

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2009, Heft 1

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

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

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



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2009



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:

© 2009 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsidentin: Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, Tel.: +49(0)345 55-26020
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2–18, D-48145 Münster, e-mail: klaus.komp@eftas.com

Published by:

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

Internet: <http://www.schweizerbart.de>

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

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

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

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition
Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer, Institut für Angewandte Informatik, Universität der Bundeswehr München, D-85577 Neubiberg, e-mail: Helmut.Mayer@unibw.de

Schriftleiter: Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Gebäude NA 7/133, D-44780 Bochum, e-mail: carsten.juergens@rub.de, Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten, HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr.1, D-22297 Hamburg, e-mail: thomas.kersten@hcu-hamburg.de, Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer, Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn, e-mail: Lutz.Pluemmer@ikg.uni-bonn.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 107, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@geo-basis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: €185,- 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 351456-0; Fax: 0711 351456-99.

e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

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

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

PFG – Jahrgang 2009, Heft 1

Inhaltsverzeichnis

Themenheft Terrestrisches Laserscanning

KERSTEN, T. & PRZYBILLA, H.-J.: Editorial Terrestrisches Laserscanning	5
--	---

Originalbeiträge

MOLNÁR, G., PFEIFER, N., RESSL, C., DORNINGER, P. & NOTHEGGER, C.: On-the-job Range Calibration of Terrestrial Laser Scanners with Piecewise Linear Functions	9
SCHENK, S. & HANKE, K.: Genetic Algorithms for Automatic Registration of Laser Scans with Imperfect and Subdivided Features (GAREG-ISF)	23
VENNEGEERTS, H., PAFFENHOLZ, J.-A., MARTIN, J. & KUTTERER, H.: Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans	33
SCHMITT, A. & VÖGTLE, T.: An Advanced Approach for Automatic Extraction of Planar Surfaces and their Topology from Point Clouds	43
NOTHEGGER, C. & DORNINGER, P.: 3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation	53
BOOCHS, F., KERN, F., SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen	65
KERSTEN, T.P., LINDSTAEDT, M. & VOGT, B.: Preserve the Past for the Future – Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai	79
SCHWALBE, E. & MAAS, H.-G.: Bewegungsanalyse schnell fließender Gletscher aus multi-temporalen terrestrischen Laserscanneraufnahmen	91

Berichte und Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen

8 th International Scientific and Technical Conference “From imagery to map: digital photogrammetric technologies” vom 15.–18. September 2008 in Porec, Kroatien ...	99
10. Europäische Konferenz für Computer Vision (ECCV'08) vom 13.–16. Oktober 2008 in Marseille, Frankreich	101
Denkmäler3.de vom 5.–7. November 2008 in Essen	102
ISDE Summit „Digital Earth Summit on Geoinformatics: Tools for Global Change Research” vom 12.–14. November in Potsdam	104

Mitteilungen

Laserscanning im Deutschen Markscheidewesen	105
---	-----

Buchbesprechungen

CAR, A., GRIESEBNER, G. & STROBL, J. (2008): Geospatial Crossroads @ GI_Forum '08	106
---	-----

Veranstaltungskalender	107
------------------------------	-----

Zum Titelbild	109
---------------------	-----

Korporative Mitglieder	110
------------------------------	-----

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

Editorial: Themenheft Terrestrisches Laserscanning

THOMAS P. KERSTEN, HAMBURG & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, BOCHUM

Dieses Themenheft der PFG präsentiert gebündelt aktuelle Fortschritte des terrestrischen Laserscannings. Seit circa einem Jahrzehnt erobern terrestrische Laserscanner vielfältige Marktsegmente im Bereich der 3D-Messtechnik, die früher der Tachymetrie oder der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie vorbehalten waren. Heute stellt sich das terrestrische Laserscanning sowohl als konkurrierende, als auch als ergänzende Messmethode mit erweiterten Möglichkeiten dar. Der technologischen Entwicklung der Geräte stehen jedoch immer noch Schwierigkeiten bei der Auswertung der 3D-Punktwolken gegenüber, deren Überführung in strukturierte Objektdaten überwiegend manuell und nur in Teilen semi-automatisch erfolgt.

Die konstruktive Weiterentwicklung der Scannersysteme ist zunehmend durch die Übernahme der Fähigkeiten geodätischer Instrumente (z. B. Neigungskompensation) sowie die Integration und Kombination digitaler Bilddaten in den Aufnahme- und Auswerteprozess gekennzeichnet. Bei stetigen Entwicklungen in der Sensortechnologie und der damit verbundenen Optimierung der Scanner-Hardware in Richtung zunehmender Automation in der Datenerfassung, stellt die Auswertesoftware auch weiterhin den Schwachpunkt dar. Das Scannen von Objekten erfordert heute nicht mehr unbedingt eine hohe fachliche Qualifikation, sondern funktioniert schon fast auf Knopfdruck. Die Verarbeitung der Daten jedoch stellt den Anwender oft vor große Herausforderungen, da einerseits die Auswertesoftware begrenzte Funktionalitäten bietet und andererseits riesige Datenmengen die Hardware vor Probleme stellen. Viele Anwendungen sind aktuell noch durch einen geringen Automationsgrad und damit einher gehend, hohen zeitlichen Aufwand, charakterisiert.

Instrumentelle Untersuchungen (Geräteuntersuchungen und -kalibrierungen, Sensormo-

dellierung, Multispektral-Scanning, Standardisierung, etc.) und die Entwicklung automatisierter Auswertesysteme (zur Registrierung von Punktwolken, bei der Objektextraktion und Datenfusion, etc.) stellen heute und zukünftig sehr interessante Herausforderungen für Forschung und Entwicklung dar. Terrestrisches Laserscanning ist daher aktuell durch folgende Schwerpunkte gekennzeichnet:

- Neue gerätetechnische Entwicklungen
- Instrumentelle Untersuchungen
- Modellierung systematischer Fehler und Entwicklung von Prüf- und Kalibrierungsverfahren
- Automatische Methoden zur Sensororientierung bzw. zur Registrierung und Georeferenzierung von Punktwolken
- Objekterkennung und automatische 3D-Objektmodellierung
- Kombination von Punktwolken und Bilddaten zur Texturierung und Modellierung
- Erweiterte, innovative Anwendungsgebiete für terrestrische Laserscanner

Die vorliegenden acht Beiträge dieses Themenhefts decken die oben aufgeführten Bereiche bereits teilweise ab und zeigen somit das breite Spektrum des terrestrischen Laserscannings auf. Die Artikel sind thematisch nach Kriterien der durchzuführenden Arbeitsschritte bei der Datenverarbeitung wie folgt gegliedert: Prüfung und Kalibrierung, Registrierung, (direkte) Georeferenzierung, (automatische) Objektextraktion, Filterung, Modellierung sowie Deformations- und Bewegungsanalyse.

Im einführenden Artikel „*On-the-job Range Calibration of Terrestrial Laser Scanners with Piecewise Linear Functions*“ beschreiben GÁBOR MOLNÁR, NORBERT PFEIFER, CAMILLO RESSL, PETER DORNINGER und CLEMENS NOTHEGGER eine „on the job“ Kalibrierungsmethode für die Streckenmessungen des FARO LS 880HE

Laserscannern. Die vorgestellte Methode setzt dafür voraus, dass ebene Flächenstücke in der gescannten Punktwolke vorhanden sind, wobei die Orientierungsparameter der einzelnen Scanpositionen, die Ebenenparameter und die Parameter für die Entfernungskorrektur in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen simultan berechnet werden.

Eine Methode zur vollautomatischen Registrierung von Punktwolken, welche durch einen signifikanten Rauschpegel, unvollendete Geometrie sowie Verdeckungen gekennzeichnet sind, wird in dem Beitrag „*Genetic Algorithms for Automatic Registration of Laser Scans with Imperfect and Subdivided Features (GAReg-ISF)*“ von STEFAN SCHENK und KLAUS HANKE präsentiert.

In dem Beitrag „*Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans*“ von HARALD VENNEGEERTS, JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, JENS MARTIN und HANSJÖRG KUTTERER werden zwei Verfahren zur direkten Georeferenzierung von terrestrischen Laserscans vorgestellt. Dabei wird die Position und Ausrichtung des Laserscanners auf einer statischen Plattform direkt durch ein integriertes kinematisches GNSS bestimmt. In der zweiten Aufnahmevariante wird die Kombination aus inertialem Messsystem (INS) und GPS genutzt, um das hybride Sensorsystem zu orientieren.

Ein erweiterter generischer Ansatz zur Extraktion von Oberflächenprimitiven wird in dem Beitrag „*An Advanced Approach for Automatic Extraction of Planar Surfaces and their Topology from Point Clouds*“ von ANDREAS SCHMITT und THOMAS VÖGTLE vorgestellt. Erste Erfahrungen mit synthetischen und realen Daten von Gebäuden haben die Eignung dieses Ansatzes sowie seine Robustheit gegenüber Rauschen, Oberflächenrauigkeit und Ausreißern erwiesen.

Der Beitrag „*3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation*“ von CLEMENS NOTHEGGER und PETER DORNINGER stellt eine Prozesskette zur Vorverarbeitung hoch auflösender Laserscanner-Daten vor, bei der durch Ausnutzung der Redundanz die Punktanzahl signifikant reduziert wird und dennoch Details, wie scharfe Kanten, erhalten bleiben. Mit der rechenintensiven Methode werden die

notwendigen Parameter automatisch geschätzt, wobei eine adaptive Anpassung dieser Parameter erforderlich ist, da die Punktdichte innerhalb eines Scans stark variieren kann.

In dem Aufsatz „*Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen*“ von FRANK BOOCHS, FREDIE KERN, RAINER SCHÜTZE und ANDREAS MARBS werden verschiedene Konzepte und Ansätze zur Objektrekonstruktion auf Basis von 3D-Punktwolken durch halb- und vollautomatisierte Auswertelgorithmen vorgestellt. Dabei werden die zu bewältigenden Aufgabenstellungen, wie z. B. Kugel- und Gebäuderekonstruktion, auf spezielle, exakt formulierte Detailprobleme begrenzt, so dass das Ziel eines automatisierten Auswertungsprozesses auch in der Praxis erreicht wird. Die Algorithmen arbeiten entweder auf rein geometrischer Basis oder unter Zuhilfenahme von Vorwissen in Form einer Ontologie, wobei die Verarbeitungsprozesse sowohl daten- als auch modellgetrieben sind.

Die Dokumentation der großen vulkanischen Steinfiguren (Moai) auf der Osterinsel, die seit 1995 Weltkulturerbe der UNESCO sind, durch terrestrisches Laserscanning wird in dem Beitrag „*Preserve the Past for the Future – Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island’s Moai*“ von THOMAS KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT und BURKHARD VOGT vorgestellt. Die Erfassung ausgewählter Moai in verschiedenen Epochen erlaubt die Analyse möglicher Deformationen und die Überwachung geplanter Konservierungsmaßnahmen durch 3D-Vergleiche der aus den Laserscanner-Daten generierten Objektmodelle.

Der abschließende Beitrag „*Bewegungsanalyse schnell fließender Gletscher aus multi-temporalen terrestrischen Laserscanner-aufnahmen*“ von ELLEN SCHWALBE und HANS-GERD MAAS berichtet über praktische Erfahrungen mit einem Laserscanner Riegl LPM-321 an dem grönländischen Gletscher Jacobshavn Isbræ. Multi-temporale Laserscanner-aufnahmen erlauben über die Herstellung von Korrespondenzen in 3D-Punktwolken die Bestimmung von Bewegungen der Oberfläche des Gletschers, der eine Geschwindigkeit von bis zu 40 Metern pro Tag aufweist. Hierzu wurden Verfahren der Kreuzkorrelation sowie

eine Iterative Closest Point (ICP-) Implementation verwendet.

Anschriften der Autoren:

Prof. THOMAS P. KERSTEN, HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

Prof. Dr.-Ing. HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik, Lennerhofstraße 140, D-44801 Bochum, Tel.: +49-234-32-10517, Fax: +49-234-32-14735, e-mail: Heinz-Juergen.Przybilla@hs-bochum.de

On-the-job Range Calibration of Terrestrial Laser Scanners with Piecewise Linear Functions

GÁBOR MOLNÁR, NORBERT PFEIFER, CAMILLO RESSL, PETER DORNINGER & CLEMENS NOTHEGGER, Vienna, Austria

Keywords: Laser Scanning, TLS, calibration, systematic errors

Summary: Phase-shift terrestrial laser scanners, as all other measuring devices, are affected by measurement errors, i.e. errors in range and vertical and horizontal angle. These errors are composed of a random and a systematic part. The systematic errors of the range measurement are in the order of a few millimeters, whereas random range measurement errors are higher.

An on-the-job range calibration method is presented and applied on a real dataset. The method relies on scanned datasets of planar surfaces, so called “patches”. Assuming that the measured points are on these patches, parameters of the range correction function, scanner and patch parameters are estimated simultaneously using least squares adjustment.

A continuous piecewise linear correction function is suggested, and its parameters are estimated using the proposed adjustment method. This is, from the theoretical point of view, the main contribution of this paper. It effectively exploits the massive overdetermination provided by terrestrial laser scanning and advances previously suggested self-calibration approaches (GIELSDORF et al. 2004, BAE & LICHTI 2007). The actual range correction function for a FARO LS 880HE instrument clearly shows the periodic range errors reported by other authors. The correction function also shows shorter periodic errors not reported before as well as non-periodic systematic errors.

Zusammenfassung: *On-the-Job Entfernungskalibrierung von terrestrischen Laserscannern mit stückweise glatten Funktionen.* Die Winkel- und Streckenmessungen von terrestrischen Laserscannern sind durch zufällige und systematische Fehler verfälscht. Bei der Entfernungsmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren sind die systematischen Fehler typischerweise zwar kleiner als die zufälligen Fehler, aber auch schwieriger zu bestimmen. In diesem Artikel wird eine „on the job“ Kalibrierungsmethode für die Streckenmessungen präsentiert und an einem realen Datensatz getestet. Die Methode setzt voraus, dass ebene Flächenstücke in der gescannten Punktwolke vorhanden sind. In der Folge werden in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen die Orientierungsparameter der einzelnen Scanpositionen, die Ebenenparameter und die Parameter für die Entfernungskorrektur simultan berechnet. Letztere ist durch eine stetige, stückweise lineare Korrekturfunktion realisiert. Diese Form der Korrekturfunktion und die simultane Berechnung ihrer Parameter ist der Hauptbeitrag dieses Artikels. Der Ansatz nutzt die in Laserdaten vorhandene Überbestimmung sehr effizient aus und erweitert existierende Selbstkalibrierungsvorschläge (GIELSDORF et al. 2004, BAE & LICHTI 2007). Im Beispieldatensatz eines FARO LS 880HE Laserscanners zeigten sich deutliche periodische Korrekturanteile über die auch andere Autoren bereits berichtet haben. Mit der vorgestellten Methode wurden aber auch markante periodische Korrekturanteile mit kürzerer Wellenlänge aufgedeckt – über diese wurde bisher noch nicht berichtet. Zusätzlich wurden auch nicht-periodische Anteile festgestellt.

1 Introduction

Precise and detailed, three-dimensional geometric models are used for multiple purposes

such as industrial site reconstruction, heritage documentation, and natural surface monitoring for risk and hazard assessment. Point clouds acquired by a terrestrial laser scanner

(TLS) are commonly used for automated model generation, as TLS allow for fast and area-wide acquisitions of huge scenes. The continuously increasing performance (i. e. data sampling rates) of such scanners increases also the expectations of the data end-users with respect to accuracy and richness in detail. However, these expectations can often not be fulfilled due to shortcomings of the systems.

TLS based on phase-shift measurement (RÜEGER 1990) have a field of application between less than one meter and up to 100 meter. Commercial systems apply amplitude modulation of the continuously emitted wave (AM-CW). The achievable accuracy of the raw measurements is about 3 millimeters for distances of up to 10 m. However, it has been shown, for example, by LICHTI (2007), AMIRI PARIAN & GRUEN (2005), and SCHNEIDER & MAAS (2007), that the error budget of TLS can be divided into random (precision) and systematic measurement errors following the definition of (MIKHAIL 1976). Hence, both categories of errors may be dealt with individually. For example, random measurement errors as reported by (INGENSAND et al. 2003) can be reduced significantly by suitable averaging techniques (NOTHEGGER & DORNINGER 2009) especially when taking advantage of the high measurement rates of phase-shift scanners (>100 kHz).

Systematic measurement errors cannot be removed by simple averaging. These errors are often correlated with the measured distance, hence, modifying the average of the measured distances. Thus these errors limit the applicability of terrestrial laser scanning especially if high accuracy, e. g., ± 1 mm, is required. However, systematic measurement errors can be eliminated, or at least reduced, by proper laboratory calibration. However, very often the scanned data still shows remaining systematic errors. Therefore correction methods are required, which can be applied "on-site", termed *on-the-job calibration* or *self calibration*.

