedoch häufig dichte 3D Punktwolken erfasst, die zu Ober-

flächen vermascht werden. Solche Objektrepräsentationen beinhalten somit eine sehr große Anzahl von Flächenelementen. Dies erfordert die Verfügbarkeit eines effizienten Algorithmus zur Lösung des Sichtbarkeitsproblems, wie er im zweiten Teil des Artikels vorgestellt wird.

2 Merkmalsextraktion und Registrierung

Um eine vollständige Erfassung räumlich komplexer Objekte zu gewährleisten, werden terrestrische Laserdaten in der Regel von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen. Die einzelnen Punktwolken sind somit durch räumliche Transformationen zusammenzuführen und gegebenenfalls in ein übergeordnetes Koordinatensystem einzubinden. Bei ausreichender Überdeckung der einzelnen Scans ist eine Registrierung durch Verfahren wie den Iterative Closest Point Algorithmus möglich [BM92]. Häufig werden auch künstliche ebene oder kugelförmige Signale im Objektraum angebracht und so durch semi-automatische Messung Paß- und Verknüpfungspunkten bereitgestellt. Solche Signale können auch zur Registrierung der Bilddaten verwendet werden. Neben dem Aufwand für die Signalisierung entstehen dadurch jedoch unter Umständen störende Verdeckungen im Texturbild. Aus diesem Grund ist für die Registrierung der Bild und LIDAR Daten eine Nutzung korrespondierender Elemente anzustreben, die sich direkt aus den aufgenommenen Objektstrukturen extrahieren lassen [LHS00].

Üblicherweise werden in photogrammetrische Anwendungen korrespondierende Punkte zur Rekonstruktion der äußeren Orientierung genutzt. Wie Abb. 1 für einen Objektausschnitt demonstriert, der sowohl mittels Laserscanner als auch unabhängiger Kamera erfasst wurde, lassen sich geeignete Punkte in Bildern relativ gut bestimmen. Demgegenüber ist eine exakte Definition und Messung der zugehörigen Punkte in den Laserdaten nahezu unmöglich. Dies gilt sowohl für die in Abb. 1 Mitte abgebildete 3D

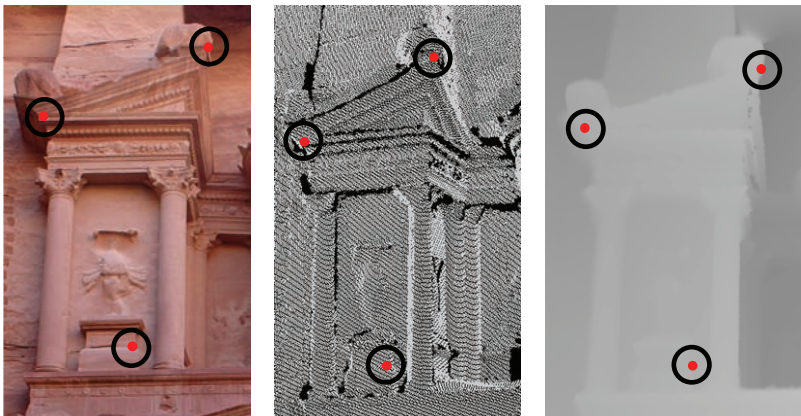


Abb. 1: Identische Punkte im Intensitätsbild, 3D Punktwolke und Distanzbild.

Punktwolke als auch für das rechts dargestellte Distanzbild, das sich aus einer Anordnung der LIDAR Messungen in einem regelmäßigen Raster ergibt.

Aufgrund der Probleme bei der exakten Identifizierung von Punktmerkmalen ist die erreichbare Messgenauigkeit für eine exakte Registrierung häufig nicht ausreichend [LS05]. Im Gegensatz dazu lassen sich linienförmige Strukturen genauer extrahieren und messen [CH99], [LH02]. Solche Kantenstrukturen sind in künstlichen Bauten in ausreichender Zahl vorhanden und erlauben eine zuverlässige Bestimmung der Kameraorientierung durch räumlichen Rückwärtschnitt. Aus diesem Grund wurde ein Segmentierungsalgorithmus zur effektiven Extraktion solcher Kantenstrukturen aus Distanzdaten entwickelt.

2.1 Krümmungsbasierte Segmentierung von Distanzbildern

Häufig werden zur Segmentierung von LIDAR Daten Distanzbildern statt ungeordneter 3D Punktwolken genutzt. Distanzbilder werden unter Beibehaltung der Topologie der ursprünglichen Scans erzeugt, so dass Nachbarschaftsbeziehungen zwischen einzelnen Punktmessungen implizit zur Verfügung stehen. Diese Form der Repräsentation ermöglicht somit im Vergleich zu 3D Punktwolken eine einfachere Implementie-

rung von Segmentierungsalgorithmen analog zu bildbasierten Verfahren. Ähnlich zur Segmentierung von Bildern können die Ansätze zur Distanzdatensegmentierung in regionen- und kantenbasierte Verfahren unterteilt werden. Einen Überblick über regionenbasierte Verfahren, die einzelne Distanzmessungen aufgrund eines Homogenitätskriteriums zu größeren Bereichen gruppieren, findet sich beispielsweise in [HJJ*96] und [MLM01]. Im Gegensatz zu der damit möglichen Segmentierung glatter oder ebener Flächenstücke gestaltet sich die direkte Extraktion von Kanten recht schwierig. Neben der eingeschränkten räumlichen Auflösung führen vor allem fehlerbehaftete Punktmessungen an Kanten durch Mehrfachreflexionen zu Problemen [SD01]. Um dennoch solche gut zur Registrierung von Bild und Distanzdaten geeigneten linearen Strukturen zu extrahieren, wurde ein auf der Analyse der mittleren Krümmung basiertes Verfahren entwickelt. Dabei wird zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit die Lokalisierung von Kanten in unterschiedlichen Maßstäben mit einer nachfolgenden Skeletisierung verknüpft. Da sich die Mittlere Krümmung aus dem arithmetischen Mittel der beiden Hauptkrümmungen ergibt, ist sie geringfügig stabiler gegenüber Rauschen. Zudem liefert die implementierte krümmungsbasierte Segmentierung geeignete Merkmale zur Beschreibung der jeweiligen

Oberflächen, die eine anschließende Zuordnung erleichtern.

2.2 Berechnung der Mittleren Krümmung

Die durchgeführte Berechnung der Mittleren Krümmung basiert auf den Arbeiten von [BJ88]. Grundidee ist die Schätzung einer analytische Oberflächenbeschreibung in der lokalen Nachbarschaft eines Punktes, um so die partiellen Ableitungen zur Berechnung der Krümmung zu bestimmen. Dies wird durch Faltungsoperationen realisiert, die eine effektive Berechnung in verschiedenen Maßstäben ermöglichen. Zusammengefasst kann der Ansatz wie folgt beschrieben werden:

Innerhalb eines ungeraden $N \times N$ Fenster seien Distanzpunkte an Positionen (u, v) aus der Menge $U \times U$ mit $U = \{-(N-1)/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, (N-1)/2\}$ gegeben. An diese Punkte soll eine lokale biquadratische Oberflächenbeschreibung basierend auf den diskreten orthogonalen Polynomen $\mathcal{O}_0(u) = 1$, $\mathcal{O}_1(u) = u$, $\mathcal{O}_2(u) = (u^2 - M(M+1)/3)$ mit $M = (N-1)/2$ angepasst werden. Mit

$$P_0(M) = N, \quad P_1(M) = \frac{2}{3}M^3 + M^2 + \frac{1}{3}M.$$

$$P_2(M) = \frac{8}{45}M^5 + \frac{4}{9}M^4 + \frac{2}{9}M^2 - \frac{1}{9}M^2$$

$$- \frac{1}{15}M$$

ergeben sich dann die normalisierten Versionen dieser orthogonalen Polynome $\mathcal{O}_i(u)$ zu

$$\vec{d}_i(u) = \frac{\mathcal{O}_i(u)}{P_i(M)}$$

Durch die Kombination dieser normalisierten Polynome werden dann die zweidimensionalen Faltungskerne

$$[D_u] = \vec{d}_0 \vec{d}_1^T, \quad [D_v] = \vec{d}_1 \vec{d}_0^T,$$

$$[D_{uu}] = \vec{d}_0 \vec{d}_2^T, \quad [D_{vv}] = \vec{d}_2 \vec{d}_0^T, \quad [D_{uv}] = \vec{d}_1 \vec{d}_1^T$$

gebildet. Die partiellen Ableitungen der ver-
tauschten, quantisierten und diskreten Ver-

sion $\vec{g}(i, j)$ einer stückweise glatten Oberfläche ergeben sich dann durch die Faltungsoperationen

$$g_u(i, j) = D_u * g(i, j), \quad g_v(i, j) = D_v * g(i, j),$$

$$g_{uu}(i, j) = D_{uu} * g(i, j),$$

$$g_{vv}(i, j) = D_{vv} * g(i, j),$$

$$g_{uv}(i, j) = D_{uv} * g(i, j)$$

Diese partiellen Ableitungen werden dann zur Berechnung der Mittleren Krümmung genutzt.

$$H(i, j) = \frac{(1 + g_u^2(i, j)) + g_{uu}(i, j) + (1 + g_v^2(i, j)) + g_{vv}(i, j) - 2g_u(i, j)g_v(i, j)g_{uv}(i, j)}{2(\sqrt{1 + g_u^2(i, j) + g_v^2(i, j)})^3}$$

2.3 Analyse der Mittleren Krümmung

Die Eigenschaften der Mittleren Krümmung werden in Abb. 2 für unterschiedliche Objektbereiche von synthetischen Distanzbildern demonstriert. Die berechneten Krümmungswerte werden hierfür entlang der den Distanzbildern überlagerten roten Profillinie extrahiert. Aus der Analyse dieser Werte im unteren Teil der Abb. 2 folgt dass:

- Tiefensprünge (T), d. h. Diskontinuitäten der gemessenen Entfernungen an Verdeckungen ergeben klar sichtbare Nulldurchgänge mit sehr deutlichen Maxima beziehungsweise Minima der mittleren Krümmung.
- Diskontinuitäten der Flächennormalen an Objektkanten (K) führen zu flacheren Maxima. Konkave Kanten an Graten (K_G) ergeben i ein positives Vorzeichen der Krümmungswerte, während konvexe Kanten an Falten (K_F) zu negativen Werten führen.
- Die Mittlere Krümmung, die sich an gekrümmten Objektoberflächen (O_K) ergibt ist im Vergleich zu den Werten an Kanten K_G und K_F deutlich geringer, wobei die Beträge der Mittleren Krümmung an Tiefensprünge T insgesamt am größten ist.