In this paper, we propose a method for on-the-job *range* calibration of TLS. It requires multiple scans from identical, planar patches. It can be applied on data acquired on the job, i. e., real project data. Hence, changes of the calibration over time can be dealt with prop-

erly. Because of the huge amount of data, such methods are only feasible if they run automatically. The method is based on an overall adjustment of the residuals of the measurements with respect to the planar patches. Simultaneously, the plane parameters of all patches and the registration parameters of the individual scans are determined. The paper starts with an overview on the state-of-the-art in TLS calibration approaches in Section 2. Theory and methods are described in Section 3. In Section 4, we describe the acquisition and the preprocessing of the datasets used for the experiments. The results of the method's application on point clouds, acquired in historic rooms are presented in Section 5 and discussed afterwards.

2 State-of-the-Art

To understand the nature of the systematic errors discussed in this paper, a closer look on the measurement principles of the instruments used is necessary. Systematic errors of the early phase-shift electronic distance measurement devices are summarized by (RÜEGER 1990). He identified additive constant error, scale-error, short-periodic errors and non-linear distance dependent errors. The additive constant error is a constant difference of the true and the measured distance. This is due to the optical and electronic structure of the instrument (the uncompensated optical path length and time delay in the electronics). The scale error is due to the frequency error of the modulating waves. The short-periodic errors are periodic functions of the measured range. The wavelengths of these periodic functions are usually integer divisors of the modulating wavelengths. This can be caused by the optical and/or electrical crosstalk (RÜEGER 1990). Non-linear distance dependent errors are all other distance-dependent errors, which are repeatable and reproducible, but do not fit into the above three classes. These errors are usually modeled with polynomial expressions.

A similar error model was presented by (LICHTI 2007) for phase-shift scanners. The error functions for range measurement correction were the additional constant, scale factor and periodic functions with only the half of

the wavelength of shortest and middle modulating waves. In addition, the dependency of the measured distance from the vertical and horizontal angle of measurement direction was also considered. The actual values of the coefficients of the error functions (additional parameters, APs) were estimated using an adjustment method comparing laser scanner and tachymeter measurements of a set of retro-reflecting targets.

(INGENSAND et al. 2003) reported laser scanner range measurements compared with interferometer distances. As the measurements were made with one-meter interval for 0–52 meters, the short-periodic errors (shorter than 2 meters wavelength) were not seen in the calibration function. They also found an unexpected short-periodic error with a wavelength of approximately 3.4 meters and with increasing amplitude from 3 mm to 27 mm in the distance range from 28 to 52 meters. This indicates that short-periodic errors cannot be regarded as a periodic function with constant amplitude over the entire measurement range.

(KERSTEN et al. 2008) used spherical objects and reflective targets to evaluate and determine the long-distance measurement errors of new generation laser scanners. They also determined the non-periodic systematic errors for two phase-shift scanners.

The method of range measurement error determination – applied by the authors mentioned above – has significant deficiencies: Because the random error of the range measurements is larger than the systematic errors, the number of the calibration measurements (number of the measured targets) should exceed substantially the number of the calibration function coefficients (additional parameters). This is a very time consuming work, because the scanner measurements should be repeated many times for proper averaging of scanner data, and reference measurements (with tachymeter or interferometer) should be made with short distance intervals to find all possible short-periodic error components over the entire measurement range.

An analysis of short-periodic errors was made by (DORNINGER et al. 2008). They defined local plane surface segments (patches) in the dataset of a scanned room, and calculated the distances of individually measured points

from the adjusted planar patches. They used patches with an extent in range direction that is slightly longer than the wavelength of the expected systematic error. This method has limitations: the coefficients of periodic errors with longer wavelength than the extent of the patch cannot be determined. But increasing the extent of the patches is also limited, because then also the planarity of the patches on real surfaces decreases.

In an earlier work, a plane-based on-the-job calibration method was suggested by (GIELSDORF et al. 2004). The basic idea is that points measured from different scanner positions and corrected with the proper calibration function should fit on planar patches. The parameters of the calibration function, the exterior orientation of the scanners, and the plane parameters of the patches are estimated using an adjustment process, similarly to a photogrammetric bundle adjustment. (GIELSDORF et al. 2004) applied the method for correcting horizontal and vertical angles. For the ranges they estimated the additive constant error and the scale-error. (BAE & LICHTI 2007) applied this method for the FARO LS 880HE laser scanner data, and they estimated for range correction only the additive constant parameter (besides angular correction functions).

The measured distance also depends on the propagation conditions in the atmosphere (not significant on distances up to 50 meters) and on the interaction of the reflecting surface and the laser beam. This second effect (“material-related variance”) was examined by (INGENSAND et al. 2003). It is often modeled as a function of measured intensity and applied in the laser scanner software.

3 Theory and Method

We assume the following to be given: (i) several scans of the same scene obtained from different scan positions, and (ii) planar features included in the scene.

The method for detecting such planar features (termed *patches* in the following) is not scope of this paper. However, Section 4 on the example data gives a short description of the method we applied.

3.1 Observations

Exported x , y , z point coordinates should be converted to spherical coordinates, as the instrument actually measures these values. The spherical coordinates¹ of the i^{th} measured point in the j^{th} scanner space are range, ρ_{ij} , horizontal direction, λ_{ij} , and elevation (vertical) angle, φ_{ij} , which are parameterized in terms of scanner space Cartesian co-ordinates (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) as follows:

$$\lambda_{ij} = \arctan\left(\frac{y_{ij}}{x_{ij}}\right), \quad \varphi_{ij} = \left(\frac{z_{ij}}{\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}}\right) \quad (1.a, b)$$

$$\rho_{ij} = \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} + \Delta\rho(\mathbf{x}^{\text{AP}}) \quad (1.c)$$

As a consequence of the aim – correction of range measurements – a range correction function $\Delta\rho$ is introduced in Eq. (1.c). The actual form of the function $\Delta\rho$ will be discussed later. The parameters \mathbf{x}^{AP} of this correction function are either called “interior orientation parameters”, “additional parameters” (AP), in (LICHTI 2007), or “calibration parameters” in (GIELSDORF et al. 2004).

3.2 Functional Model

In the proposed algorithm, identical planes are observed from different scanner positions, so the range correction function, the scanner orientation parameters and the patch parameters are adjusted simultaneously, with the condition that the measured points are on the patch.

The Cartesian coordinates of the observed range and angle measurements can be calculated using the inverse of Eqs. 1.a – 1.c.

$$\rho_{ij}, \lambda_{ij}, \varphi_{ij} \rightarrow x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} \quad (2)$$

The Cartesian coordinates of this observed point are denoted as \mathbf{p}'_{ij} . To convert these

“scanner-based” coordinates to our global (project) coordinate system, the rotation matrix, \mathbf{M}_j , and translation vector, \mathbf{t}_j for the j^{th} scanner position are used. The point \mathbf{p}'_{ij} in the global coordinate system is given by

$$\mathbf{p}'_{ij} = \mathbf{M}_j \cdot \mathbf{p}_{ij} + \mathbf{t}_j \quad (3)$$

The rotation matrix is constructed using the rotation angles around the three axes of the global coordinate system. (GIELSDORF et al. 2004) used quaternion representation for the rotations, but if the initial values of these angles are close to the solution, classical rotation matrix representation is sufficient. The parameters responsible for scanner position and angular attitude are the exterior orientation. Therefore, the rotation angles and translation vector components are denoted as \mathbf{x}_j^{EO} .

The parameters of the k^{th} patch in the global coordinate system are the plane normal \mathbf{n}_k (with $\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{n} = 1$) and the patch constant d_k . The patch parameters are combined and denoted as \mathbf{x}_k^{PP} . The orthogonal distance of the measured point \mathbf{p}'_{ij} from its corresponding patch is:

$$v_{ijk} = \mathbf{p}'_{ij}{}^T \cdot \mathbf{n}_k - d_k \quad (4)$$

3.3 Stochastic Model

Our aim is to determine the additional parameters, the exterior orientation and the patch parameters such that all points \mathbf{p}'_{ij} lie as close as possible to their respective patch. For doing this simultaneously we apply a least squares adjustment based on Eq. (4). Since \mathbf{p}'_{ij} in (4) is a function of the original polar measurements (ρ, λ, φ) , such a least squares adjustment would require a Gauss-Helmert model minimizing the residuals of these original measurements. Then (4) could be used as constraints with $v_{ijk} \equiv 0$. However, at the present state of our research, we apply a simplified version and use \mathbf{p}'_{ij} as fixed, but consider Eq. (4) as observation equation (also termed condition); i. e.

$$0 + v_{ijk} = \mathbf{p}'_{ij}{}^T \cdot \mathbf{n}_k - d_k \quad (5)$$

Thus, the observation value is zero (i. e. the orthogonal distance of \mathbf{p}'_{ij} to its patch) and v_{ijk} is the residual. This way we work with a

¹ Often phase based TLS work like a “profiler”: the emitted laser beam direction rotates in a vertical plane, so the vertical angle, φ_{ij} , is from -90° (nadir) to 270° . This “profiler” makes a half rotation during the measurement process, so the direction angle, λ_{ij} , is between 0° and 180° .

Gauss-Markov model and according to the least squares principle, we need to minimize the sum of squared residuals:

$$\sum_{i,j,k} v_{ijk}^2 = \min \quad (6)$$

However, each point is observed at different distances and at different incidence angles w.r.t. the patches. Therefore the distribution of the orthogonal distance to the respective patch will be different in each \mathbf{p}'_{ij} . Consequently we introduce individual *a priori* weights, p_{ijk} and minimize the weighted sum of squared residuals:

$$\sum_{ijk} p_{ijk} \cdot v_{ijk}^2 = \min \quad (7)$$

The individual weight p (omitting $_{ijk}$) is given by $p = 1/\sigma_n^2$, where σ_n is derived by applying the law of error propagation onto (4). Geometrically σ_n can be interpreted as half of the extension of the error ellipsoid of the point \mathbf{p}'_{ij} in the direction of the plane normal \mathbf{n}_k . This error ellipsoid results from the propagation of the errors in (ρ, λ, φ) into the point \mathbf{p}'_{ij} .

The remainder of this Subsection shows how σ_n can be derived geometrically. The stochastic model can be established by defining standard deviations σ_ρ , σ_λ and σ_φ for original observations (KRAUS 1997). These values are taken from the instrument specification. To calculate the error ellipses of a measured

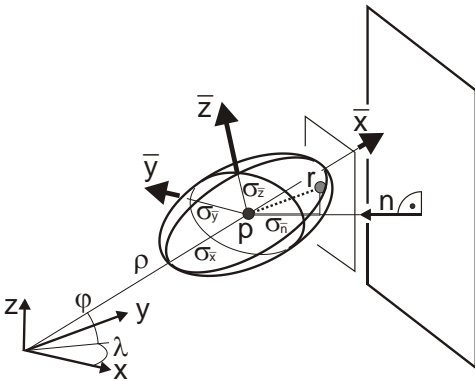


Fig. 1: Error ellipsoid in the measurement based local coordinate system. The σ_n value is half of the extension of error ellipsoid in the direction of the plane normal vector.

point, a local point-based coordinate system $(\bar{x} \bar{y} \bar{z})$ is defined (BAE et al. 2005), where this error ellipsoid is in canonical position: its axes are parallel to the axes of the local coordinate system. The \bar{x} -axis of this coordinate system is in the range measurement direction; the \bar{y} -axis is orthogonal to the \bar{x} -axis and orthogonal to the scanner vertical axis. The \bar{z} -axis is orthogonal to both, and the three axes follow the right-hand rule. In this local Cartesian coordinate system, the semi-axes of the error ellipsoid are:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma_\rho, \quad \sigma_{\bar{y}} = \cos \varphi \cdot \rho \cdot \sigma_\lambda, \quad \sigma_{\bar{z}} = \rho \cdot \sigma_\varphi \quad (8)$$

As $\sigma_{\bar{y}}$ and $\sigma_{\bar{z}}$ increases with the range, the shape of error ellipsoid differs from point to point. The σ_n is half of the extension of the ellipsoid in the plane normal direction. For points with longer measured range, $\sigma_{\bar{y}}$ and $\sigma_{\bar{z}}$ might significantly exceed $\sigma_{\bar{x}}$. To calculate σ_n , the plane normal is transformed into the system $(\bar{x} \bar{y} \bar{z})$.

On the ellipsoid the point $\mathbf{r} = (\bar{x}_r \bar{y}_r \bar{z}_r)$ is the tangent point of a plane parallel to the patch (see Fig. 1). The distance of the origin of the coordinate system to this tangent plane equals σ_n . It can be computed in the following way. The normal vector \mathbf{n} of the patch and the ellipsoid gradient in \mathbf{r} must be parallel: $\mathbf{n} \parallel \text{grad}_{\text{ell}}(\mathbf{r})$; thus:

$$(n_x; n_y; n_z) \parallel \left(\frac{2\bar{x}_r}{\sigma_{\bar{x}}^2}, \frac{2\bar{y}_r}{\sigma_{\bar{y}}^2}, \frac{2\bar{z}_r}{\sigma_{\bar{z}}^2} \right) \quad (9)$$

This yields:

$$(\bar{x}_r; \bar{y}_r; \bar{z}_r) = \frac{s}{2} (n_x \sigma_{\bar{x}}^2; n_y \sigma_{\bar{y}}^2; n_z \sigma_{\bar{z}}^2) \quad (10)$$

The scale factor s is computed using the ellipsoid equation:

$$\frac{1}{s^2} = \frac{n_x^2 \cdot \sigma_{\bar{x}}^2}{4} + \frac{n_y^2 \cdot \sigma_{\bar{y}}^2}{4} + \frac{n_z^2 \cdot \sigma_{\bar{z}}^2}{4} \quad (11)$$

Substituting s into Eq. (10) returns \mathbf{r} , which finally gives the *a priori* standard deviation of the measurement:

$$\sigma_n = \mathbf{n}^T \cdot \mathbf{r} \quad (12)$$

Since σ_n depends on the unknown normal vector \mathbf{n} , σ_n needs to be recomputed before each iteration step.

3.4 Formulation of the Adjustment

By combining all v_{ijk} to a vector \mathbf{v} and generating a diagonal matrix \mathbf{P}_{ii} from all weights p_{ijk} , our minimizing criterion is therefore given by

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P}_{ii} \mathbf{v} = \min \tag{13}$$

From Eq. (5) we get after linearization:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l} \tag{14}$$

where \mathbf{x} is the vector of corrections to the unknown parameters

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}^{AP}, \mathbf{x}_1^{EO}, \dots, \mathbf{x}_J^{EO}, \mathbf{x}_1^{PP}, \dots, \mathbf{x}_K^{PP}) \tag{15}$$

with J scan positions and K planar patches. \mathbf{A} is the Jacobian of Eq. (5) with respect to \mathbf{x} and \mathbf{l} is the misclosure vector. Constraints need to be defined as the length of each patch normal vector is 1:

$$\sqrt{\mathbf{n}_k^T \cdot \mathbf{n}_k} - 1 = 0 \tag{16}$$

These constrains after linearization can be rewritten in the form:

$$\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{w} = 0 \tag{17}$$

where \mathbf{C} is the Jacobian of the constraints with respect to the set of parameters and \mathbf{w} is the misclosure vector. This way we get a Gauss-Markov model with constraints. The respective system of equations can be solved using Lagrange multipliers $\boldsymbol{\mu}$.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_{ii} \mathbf{A} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_{ii} \mathbf{l} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Since the initial values of the parameters are already close to the final solution, one iteration is usually sufficient.

3.5 Range Correction Function

The applied range correction function should be mathematically as simple as possible, but also as effective as possible.

Harmonic functions (sine and cosine) with wavelengths reported by other authors seem to be a good choice. This definitely works for short-periodic wavelengths, but it also tries to approach the non-periodic error with periodic functions, which might introduce serious errors. Another disadvantage of harmonic functions is that the correction function does not necessarily have equal amplitude along the whole measurement range. Polynomial functions are also good for non-periodic components, but for realizing short-periodic components higher order terms are required, whose behavior is not very predictable. More complicated error functions could be composed by combining harmonic and polynomial functions.