Durch die unterschiedlichen Beträge der Mittleren Krümmung ist eine Unterscheidung von Tiefensprünge beziehungsweise konvexen und konkaven Kanten durch ge-

eignete Schwellwerte einfach möglich. Dies wird in Abb. 3 anhand der unterschiedlichen Einfärbung der automatisch extrahierten Kantentypen dokumentiert.

In Abb. 4 ist das Ergebnis der Segmentierung für zwei Distanzdatensätze des Khazne al-Firaun (Schatzhaus des Pharaos) in Petra, Jordanien dargestellt, die durch einen Mensi GS100 Laserscanner erfasst wurden [AH05]. Die obere Reihe von Abb. 4 zeigt die Fassade des Schatzhauses, während die untere Reihe den Eingang zu einem der inneren Räume zeigt. Zur krümmungsbasierten Segmentierung wurden die Abb. 4a dargestellten Distanzbilder genutzt, die extrahierten Kanten sind in der zweiten Spalte (Abb. 4b) dargestellt. Zur Extraktion markanter Kanten wurden zunächst relativ große Filtermasken genutzt, so dass sich ver-

schmierte Bereiche ergeben. Aus diesem Grund wurde eine Skelettierung als Postprozessierung eingesetzt, deren Ergebnis in den Abb. 4c dem Distanzbild überlagert wurde.

Wie Abb. 4d zeigt, ist die Anwendbarkeit des Segmentierungsalgorithmus nicht auf Distanzbilder beschränkt, sondern kann auch zur Extraktion geeigneter Merkmale aus Intensitätsbildern eingesetzt werden. In Abb. 4c und Abb. 4d sind zusätzlich korrespondierende Liniensegmente markiert, die manuell aus den Ergebnissen der Segmentierung ausgewählt wurden. Diese Korrespondenzen wurden anschließend zur Ko-registrierung der Farb- und Distanzbilder mittels des in [KF03] vorgestellten Verfahrens verwendet.

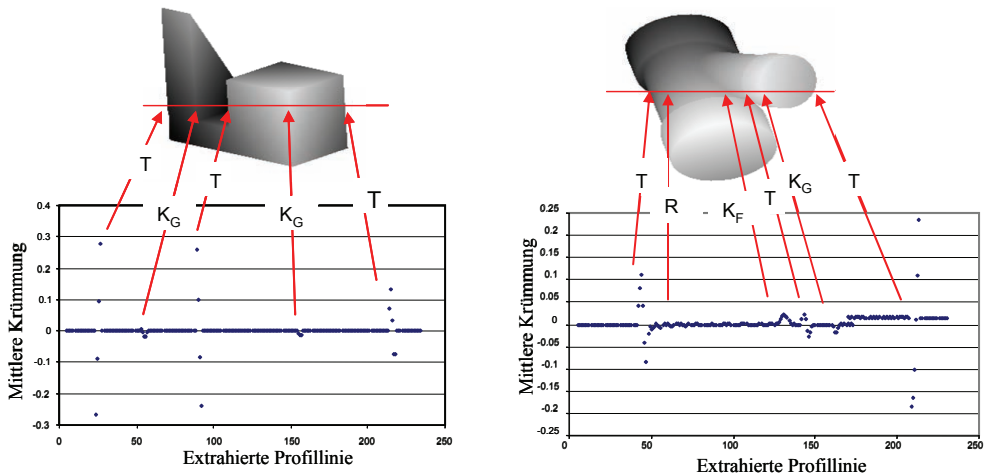


Abb. 2: Berechnete Mittlere Krümmungen für synthetische Datensätze.

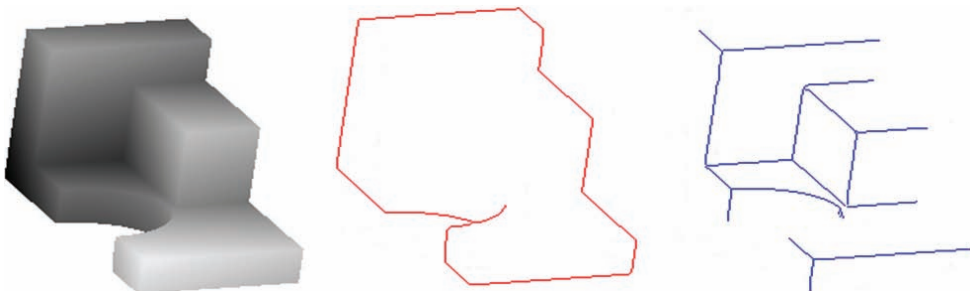


Abb. 3: Segmentierung zur Trennung von Tiefensprüngen (rot) und Bruchkanten (blau).

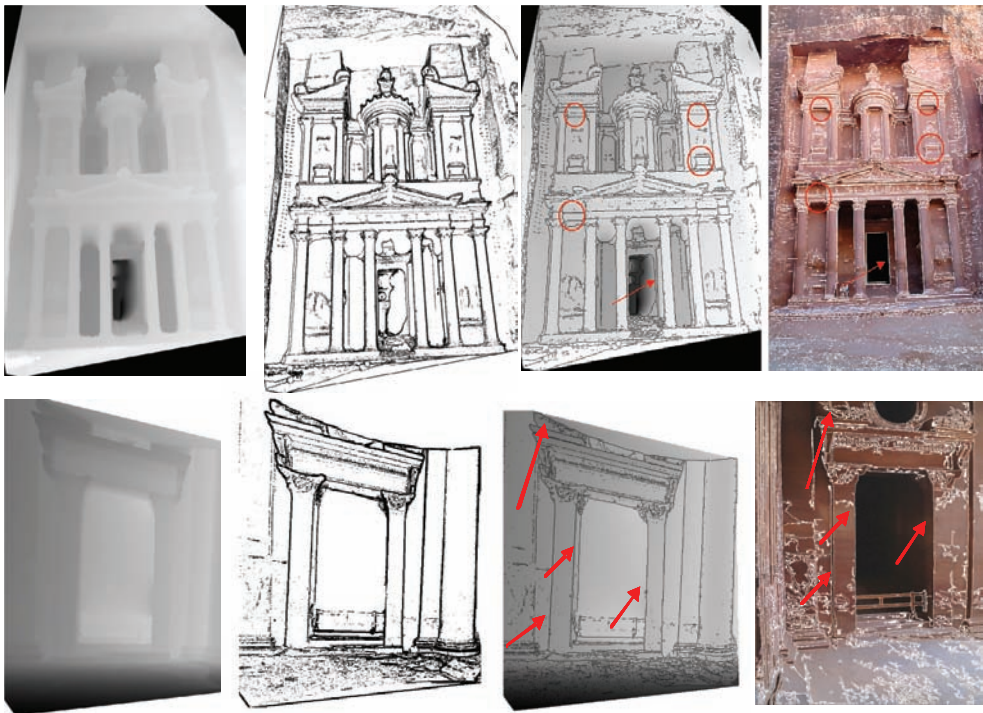


Abb. 4: a) Distanzbilder der Khazne al-Firaun, b) Segmentierte Bruchkanten, c) Skelettierte Bruchkanten im zugehörigen Distanzbild, d) Segmentierung der Bilddaten. Für die Registrierung der Bild- und Distanzdaten ausgewählte Segmente sind durch Pfeile bzw. Kreise markiert.

3 Texturierung komplexer 3D Szenen

Nach der Registrierung der Bilder zu den erfassten LIDAR Daten ist eine Texturierung der Objektoberflächen einfach möglich. Hierfür ist anhand der bestimmten Transformationsparameter für jeden Objektpunkt die zugehörige Bildkoordinate des zur Texturierung verwendeten Bildes zu berechnen. Zusätzlich ist jedoch sicherzustellen, dass nur diejenigen Objektteile texturiert werden, die von den jeweiligen Aufnahme standpunkten aus auch tatsächlich sichtbar sind. Während die hierfür notwendige Analyse von Verdeckungen für geometrisch einfache Objektbeschreibungen problemlos möglich ist, kann dies für komplexe Objekte wie historische Bauten sehr aufwändig werden. Zur Erfassung des 3D Modells der Khazne al-Firaun wurden beispielsweise Laserdaten

von drei verschiedenen Aufnahme standpunkten aus aufgenommen. Dies resultierte nach der Vermaschung in einem 3D Modell mit durchschnittlichem Punktabstand von 5cm und mehr als 2 Millionen Dreiecken. Zur Texturierung müssen all die Knoten dieser Dreiecke in das zugehörige Bild transformiert und die Sichtbarkeit der jeweiligen Flächenelemente überprüft werden.