Because of the mentioned drawbacks of harmonic and polynomial functions we select a piecewise linear range correction function. The measurement range is divided into M equal range intervals. The mathematical form is:

$$\Delta\rho(\rho) = a_i + \frac{a_{i+1} - a_i}{\rho_{i+1} - \rho_i} \cdot (\rho - \rho_i) \tag{19}$$

if: $\rho_i \leq \rho < \rho_{i+1}$ with $i = 1, \dots, M+1$

The a_i coefficients are the parameters of the function. The length of the intervals $\delta\rho = \rho_{i+1} - \rho_i$ can be set arbitrarily to some extent. As a lower limit for the interval length, there should be enough measurement points in all intervals of the range, to reduce the effects caused by random errors. An upper limit of $\delta\rho$ is given by the Nyquist-Shannon theorem: $\delta\rho$ must be smaller than half of the shortest wavelength of the short-periodic errors. The shortest wavelength observed by (DORNINGER et al. 2008) is the 15 cm wavelength, so the interval length should be shorter than 7.5 cm, and therefore $\delta\rho = 5$ cm proved to be a good compromise.

Depending on the minimum and maximum range (i. e. the span of ranges) this correction function is applied on, the number of unknown parameters a_i can be quite high and their esti-

mates after the adjustment will be correlated. This property makes this correction function not the best candidate for a *laboratory* calibration, which later is to be applied at different projects with different spans of ranges. It is, however, suitable for *on-the-job* calibration, which is the topic of this paper. There the derived correction function is only applied to the data set, which contains the patches that were used for determining the parameters a_i . In order to get reasonable estimates for all a_i within the span of ranges on site, all range intervals must be covered with range-wise overlapping patches. Therefore a suitable number of planar regions is required on site. Such conditions can be fulfilled for example at manmade sites. If certain range intervals are not covered by at least one patch, then these intervals can not be corrected.

The correction function (19) is of a very general form. The additive constant and the scale error are included implicitly. The latter would lead to a singularity in the adjustment. Consequently proper means for fixing this singularity must be introduced; e. g., known distances between the intersection points of triples of patch planes. Alternatively, one a_i can be fixed. This, however, introduces an artificial scale which appears as a linear trend in the correction function.

4 Data

4.1 Dataset

With a FARO LS 880HE scanner, several rooms of Schönbrunn Palace (Vienna, Austria) were scanned during a measurement campaign in May 2007. One of the rooms with



approximately 7.4 m by 5.8 m horizontal extension, and with a vaulted ceiling (up to 4 m) was scanned from three scanner positions. The walls of the room are covered with paintings (frescoes in the vaults and on linen, fixed on wooden frames on the walls). The floor is varnished parquet. Fig. 2, left, shows a textured, virtual model of this room. A map of the room indicating the three scanner positions (SP1, SP2, and SP3) is shown in Fig. 2, right. The three point clouds, acquired at the three scanning positions, originally consist of about 40 million points, each. The mean point density at 5 meter distance is about 3 mm.

4.2 Preprocessing of Data

The instrument already is equipped with a set of three internal range correction functions: a periodic correction with a wavelength of 60 cm, a polygonal correction function based on range and described as a look-up table, and another look-up table based correction correlated with the intensity of the reflected signal. Individual investigations of these three corrections have shown that the intensity calibration is sufficient, while the other two corrections may not be able to cope with the occurring systematic errors properly. Indeed, the influence of the periodic error with a wavelength of 60 cm was reduced but not eliminated sufficiently and periodic errors with different wavelengths are still detectable. Moreover, the polygonal distance correction eliminates the systematic errors only partially (DORNINGER et al. 2008). Hence, the internal periodic and the polygonal correction were deactivated, prior to our investigations.

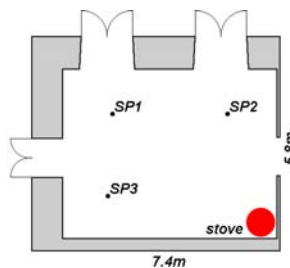


Fig. 2: A textured model of the Bergl-room (left) and a map including the scanner positions (right).

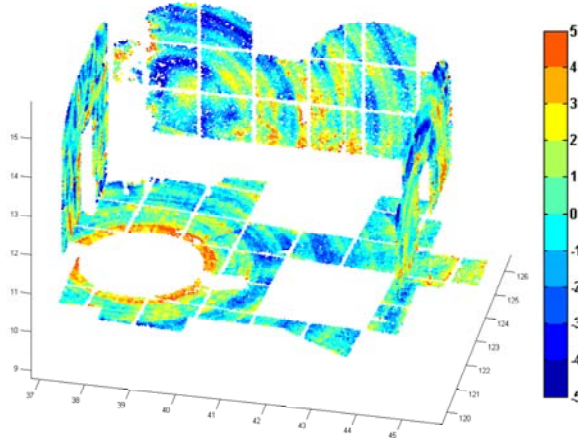


Fig. 3: The dataset of a room captured with FARO LS 880HE instrument. Point colors indicate the distance (in mm) of the measurement points (of SP 2 in Fig. 2) from adjusted planar patches. Circular patterns on the floor and on the walls originate from short-period measurement errors.

For reducing the measurement noise while simultaneously reducing the number of points to be processed, a three-dimensional filtering and thinning approach (NOTHEGGER & DORNINGER 2009) was applied. This allowed reducing the number of points by a factor of 20, resulting in approximately 2 million points per scan.

The first registration of the scans was based on a network of spherical targets, detectable in all point clouds. The reference positions of the targets were determined by tachymetric measurements. The accuracy of this registration is about ± 0.5 cm.

For the on-the-job calibration approach described in the following, planar features (“patches”), identifiable in multiple scans, are necessary. These patches are determined automatically by a two step procedure. First, an automatic segmentation (DORNINGER & NOTHEGGER 2007) is performed, resulting in an assignment of the given points to huge segments representing the walls and the floor. Second, the patches are determined by partitioning the huge segments into subsegments. These are defined in a regular pattern of the local 2D coordinate system of each huge segment. Therefore and because of the known orientation of the scans the patches are identified in all scans.

The patch definition allows for the determination of rectangular patches considering an

overlap (in percent), a minimum number of points belonging to a patch, and an *a priori* threshold for outlier elimination. For our experiments, we determined 1 by 1 meter patches, with 10 cm gaps between patches. For outlier elimination we defined a threshold of 1 cm. As the measurements were made in a room, where the strict planarity of the walls and the floor could not be guaranteed, a smaller threshold to eliminate non-planar patches would be favorable. On the other hand, it could not be determined beforehand if the observed deformation of a patch originates from the non-planarity of the feature, or from the systematic range measurement error of the instrument.

According to these parameters, we determined 73 patches. Initially, the plane parameters (\mathbf{n} and d) for all patches are calculated by independent adjustments. The orthogonal distances of the patch defining points with respect to the planes are shown color coded in Fig. 3 for one scan.

5 Results

Fig. 4 shows the resulting range correction function. Fig. 5 shows the power spectrum of the range correction function. As expected, periodic components with wavelengths of 60 cm and 30 cm can be found in the correc-

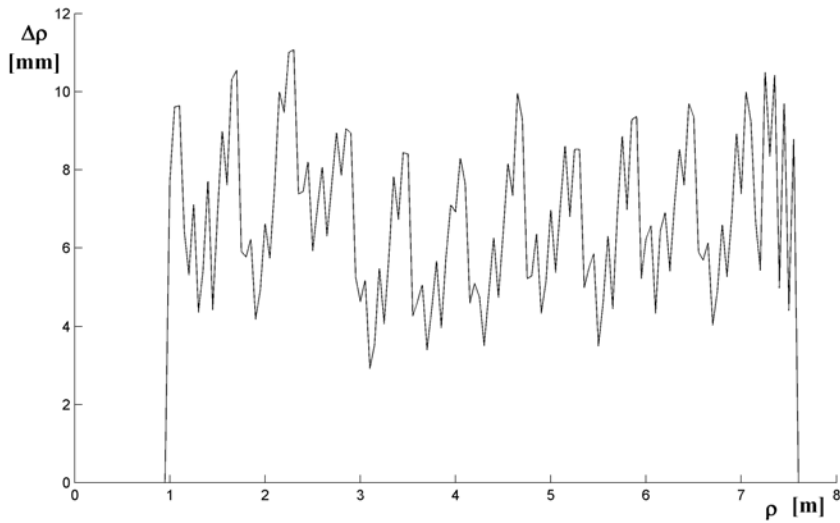


Fig. 4: Range correction function with interval length $\delta\rho = 5$ cm. Short-periodic systematic errors are clearly visible. The additional constant error of 6.72 mm on average is due to deactivating the internal periodic and polygonal correction.

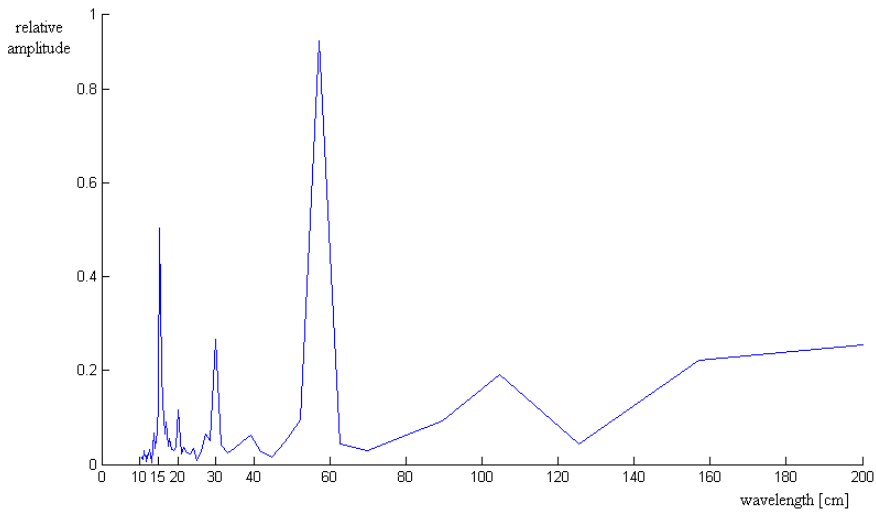


Fig. 5: Power spectrum of the Fast Fourier Transformation of the range correction function. The 60 cm wavelength is dominant, but also 15, 30 and 20 cm show very clear and sharp peaks. No such sharp edges can be identified for longer wavelength components.

tion function, but also higher frequency components (20 and 15 cm) are clearly visible.

Because no external reference distance was given, the scale ambiguity mentioned in Section 3.5 was solved by fixing one a_i . The linear trend induced thereby in the correction function was estimated after the adjustment and removed from the correction function shown in Fig. 4.

In order to show the positive effect of the derived correction function Fig. 6.a and b show the distance of all measured points without and with range correction from the patch-

es. The standard deviation of these distances was 1.62 mm without range correction function (cf. Fig. 6a). In this adjustment process, only the scanner parameters and the patch parameters were estimated. By estimating the range correction function parameters in the adjustment process, the standard deviation of these distances decreased to 1.21 mm. The comparison of Fig. 6.a with b and the decrease in the standard deviation show that the data quality is significantly improved. Outliers were not removed from the dataset (cf. Section 3.2).

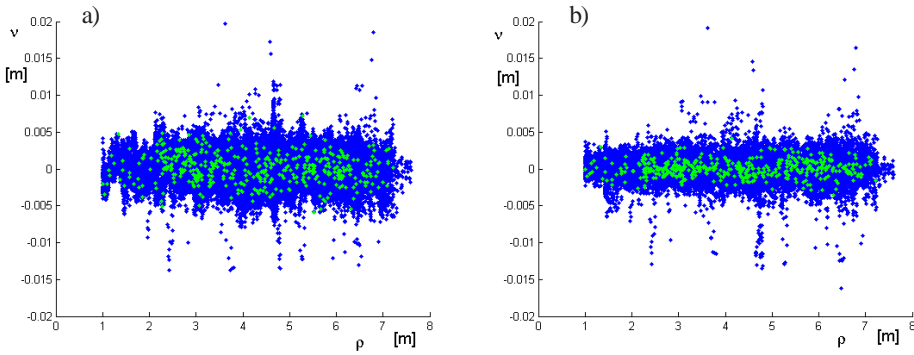


Fig. 6: (a) Distance of originally measured points from the adjusting patches. Blue dots: orthogonal distance (v_{ijk}). Green dots: average of blue dots (bin size 1 cm in range direction). (b) Distance of range-corrected points from the adjusting patches.

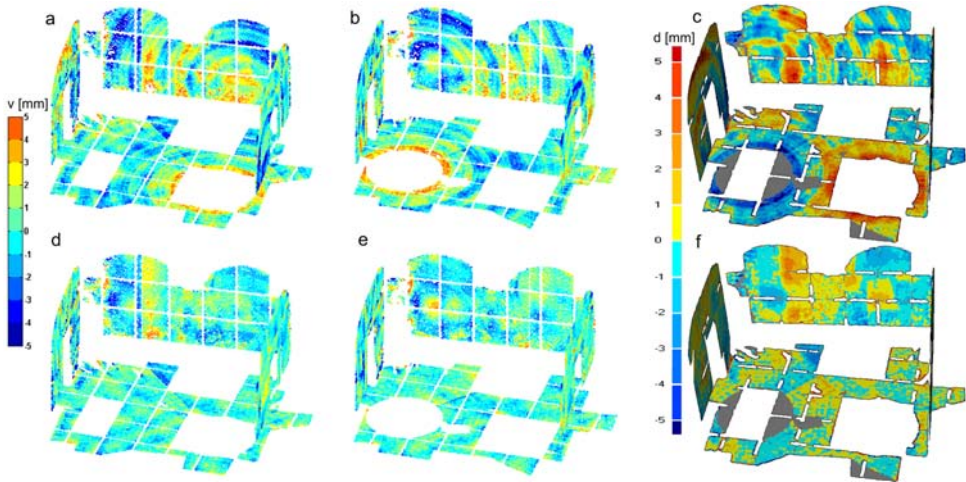


Fig. 7: Distance of measured points from adjusting patches. (a) Scanner position 1 without correction, (b) Scanner position 2 without correction, (c) difference of both scans without correction; (d) Scanner position 1 with correction, (e) Scanner position 2 with correction and (f) difference of both scans with correction. Note: For subfigures (c) and (f) the data of scanner position 1 was triangulated and the distance of the data points of scanner position 2 to this surface is visualized.

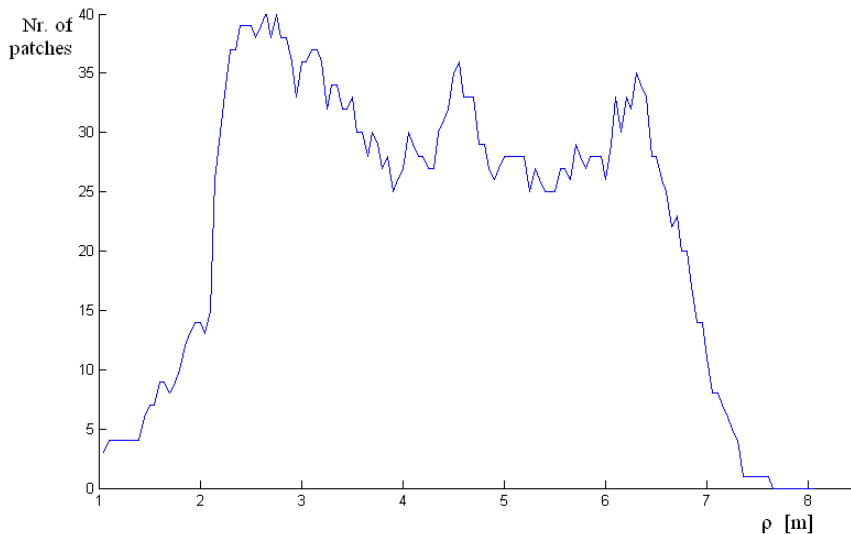


Fig. 8: Number of patches covering the range intervals of size 5 cm in the three scans used. At maximum almost 40 patches cover the intervals between 2.5 m and 3 m. The entire data set consists of 73 individual patches. Because of the high resolution of the scans most intervals contain about 300 measured laser points and all these are used in the adjustment.

In Fig. 7 the data of two scan positions before and after the range correction is shown. The uncorrected datasets clearly show the effect of short-periodic errors (cf. Figs. 7.a and 7.b), whereas for the corrected datasets these errors are significantly reduced (cf. Figs. 7.d and 7.e). These figures visualize the vertical distances of the uncorrected and corrected laser points from the adjusted patches. The spatial distribution of the errors before and after the correction are similar; i.e. at locations where the typical distance of points from the adjusting patch is positive before the correction, it is also positive after the correction. This is the consequence of the small but existing non-planarity of the patches.

Figs. 7.c and 7.f show the difference between both scans before and after the range correction. This additionally demonstrates the improvement. In all the subfigures of Fig. 7 the spatial distribution of the errors shows a relatively sharp change along a line on the wall and the floor. This residual error is due to the still uncorrected angular errors.

As mentioned in Section 3.5 the number of unknown parameters in the correction func-

tion is high. Therefore it has to be checked that each range interval is covered with patches. For this purpose Fig. 8 shows the number of patches in each range interval used in the adjustment. It can be seen that most range intervals are covered by at least 25 different patches. Nonetheless, large correlations were found between the parameters a_i by analysing the inverse of the matrix of the normal equation system (18).

In order to test the stability of the results each possible pair of the three scanner positions was selected for determining the correction function. The three resulting correction functions were very similar to the result shown in Fig. 4, which results from using all three scanner positions simultaneously.

6 Conclusions

We presented an on-the-job calibration method for removing short-periodic systematic range errors in terrestrial laser scanner data using a piecewise linear range correction function, whose parameters are determined

using all measured points which lie in planar patches visible in the scanned scene. This correction function samples the span of the ranges with short intervals. Consequently this function has the benefit of being very general; thus practically no assumptions on the error sources are required. Its formulation, however, requires many parameters. Thus enough planar patches, which are range-wise overlapping (within the span of ranges on site) are required. Objects fulfilling this condition are, e.g., rooms.

In the presented example, with ranges up to 7 m, short-periodic systematic range errors were found and eliminated from the dataset using the proposed method. The short-periodic errors found correspond to the shortest modulating wavelength (1.2 meter) of the FARO LS 880HE instrument. It should be emphasized, that these wavelengths were not introduced into the model, but obtained from the correction function using Fourier analysis. Compared to the method of estimating the parameters of harmonic functions, we did not assume constant amplitudes along the whole measurement range. The correction function obtained proved to be time-independent – at least during the time interval of the three scans used in the example.

The application of piecewise linear functions proved to be effective for on-the-job calibration of range measurements. In the presented example this is shown by the improvement of the data quality, which can be seen clearly by comparing Fig. 7.a, b with Fig. 7.d, e.

In the future, we will test the proposed method on more examples, especially ones with larger spans of ranges. Further we will apply it also for the on-the-job calibration of the angular measurements of terrestrial laser scanners. This will require the formulation of the adjustment in the Gauss-Helmert model, which then will also allow the simultaneous on-the-job calibration of angles and ranges. Besides using it in *practice* as correction tool, the proposed function may be also beneficial for *research*. There it could be used as tool for studying the error behavior of the measurements by analyzing its computed form, e.g., with Fourier transformation. This way new correction functions, optimized with respect

to shape, e.g., harmonics and/or polynomial, and number of parameters could be derived easier.

Acknowledgements

We would like to thank the private management of Schönbrunn Palace and Steinmetzbetriebe Bamberger as members of the Christian Doppler-Laboratory for supporting our investigations. Furthermore, we thank the anonymous reviewers for their fruitful and encouraging comments, which helped a lot in preparing the final version of the document.

References

- AMIRI PARIAN, J. & GRUEN, A., 2005: Integrated laser scanner and intensity image calibration and accuracy assessment. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W19): 18–23.
- BAE, K.H., BELTON, D. & LICHTI, D.D., 2005: A framework for position uncertainty of unorganized three-dimensional point clouds from non-monostatic laser scanners using covariance analysis. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W19): 7–12.
- BAE, K.H. & LICHTI, D.D., 2007: On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W52): 14–19.
- DORNINGER, P. & NOTHEGGER, C., 2007: 3D Segmentation of unstructured point clouds for building modeling. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W49A): 191–196.
- DORNINGER, P., NOTHEGGER, C., PFEIFER, N. & MOLNAR, G., 2008: On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. – Journal of Applied Geodesy **2** (4).
- GIELSDORF, F., RIETDORF, A. & GRUENDIG, L., 2004: A Concept for the calibration of terrestrial laser scanners. – FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22–27, on CD-ROM.
- INGENSAND, H., RYF, A. & SCHULZ, T., 2003: Performances and Experiences in Terrestrial Laser-scanning. – Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zurich, Switzerland: 236–243.

- KERSTEN, TH., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M. & STERNBERG, H., 2008: Geometric Accuracy Investigations of Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. – FIG Working Week 2008, Integrating Generations, Stockholm, Sweden, June 14–19.
- KRAUS, K., 1997: Photogrammetry, Volume 2, Advanced Methods and Applications. – Ferd. Dümmler Verlag, Bonn, Germany.
- LICHTL, D.D., 2007: Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **61** (5): 307–324.
- MIKHAIL, E.M., 1976: Observations and Least Squares. – IEP – a Dun-Donnelley Publisher, New York, USA, 497 p.
- NOTHEGGER, C. & DORNINGER, P., 2009: 3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation **2009** (1): 607–617.
- RÜEGER, J.M., 1990: Electronic distance measurement. – Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2007: Integrated bundle adjustment with variance component estimation – fusion of terrestrial laser scanner data, panoramic and central perspective image data. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W52): 18–23.

Addresses of the Authors:

PhD. GÁBOR MOLNÁR, Dr. PETER DORNINGER, Dipl.-Ing. CLEMENS NOTHEGGER, CHRISTIAN DOPPLER Laboratory for “Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing” at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, A-1040 Vienna, Gußhausstraße 27-29. Tel.: +43-1-58801-12250, Fax: +43-1-58801-12299, e-mail: {gmo, pdo, cn}@ipf.tuwien.ac.at

Prof. Dr. NORBERT PFEIFER, Dr. CAMILLO RESSL, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, A-1040 Vienna, Gußhausstraße 27–29., e-mail: {np, car}@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: Juni 2008
Angenommen: November 2008

Genetic Algorithms for Automatic Registration of Laser Scans with Imperfect and Subdivided Features (GAReg-ISF)

STEFAN SCHENK & KLAUS HANKE, Innsbruck, Österreich

Keywords: Genetic Algorithms, Automatic Registration, Point Clouds, Occlusions

Summary: The easy on-site application and the possibility of high quality post processing of terrestrial laser scans make their use highly attractive for architectural, archaeological and sculptural documentation. In this paper we present a strategy for handling the fully automatic registration of point clouds characterized by significant noise level, imperfect geometry and occlusions.

To handle these datasets we propose to work with both imperfect and subdivided features and to divide the pair-wise matching process into three subsequent stages. First rough feature registration finds auspicious regions in search space, next Genetic Algorithms are used to exploit those areas and form approximate solutions which are then refined in a third step.

By combining imperfect and subdivided features with Genetic Algorithms in general feature detection, pair-wise scan matching and multi-view registration, we are able to show globally consistent registrations of real world scenes.

Zusammenfassung: *Vollautomatische Registrierung von Laserscans mit Genetischen Algorithmen sowie genäherten und unterteilten Merkmalen.* Die einfache Vor-Ort-Anwendung und die Möglichkeit einer hochwertigen Weiterverarbeitung terrestrischer Laserscans machen deren Einsatz bei architektonischen, archäologischen und skulpturalen Dokumentationen überaus interessant. In diesem Artikel präsentieren wir eine Methode zur vollautomatischen Registrierung von Punktwolken, welche durch einen signifikanten Rauschpegel, unvollendete Geometrie sowie Verdeckungen gekennzeichnet sind.

Um diese Datensätze zu verarbeiten, verwenden wir genäherte und unterteilte Merkmale und führen die paarweise Registrierung der Scans in drei aufeinander folgenden Schritten durch. Zuerst erfolgt eine Grobregistrierung mittels Merkmalen um erfolgversprechende Bereiche im Suchraum ausfindig zu machen. Im nächsten Schritt werden Genetische Algorithmen verwendet, um diese Bereiche zu erforschen und Näherungslösungen für die im dritten Schritt durchgeführte, abschließende Verfeinerung zu bilden.

Durch die Kombination genäherter und unterteilter Merkmale mit Genetischen Algorithmen in der Merkmals-Erkennung, der paarweisen Scan-Zuordnung und der Multiview-Registrierung können global richtige Registrierungen von realen Scans erstellt werden.

1 Introduction

Terrestrial laser scanners have become very popular for fast scene acquisition in the last decade. The need of having several stations when scanning complex objects, in order to avoid hidden or missing parts, leads to the task of registering the single scans. Setting up arti-

ficial spherical, cylindrical or plain targets into the scene is a common (and robust geodetic) way to connect the scans (HANKE et al. 2006). In many applications, however, this is not possible or useful for different reasons and the registration of point clouds using only object's features comes in as a popular approach. To enable this non linear spatial transformation, an (often manual) selection of at least 3

common points has to precede the final registration process to provide approximation values for shift and rotation. This selection, however, is time consuming and error-prone and should, thus, be avoided by using a robust and automated algorithm. One of the possible solutions is proposed in the following.

1.1 Genetic Algorithms

In the present paper the principles of biological processes are used to create a computer-based simulation of natural evolution, the so-called Genetic Algorithm (GA). GAs became popular through the work of (HOLLAND 1975) and can be characterized as heuristic search strategies. They are suitable for problems where search space is large or poorly understood and no simple mathematical analysis of the solution is available. Due to their simple and clear structure, GAs can easily be adapted to arbitrary kinds of constraints and objectives. In this paper we are working with a GA by (REED et al. 2005) originally developed for tunnel design optimisation. With only a few modifications we are able to use the same algorithm for laser scan registration; a proof of the great flexibility of GAs.

Natural evolution can be seen as optimisation process and, according to Charles Darwin, is mainly characterised by one keyword: *natural selection*. Natural selection, also known as “survival of the fittest”, means that individuals with higher quality – called *fitness* – have a higher probability of surviving and reproduction than those with lower fitness. The so-called *fitness function* evaluates all individuals of a population and calculates their

fitness. The specific characteristics of each individual are stored in chromosomes, or more precisely in its subparts named genes. Genes are essentially for reproduction characterised by both *mutation* (substitution of single gene parts) and *cross-over* (merging of two or more genes). By translating these processes into mathematical algorithms we are able to create a simple but effective tool for optimisation. Hereby a single *individual* is equal to a mathematical solution, while a *population* refers to a group of possible solutions. Equally to natural evolution, GAs too have an iterative structure, performed in single steps known as *generations*.

The initialisation of a GA is done by creating a start population either out of a pool of randomly generated solutions or a given set of rough solutions. Afterwards an iterative process as shown in Fig. 1 is initiated, based on reproducing new individuals by mutation and cross-over, evaluating their fitness and implementing natural selection; this is done until either a certain number of generations or a pre-defined termination condition is reached.

The use of GAs is often “computationally expensive” and, as in nature, also simulated evolution usually can’t provide neither perfect nor exact results, but good approximations. It can however be said that GAs are a good choice for complex or unknown problems where other approaches may fail.

Genetic Algorithms were already used for the registration of close-up objects for example by (BRUNNSTRÖM & STODDARD 1996), (CORDÓN et al. 2003), (SILVA et al. 2005) or (LOMONOSOV et al. 2006). We propose to implement an adapted version of these approaches in the classical registration process. This helps

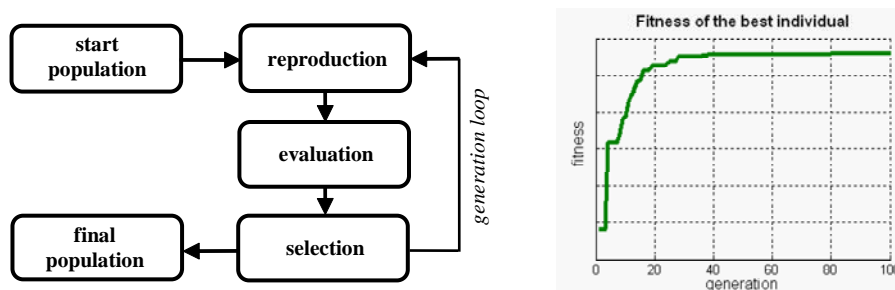


Fig. 1: Left: Structure of a Genetic Algorithm (GA); Right: Fitness progress of a typical GA.

to maintain robustness and computational performance also when registering scans of bigger sized objects characterised by a notably increased number of points, a significant noise level and occlusions.

1.2 Imperfect Features

Laser scanners are able to capture thousands of points a second, which allows a detailed representation of scenes in a fairly short amount of time. For registration purposes datasets have often to be reduced to a more usable form. This can either be done by finding characteristic features inside the scans or by simplifying the point cloud as seen, e. g., in (MOENNING & DOGSON 2003).

Features have the advantage that they can often be robustly detected and contain useful information such as barycentres or normal directions and radii. This can be used to ensure a robust pair-wise alignment of two scans.

It might however be the case that we receive datasets where point density is too low or noisy for exact feature detection; a typical example for noisy data is grassland. While scanning such landscape, the laser ray hits partially blades of grass and partially the ground. An approach to smooth noisy point clouds while recovering the edges of the original surface can be found in (LANGE & POLTHIER 2005).

Further problems that may be encountered when acquiring real-life scenes are shown in a simplified way in Fig. 2. While on one hand the number of scanning stations has often to be reduced to save precious time, on the other hand occlusions - produced either by the ob-

ject itself or obstacles between the laser scanner and the object - arise in an increased quantity. Hereby edges and borders may emerge differently when scanning from different stations due to their often round, bevelled or simply their rough shape. The fact that the overlapping parts are lying on parallel planes makes processing just more difficult. Moreover, data may be partially missing or too fragmentary for further processing. Different feature types, however, react with different sensibility to the above mentioned effects. Borders and edges, for example, are more likely to be influenced than other features such as planes. In this paper these datasets are referred to as “imperfect” which means that we can work with it, but we have to keep in mind that they might be noisy or even misrepresent the original scenery.

1.3 Subdivided Features

Generally a high number of features can be detected in typical scenes; it does however happen, e. g., with larger features such as planes, that due to unfavourable occlusions, noise or lack of information, the needed correspondences get rather poor. To overcome this problem we propose to subdivide features into smaller subparts; those subdivided features which are not influenced by occlusion anymore can then be successfully matched.

As (BRENNER & DOLD 2007) and (BRENNER et al. 2008) show, planar structures can successfully be used for registration. (VON HANSEN 2007) uses a similar approach: After the scenery has been segmented according to a regular

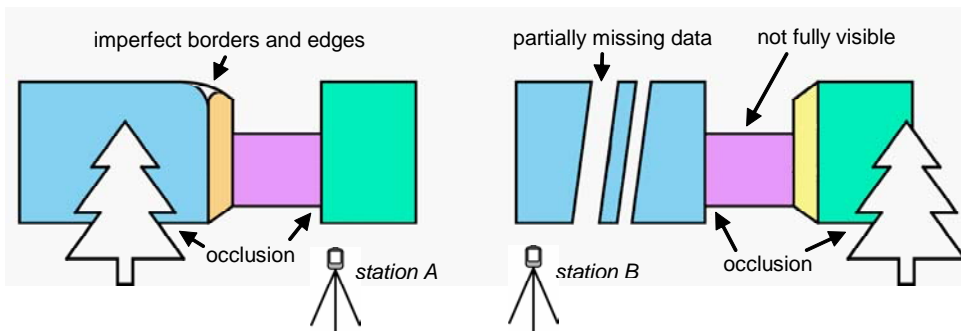


Fig. 2: Typical problems in data acquisition.

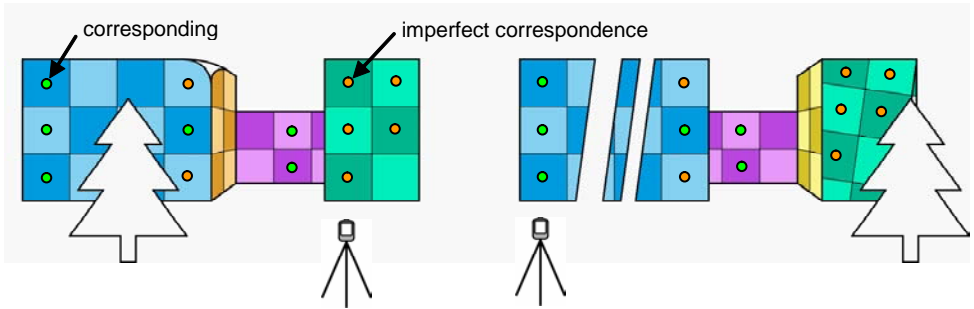


Fig. 3: Subdividing and matching the acquired features.

3D raster, RANSAC plane detection is applied to all raster cells which are then grouped to larger planes using neighbourhood and coplanarity checks.

We suggest evolving the idea of raster cells during coarse registration and using the additional information of the larger planes for their subdivision: The principal directions of the planes can be calculated; they are used to create a local coordinate system for each plane which is then employed for dividing the planes into smaller subparts as shown for example in Fig. 3.

One of the main advantages of our approach is that whenever a plane is fully visible and detectable equally in two scans, by using the principal directions as local coordinate system for subdivision the resulting subplanes will have corresponding values and barycentres.

If a plane is, however, not fully visible and also in cases where the principal directions are ambiguous, subdivision can result in a differ-

ing grid; in this case the barycentres of the subplanes might contain in the worst case a maximal distance error of half the raster cell diagonal and can be handled the same way as imperfect features (“imperfect correspondence”).