Die Analyse von Verdeckungen ist auch eine Standardaufgabe in der Computergaphik, so dass für deren Lösung sehr effiziente Ansätze zur Verfügung stehen. Während diese Verfahren ursprünglich zur Bestimmung von Sichtbarkeiten bei der Erzeugung virtueller Bilder aus gegebenen 3D Modellen entwickelt wurden, ermöglicht ihre Modifikation auch den Einsatz bei der Texturierung komplexer 3D Objekte. Ein typisches Verfahren zur Verdeckungsanalyse ist der Z-Buffer Ansatz. Dabei wird durch ei-

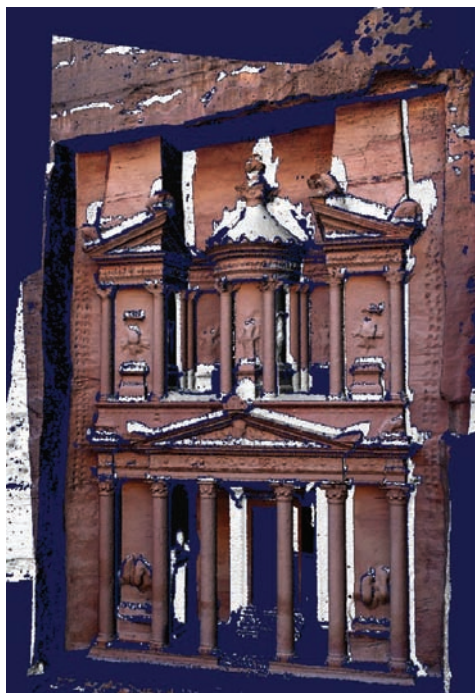


Abb. 5: Ergebnis der Texturierung mit grau markierten verdeckten Bereichen.

nen pixelweisen Vergleich von Tiefeninformation feststellt, welche Elemente einer Szene gezeichnet werden müssen und welche verdeckt sind. Dieser Ansatz wird von [GKK*05] zur Sichtbarkeitsbestimmung in Texturbildern verwendet. [AH05] kombinieren diesen Ansatz mit dem in der 3D-Computergrafik ebenfalls bekannten Painter Algorithmus. Dieser sortiert zur Lösung des Sichtbarkeitsproblems alle Polygone ihrer Tiefe nach um sie bei der Darstellung der Reihenfolge nach zu überzeichnen. Durch die kombinierte Analyse im Bild- und Objektraum wird somit eine effektive Berechnung der Verdeckungen in den Texturbildern ermöglicht.

Ein Zwischenergebnis des Verfahrens ist in Abb. 5 für das vermaschte Modell der Khazne al-Firaun dargestellt, wobei das in Abb. 4d dargestellte Bild für die Texturierung verwendet wurde. Die in diesem Bild nicht sichtbaren Maschen des Objektmodells werden bestimmt und in Abb. 5 als graue Re-



Abb. 6: Zur Texturierung verwendete Aufnahme des Römischen Theaters.

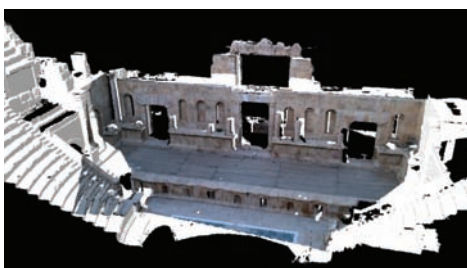


Abb. 7: 3D Modell mit texturiertem und verdeckten Bereichen.

gionen markiert. Diese Bereiche werden aus der ursprünglichen Vermaschung des 3D Modells extrahiert um sie anschließend durch ein zweites Bild von einem anderen Aufnahmestandpunkt aus zu texturieren. Dieser Prozess der Sichtbarkeitsanalyse und Extraktion verdeckter Bereiche wird anschließend so lange wiederholt, bis das komplette Modell anhand aller verfügbaren Bilder texturiert ist. In einem letzten Schritt werden dann die getrennten Bereiche wieder zu einem Gesamtobjekt zusammengefügt.

Dieses iterative Verfahren wurde auch zur Prozessierung eines Datensatzes des Römischen Theaters in Jerash, Jordanien eingesetzt. Im Rahmen dieses Projektes wurden zunächst zur geometrischen Rekonstruktion LIDAR Daten von 6 Standpunkten aus mit einem Mensi GS100 Scanner erfasst. Das daraus abgeleitete 3D Modell besteht aus 6 Millionen Dreiecken. Zunächst wird das in Abb. 6 dargestellte Bild zur Texturierung verwendet, das Ergebnis zeigt Abb. 7.

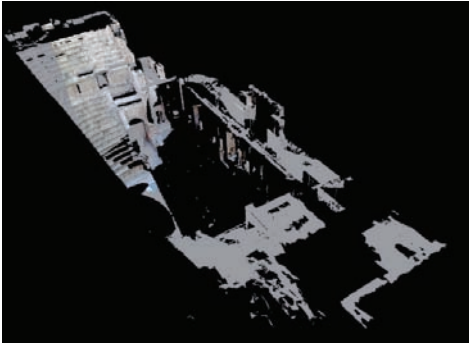


Abb. 8: Extrahierte Bereiche nach Texturierung durch zweites Bild.



Abb. 9: Zweites Texturbild.



Abb. 10: Ausschnitte des mit weiteren Bildern texturierten Modells.

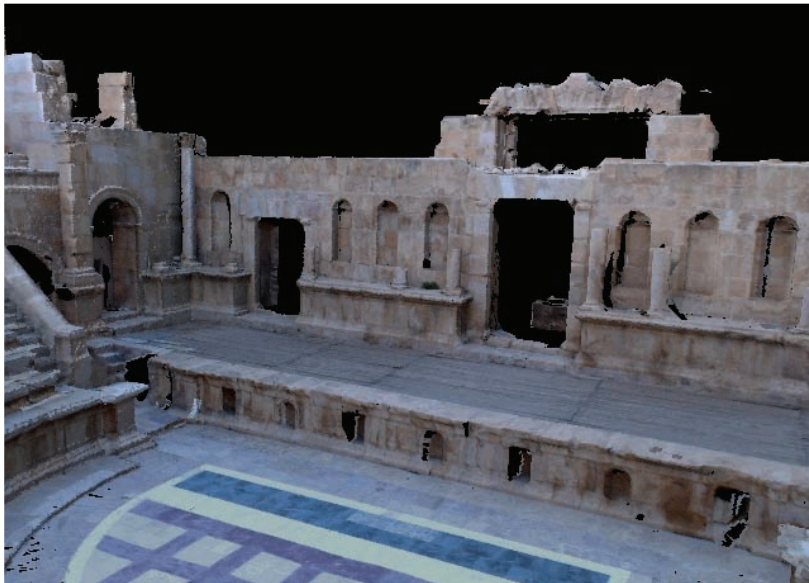


Abb. 11: Ergebnis der Texturierung nach Zusammenfügung der Teilbereiche.

Analog zur Darstellung in Abb. 5 sind dabei die im Bild verdeckten Bereiche des 3D Modells grau eingefärbt.

Abb. 8 zeigt diese Bereiche getrennt vom ursprünglichen 3D Modell. Diese Maschen werden wiederum mit dem in Abb. 9 enthaltenen Bild texturiert, das Ergebnis dieses Prozesses ist bereits in Abb. 8 enthalten.

Die danach verbleibenden grau markierten Bereiche werden dann mit weiteren verfügbaren Bildern texturiert, beispielhafte Ergebnisse sind in Abb. 10 dargestellt.

Neben der geometrischen Prozessierung ist in der Regel auch eine radiometrische Bearbeitung der Texturbilder notwendig. Hierfür wurde ein kommerzielles Bildverarbeitungs paket zur Histogrammanpassung und Bildmosaikierung genutzt. Dadurch ist die Minimierung eventueller Differenzen zwischen den zur Texturierung verwendeten Bildern möglich. Wie Abb. 11 anhand eines Ausschnitts des endgültigen 3D Modells zeigt, werden so nach dem abschließenden wieder Zusammenfügen homogene Schnittlinien zwischen den mit unterschiedlichen Bildern texturierten Teilbereichen erreicht.

4 Zusammenfassung

Realistische Visualisierungen komplexer Szenen, wie sie beispielsweise zur Dokumentation von Kulturdenkmälern und historischen Bauten erstellt werden, erfordern eine Texturierung der erfassten 3D Modelle mittels qualitativ hochwertiger Bilder. Dies kann durch eine Kombination von LIDAR Daten mit getrennt erfassten Bildern ermöglicht werden. Während mit dem vorgestellten Verfahren der Einsatz der registrierten Datensätze derzeit auf die Texturierung beschränkt ist, sollen zukünftige Arbeiten eine Integration auch zur effektiveren 3D Datenerfassung und geometrischen Modellierung nutzen.

Literatur

- [AH05] ALSHAWABKEH, Y. & HAALA, N., 2005: Automatic Multi-Image Photo Texturing of Complex 3D Scenes. – CIPA IAPRS, Vol. 34-5/C34: 68–73.
- [A06] ALSHAWABKEH, Y., 2006: Integration of Laser Scanning and Photogrammetry for Heritage Documentation. – Dissertation Universität Stuttgart.
- [BJ88] BESL, P. & JAIN, R., 1998: Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9(2): 167–192.
- [BM92] BESL, P.J. & MCKAY, N., 1992: A method for Registration of 3-D Shapes. – IEEE Trans. on Pattern Anal. & Machine Intell. 14[2]: 239–256.
- [CH96] CHRISTY, S. & HORAUD, R., 1996: Iterative Pose Computation from Line Correspondences. – Computer Vision and Image Understanding, Vol. 73, No. 1: 137–144.
- [GKK*05] GRAMMATIKOPOULOS, L., KALISPERAKIS, I., KARRAS, G. & PETA, E., 2005: Data Fusion from Multiple Sources for the production of Orthographic and Perspective Views with Automatic Visibility Checking. – CIPA IAPRS Vol. 34-5/C34.
- [HJJ*96] HOOVER, A., JEAN-BAPTISTE, G., JIANG, X., FLYNN, P. & BUNKE, H., 1996: An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 18(7): 673–689.
- [KF03] KLINEC, D. & FRITSCH, D., 2003: Towards pedestrian navigation and orientation. – Proceedings of the 7th South East Asian Survey Congress: SEASC'03, Hong Kong.
- [LH02] LEE, Y. & HABIB, A., 2002: Pose Estimation of Line Cameras Using Linear Features. – ISPRS Symposium of PCV'02 Photogrammetric Computer Vision, Graz, Austria.
- [LHS00] LENSCH, H., HEIDRICH, W. & SEIDEL, H., 2000: Automated texture registration and stitching for real world models. – Proceedings of Pacific Graphics, pp. 317–326.
- [LS05] LIU, L. & STAMOS, S., 2005: Automatic 3D to 2D registration for the photorealistic rendering of urban scenes. – Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society.
- [MLM01] MARSHALL, D., LUKACS, G. & MARTIN, R., 2001: Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy. – IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 23(3): 304–314.
- [SD01] SAPPA, A. & DEVY, M., 2001: Fast Range Image Segmentation by an Edge Detection Strategy. – Proc. IEEE Conf. 3D Digital Imaging and Modelling, (2001), pp. 292–299.