2 Registration Strategy

The proposed automatic registration of laser scans without artificial targets consists of three parts. As illustrated in Fig. 4, in the first step all scans are analysed, and the detection and subdivision of features (planes) is used to describe characteristic areas in each scan.

Afterwards pair-wise scan registration is initiated, whereby the subdivided and imperfect features detected in the first step are combined to create a start population for a Genetic Algorithm, which then reduces and refines the possible registration solutions. Since a typical

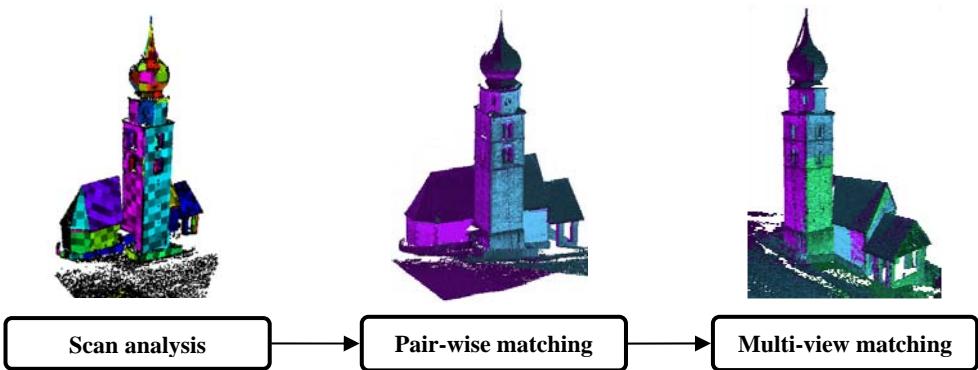


Fig. 4: Automatic registration strategy.

real-life scene does not consist of features such as planes only, the gathered solutions are supplied to another GA performing free-form matching with a reduced point cloud. By applying these steps in a clearly targeted way, speed and robustness of the registration process can be significantly increased. In the last step the so-called multi-view matching is used to reassemble the single scans to a globally consistent solution. As seen in Fig. 4 our algorithm is able to successfully register the scans of the church of Seis, Italy (BURGER & THALER 2008), captured with a Trimble GX laser scanner.

2.1 Scan Analysis

Our input datasets consist of single points and if available also intensities or colour information. All steps are executed directly on the point clouds and no additional structure such as a triangulated mesh is necessary. Since the algorithm should work almost independently of the object size we adopt the idea stated in (GELFAND et al. 2003). We scale the point clouds uniformly so that the average distance of the points from the mass centre is 1; hereby the global scaling factor is set accordingly to the first analysed scan. This helps to make sure that registration thresholds are within similar dimensions. To keep computing low the original point clouds – consisting of up to millions of points – are reduced by random sampling and a data-pyramid is constructed; this enables to access different levels of resolution in a very efficient way. Further we use a kd-tree structure to gather the neighbours of each point on the surface and use them for principal component analysis (PCA) to find

the tangent plane and the normal vector in each point (HOPPE et al. 1992).

As (PAULY et al. 2003) show, this approach can further be evolved by using the resulting eigenvalues for the estimation of the change in geometric curvature named *surface variation*. Multi-scale surface variation however has not improved significantly our registration process.

According to (VIEIRA & SHIMADA 2005) we use the surface variation to identify seed points for surface extraction through region growing. They show that the proposed method is even able to extract non-rational bicubic Bézier surfaces; for now however we use the approach for plane detection only.

2.2 Pair-wise Matching

The registration of laser scans – an overview of popular registration methods is found in (SALVI et al. 2007) – can be seen as search problem in six-dimensional space. This can be solved either by feature matching – which means omitting all additional geometric information that can not be assigned to one of the used features – or by free-form matching typically done on reduced point clouds as they are generally not restricted to any geometric shape.

To achieve both robustness and flexibility we propose – as shown in Fig. 5 – to extend classical coarse and fine registration by implementing a third step as a combination of feature matching and free-form matching.

First feature matching with an extension for imperfect and subdivided features is employed for coarse registration. Generally three pairs of corresponding features with linearly inde-

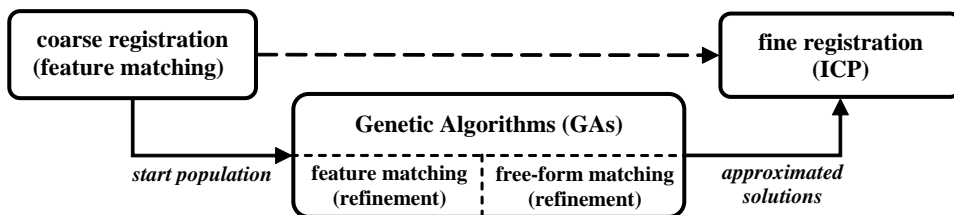


Fig. 5: Pair-wise matching strategy using Genetic Algorithms (GAs) – ICP: iterative closest point algorithm.

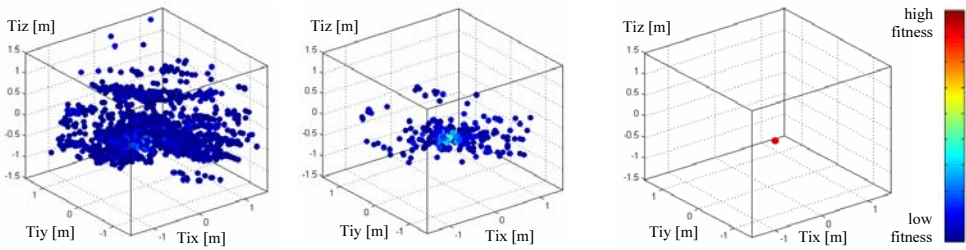


Fig. 6: Convergence of a Genetic Algorithm (GA): From left to right: Displacement components (T_{ix} , T_{iy} , T_{iz}) of the population in generation 1, 10 and 50.

pendent normal vectors are necessary to form a solution when working with planar surfaces. According to (HE et al. 2005) the barycentres of a pair of matching planes can be used to compute the registration so that only two feature pairs are necessary. As stated in (BRUNNSTRÖM & STODDARD 1996) using four invariants – the barycentres' distances, pairwise relative orientations of two normals and an additional twist angle – can further reduce the number of possible combinations. By implementing imperfect and subdivided features, in the worst case one plane – which can be partly occluded – is enough to create rough solutions. These solutions are then supplied as start population to a GA which refines the feature matching results and uses a reduced point cloud for free-form matching to include as much geometric information as possible in the early registration process.

At the moment only the best solution of each pair-wise matching – determined by the GA's fitness function – is used for the final multi-piece matching; we are however working on implementing niching techniques so that the population itself is able to adapt the search process dynamically to the specific requirements and to exploit different solutions simultaneously.

Our GAs use a real-coded representation of the possible solutions comparable to (CORDÓN et al. 2003). We use a single individual X_i in the form of $X_i = (Q_i, T_{ix}, T_{iy}, T_{iz})$, whereby Q_i represents the quaternion of the rotation and T_{ix} , T_{iy} , T_{iz} are the components of the displacement vector.

In each generation new individuals are formed either by creating a *mutant* (with a 10% probability) or through a *cross-over* (90%

probability). Additional *mutation* is applied on all new individuals with a 5% probability. These values were selected according to (SILVA et al. 2005) and according to our own test results. While mutants and mutation force the population to spread out and explore the search space, cross-over is mainly used to concentrate the population in auspicious regions and improve existing solutions.

A typical convergence process is illustrated by the populations' displacement components (T_{ix} , T_{iy} , T_{iz}) in Fig. 6 where, after initially shifting the centres of mass to the origin, the point sets are scaled so that the average distance of points from the origin is 1.

The mutant operation selects an already existing parent individual X_i by roulette-wheel-selection; hereby individuals with higher fitness are chosen more probably by assigning them a larger space on the roulette-wheel. Next randomly selected genes of the parent X_i are partly altered, and the result is stored in a new individual X_{new} . Cross-over is done by merging the genes of two selected parent individuals X_i and X_j and creating two new individuals $X_{new,A}$ and $X_{new,B}$ which are formed by spreading the parents genes randomly over the new individuals.

We propose to run the GA twice: at first it runs for 50 generations using feature matching to refine the possible combinations; in the second run the same GA works with the remaining solutions for another 50 generations doing free-form matching directly on the original but reduced point cloud. Although generally one run would be enough to identify and refine the good solutions, two consecutive algorithms are used in order to raise robustness.

Our fitness function – similar to (LOMONOSOV et al. 2006) – forces the GA to increase the amount of overlapping parts and, at the same time, to reduce their distance error. After evaluating all individuals with the fitness function we use a binary tournament, where repeatedly two individuals are randomly selected from the population and – according to their fitness – the better one is selected for the next generation.

In the last stage we refine the gathered solutions with the well-known iterative closest point algorithm (ICP) proposed by (BESL & MCKAY 1992). To improve robustness and stability of the algorithm we use the geometrically more stable version of (GELFAND et al. 2003). An overview of other efficient variants of the ICP algorithm can be found in (RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001).

2.3 Multi-view Matching

A lot of investigation has already been done in multi-view matching, also known as multi-piece matching (HUANG et al. 2006). Similar to (PULLI 1999), we take the pair-wise matching results and order them according to their quality. The best matching pair is fixed and iteratively another view is added to the fixed set. In order to ensure a globally consistent recon-

struction of all views, additional checks are used after every step to see if penetration effects are encountered when adding the next view. If they reach a certain threshold, the view is skipped and the next views are handled. Moreover, an inner loop ensures that the fixed set is realigned in every iteration step.

3 Experimental Results

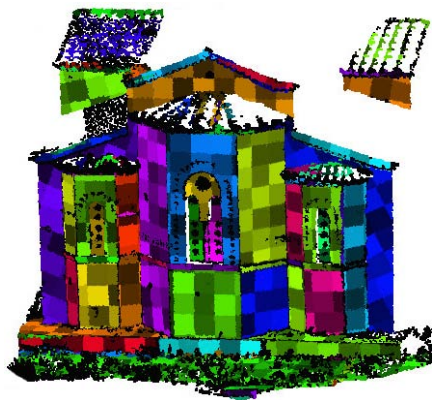
To prove the potential of our registration strategy we processed a number of real-life scenes. All scans were neither pre-processed nor ordered accordingly to their neighbourhood relationship. The results are shown in the following.

3.1 Agia Sanmarina, Greece

One dataset we tested our registration strategy on is the dataset of the Agia Sanmarina church in Greece, scanned with a Cyra Cyrax 2500 laser scanner. The eight point clouds were provided by the ISPRS working group V/3 on terrestrial laser scanning (www.commission5.isprs.org/wg3/), whereas the reference values for the comparison were taken from (BAE 2006).

Position East

Subdivided planes $\approx 0.5 \times 0.5\text{m}$



Position East and Northeast

(W, L, H) $\approx (12\text{m}, 11\text{m}, 10\text{m})$

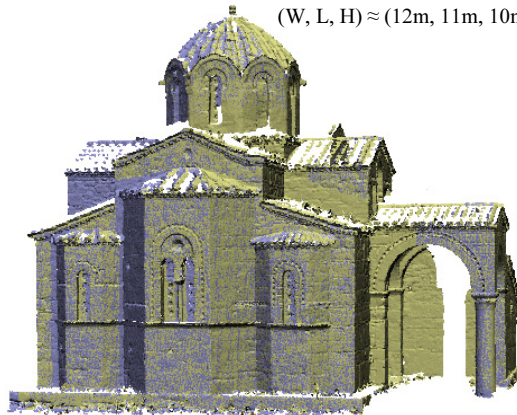


Fig. 7: Registration of position East and position Northeast: Left: Subdivided features of position East; Right: Pair-wise matching result (smoothed and shaded view).

Tab. 1: Registration results of position East (identity transformation) and Northeast: Left: Pair-wise matching results of direct georeferencing method, Leica Cyclone, GP-ICPR (BAE 2006) and GAReg-ISF; Right: Differences to direct georeferencing method.

	Estimated transformation parameters					Direct georeferencing method vs.		
	Direct georef.	Leica Cyclone	GP-ICPR	GAReg-ISF		Leica Cyclone	GP-ICPR	GAReg-ISF
ω [°]	5.2348	5.2084	5.2353	5.2272	$d\omega$ [°]	-0.0264	0.0005	-0.0076
ϕ [°]	42.5217	42.5260	42.5466	42.5457	$d\phi$ [°]	0.0043	0.0249	0.0240
κ [°]	-9.2648	-9.1781	-9.1497	-9.1493	$d\kappa$ [°]	0.0867	0.1151	0.1155
x [m]	15.6092	15.6110	15.6140	15.6146	dx [m]	0.0018	0.0048	0.0054
y [m]	-0.3940	-0.3800	-0.4004	-0.3910	dy [m]	0.0140	-0.0064	0.0030
z [m]	-2.1943	-2.1950	-2.1971	-2.1990	dz [m]	-0.0007	-0.0028	-0.0047

In the following we show the pair-wise alignment of position East (515.308 points) and Northeast (491.384 points) and compare our results with those of a registration using a total station (direct geo-referencing method), a registration using the commercial software Cyclone (Leica, 2006, 5.0) and a registration using the GP-ICPR algorithm – a method based on geometric primitives such as the surface normal vectors – all stated in (BAE 2006).

To increase the effect of “imperfectness” our algorithm selects a random subset of 100.000 points (about 1/5 of the original point cloud) from each scan for feature detection and the final ICP; 3.000 points are used in the second Genetic Algorithm for free-form matching. These start conditions have to be considered when comparing the results of our registration strategy, based on Genetic Algorithms and imperfect and subdivided features (GAReg-ISF), with other methods.

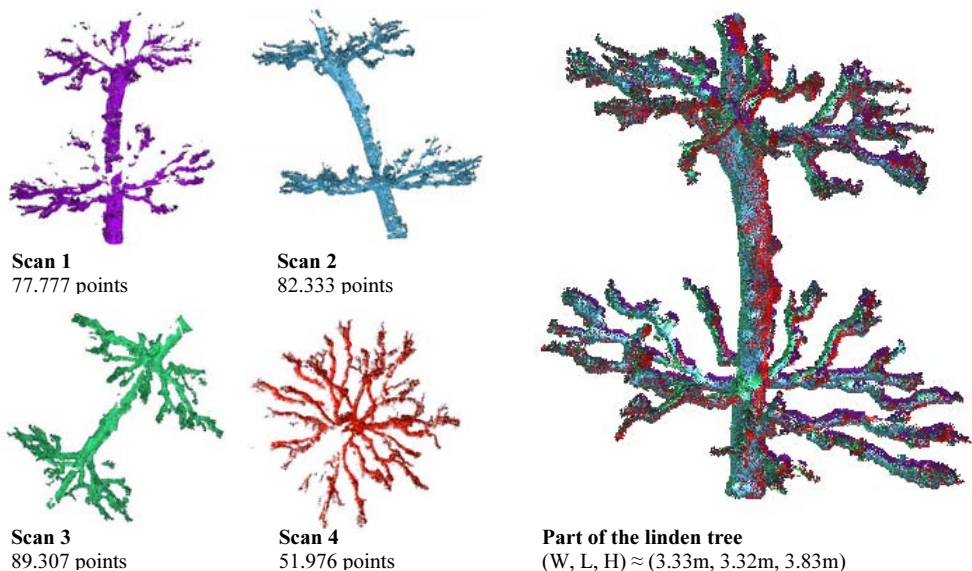


Fig. 8: Left: Four single scans of the linden tree; Right: Multi-view matching result.

Fig. 7 shows on the left side the subdivided features of position East which were used for the pair-wise matching (right side) with position Northeast. The six transformation parameters (rotation and translation) of the two scans from Agia Sanmarina church as well as the difference to the direct geo-referencing method can be seen in Tab. 1.

By using imperfect and subdivided features we successfully performed the registration with a similar quality as in (BAE 2006).

3.2 Linden Tree, Grettstadt, Germany

Although our approach is mainly thought for architectural objects featuring geometrical shapes such as planes we tried to apply our algorithm to a part of a linden tree scanned from four sides using a Trimble GX scanner. The data used is part of a project for the documentation of a so-called “Tanzlinde”. This is a kind of dancing floor build into a tree, a local architectural specialty in some parts of Southern Germany.

The linden tree is interesting insofar as it does not contain “perfect” features such as planes or straight borders. In this case neither cylinders are well suited because of the curved and rough surface of the tree. However, due to the use of imperfect and subdivided features (planes) and by allowing more tolerance during feature detection, the algorithm could gather enough information for a rough pair-wise alignment; the results of the pair-wise alignment were afterwards refined by the two Genetic Algorithms. Using the point-to-plane error metric we observed a RMSE of 1.58 to 1.79 mm from the pair-wise matching of the single scans after applying the ICP algorithm. Fig. 8 shows the four scans of the dataset linden tree and the multi-view matching result.