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. YAHYA ALSHAWABKEH
e-mail: yahya.alshawabkeh@ifp.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. NORBERT HAALA
e-mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Prof. Dr.-Ing. DIETER FRITSCH
e-mail: dieter.fritsch@ifp.uni-stuttgart.de
Universität Stuttgart
Institut für Photogrammetrie (ifp)
Geschwister-Scholl-Straße 24D
D-70174 Stuttgart

Manuskript eingereicht: Januar 2007

Angenommen: Januar 2007

Simultaneous 3D-Flow Field and Compliant Wall Measurements in an Abdominal Aortic Aneurysm Flow using Scanning-PTV

KLAUS WERNER HOYER*, JOSEPH KNIGHT, MARKUS HOLZNER, MICHELE GUALA & WOLFGANG KINZELBACH, Zürich

Keywords: Medicine, tomographic scanning, index matching, scanning particle tracking velocimetry, flow phantom

Abstract: We combine well established particle tracking with wall surface measurements using tomographic scanning and present results for the non-stationary 4D – flow field within an abdominal aortic aneurysm (AAA) phantom. It was manufactured from an optically homogeneous but slightly opaque silicone having an index of refraction $n = 1.414$. The fluid used is a mixture of water and glycerol to match the index of refraction of the silicone to render the region of interest undistorted. The 3D data is acquired in two ways. First full volume illumination and spectral separation of Rhodamine labelled particles is used to obtain the flow field. In a second experiment, a scanning light sheet illumination for the detection of the aorta wall is used. Both experiments are phase locked to the pulsating beat of the pump. We use a set of four high speed cameras, which were calibrated using a standard PIV calibration target placed parallel at two separate planes within the region of interest. In addition to the seeded particles, which we identify and track in time, the aneurism wall lights up across the cut with the laser plane and we will now also extract the surface of the moving interior wall through proper epipolar constraints, e. g. their intersection with a filtered edge detection map.

Previous measurements and attempts of different groups (MRI, DNS) to unify the stationary flow field data have shown the necessity to obtain the compliant wall motion simultaneously with the flow field boundary conditions. This paper addresses this issue to meet all necessary requirements that will allow further development of a numerical simulation tool.

Kurzfassung: *Simultane Messung eines pulsierenden Geschwindigkeitsfeldes und der bewegten Gefäßwand eines abdominalen Aortenaneurysmas mit Scanning PTV.* Wir kombinieren Particle Tracking Velocimetry und tomographisches Laser Sheet Scanning, um das Geschwindigkeitsfeld und die Wandbewegung eines abdominalen Aortenaneurysmas (AAA) während pulsierendem Durchfluss zu bestimmen. Das AAA-Phantom besteht aus optisch homogenem, flexiblem Silikon mit Brechungsindex $n = 1.414$ und leicht milchiger Färbung. Als Testflüssigkeit wurde eine Mischung aus Wasser und Glycerin mit gleichem Brechungsindex gemischt, um das Beobachtungsvolumen verzerrungsfrei abbilden zu können. Die 3D Daten werden auf zwei Methoden erzielt. Zuerst wird das gesamte Beobachtungsvolumen beleuchtet und die Emission der beigefügten Flüssigkeitsmarker (Rhodamine Partikel) durch einen Gelbfilter vom Hintergrund getrennt. In einem folgenden Experiment wird die Aorta-Wand mit einer dünnen, senkrecht zu ihrer Ebene bewegten, Lichtschicht durchstrahlt. Dasselbe Kamerasystem, jedoch ohne Gelbfilter, erlaubt nun die Wandkoordinaten aus den im Laserschnitt beleuchteten Querschnitten im Raum zu rekonstruieren. Beide Experimente sind über eine im Bild platzierte LED mit dem Puls der Pumpe synchronisiert und erlauben so, ein phasengemittelttes Geschwindigkeitsfeld und die zugehörige Wandbewegung als Funktion der Zeit darzustellen.

Frühere Versuche verschiedener Gruppen (MRI, DNS) zeigten, dass beide Informationen im gleichen Experiment zu messen sind, um ein geschlossenes System inklusive der zeitlich abhängigen Randbedingungen zu erhalten. Dieses dient dann als Testfall für die Weiterentwicklung der numerischen Methoden für den allgemeinen Fall.

* Corresponding author.

1 Introduction

1.1 Motivation

The quantitative analysis and modelling of fluid flow in humans has become an increasingly important tool for decision making regarding the course of action for treatment. In patients with an aortic aneurysm, the risks of surgery have to be weighted against the risks of rupture. To date, the main decision criterion for or against surgical intervention is a critical aneurysm diameter of $D = 5$ cm.

Whereas this criterion is an empirically found result that should save most peoples' lives, each aneurysm exhibits its own flow topology. Additional fluid stresses on the arterial walls stem from flow redirection, flow separation and possibly wall attached vortex cores. Generally these additional stresses generate within the aneurysm due to the sudden increase diameter and therefore act primarily on the arterial wall cells that have already weakened considerably. The local nature of these repetitive alternating fluid flow stresses may contribute significantly to ones individual risk, especially when the wall has lost enough elasticity and support tissue to actually collapse locally during the low pressure phase.

The final goal of this cooperative effort is to have a reliable numerical simulation tool that incorporates the moving geometry and time dependent fluxes from individual patient MRI data to help in the decision process.

1.2 Aims

We aim to provide a complete experimental data set that allows the necessary verification and optimization of a numerical flow simulation, given the fluctuating wall surface and flux or pressure boundary conditions at the inlet and exits. Although the phantom geometry is modelled after an individual patient, the experimental setup will not simulate the exact flow in the patient mainly due to differences in the outlet impedances and the differences in the struc-

tural support. Nevertheless it will provide a viable data set, being a regular solution of the Navier-Stokes equations under the given boundary conditions.

Previous work using index matched liquids for optical flow measurements in complex geometries were pioneered by EDWARDS & DYBBS 1984 (LDA in rod bundles) and later expanded by HOPKINS et al. 2000 (PIV in a nasal cavity). Here additionally we allow compliant wall motion compared to the previous investigations.

2 Material and Methods

2.1 Index matching

The AAA wall material is a permanently cured but flexible silicone from DOW Chemicals and was manufactured by repeatedly brushing the surface of a $\lambda = 3/2$ scaled up wax positive and curing the layer to the elastic state from the initially viscous liquid state. During the liquid state of the curing process, the positive wax geometry has to be constantly tumbled around in a specially designed rotating fixture to avoid large irregularities in the wall thickness.

The material exhibits a homogeneous index of refraction that has been matched using an approximate (40:60) mixture of glycerol and water. During the mixing and matching, the refractive index of the solution was repeatedly measured using a Bellingham + Stanley Eclipse 45-41 refractometer, which allowed approaching the ideal mixture asymptotically.

2.2 Full volume illumination for particles phase

As tracer particles we added Rhodamine labelled particles with a nominal size distribution of $64 \mu\text{m} < d_{90} < 128 \mu\text{m}$. It was necessary to use labelled particles to increase the signal to noise ratio. Unfortunately, the silicone material was more opaque than it should ideally have been. Although certain opaqueness is desirable, too much scatter from the wall increases the background grey value and also blocks light especially to re-

gions where it has to pass multiple wall segments. The particle phase was therefore measured separately from the wall acquisition described further below.

To measure the particle phase, we used an expanded Ar-Ion laser beam and yellow filters on the cameras to block the scattered light (488 and 514 nm wavelength), from the aneurism wall. A separate camera calibration was obtained for the setup with filters since it was necessary to touch the cameras to mount the mirrors. The camera exposure was over the entire frame at a camera frame rate of $f_C = 250$ Hz.

2.3 Scanning laser sheet illumination for wall

Our laser sheet is obtained by expanding an Ar-Ion laser beam of approximately 2.5 mm diameter using a cylindrical lens. The sheet thickness at the observation volume adjusts to approximately $d_{LS} = 1$ mm using a long focal length cylindrical lens. The laser beam reflects from rotating 16-face cylindrical mirror and a passes through a spherical lens to parallelize the beam. The prism was closed loop controlled using National Instruments motion control hardware. The horizontally scanning beam now expands to a sheet using a $f = 8.5$ mm focal length cylindrical lens having a maximum length $l = 80$ mm. The scanning laser sheet then is mirrored directly to the region of interest such that the light passes through the model in the least self obstructing way, possibly compromising the ideal case of the scan direction being as aligned to the camera axis as possible to maximize data yield. The wall data was acquired having the prism rotating at $f_{VS} = 11$ Hz. Camera frame rate was set at $f_C = 500$ Hz and shutter set to 1 ms to obtain stop action images.

2.4 Camera setup and image splitter

We use a set of four highspeed cameras (Microtron with resolution 1280 k by 1024 k @ $12\ \mu\text{m}$ square pixels) with C-mount $f = 25$ mm focal length lenses set with two 5 mm spacers and at $f\#16$ to maximize depth

of field. Additionally a yellow filter reduced the direct scatter of the laser light and passed the Rhodamine emitted light essentially unhindered. This allowed additional signal improvement for the fluid phase tracking. The cameras are set to view a common region of interest.

3 Data acquisition and processing

3.1 Camera calibration

The camera calibration is achieved using a standard PIV target positioned at two known planes separated approximately as to border the front and back of the region of interest with respect to the camera axis. The back calibration image was taken through the AAA phantom. This image was high pass filtered, after which edge artefacts from the phantom were removed, whereas the front calibration was imaged directly. To give an impression for the index match quality we show the original back calibration image in Fig. 1.

Together with a target file of the “true” 3D coordinates, this image file allows determination of the inner and outer camera parameters with respect to a chosen coordinate system. The calibration, the particle recognition and the stereoscopic matching through the multimedia geometry is detailed

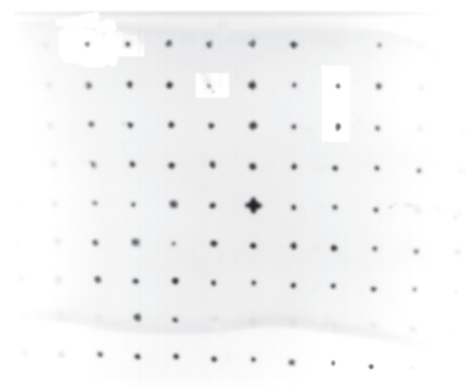


Fig. 1: Processed back plane calibration image as seen by one camera. In the second from bottom row one recognizes the slightly opaque AAA phantom wall (particles were removed).

in MAAS (1992). The calibration of the camera model allowed identification and stereo-matching of about 400 particles per slice. The positioning accuracy is about $50\ \mu\text{m}$ in the normal to and about $300\ \mu\text{m}$ parallel to the camera axis. The decreased resolution along the optical axis can be explained with the large working distance when imaging a relatively large region of interest using the 4 way splitter geometry and a 25 mm focal length lens. A shorter focal length lens may also help to improve this compromise.

3.2 Camera trigger

The camera is being triggered in “random reset”-mode which allows triggering to the rotating prism or each new start of the laser scan. On the trigger, the camera timer is reset after which a set number of images are

taken at a pre-programmed frame rate. In our case we obtained 20 images at 500 Hz camera frame rate per trigger.

3.3 Image sequence

In SPTV we use a laser sheet that scans perpendicular to its plane, whereas a camera repeatedly takes a rapid image sequence. To illustrate the process, we have added a film-strip image of a volume scan through the region of interest

As a result of the fast sequential image acquisition we have an observation volume that is gathered with increasing time stamp, e. g. the far planes are scanned after the near planes. For the tracking and post-processing it is desirable to have all data interpolated to a single time stamp for each volume scan. The detailed code adaptations for

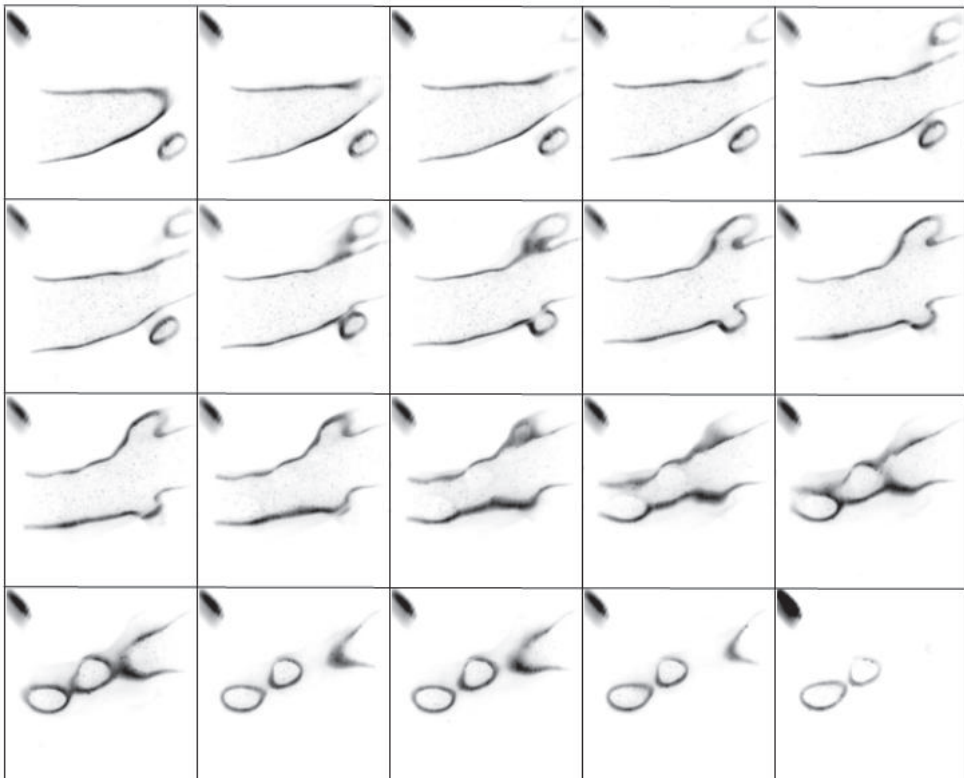


Fig. 2: Filmstrip of one volume scan through the aorta as imaged by one camera view. Time progresses from left to right and from top to bottom. The camera frame rate from this earlier is 2 kHz and is acquired within $1/100\text{s}$.

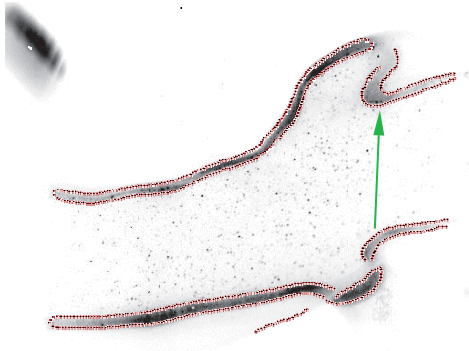


Fig. 3: Top/left quarter of the imager chip with typical raw data (grey) and pearl-string contour (red). The green arrow is parallel to the laser light. Both the illumination and the observation paths are partly obscured by wall material; especially noticeable as dark region (top right) and as edge artefact through the lower segment (bottom right), respectively.

SPTV post-processing have been published recently HOYER et al. (2005). We tracked the particle data sequence using a correlation based approach detailed in HOYER et al. (2006). For now, we will focus on the edge

detection algorithm used to determine the wall coordinates. Fig. 3 shows a single slice of raw data of the top/left 512^2 pixels, where seed particles and aortic wall are visible being illuminated by a thin slice. The edge detected by the image pre-processing is also highlighted as red pointed line. We can see that the obstruction of the illuminated region by dark wall material leads to false edges, visible in edge detected the lower right artery. Since these false edges do not generally result in matched edges, they do not show up in the result. Only edges that have stereoscopic matches are determined real, data that does not result in stereoscopic matches is discarded.

The scanning laser sheet adds an additional dynamic thickness to the width of the laser sheet. When scanning the sheet perpendicular to its plane, the illuminated region grows linearly with time. To obtain a sharp contour it is therefore desirable to have a thin static sheet and a short exposure time. Since the particle recognition requires the shutter to be open for the inverse of the frame rate, we can only increase the frame rate to minimize this dynamic effect. For the

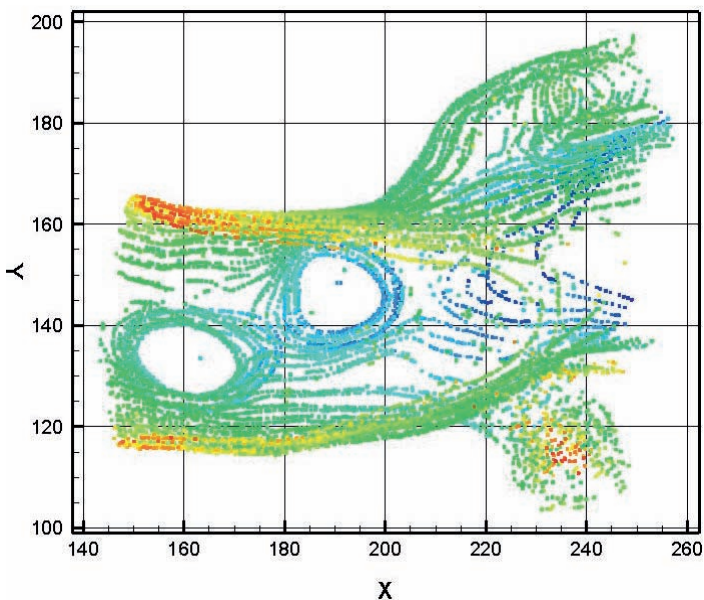


Fig. 4: Inner and outer surface contours of the aortic wall compiled from 20 slices. Colours indicates Z-coordinate (red near/blue far) (units in [mm]).