4 Conclusions and Future Work

In this paper we proposed an improvement to the state of the art for handling the fully automatic registration of arbitrary orientated and partially occluded point clouds characterized

by a significant noise level and imperfect geometry.

One of the main ideas is to strictly accept a certain amount of inaccuracies (imperfectness) in our datasets and features and to create a registration framework able to handle them. Furthermore we subdivide features into smaller sub-features to overcome occlusion and implement Genetic Algorithms (GAs) as clearly targeted steps in between classical coarse and fine registration. This way we are able to maintain both robustness and computational performance also when registering objects of bigger size.

Currently we are implementing more kinds of features such as lines, cylinders and spheres in our algorithm and are, moreover, extending the Genetic Algorithms with niching techniques to handle cases in pair-wise matching where more than just one optimum can lead to correct solutions.

At the moment our algorithm – able to combine the positive aspects of different registration techniques and use them in a both appropriate and efficient way – is still under development; nevertheless already now it shows a great potential in all our tested datasets.

References

- BAE, K.-H., 2006: Automated Registration of Unorganised Point Clouds from Terrestrial Laser Scanners. – PhD thesis, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: A method for registration of 3D shapes. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14** (2): 239–259.
- BRENNER, C. & DOLD, C., 2007: Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W52): 84–89.
- BRENNER, C., DOLD, C. & RIPPERDA, N., 2008: Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **63** (1): 4–18.
- BRUNNSTRÖM, K. & STODDARD, A.J., 1996: Genetic algorithms for free-form surface matching. – 13th International Conference on Pattern Recognition **4**: 689–693.

- BURGER, A. & THALER, E., 2008: Methoden der Bau-dokumentation. – Diploma thesis, University of Innsbruck, Austria.
- CORDÓN, O., DAMAS, S. & SANTAMARÍA, J., 2003: A CHC Evolutionary Algorithm for 3D Image Registration. – *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, **2715**: 404–411.
- GELFAND, N., IKEMOTO, L., RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M., 2003: Geometrically stable sampling for the ICP algorithm. – Fourth International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, *3DIM 2003*: 260–267.
- VON HANSEN, W., 2007: Registration of Agia Samarina LIDAR Data using Surface Elements. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W52): 178–183.
- HANKE, K., GRUSSENMEYER, P., GRIMM-PITZINGER, A. & WEINOLD, TH., 2006: First Experiences with the Trimble GX Scanner. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (5).
- HE, W., MA, W. & ZHA, H., 2005: Automatic registration of range images based on correspondence of complete plane patches. – Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, *3DIM 2005*: 470–475.
- HOLLAND, J., 1975: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. – University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA.
- HOPPE, H., DE ROSE, T., DUCHAMP, T., McDONALD, J. & STUETZLE, W., 1992: Surface reconstruction from unorganized points. – *Proceedings of ACM SIGGRAPH '92*, ACM Press, New York, NY, USA, **1992**: 71–78.
- HUANG, Q.-X., FLÖRY, S., GELFAND, N., HOFER, M. & POTTMANN, H., 2006: Reassembling fractured objects by geometric matching. – *ACM Trans. Graphics* **25** (3): 569–578.
- LANGE, C. & POLTHIER, K., 2005: Anisotropic smoothing of point sets. – *Computer Aided Geometric Design* **22** (7): 680–692.
- LOMONOSOV, E., CHETVERIKOV, D. & EKÁRT, A., 2006: Pre-registration of arbitrarily oriented 3D surfaces using a genetic algorithm. – *Pattern Recognition Letters* **27** (11): 1201–1208.
- MOENNING, C. & DODGSON, N., 2003: A new point cloud simplification algorithm. – 3rd IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing, *VIIP 2003*, Benalmádena, Spain.
- PAULY, M., KEISER, R. & GROSS, M., 2003: Multi-scale feature extraction on point-sampled surfaces. – *Computer Graphics Forum* **22** (3): 281–289.
- PULLI, K., 1999: Multiview Registration for Large Data Sets. – 2nd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, *3DIM 1999*: 160–168.
- REED, M., SCHENK, S. & SWOBODA, G., 2005: FTO: A genetic algorithm for tunnel design optimisation. – *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2005)*, Washington, D.C., USA.
- RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M., 2001: Efficient variants of the ICP algorithm. – 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, *3DIM 2001*: 145–152.
- SALVI, J., MATABOSCH, C., FOFI, D. & FOREST, J., 2007: A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. – *Image and Vision Computing* **25** (5): 578–596.
- SILVA, L., BELLON, O.R.P. & BOYER, K., 2005: Robust Range Image Registration Using Genetic Algorithms and the Surface Interpenetration Measure. – *Series in Machine Perception and Artificial Intelligence* **60**, World Scientific Publishing Co., ISBN 978-981-256-108-0.
- VIEIRA, M. & SHIMADA, K., 2005: Surface Extraction from Point-Sampled Data through Region Growing. – *International Journal of CAD/CAM* **5** (1).

Address of the Authors:

Dipl.-Ing. STEFAN SCHENK & ao. Univ.-Prof. Dr. KLAUS HANKE, University of Innsbruck, Faculty of Civil Engineering, Surveying and Geoinformation Unit, A-6020 Innsbruck, Tel.: +43 512 507 6752, e-mail: klaus.hanke@uibk.ac.at

Manuskript eingereicht: Juni 2008
Angenommen: November 2008

Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans

HARALD VENNEGEERTS, JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, JENS MARTIN & HANSJÖRG KUTTERER, Hannover

Keywords: Direkte Georeferenzierung, Mobile Mapping, LiDAR, TLS

Summary: *Two Variants on Direct Geo-referencing of Terrestrial Laser Scans.* This paper presents two methods for direct geo-referencing of terrestrial laser scans. The first approach deals with the direct estimation of the sensor position and orientation with GNSS antennas mounted on a laser scanner. In the second approach a mobile mapping system is presented. This system is based on an integration of INS and GPS for positioning and orientation tasks of the hybrid sensor system formed by one laser scanner and additional navigation sensors. The paper presents the common principle, the current system setup as well as the benefit of both variants for direct geo-referencing of terrestrial laser scans.

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung von terrestrischen Laserscans vorgestellt. Für eine statische Plattform wird die Position und Ausrichtung des Laserscanners direkt durch ein integriertes kinematisches GNSS bestimmt. In der zweiten Aufnahmevariante wird die Kombination aus inertialem Messsystem (INS) und GPS genutzt, um das hybride Sensorsystem zu orientieren. Das gemeinsame Prinzip beider Ansätze wird im Kontext der Georeferenzierung erläutert. Aktuelle Realisierungen werden dargestellt und schließlich wird daraus das Potential beider Varianten für die direkte Georeferenzierung abgeleitet.

1 Einführung

Objekterfassende Sensoren wie terrestrische Laserscanner können eine lokale Szene dreidimensional, hochauflösend und automatisch abbilden. Sind mehrere lokale Szenen auf ein gemeinsames System zu beziehen (Registrierung), werden üblicherweise (signalisierte) Passpunkte genutzt, um die relativen Transformationen zwischen den lokalen Szenen zu parametrisieren. Der Bezug zu einem erdfesten System (Georeferenzierung) ist dann hergestellt, wenn diese Passpunkte ebenfalls im erdfesten System koordiniert sind. Passpunkte zu koordinieren ist jedoch eine zeitaufwändige Aufgabe.

Der vorliegende Beitrag stellt zwei Varianten vor, mit denen die Parameter zur Georeferenzierung direkt und automatisch bestimmt werden, ohne dass räumliche Passpunkte erforderlich sind. Vielmehr werden zusätzliche

Sensoren benutzt, um die Transformationsparameter zu ermitteln. Weitere Bedingungen charakterisieren den ersten Ansatz zur direkten Georeferenzierung. So kann beim statischen Scannen auf einem festen Standpunkt davon ausgegangen werden, dass sich das Zentrum des Scans erdbezogen nicht verändert. Außerdem kann die konstante horizontale Rotation des Laserscanners genutzt werden, um daraus ein Azimut redundant abzuleiten.

Beim zweiten Ansatz werden keine Bedingungen an die Orientierung des Scanners gestellt. Der Laserscanner lässt sich in einer freien Trajektorie im Raum bewegen. In diesem Ansatz werden alle Freiheitsgrade für die Transformation ins erdfeste System kontinuierlich bestimmt.

Um objekterfassende Sensoren mit Navigationssensoren zu kombinieren, ist eine gemeinsame zeitliche und räumliche Basis zu schaffen. Wie ein terrestrischer Laserscanner

in ein derartiges hybrides Sensorsystem integriert werden kann, wird im Folgenden beschrieben.

Zunächst wird die Methodik der direkten Georeferenzierung für den terrestrischen Fall gezeigt. Je nachdem wie viele Freiheitsgrade vorliegen, werden dazu zwei Varianten vorgestellt. Danach wird die Umsetzung beider Ansätze erläutert, in der die Genauigkeitsanalyse ein integrierter Systembaustein ist. Abschließend erfolgt eine kurze Diskussion über das Potential des Systems und über zukünftige Entwicklungstendenzen.

2 Methodik der direkten Georeferenzierung

Terrestrische Laserscanner bilden die Umgebung im sensoreigenen lokalen System ab. Für die Transformation gescannter Objekte in ein übergeordnetes (erdfestes) System sind für alle lokal gescannten Punkte (beschrieben durch den Positionsvektor \mathbf{x}_s im lokalen System) die aktuelle Rotation (beschrieben durch die Drehmatrix \mathbf{R}_s^E vom Sensorsystem in das erdfeste System) und Translation (beschrieben durch den Positionsvektor $\Delta\mathbf{x}_s^E$ als Zentrum des Sensorsystems im erdfesten System) des Scanners zu bestimmen:

$$\mathbf{x}_E = \mathbf{R}_s^E \cdot \mathbf{x}_s + \Delta\mathbf{x}_s^E. \quad (1)$$

Die Umgebung wird beim Terrestrischen Laserscanning (TLS) prinzipiell sequentiell erfasst. Alle Beobachtungen sind daher sowohl zeitlich als auch räumlich zu referenzieren. Die Anzahl der zu bestimmenden Freiheitsgrade ist dabei abhängig vom Messverfahren, von den Eigenschaften des Sensors und von nutzbaren Informationen aus dem Objektraum.

Sequentielle Beobachtungen sind jeweils zeitlich zuzuordnen. Die Zuordnung kann entweder intern, extern oder objektraumbezogen realisiert werden. Sind konstante Abtastraten der Distanz und der Rotationen charakteristisch für die Sequenz, ist damit die zeitliche Referenz der Beobachtungen intern im scannenden System festgelegt. Die Beobachtungen lassen sich in gleichen Winkelinkrementen zuweisen.

Werden weitere (externe) Sensoren für die zeitliche Zuordnung eingesetzt, ist eine konstante Abtastrate nicht zwingend. Eine externe Zeitskala erlaubt darüber hinaus, scannende Systeme in räumlich referenzierende Systeme zu integrieren. Werden konstante Rotationen im scannenden System vorausgesetzt, kann die Zeitskala alternativ auch aus dem Objektraum generiert werden.

Im 3D-Modus – der klassischen Anwendung des TLS – wird davon ausgegangen, dass sich das Zentrum eines Scans während der Aufnahme nicht ändert. Die zeitliche Referenz der einzelnen Beobachtungen wird gewöhnlich intern durch konstante Abtastraten der Distanz und konstanter Rotation um Stehachse (horizontal) und Umlenkspiegel (vertikal) gewährleistet. Ein so gewonnener 3D Scan wird daher als konsistent betrachtet und als „statisch“ bezeichnet. Mit einer einheitlichen Rotation und Translation lässt er sich in ein übergeordnetes System transformieren. Pro Scan verbleiben sechs geometrische Freiheitsgrade. Sie werden üblicherweise indirekt mittels korrespondierender Punkte im Objektraum bestimmt.

Scans im 3D Modus sind jedoch nicht zwingend als „statisch“ zu betrachten. Da die Beobachtungen sequentiell erfolgen, ist die Richtung der Beobachtung zeitlich variabel. TLS ist im Grundsatz ein kinematisches Messsystem. Rotationen um Stehachse und Umlenkspiegel können auch als eine Zeitreihe betrachtet werden. Mit zusätzlicher Sensorik lassen sie sich auch direkt beobachten. Voraussetzung dafür ist, dass die Beobachtungsrichtung des Scanners mit den georeferenzierenden Sensoren synchronisiert wird. Exzentrisch installierte referenzierende Sensoren beschreiben eine Trajektorie, aus der das Zentrum des Scans bestimmt werden kann, das je 3D Scan als konstant angenommen wird. Alle geometrischen Freiheitsgrade werden somit direkt ermittelt. Dieser Ansatz wird im Folgenden als schnelle statische Georeferenzierung bezeichnet.

Die Abb. 1 zeigt die Realisierung eines Systems, das die Parameter der Georeferenzierung direkt liefert. Als referenzierender Sensor wird hier ein kinematisches GNSS (Global Navigation Satellite System), bestehend aus zwei Antennen eingesetzt. Für einen 3D Scan



Abb. 1: Aktuelle Realisierung des hybriden Sensorsystems am GIH.

beschreiben die Positionen der Antennen jeweils eine Trajektorie, aus der sich die aktuelle horizontale Ausrichtung (Azimut) eines Scans ableiten lässt. Dreht sich der Antennenreferenzpunkt (ARP) horizontal mit der Scanrichtung, kann von einem konstanten polaren Offset ΔAzimut ausgegangen werden. Eine konstante Rotationsgeschwindigkeit um die Stehachse des Scanners ermöglicht es, das Azimut redundant abzuleiten. Da die Trajektorie aus den Positionslösungen des GNSS per se auf ein übergeordnetes System bezogen sind, kann daraus auch die Position des Scannerzentrums $\Delta\mathbf{x}_S^E$ festgelegt werden. Verbleibende Neigungsanteile lassen sich entweder durch zusätzliche Neigungssensoren erfassen bzw. durch entsprechende Aufstellung kompensieren.

Im zweiten hier dargestellten Ansatz werden die Orientierungselemente \mathbf{R}_S^E und $\Delta\mathbf{x}_S^E$ ebenfalls direkt über zusätzliche Sensoren bestimmt. Anders als im statischen Fall wird jedoch keine invariante Position $\Delta\mathbf{x}_S^E$ vorausgesetzt. Der Scanner kann während der Aufnahme frei im Raum bewegt werden. Diese Variante wird demnach als Georeferenzierung on-the-fly bezeichnet. Für jeden gescannten Punkt existieren somit sechs eigene geometrische Freiheitsgrade. Alle sechs Parameter der Rotation und Translation sind dafür kontinuierlich zu ermitteln. Die Position des Scanners kann wie im statischen Ansatz mittels GNSS beobachtet werden. Neben den Positionssensoren sind zusätzliche Sensoren zu integrieren, die die aktuellen Rotationsanteile erfassen. Bewegt sich die Plattform, lässt sich aus der Richtung der Fahrtgeschwindigkeit die zugehörige horizontale Ausrichtung des Scan-

ners ableiten (HESSE 2008). Anders als im statischen Fall kann hier aufgrund der Fahrdynamik nicht von einer horizontalen Lage des Scanners ausgegangen werden. Diese Rotationsanteile, vor allem diejenigen um die Längsachse eines Fahrzeuges (Rollen), sind daher explizit zu erfassen. Wird zusätzlich zum GNSS eine inertielle Messeinheit (IMU) integriert, können alle sechs Parameter geschätzt werden, selbst wenn zeitweilig Abschattungen die GNSS Lösung beeinträchtigen. Wie bei der schnellen statischen Georeferenzierung ist auch im bewegten Fall die Synchronisation für den vollständigen Messzeitraum zu gewährleisten. Die gemeinsame zeitliche Basis für den Scanner und die Navigationssensoren kann mit einer hardware-basierten Registrierung der Scanzeitpunkte extern realisiert werden. Üblicherweise werden dazu die Umlaufzeiten des Umlenkspiegels erfasst. Da diese Umlenkeinheiten mit sehr konstanter Geschwindigkeit rotieren, lässt sich deren Eigenschaft auch nutzen, um selbst eine Zeitskala zu erstellen (VENNEGEERTS et al. 2008). Die Uhrparameter ergeben sich aus geometrischen Bedingungen im Objektraum.