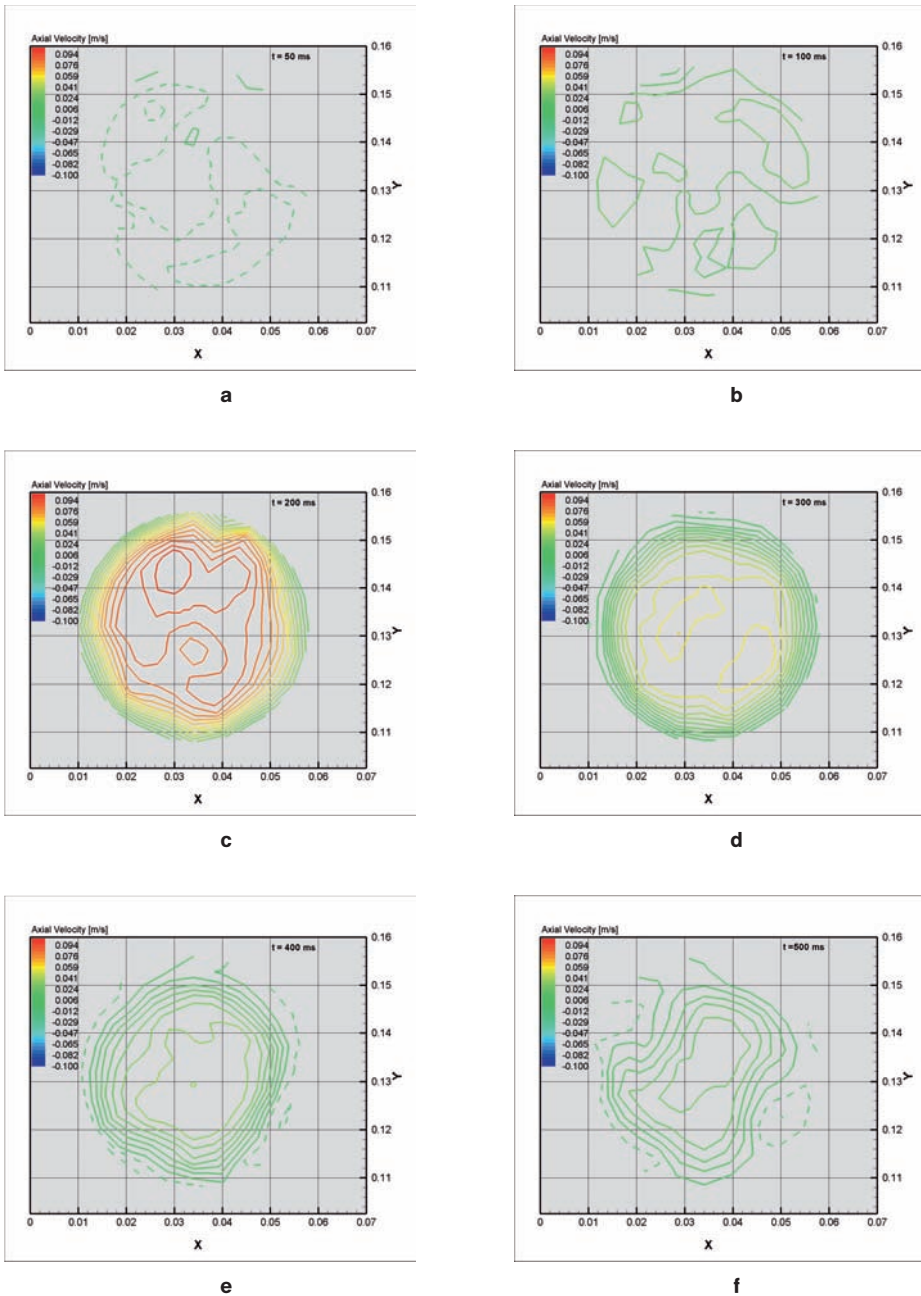


Fig. 5a–f: Axial Velocity profile over the artery cross section at different instances in time. Dashes lines resemble negative velocities. Data is interpolated using 16 phase locked pulses overall.

surface extraction, the images were pre-processed to remove the particles and to increase the signal from the wall scatter using low pass filtering and gamma correction. The edge detection and segmentation was achieved using the LabView image processing toolbox.

3.4 Surface extraction

The surface extraction is achieved by processing the edge segments as strings of particles. Therefore we generated finely discretized lines of “particles” along all edge sequences to feed to the particle recognition and matching code. When the line is discretized in increments smaller than the tolerance to the epipolar line, the stereoscopic matching algorithm will find some candidates and chooses the match with the least error in every image as long as a common edge has been detected. The additional noise introduced to the wall coordinate is directly related to the discretization and thus can be reduced to levels comparable with regular particle recognition uncertainties. For the current application, memory or processing time restraints have not surfaced using this approach.

Fig. 4 shows the reconstructed volume obtained with the described edge detection displaying the main abdominal aortic branches supplying kidneys and digestive tract. The branch leading out to the bottom right exhibits decreased resolution and possibly artefacts due to the mentioned obstruction in the observation path. This obstruction can be reduced by processing also unambiguous stereo pairs. This is possible only when the location of the arbitrarily inclined scanning plane is modelled correctly in time, so that the epipolar lines can be kept as short as possible. This can be done in a second step after processing the images in a first step using little restriction on the length of the epipolar lines. The arbitrary inclination and scanning direction is necessary to avoid obstruction of the illumination path. This iterative second step is not yet implemented and the particle cloud presented in Fig. 4 was compiled from triplets

and quadruplets, e. g. common points recognized in three and four cameras simultaneously, respectively. Possibly also other topological features such as the grey value gradient will be needed to sort out doublet match ambiguities from opposite surfaces.

3.5 Flow field extraction

The pulsating flow field in the observed experiment (see Fig. 5a–f) has a large variation from almost zero velocity to a maximum of $U = 0.15$ m/s which leads to a Reynolds number of $Re = 450$ based on the aorta diameter $D = 0.03$ m and kinematic viscosity of the water glycerol mixture $\nu = 10^{-5}$ m²/s.

Particle tracking was achieved using the four time frame tracking algorithm described previously. We were also using a yellow filter to increase the signal to noise ratio for the particles, however had trouble recognizing particles in the darker regions, which is especially true at the Gaussian tails of the laser sheet intensity. Contrary to the image preprocessing for the wall surface, the particle images were high pass filtered.

4 Conclusion

We are presenting a highly resolved flow field within a replica of an abdominal aortic aneurysm using SPTV for the illumination of the tracer particles and the phantom wall. From a total of 11500 detected particles per volume scan, 4000 interpolated trajectories remained after tracking and trajectory interpolation. The scattered light from the opaqueness of the phantom wall material exceeds by far the signal from the particle images. Therefore we used spectral separation between the excitation at 514 nm and the particle Rhodamine emission using a yellow filter. The model wall was more opaque than necessary which resulted in reduced data quality and necessitated work-arounds. The particle recognition and matching algorithm allows essentially an arbitrary orientation of the illuminating light sheet, which is necessary to optimize the light path through the model phantom with

respect to the obstruction of the incoming light. Although optimally perpendicular to the common camera symmetry line, the direction and motion of the scanning sheet has to avoid also connection tubing and fittings within the model tank. The optical access of both illumination and observation has to be carefully judged designing and building a generally customized glass-walled container. We present a single observation volume of only a part of the entire flow phantom. We plan to repeat and optimize the measurements over the entire phantom to obtain a dynamic flow field and wall motion map as an experimental baseline and boundary conditions to allow improvement of the direct numerical simulation of such flow problems.

Acknowledgements

We wish to express our gratitude to the Swiss national science foundations CO-ME program sponsored through the National Centres of Competence in Research (NCCR).

References

- EDWARDS, R.V. & DYBBS, A., 1984: Refractive index matching for velocity measurements in complex geometries. – TSI Quarterly, Volume X, Issue 4.
- HOPKINS, L.M., KELLY, J.T., WEXLER, A.S. & PRASAD, A.K., 2000: Particle image velocimetry in complex geometries. – Experiments in Fluids, 29: 91–95.
- HOYER, K., HOLZNER, M., LÜTHI, B., GUALA, M., LIBERZON, A. & KINZELBACH, W., 2005: 3D Scanning particle tracking velocimetry. – Experiments in Fluids, 39: 923–934.
- HOYER, K., HOLZNER, M. & KINZELBACH, W., 2006: Correlation based particle tracking Velocimetry. – 5th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Dubrovnik, Croatia, September 25–29, 2006.
- MAAS, H.-G., 1992: Doctoral thesis: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. – Dissertation ETH Nr.: 9665.
- Address of the authors:
- Dr. sc. tech. KLAUS WERNER HOYER,
Tel. +41-44-6333068, Fax: +41-44-6331061
- M.Sc. Biomed. Engineering JOSEPH KNIGHT
Dipl.-Ing. MARKUS HOLZNER
Dr. Envir. Engineering MICHELE GUALA
Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG KINZELBACH
- e-mail: (hoyer,holzner,guala,kinzelbach)@ifu.bau.ethz.ch,
joseph.knight@lntn.iet.mavt.ethz.ch
ETH Zürich, CH-8093 Zürich, HIL G 37.1
Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), Professur für Grundwasser und Hydro-mechanik (GWH)
- Manuskript eingereicht: Januar 2007
Angenommen: Januar 2007

Berichte

6. Oldenburger 3D-Tage

vom 31.1. bis 1.2.2007

Die 6. Oldenburger 3D-Tage wurden in diesem Jahr von rund 230 Teilnehmern besucht. Die Zahl von Hochschulleitern, Anwendern und Herstellern hat sich auch 2007 die Waage gehalten und macht den besonderen Charakter der Tagung aus. Die Fachvorträge aus den Bereichen des *Laserscanning*, der *Nahbereichsphotogrammetrie* und *Spezialanwendungen wie der 3D-Mikroskopie* waren meist praxisnah und problemorientiert. Die Mischung des Publikums hat dazu beigetragen, dass interessante Diskussionen nach den Fachvorträgen angestoßen wurden, die man auch in der Firmenausstellung oder auf der Abendveranstaltung beim traditionellen Grünkohlessen fortführen konnte. Herstellern und Dienstleistern wurde genügend Zeit und Raum zur Verfügung gestellt, um sich zu präsentieren, 24 Aussteller nahmen dieses Angebot gerne an. Die Oldenburger 3D-Tage haben sich als Fachtagung und Ausstellerplattform auch über den Bereich von Nordwestdeutschland hinaus etabliert und sind mittlerweile fester Bestandteil des jährlichen Veranstaltungskalenders geworden. Sowohl Hochschulleitern und Anwendern als auch Dienstleistern und Herstellern wird in Oldenburg Gelegenheit zum Ideenaustausch gegeben.

Eröffnet wurde die Fachtagung durch einen Vortrag von Prof. KUTTERER von der Leibniz Universität Hannover zum Thema: *Kinematisches Terrestrisches Laserscanning – Stand und Potenziale*. In dem Vortrag wurde anschaulich gezeigt, wie man mit einem

Laserscanner auch bewegte Objekte mit hoher zeitlicher Auflösung erfassen kann, indem man den Messmodus von der typischen 3D Aufnahme mit vergleichsweise geringer Taktrate auf die schnelle Aufnahme von 2D Profilen oder eine 1D Punktmessung beschränkt. Durch Kopplung mit weiteren Sensoren lassen sich auf diese Art auch komplexe Fragestellungen behandeln, sofern die Synchronisierung der Sensoren gewährleistet ist. Das Scannen von einer bewegten Plattform aus verlangt nach einer Referenzierung der Scannerposition mit Hilfe von Navigationssensoren. Ziel eines solchen Scansystems wird in Zukunft die automatische Vermessung und Navigation von einer bewegten Plattform aus sein.

Die knapp 50 Vorträge der Teilnehmer befassten sich unter anderem mit der Vorstellung neuer Algorithmen zur *Ausdünnung von Punktwolken*, *Eich- und Standardisierungsverfahren verschiedener Geräte* sowie der *Vorstellung neuer Geräte, beziehungsweise ersten Erfahrungsberichten mit neuen Geräten im praktischen Einsatz*. Erweitert wurde das bekannte Programm aus Nahbereichsphotogrammetrie und Laserscanning durch *„Nischenforen“ zur Roboternavigation und der 3D-Mikroskopie*. Eine Liste der Vorträge sowie die Vortragsfolien werden unter <http://www.fh-oow.de/3dtage/programm.php> zur Verfügung gestellt. Die Beiträge der Vortragenden werden als Sammlung von Artikeln im Wichmann Verlag als Tagungsband der 6. Oldenburger 3D Tage erscheinen.

DIRK RIEKE-ZAPP, Bern

Hochschulnachrichten

Technische Universität München

Frau Dipl.-Ing. **BIRGIT WESSEL** promovierte am 29. Mai 2006 an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen (Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung) der Technischen Universität München mit der Arbeit „*Automatische Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten*“ zum Dr.-Ing.

1. Gutachter: Prof. i.R. Dr. Dr. e.h. HEINRICH EBNER, Technische Universität München

2. Gutachter: Prof. Dr. OLAF HELLWICH, Technische Universität Berlin

3. Gutachter: Prof. Dr. UWE STILLA, Technische Universität München

Zusammenfassung

Bei der automatischen Extraktion von topographischen Objekten wie Straßen aus Fernerkundungsdaten liegt generell die Schwierigkeit darin, den Erkennungsprozess mit Methoden der Bildanalyse zu realisieren: die Erfassung von Strukturen, deren Gruppierung und die Zuweisung von Semantik. Neuere Arbeiten verwenden hierzu üblicherweise Objektmodelle, die eine Abstraktion des zugehörigen realen Objekts repräsentieren. Bisherige Forschungsarbeiten zur Straßenextraktion haben diese Objektmodelle hauptsächlich für optische Bilddaten aufgestellt. Die gestiegene Auflösung der *synthetic aperture radar* (SAR-)Sensoren ermöglicht aber auch die Erkennung von Straßen aus SAR-Bilddaten. SAR-Bilddaten bieten mit ihren Aufnahmen im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums eine gute Ergänzung oder Alternative zu optischen Bilddaten: zum einen in Bezug auf die schnelle Verfügbarkeit der Daten (Unabhängigkeit der Aufnahme von der Tageszeit und dem Wetter) und zum anderen in Bezug auf die unterschiedlichen spektralen Eigenschaften.

Diese Arbeit stellt einen Ansatz zur automatischen Extraktion von Straßen aus

SAR-Bilddaten vor. Der Ansatz basiert auf einem bestehenden Verfahren zur Extraktion von Straßen aus optischen Bilddaten (Dissertation WIEDEMANN, 2001). Dieses Verfahren wird durch Berücksichtigung SAR-spezifischer Abbildungseigenschaften und Modellierung von Nachbarschaftsbeziehungen an SAR-Bilddaten angepasst und verbessert. Das vorgestellte System ist vor allem für die automatische Straßenextraktion in ländlichen Gebieten und für Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. zwei Metern geeignet.

Generell basiert der Ansatz zur Straßenextraktion auf der Extraktion von Linien. Für die Linienextraktion aus SAR-Bilddaten wurde eine SAR-spezifische Vorverarbeitung vorgestellt, deren wesentliche Elemente eine Speckle-Reduzierung, eine radiometrische Kalibrierung und eine Vorklassifikation von städtischen und ländlichen Gebieten sind. Im Anschluss an die Extraktion von dunklen Linien entstehen durch die Gruppierung und Bewertung der Linien nach geometrischen und radiometrischen Kriterien Hypothesen für Straßen. Zusätzlich werden Verbindungshypothesen eingeführt. Mit Hilfe einer „kürzesten Pfadsuche“ erfolgt dann die Extraktion des Straßennetzes.

Dieses Verfahren wurde auf größeren SAR-Szenen flugzeuggetragener Sensoren (E-SAR, AER II, AeS 1) mit ländlichen und industriellen Inhalten angewendet. Durch eine Analyse der erzielten Ergebnisse konnte eine Einteilung in allgemeine und SAR-spezifische Problembereiche vorgenommen werden. Darauf aufbauend wurden Erweiterungen in der Modellierung von Straßen und ihren Kontextbeziehungen vorgenommen, um die Straßenextraktion zu verbessern.

So wurden für einige der SAR-spezifischen Problembereiche, wie Bäume, Brücken, bewegte Fahrzeuge und Verkehrsschilder, die das Erscheinungsbild von Straßen lokal beeinflussen, die Abbildungseigen-

schaften modelliert. Die explizit modellierten, lokalen Objekte werden als Kontextinformation in die Straßenextraktion eingebracht, um so kleinere Lücken im extrahierten Straßennetz zu schließen und die topologische Korrektheit der extrahierten Straßen zu erhöhen, z. B. an Stellen, die durch Layover und Schatten von Bäumen verdeckt sind.

Eine weitere Verbesserung der Straßenextraktion wird durch die Einführung von Bereichen mit dichter Bebauung aus der Vorklassifikation erzielt. Mit dieser Information können neue, sichere Startstücke für Straßen gewonnen werden, die die Vollständigkeit des extrahierten Straßennetzes verbessern.

Darüber hinaus wird eine automatische Extraktion von Autobahnen vorgestellt, die auf einer expliziten Modellierung der geometrischen, radiometrischen und multi-skalen Eigenschaften von Autobahnen in SAR-Bilddaten beruht. Die Vollständigkeit dieser Straßenklasse konnte dadurch auf über 90 % gesteigert werden.

Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens wird anhand von verschiedenen SAR-Szenen aus ländlichen und industriellen Gebieten demonstriert und durch einen Vergleich der Ergebnisse mit manuell erfassten Referenzdaten evaluiert.

Die Dissertation ist in der Schriftenreihe der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in der Reihe C, Heft Nr. 600, veröffentlicht und online verfügbar unter: <http://dgk.badw.de/index.php?id=12>

Technische Universität Berlin

Von der Fakultät VI (Planen, Bauen, Umwelt) wurde Dipl.-Natw. (ETH) **MARTIN RITTER** am 30. Oktober 2006 zum Dr.-Ing. promoviert. Das Thema seiner Dissertation lautet "*A landmark based method for the geometrical 3D calibration of scanning microscopes*".

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. OLAF HELLWICH und Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ, TU Berlin, Dr. HEINZ HOHENBERG, Heinrich-Pette-Institut Hamburg.

Zusammenfassung

Die vorgelegte Arbeit stellt eine neue Strategie und ein daraus abgeleitetes Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von 3D-Messgeräten im Mikrobereich vor. Das Verfahren beruht auf der Anwendung von räumlichen Kalibrierstrukturen mit Nanomessmarken (Nanomarker). Es konnte erfolgreich für die 3D-Kalibrierung von Rasterkraftmikroskopen (SPM) und konfokalen Laserrastermikroskopen (CLSM) eingesetzt werden. Im Rahmen von vergleichenden Untersuchungen wurden die 3D-Kalibrierstrukturen ebenfalls für die photogrammetrische Selbstkalibrierung im Rasterelektronenmikroskop (SEM) verwendet.

Für die Umsetzung der Kalibrierstrategie wurde sowohl für die eigentliche 3D-Kalibrierung als auch für die photogrammetrische Selbstkalibrierung das in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendete Prinzip von Messmarken in Form von Nanomarkern auf den Mikro- und Nanobereich übertragen. Als Träger für die Nanomarker dienen neu entwickelte, räumliche Mikrostrukturen in Gestalt von mehrstufigen Pyramiden mit schrägen Seitenflanken, hergestellt mit der Technologie der *Focused Ion Beam* (FIB) induzierten Metalldeposition. Die 3D-Mikrostrukturen sind so konzipiert, dass sie den größten Teil des Messvolumens von Rasterkraftmikroskopen erfassen und durch ihre Form die gleichmäßige Verteilung der Nanomarker im Messvolumen der Rastergeräte ermöglichen. Die Nanomarker wurden durch FIB-Ätzung (*Milling*) als Messmarken mit einem Durchmesser von wenigen 100 Nanometern auf die Basis und die Stufenplateaus der pyramidalen Mikrostrukturen aufgebracht. Die Nanomarker besitzen eine optimale Gestalt, welche sowohl eine genaue räumliche Messung mit SPM und CLSM erlaubt, als auch die photogrammetrische Berechnung der Koordinaten der Nanomarker bei Aufnahmen der Kalibrierstrukturen im SEM. Die Mittelpunkte der Nanomarker dienen als Referenzpunkte in den Messdaten, deren Bild- bzw. Objektkoordinaten mit Hilfe von digitalen Bildverarbeitungsmethoden in Subpixelgenauigkeit bestimmt wurden.

Im Gegensatz zu den hier verwendeten räumlichen Referenzstrukturen beruhen bisherige Kalibriermethoden für Rastermikroskope auf sequentiellen Kalibriermessungen von 2D-Gitter- und Höhenstrukturen. Das bedeutet, dass die Bestimmung des Maßstabsfaktors für die Höhenmessung einer Mittelwertbildung über den gesamten Datensatz entspricht, und damit unabhängig von der jeweiligen lateralen Rasterposition. Daher ist es mit dem sequentiellen Kalibrierverfahren nicht möglich, Kopplungen zwischen den lateralen Koordinatenachsen und der z-Achse in Form eines Scherungsfaktors zu bestimmen.

Aus diesem Grund wurde für die hier vorgestellte 3D-Kalibrierung ein geometrisches Modell verwendet, welches Maßstabsfaktoren in alle Raumrichtungen sowie Achsenkopplungen zwischen allen Koordinatenachsen zulässt. Mit der korrelativen Analyse der Messdaten der drei Messmethoden (SPM, CLSM und photogrammetrische SEM) konnten erstmals direkt alle Maßstäbe sowie lineare Kopplungen der im jeweiligen Messgerät verwendeten Sonde für die Höhenmessung in Abhängigkeit von ihrer lateralen Messposition erfasst werden.

Es zeigte sich, dass die während der Messungen mit SPM und CLSM ausgeführte Rasterbewegung fehlerbehaftet ist. Durch Hystereseeffekte und Führungsabweichungen der Rastergeneratoren, durch Fehler und Eigenheiten im Regelkreis, in der Anbringung der Sonde sowie in der Signaldetektion weicht das Messkoordinatensystem der Mikroskope von einem idealen Referenzkoordinatensystem ab. Maßstab und Orthogonalität der Achsen der Messkoordinatensysteme müssen kalibriert und korrigiert werden, um die Messpunktstände auf die SI-Einheit Meter zurückzuführen und damit quantitative 3D-Messungen zu ermöglichen.