In der Aerophotogrammetrie wird die Kombination der Beobachtungen aus IMU und GNSS bereits seit mehreren Jahren für die direkte Georeferenzierung eingesetzt. Umfangreiche Versuche und direkte Vergleiche mit dem Orientierungswinkel aus der Aerotriangulation finden sich in (CRAMER 2003). Aspekte der Kalibrierung, speziell auch die relative Ausrichtung der Winkel zwischen den Koordinatensystemen der erfassenden und referenzierenden Sensoren behandelt z. B. (JACOBSEN 2002). Untersucht wird dort auch eine langfristige Stabilität dieser Orientierungselemente. Für airborne Anwendungen stellt die direkte Georeferenzierung kein aktuelles Forschungsthema mehr da, da die Lösungen für hinreichend ausgereift gehalten werden (JACOBSEN 2008).

Für den hier vorstellten terrestrischen Fall der direkten Georeferenzierung von Laserscannern sind eine Reihe von abweichenden Merkmalen charakteristisch. Positionslösungen des kinematischen GNSS sind hier oft nicht durchgängig verfügbar. Zudem zeigt der Laserscanner durch die feste Adaptierung auf der bewegten Plattform während der Fahrt ein

stark dynamisches Verhalten, besonders bezüglich der Querneigung. Schließlich sind die Anforderungen an die absolute Orientierung der Winkel bei den hier vorliegenden vergleichbar kurzen Zielweiten entsprechend geringer, wodurch auch alternative Verfahren bzw. Sensoren einsetzbar werden. Für den terrestrischen Fall sind also die Bedingungen und damit auch die Auswirkungen auf die referenzierte gescannte Szene individuell zu betrachten. Dies wird im hier vorgestellten Ansatz der integrierten Genauigkeitsanalyse berücksichtigt, der die Wirkung der direkten Georeferenzierung unmittelbar quantifiziert und visualisiert.

3 Schnelle statische Georeferenzierung

3.1 Methodik

Die schnelle statische Georeferenzierung basiert auf klassischen 3D Scans von einer statischen Plattform. Um die Parameter der Georeferenzierung bereitzustellen wird ein hybrides Sensorsystem bestehend aus einem Laserscanner zur Objekterfassung und kinematischem GNSS zur Positions- und Orientierungsbestimmung aufgebaut (vgl. Abb. 1). Die in einem hybriden Sensorsystem notwendige gemeinsame Zeitbasis der Einzelkomponenten wird durch das PPS (pulse per second) Signal des GNSS definiert. Jeder volle Umlauf des Umlenkspiegels des Laserscanners wird durch den Event-Marker-Input des GNSS Re-

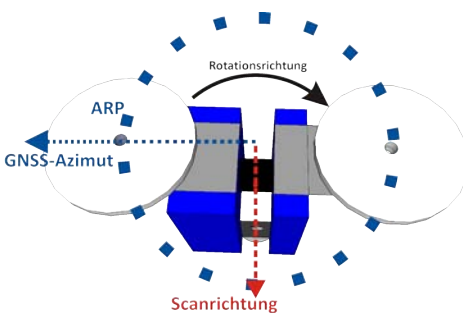


Abb. 2: Schematische Darstellung des hybriden Sensorsystems.

ceivers registriert. Somit erhält jedes 2D Profil des Scans einen eindeutigen Zeitstempel in der gemeinsamen Zeitbasis.

Ein besonderes Merkmal des hybriden Sensorsystems ist die Nutzung der konstanten Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners um die Stehachse zur Ableitung der Orientierungsparameter. Auf Grund der Adaption der zwei GNSS Antennen auf dem Laserscanner (vgl. Abb. 2) beschreiben die ARPE durch die konstante Rotation des Laserscanners um die Stehachse jeweils eine Raumkurve mit den Parametern Mittelpunkt und Radius. Der Mittelpunkt repräsentiert die Position des Laserscanners. Aus den präzisen 3D Positionen der Raumkurve und der Position des Laserscanners lässt sich für jedes 2D Profil des Laser-scans ein Azimut ableiten. Dabei wird die Güte der schnellen statischen Georeferenzierung durch die Azimutgenauigkeit bestimmt. Eine Ungenauigkeit des abgeleiteten Azimutes von 0.1° führt bei einer Scanentfernung von 30 m bereits zu einer metrischen Querabweichung der Punktlage von 5 cm.

Aus der Trajektorie der ARPE kann neben der invarianten Position $\Delta \mathbf{x}_S^E$ auch die Orientierung als verbleibender Freiheitsgrad abgeleitet werden. Das zweistufige Modell zur robusten Parameterschätzung der Trajektorie soll hier nur grob wiedergegebene werden. Eine ausführliche Diskussion ist in (PAFFENHOLZ & KUTTERER 2008) zu finden.

Im ersten Schritt erfolgt eine Projektion der 3D Positionen auf eine ausgleichende Ebene. Dieser Schritt ist erforderlich, um die 3D Informationen der Punkte zu nutzen. Des Weiteren

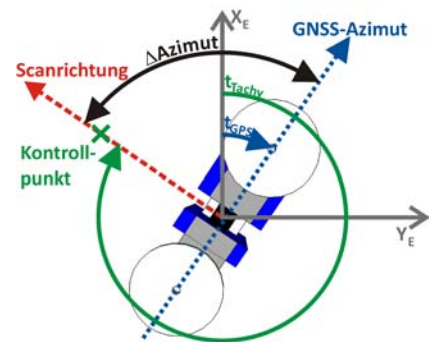


Abb. 3: Schematische Darstellung der Ableitung des Azimuts.

ren können dadurch Rotationen auf Grund des Koordinatensystems berücksichtigt werden. Im zweiten Schritt wird ein ausgleichender Kreis durch die in die Ebene projizierten Punkte geschätzt. Dies liefert zum einen Mittelpunktskoordinaten (invariante Position $\Delta \mathbf{x}_S^E$ des Laserscanners) und Radius und zum anderen die ausgeglichenen und ausreißerfreien Beobachtungen. Diese werden anstelle der originalen Beobachtungen verwendet, da die leicht verrauschten Originalpositionen durch die Ausgleichung geglättet werden und somit die Azimutzuordnung optimiert werden kann.

Aus der ausgeglichenen Trajektorie der ARPe und der invarianten Position des Laserscanners lässt sich für jedes 2D Profil des Laserscans ein Azimut berechnen. Für die absolute Angabe des Azimutes ist zusätzlich die Anordnung der GNSS Antennen in Bezug auf die Scanrichtung zu beachten (vgl. Abb. 3). Das aus der gewählten Adaptierung resultierende Δ Azimut ist ein konstantes polares Offset, wenn jegliche Fehlereinflüsse erfassbar sind und die Rotationsgeschwindigkeit des Laserscanners korrekt ermittelt wurde.

Wird das Δ Azimut an jeder Position des Vertikalmotors berücksichtigt, ist die direkte Georeferenzierung des 3D Scans durch die Zuordnung eines Azimutes zu jedem 2D Profil möglich. Die Güte der Azimutzuordnung ist daher unmittelbar von der Güte der Positionsbestimmung mit dem kinematischen GNSS abhängig. Als Fehlerquellen der GNSS Komponente sind neben Nahfeldeffekten, verursacht durch die Antennenadaptation aus Aluminium und das Laserscannergehäuse, Mehrwegeeffekte sowie die alternierende Antennenausrichtung in Betracht zu ziehen. Die Analyse der genannten Fehlerquellen sowie eine Optimierung der Auswertung sind in Vorbereitung. Gegenstand aktueller Untersuchungen ist auch die Ableitung von zusätzlichen, systemstabilisierenden Informationen aus beiden GNSS Ausrüstungen, was die Nutzung von zwei GNSS Ausrüstungen rechtfertigt. Des Weiteren ist durch eine kombinierte Auswertung von GPS und Glonass sowie zukünftig Galileo eine Verbesserung der kinematischen Positionsbestimmung zu erwarten.

3.2 Aufbau und Potential des Systems

Die aktuelle Realisierung des hybriden Sensorsystems am Geodätischen Institut (GIH) der Leibniz Universität Hannover besteht aus einem Laserscanner vom Typ Leica HDS 4500 (baugleich mit dem Zoller+Fröhlich (Z+F) Imager 5003) zur Objekterfassung und zwei geodätischen L1/L2 GNSS Receivern und Antennen zur Positions- und Orientierungsbestimmung.

Das Potential des hybriden Sensorsystems wird im Folgenden anhand von Testmessungen im Ehrenhof des Großen Garten der Herrenhäuser Gärten aufgezeigt. Folgende Komponenten und Rahmenbedingungen wurden für die Testmessungen gewählt:

- Beim Laserscanner Leica HDS 4500 wurden die Scanparameter „high, low noise“ sowie ein horizontaler Bereich von 0° bis 360° gewählt. Die Dauer der Datenerfassung betrug ungefähr 15 Minuten.
- Für die Beobachtung der kreisförmigen Bewegung des Laserscanners respektive der Trajektorien der ARPe kam folgende GNSS Ausrüstung zum Einsatz: Ein Trimble 5700 Receiver mit Geodetic Zephyr Antenne (vgl. Abb. 1 links), der eine Datenrate von 10 Hz ermöglicht. Der Receiver zeichnete die zur zeitlichen Synchronisation notwendigen Impulse des Laserscanners durch den Event-Marker Eingang auf und speicherte sie in der RINEX Beobachtungsdatei. Des Weiteren wurde ein Leica GRX1200GG Pro Receiver mit einer AX1202GG Antenne (vgl. Abb. 1 rechts) mit einer Datenrate von 20 Hz verwendet. Als lokale Referenzstation diente ebenfalls ein Leica GRX1200GG Pro Receiver mit einer AX1202GG Antenne und einer Erfassungsrate von 20 Hz.

Die GNSS Auswertung erfolgte für die obige Szene sowohl individuell für die beiden auf dem Laserscanner adaptierten GNSS Antennen als auch integriert für beide GNSS Antennen gemeinsam. Dabei ergaben sich bei einer Datenrate von 10 Hz circa 8000 3D Positionen für die Trajektorie der ARPe. Neben den 3D Positionen stehen auch Varianz-Kovarianzmatrizen der Positionen zur Verfügung. Die

Ergebnisse einer individuellen Auswertung beider GNSS Antennen ist in (PAFFENHOLZ & KUTTERER 2008) zu finden. Die folgenden Ergebnisse resultieren aus einer integrierten GNSS Auswertung beider Antennen, wodurch sich eine Genauigkeitssteigerung der Azimutzuordnung erzielen lässt.

Zur Validierung der Messungen in den Herrenhäuser Gärten wurden zusätzlich Messungen mit einer Totalstation zu ausgewählten Kontrollpunkten durchgeführt. Somit kann in diesen Kontrollpunkten die Differenz zwischen den Laserscanner Richtungen und den GNSS Azimuten (Δ Azimet) überprüft werden. Unter der Annahme einer konstanten Rotation des Laserscanners sollte sich für das Δ Azimet (vgl. Abb. 3) ein konstanter Wert ergeben.

Tab. 1 zeigt für ausgewählte Kontrollpunkte die Zielentfernung, den aus der ARP Trajektorie abgeleiteten Richtungswinkel sowie den aus den tachymetrischen Messungen abgeleiteten Richtungswinkel. Weiterhin zeigt Tab. 1 das Δ Azimet sowie die aus der Azimutzuordnung resultierende metrische Unsicherheit in der Entfernung der Kontrollpunkte. Für kurze Distanzen bis zu 30 m liegen die beobachteten Querabweichungen gegenüber einer Punktbestimmung mit einer Totalstation deutlich unter 2 cm. Bei circa 30 m zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Querabweichung auf circa 7 cm bis zu über 10 cm für Entfernungen

von 53 m. Dieser Anstieg lässt sich durch ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis des eingesetzten Laserscanners für Entfernungen ab 30 m erklären (BÖHLER 2005). Hinzu kommt, dass bei den gewählten Scanparametern „high, low noise“ für Entfernungen von über 30 m die manuelle Identifizierung des 2D Profils eines ausgewählten Kontrollpunktes eine gewisse Unsicherheit von 1–2 Profilen mit sich bringt. Des Weiteren liegen die Distanzen von 50 m bzw. 53 m nahe an der Grenze des eindeutigen Entfernungsbereichs von 53.5 m des Laserscanners Leica HDS 4500.

4 Georeferenzierung on-the-fly

4.1 Methodik

Der zweite hier vorgestellte Ansatz bestimmt die Parameter zur Georeferenzierung ohne Bedingungen an die Aufnahmekonstellation, also für eine freie Trajektorie mit sechs Freiheitsgraden je gescannten Punkt. Objekterfassende als auch referenzierende Sensoren sind dafür in einem hybriden System zu integrieren. Wird ein Laserscanner zur Aufnahme der Objekte eingesetzt, kann dieser prinzipiell in unterschiedlichen Messmodi betrieben werden. Da im kinematischen Einsatz auch bei höheren Fahrtgeschwindigkeiten die Umgebung möglichst umfassend abgebildet werden

Tab. 1: Ergebnisse der Azimutzuordnung für ausgewählte 2D Profile; Relative GNSS-Auswertung beider Antennen mit Wa1 (hg4thg4lgnCA).

Kontrollpunkt	Zielentfernung [m]	t_{GPS} [°]	t_{Tachy} [°]	Δ Azimet [°]	Metrische Unsicherheit @ Zielentfernung [cm]
327	50	21.538	109.707	88.169	14.6
350	53	36.290	124.178	87.888	9.9
306	19	203.834	291.796	87.962	0.5
309	17	246.869	334.833	87.963	0.1
311	19	271.922	359.878	87.956	0.6
314	22	296.939	24.905	87.966	0.7
320	28	311.225	39.076	87.851	7.5
321	32	320.557	48.688	88.131	9.2
324	37	345.143	73.042	87.900	7.5
325	44	354.726	82.795	88.069	6.0

soll, wird hier der 2D-Profilmodus gewählt. Durch die Bewegung des Fahrzeugs beschreiben die gescannten Punkte dann die Form einer Helix, deren Tiefe durch Fahrtgeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit des vertikalen Umlenkspiegels skaliert wird.

Hybride Sensoren erfordern eine gemeinsame zeitliche und räumliche Basis. Für die zeitliche Basis wird gewöhnlich ein externes hardware-basiertes Zeitnormal installiert, das eine Referenz für die beteiligten Sensoren darstellt. Das hier vorliegende System beinhaltet einen Echtzeitprozessor, der die Zeitpunkte des Umlaufs des vertikalen Umlenkspiegels misst. Da durch die Integration der Inertial- und Satellitennavigation bereits ein solches Zeitnormal (PPS Signal des GPS) besteht, können optional software-basiert die Umlaufzeiten auch auf das Zeitnormal des INS/GPS adaptiert werden.

Unter der Annahme einer konstanten relativen Orientierung zwischen den Sensoren lässt sich diese interne räumliche Transformation prinzipiell aus einer örtlichen Einmessung (z. B. photogrammetrisch oder tachymetrisch) bzw. alternativ indirekt aus dem Objektraum bestimmen. Das Body-System der IMU repräsentiert dabei ein lokales Zielsystem, von dem anschließend über ein topozentrisches Navigationssystem in das erdfeste System transformiert wird.

Entsprechend der aktuellen Orientierung des Systems werden die Punkte aus der Profilmessung des terrestrischen Laserscanners \mathbf{x}_{S2D} in das übergeordnete geozentrische System transformiert (HEINZE 1996):

$$\mathbf{x}_E = \mathbf{R}_{Na}^E \cdot \mathbf{R}_{Bo}^{Na} \cdot (\mathbf{R}_{S3D}^{Bo} \cdot \mathbf{R}_{S2D}^{S3D} \cdot \mathbf{x}_{S2D} + \Delta \mathbf{x}_{Sc}^{Bo}) + \Delta \mathbf{x}_{Bo}^E \quad (2)$$

Der Übergang wird dabei über folgende Systeme realisiert:

- Lokales 3D-System des Laserscanners ($S3D$)
- Body-System (Bo) (in diesem Fall dem Sensor-System der IMU entsprechend)
- Topozentrisches Navigationssystem (North, East, Down) (Na)
- Übergeordnetes, geozentrisches, kartesisches Koordinatensystem (Earth-Centered-Earth-Fixed, hier: WGS84) (E).

Vor der Fahrt kann die Richtung der Profilmessung um die Vertikalachse im System des Laserscanners beliebig eingestellt werden. Entsprechend sind die 2D-Scankoordinaten in das 3D-System des Laserscanners zu rotieren. Photogrammetrisch koordinierte Punkte im Body-System der IMU dienen als identische Punkte zur Bestimmung der Transformationsparameter zum System des Laserscanners. Um die Punkte im Body-System der IMU auf das geozentrische System zu beziehen, werden die Orientierungselemente aus Eulerwinkeln (roll, pitch, yaw nach DIN 9050) und Positionsvektoren verwendet. Diese werden als Zustandsparameter im KALMAN-Filter des INS/GPS geschätzt (HEINZE 1996).