Die korrelative Analyse der SPM, CLSM und SEM Messdaten der Nanomarker ergab bei Berücksichtigung aller ermittelten Kalibrierparameter Restdifferenzen von minimal etwa 13 nm. Ohne Verwendung der Kopplungsparameter zwischen den lateralen und der vertikalen Achsen liegt der Wert um bis zu sechs Mal höher. Durch die Be-

rücksichtigung der räumlichen Kopplungen bei der 3D-Kalibrierung ist also erstmals eine direkte Vergleichbarkeit von Rasterverfahren im Mikro- und Nanobereich möglich geworden.

Universität Stuttgart



Masterkurs GEOENGINE

der Abteilung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Stuttgart

Beginnend mit dem Wintersemester 2007 lädt die Universität Stuttgart ein zu 18 monatigen „Master of Science“-Kursen für die Erlangung des akademischen Grades eines M.Sc.

Die wissenschaftliche Qualität dieser Ausbildung wird getragen von:

- Prof. Dr. DIETER FRITSCH, GIS, Photogrammetrie, Fernerkundung
- Prof. Dr. WOLFGANG KELLER, Geodäsie, Geophysik
- Prof. Dr. ALFRED KLEUSBERG, Navigation, Laserscanning
- Prof. Dr. WOLFGANG MÖHLENBRINK, Vermessung, Navigation, Verkehr
- Prof. Dr. NICO SNEEUW, Geoid, Satelliten-Geodäsie

Voraussetzungen für die Bewerbung sind:

- Abschluss eines „Bachelor of Science“-Studiengangs oder eines gleichwertigen ersten Universitätsstudiengangs in Geoinformatik oder eines verwandten Studienfachs.
- Sehr gute Englischkenntnisse. Der Studiengang wird in Englisch gehalten.

Bewerbung: jeweils bis 31. März für den Studienbeginn im Herbst desselben Jahres.

Jeder Lehrgang umfasst 3 Semester. Die Teilnehmerzahl ist auf 15 im Jahr begrenzt. Die Kosten betragen 500€ pro Semester.

Kurs-Direktor: Dr. MICHAEL CRAMER
e-mail: info@geoengine.uni-stuttgart.de
<http://www.geoengine.uni-stuttgart.de/>

Persönliches

Dipl.-Ing. RUDOLF LIEBE verstorben

Im Alter von 98 Jahren ist am 3.2.2007 unser derzeit ältestes Mitglied der DGPF, Herr Ltd. BB-Direktor a.D. Dipl.-Ing. RUDOLF LIEBE in Trier verstorben.

Geboren am 3.6.1908 in Elberfeld, ging er hier auch zur Schule und machte 1926 das Abitur. Es folgte das Studium des Vermessungswesens in Bonn und Hannover, wo er auch den Abschluss als Diplomingenieur erwarb. Damit waren alle Voraussetzungen erfüllt für eine Beamtenlaufbahn bei der Eisenbahn. Ende der 30er Jahre war RUDOLF LIEBE bei der Deutschen Reichsbahn in Berlin tätig, später in Nürnberg.

Während des 2. Weltkrieges war er als Eisenbahner an der Ostfront eingesetzt vom Baltikum bis zur Krim. Das Kriegsende erlebte er in Nordhausen, wo er auch seine Frau kennen lernte und wenige Wochen nach Kriegsende heiratete. Über verschiedene Zwischenstationen landete er schließlich 1951 in Trier, wo seine Familie mit zwei Kindern in den folgenden 55 Jahre wohnen blieb. In den 60er Jahre wurde RUDOLF LIEBE nach Wuppertal versetzt, wo ihm u. a. das Vermessungsdezernat der Bundesbahn unterstellt wurde. Er wurde zum Bundesbahnoberrat befördert. Dann folgte die Versetzung nach Frankfurt als Direktor der zentralen Kartenstelle der Deutschen Bundesbahn und schließlich die Beförderung zum leitenden Bundesbahndirektor. 1973 wurde

er pensioniert und auch persönlich in Trier sesshaft.

RUDOLF LIEBE war Mitglied des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW), aber sein besonderes Interesse galt der Photogrammetrie. Seit 1954 besuchte er gern und oft die Deutschen Geodätentage und die FIG-Kongresse im In- und Ausland. Noch im hohen Alter von 88 Jahren hat er Reisen nach Australien, Thailand, Hongkong, Bali und Singapur unternommen.

1970 erschien von ihm in der Zeitschrift BuL Heft 3, Seite 184–188 ein Aufsatz mit dem Titel „Planherstellung durch Photogrammetrie bei der Deutschen Bundesbahn“. Er hat u. a. ein Tunnelmessgerät entwickelt, für das ein Patent erteilt wurde.

RUDOLF LIEBE hat sich in den letzten 10 bis 15 Jahren nicht mehr aktiv am gesellschaftlichen Leben der DGPF beteiligen können. Aber bis zu seinem Tode hat er die Zeitschrift PFG aufmerksam gelesen und die Entwicklung von Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation sowie die Veränderungen in unserer Gesellschaft mit großem Interesse verfolgt.

Der Vorstand der DGPF und insbesondere die Mitglieder, die RUDOLF LIEBE gekannt haben, trauern um einen verdienstvollen Berufskollegen und werden ihm ein ehrendes Gedenken bewahren.

THOMAS LUHMANN, Oldenburg
Präsident der DGPF

Buchbesprechung

KURT G. BALDENHOFER, 2007: Lexikon der Fernerkundung. DVD-ROM. Erweiterte Neuauflage. Vertrieb: Kurt Baldenhofer, Im Hädele 8, 88048 Friedrichshafen, Tel.: 07544-8227, Fax: 07544-741516 und über Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Schrettenbrunner, Lehrstuhl Didaktik der Geographie.

Die neue Version des Lexikons der Fernerkundung erscheint wieder auf DVD und wird vom Internet Explorer 7 optimal unterstützt. Die mehr als 1000 Stichworte sind über ihre Anfangsbuchstaben über eine Navigationsleiste leicht auffindbar. Nach Autorenangaben ist die DVD-Version immer aktueller als die Internet-Version. Da-

rüber hinaus beinhaltet die DVD zusätzliche Informationen, die im Internet nicht bereitgestellt werden:

- hoch aufgelöste Darstellungen ausgewählter Abbildungen,
- vertiefende Zusatztexte zu einzelnen Stichworten,
- Tutorials zur Fernerkundung,
- Software zur Verarbeitung und Visualisierung von Satellitenbildern,
- Stichwortunabhängige Zusatzmaterialien,
- Thematisch gegliederte Linkliste zur Fernerkundung.

Schon auf der Startseite der DVD wird deutlich zwischen den Zusatzinformationen und dem eigentlichen Lexikon unterschieden. Die Navigation der DVD ist vorbildlich.

Inhaltlich macht das Lexikon der Fernerkundung einen ausgereiften Eindruck. Die Stichworte zur Fernerkundung sind verständlich formuliert, anschaulich illustriert (z. T. animiert) und gut mit weiteren Stichworten verlinkt. Alle Quellen sind vollständig ge-

nannt, so dass es auch möglich wird z. B. zur Originalquelle im Internet zu wechseln. Durch farbige Unterscheidung zwischen internen (DVD-) Links und externen Links ins Internet ist man jederzeit in der Lage zu bewerten woher die Informationen stammen.

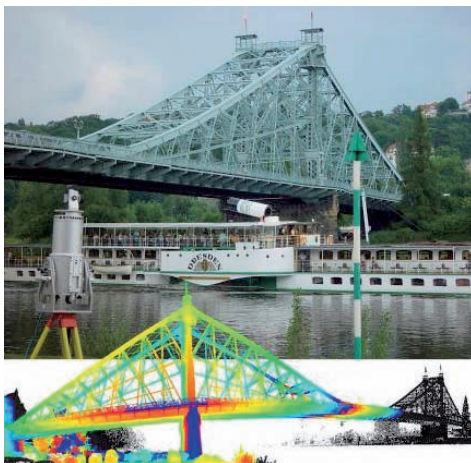
Die Informationstiefe ist für die Zielgruppe der Lehrer und Schüler an Gymnasien (Oberstufe) sowie Dozenten und Studenten der Geographie gut gewählt. Das Lexikon bietet für sie einen reichen Fundus an Informationen, Materialien und Links zur Vertiefung und Ergänzung bestimmter Themen.

Dem Autor ist es gelungen, dieses umfangreiche und ständig wachsende Werk stets aktuell zu halten und für funktionierende Internetlinks zu sorgen. Es ist zu wünschen, dass die Zusammenstellung des Lexikons kontinuierlich weiter wächst und dass hierbei Kollegen der Fernerkundung konstruktiv mitarbeiten. Insgesamt ein eindrucksvolles Werk, dem ich weite Verbreitung wünsche.

CARSTEN JÜRGENS, Bochum

Zum Titelbild

Laserscanner-Aufnahme des „Blauen Wunders“ in Dresden



Das „Blaue Wunder“, eigentlich Loschwitzer Brücke genannt, ist eine der schönsten Elbe-Brücken in Dresden. Erbaut wurde die

Stahlfachwerkkonstruktion 1891–1893 als eine der ersten strompfeilerfreien Brücken. Sie galt seinerzeit deshalb als technisches Wunderwerk und verdankt ihren Namen ihrem hellblauen Anstrich.

Im Rahmen eines studentischen Projektes am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden wurde das „Blaue Wunder“ mit einem terrestrischen Laserscanner Riegl Z420i aufgenommen. Auf dem von Süden aufgenommenen Titelbild ist ein Teil des „Blauen Wunders“ zusammen mit einem Dresdner Schaufelrad-dampfer während der Scan-Aufnahmen zu sehen. Außerdem ist die von einem Standpunkt des Laserscanners erzeugte Punktwolke als Distanzbild dargestellt. Unterschiedliche Farben bedeuten dabei unterschiedliche Entfernungen vom Aufnahme-standpunkt.

DANILO SCHNEIDER, Dresden