Integrierte Genauigkeitsanalyse

Alle beteiligten Sensoren liefern einen Beitrag für das gesamte Genauigkeitsbudget eines gescannten Punktes, für dessen Berechnung folgende Größen verwendet werden:

- Orientierungsvektor im System der IMU aus der Position XYZ_{IMU} , Länge und Breite LB_{IMU} und Rotation pry_{IMU}
- Relative Transformation zwischen Laserscannersystem und Body-System von IMU/GPS $\Delta xy z_{S2Bo}$ und $r_{xy z_{S2Bo}}$
- Fahrtgeschwindigkeit
- Rotationsgeschwindigkeit des vertikalen Umlenkspiegels ω_v
- Horizontale Ausrichtung des Laserscanners $r_{z_{S2E}}$
- Gescannte Koordinate im 2D-System xy_s

Diese Beobachtungen definieren das stochastische Modell der Punkte im erdfesten System. Um das geometrische Potential von Mobile-Mapping-Systeme zu belegen, werden oft unabhängig beobachtete Kontrollpunkte bzw. Flächenparameter herangezogen. Die abgeleiteten Genauigkeitsaussagen beinhalten – sofern sie auf ein übergeordnetes System bezogen sind – zwar das gesamte Budget der einzelnen Sensoren, sie sind jedoch nur lokal und instantan interpretierbar.

Der Einfluss der hybriden Sensoren kann mittels durchgängig integrierter Genauigkeitsanalyse quantifiziert werden. (BARBER et al. 2008) und (GLENNIE 2007) verwenden ein statisches stochastisches Modell, um die Aus-

wirkungen der einzelnen Beobachtungsanteile miteinander zu vergleichen. Das stochastische Modell der Orientierungsvektoren ist jedoch zeitlich variant, weil die GNSS Lösungen niederfrequent aufdatiert werden und abhängig von der aktuell verfügbaren Satellitenkonstellation sind. Aus diesem Grund werden im vorliegenden System die Koordinaten berechnet und die Varianzen fortgepflanzt.

Für alle Beobachtungen \mathbf{L} kann ein stochastisches Modell Σ_{LL} aufgestellt werden, das sich bei den Orientierungsparametern aus der KALMAN-Filterung und beim Laserscanner aus geräteinternen Untersuchungen (BÜTTNER & STAIGER 2007) ergibt. Die zugehörige Funktionalmatrix \mathbf{F} enthält die partiellen Ableitungen der obigen Transformationsvorschrift (2) nach den einzelnen Beobachtungen. \mathbf{F} hat hier die Dimension (18×3) , wobei nur die partiellen Ableitungen nach der Translation $\Delta \mathbf{x}_{B_o}^E$ zeitlich konstant sind. Die übrigen Elemente werden für die einzelnen Punkte numerisch bestimmt und variieren mit der Zeit. Mit der Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung lässt sich schließlich für jeden Laserscanpunkt auch die Kovarianzmatrix Σ_{xx} im geozentrischen System aufstellen

$$\Sigma_{xx} = \mathbf{F} \cdot \Sigma_{LL} \cdot \mathbf{F}^T . \quad (3)$$

Optimierte Verfahren zur effizienten Ableitung von Varianzinformationen, speziell zur Aufstellung der Funktionalmatrix, sind aktuelle Forschungsgebiete des GIH.

4.2 Aufbau und Potential des Systems

Für die Georeferenzierung on-the-fly werden als Aufnahmesensor der terrestrische Laserscanner Leica HDS 4500 sowie kinematisches GPS kombiniert mit der Inertialen Messeinheit (IMU) Honeywell Lasernav II verwendet. Zur Validierung des Systems wurden auf dem Gelände der TU Darmstadt mehrere Testfahrten durchgeführt. Für die gescannten Punkte wurden auch die Kovarianzmatrizen berechnet. Um die Varianzen für eine große Menge von Punkten in einer Punktwolke sichtbar zu machen, werden sie auf ein skalares Maß in Form der mittleren Standardabweichung der Koordinaten reduziert (vgl. Abb. 4)

$$\bar{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\text{sp}(\Sigma_{xx})}{3}} . \quad (4)$$

Die Auswirkungen des variablen stochastischen Modells der Beobachtungen werden hier sofort deutlich. Die Genauigkeit der auf-

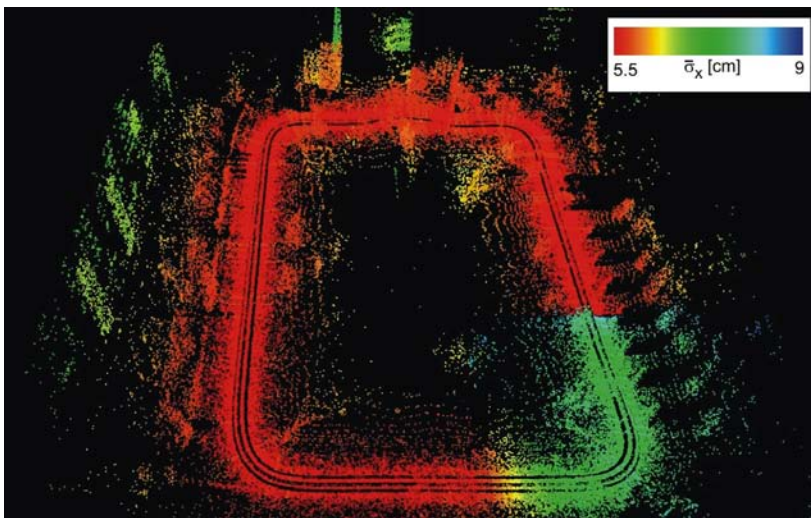


Abb. 4: Stochastische Punktwolke (die mittlere Standardabweichung der Koordinaten ist farbcodiert).

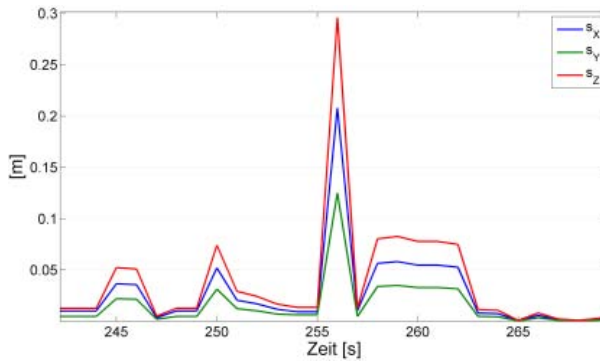


Abb. 5: Variation der Koordinatengenauigkeit des kinematischen GPS während der Fahrt (Ausschnitt).

datierten Position aus dem kinematischen GPS ist abhängig von der aktuell verfügbaren Satellitenkonstellation. Abschattungen verringern die Qualität der Positionslösung, was sich unmittelbar auch auf die gescannten Punkte auswirkt. Einen Ausschnitt aus dem Genauigkeitsniveau der einzelnen Koordinatenzeitreihen der kinematischen GPS-Lösung zeigt die Abb. 5.

Sprunghafte Änderungen der Koordinatengenauigkeit verringern das Genauigkeitsniveau der zu diesem Zeitpunkt gescannten Punkte. In stochastischen Punktwolken lässt sich dieser Einfluss lokalisieren und quantifizieren. Die Auswirkungen auf die fortgepflanzte Punktgenauigkeit werden in Abb. 4 (siehe Trajektorie unten rechts) direkt deutlich.

5 Fazit und Ausblick

Der Übergang von lokalen sensoreigenen Systemen in ein übergeordnetes erdfestes System kann unmittelbar realisiert werden, wenn die geometrischen Freiheitsgrade mit zusätzlichen Sensoren bestimmt werden. Die hier vorgestellten Ansätze verwenden beide GNSS, wobei zumindest im schnellen statischen Fall deren Verfügbarkeit durchgängig gewährleistet sein muss. Der Vorteil liegt hier darin, dass die Georeferenzierung parallel zum Scanvorgang stattfindet. Anders als bei objektraumbasierten Verfahren ist sie außerdem unabhängig von der Struktur der gescannten Szene.

Für die Qualität der schnellen statischen Georeferenzierung konnte gezeigt werden, dass bei einer Entfernung von circa 30 m Querabweichungen gegenüber einer Punktbestimmung mit einer Totalstation von kleiner 2 cm erreichbar sind. Weitere Optimierungen insbesondere im GNSS Teil durch eine integrierte Auswertung beider ARPe Trajektorien, ein abnehmendes Rauschverhalten und eine erhöhte räumliche Auflösung zukünftiger Laserscanner lassen erwarten, dass die Rotationsparameter auch für größere Entfernungen mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Bei der direkten Georeferenzierung on-the-fly wird deutlich, dass gerade bei der Integration des terrestrischen Laserscannings in hybride Sensorensysteme eine Betrachtung der Genauigkeit wichtig ist. Auf diese Weise lassen sich die Auswirkungen der einzelnen Sensoren auf die stochastische Qualität des 3D Scans quantifizieren.

Insgesamt bieten beide Ansätze aufgrund der identischen methodischen Grundlage eine effiziente Möglichkeit, terrestrische Laserscans zu georeferenzieren, weil keine zusätzlichen Passpunkte koordiniert werden müssen und zudem die Georeferenzierung simultan zum Scannen abläuft. Durch die Entwicklung kostengünstiger Navigationslösungen (WÄGGLI et al. 2007) auf der Basis von Einfrequenz GPS L1 und MEMS (Micro Electro Mechanical System) ist abzusehen, dass die direkte Georeferenzierung zukünftig vermehrt in scannende Systeme integriert werden wird.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dipl.-Ing. Frank Hinsche (Leica Geosystems) für die Bereitstellung der Leica GNSS Ausrüstung sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger für die GNSS Auswertung.

Literatur

- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S., 2008: Geometric Validation of a ground-based mobile laser scanning system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **63**: 128–141.
- BÖHLER, W., 2005: Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung von Laserscannern. – Schriftenreihe des DVW, Terrestrisches Laserscanning (TLS) 48, Wißner, Augsburg, 17–28.
- BÜTTNER, E. & STAIGER, R., 2007: Erste Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5006 von Zoller+Fröhlich. – *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*, Wichmann, Heidelberg: 206–269.
- CRAMER, M., 2003: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2007** (4): 267–278.
- GLENNIE, C., 2007: Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. – *Journal of Applied Geodesy* **2007** (3): 147–157.
- HESSE, C., 2008: Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. – *DGK C 608*, München.
- HEINZE, O., 1996: Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Institut für Physikalische Geodäsie.
- JACOBSEN, K., 2002: Calibration Aspects in Direct Georeferencing of Frame Imagery. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (1): 82–88.
- JACOBSEN, K., 2008: Persönliche Mitteilung.
- PAFFENHOLZ, J.-A. & KUTTERER, H., 2008: Direct Georeferencing of Static Terrestrial Laser Scans. – *FIG Working Week 2008, Integrating Generations*, Stockholm, Sweden, June 14–19.
- VENNEGEERTS, H., MARTIN, J., BECKER, M. & KUTTERER, H., 2008: Validation of a Kinematic Laser-scanning System. *Journal of Applied Geodesy* **2008** (2): 79–84.
- WÄGLI, A., SKALLOUD, J., TOME, P. & BONNAZ, J.-M., 2007: Assessment of the Integration Strategy between GPS and Body-Worn MEMS Sensors with Application to Sports. – *ION-GNSS*, Fort Worth, Texas, USA, September 25–28, **2007**: 2075–2084.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. HARALD VENNEGEERTS, Dipl.-Ing. JENS-ANDRÉ PAFFENHOLZ, Prof. Dr.-Ing. HANSJÖRG KUTTERER, Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, D-30167 Hannover, Tel.: +49-511-762-2466, Fax: +49-511-762-2468, e-mail: {vennegeerts, paffenholz, kutterer}@gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. JENS MARTIN, Technische Universität Darmstadt, Institut für Physikalische Geodäsie, D-60487 Darmstadt, Tel.: +49-65151-16-4509, Fax: +49-65151-16-4512, E-Mail: martin@ipg.tu-darmstadt.de

Manuskript eingereicht: Juli 2008

Angenommen: November 2008

An Advanced Approach for Automatic Extraction of Planar Surfaces and their Topology from Point Clouds

ANDREAS SCHMITT & THOMAS VÖGTLE, Karlsruhe

Keywords: Terrestrial laser scanner, Point clouds, Automatic surface extraction, 3D reconstruction

Summary: Terrestrial laser scanning has become a standard method for a fast and accurate acquisition of 3D objects. While data capture has attained a high level of development, the analysis of point clouds is still characterised by a remarkable amount of manual interaction. In this article an advanced generic approach for the extraction of surface primitives is presented. In a first step the 3D measurement domain is subdivided into volume elements (voxels) and the centre of gravity of the interior laser points is calculated for each voxel as representative geometric position. Normal vectors are determined for each voxel by means of all possible combinations of two vectors to the 26 neighbouring barycentres. If the local surrounding contains plane surface parts, a couple of these normal vectors have similar directions. These vectors will be aggregated (mean direction) and the number of involved vectors (NOV) is stored. For a planar surrounding a clear majority will be obtained. A region growing algorithm extracts plane surfaces by merging adjacent voxels if their main normal directions are similar (homogeneity criterion). If two majorities can be observed it is an edge point, for three main directions a corner point can be assumed. These topological points will be stored as a base for the subsequent 3D modelling process. First experiences with synthetic and real world data of buildings have shown the suitability of this advanced approach and the robustness concerning noise, surface roughness and outliers. A disadvantage may be a certain generalisation effect.

Zusammenfassung: *Ein erweiterter Ansatz zur automatischen Extraktion ebener Flächen und ihrer Topologie aus Punktwolken.* Terrestrisches Laserscanning ist zu einer Standardmethode der Erfassung von 3D-Objekten geworden. Während die Datenerfassung einen hohen Entwicklungsstand erreicht hat, ist die Auswertung der Punktwolken noch durch einen erheblichen Anteil an manuellen Arbeiten gekennzeichnet. In diesem Beitrag wird ein erweiterter generischer Ansatz zur Extraktion von Oberflächenprimitiven vorgestellt. In einem ersten Verfahrensschritt wird der dreidimensionale Messraum in Volumen-Elemente (Voxel) unterteilt und für jedes Voxel der Schwerpunkt der darin gelegenen Laserpunkte als repräsentativer geometrischer Ort berechnet. Für jedes Voxel werden dann Normalenvektoren bestimmt, die sich aus allen Kombinationen zweier Vektoren zu den Schwerpunkten der 26 benachbarten Voxel ergeben. Enthält die lokale Umgebung ebene Oberflächenteile, so werden mehrere Normalenvektoren nahezu in die gleiche Richtung weisen. Diese Vektoren werden unter Berechnung der mittleren Richtung zusammengefasst und die Anzahl der beteiligten Vektoren (NOV) gespeichert. Im Falle einer Ebene als lokale Umgebung wird sich eine deutliche Mehrheit der Normalenrichtungen ergeben. Ein Flächenwachstumsverfahren extrahiert ebene Flächen durch Fusion benachbarter Voxel, deren Haupt-Normalenvektoren nur eine geringe Richtungsabweichung voneinander aufweisen (Homogenitätskriterium). Ergeben sich zwei Hauptrichtungen, so handelt es sich um einen Punkt auf einer Kante, bei drei Hauptrichtungen kann eine Ecke angenommen werden. Diese topologischen Punkte werden als Basis für die anschließende 3D-Modellierung gespeichert. Erste Erfahrungen mit synthetischen wie auch realen Daten von Gebäuden haben die Eignung dieses Ansatzes sowie seine Robustheit gegenüber Rauschen, Oberflächenrauigkeit und Ausreißern erwiesen. Ein Nachteil könnte ein gewisser Generalisierungseffekt aufgrund der Voxel-Rasterung sein.

1 Introduction

During the last decade terrestrial laser scanning (TLS) has become a standard method for a fast acquisition of 3D data with high accuracy. Meanwhile a lot of various applications use TLS techniques like network planning in urban areas, industrial production, plant engineering and construction, forest inventories, forensic applications or film industry. One of the most important ones is the recording and modelling of buildings, e. g., for generation of 3D city models, infrastructure and environmental planning, tourist guide systems, architecture, archaeology or conservation of cultural heritage.

While data capture has attained a high level of development the analysis of point clouds is still characterised by a remarkable amount of manual interaction – especially for objects of complex structure like buildings or industrial products. Therefore, automation is an important topic of recent international research and a couple of methods can be found in the literature to extract 3D objects from point clouds which offer different levels of automation.

In this article an advanced generic approach will be presented which combines the flexibility of data driven approaches concerning the possible variety of object shapes with the automatic extraction of topologic relations between the extracted surface primitives as well as data and noise reduction, typical for model driven approaches. For 3D modelling neighbouring surface elements are intersected or connected by means of this topological information. Even if it aims at automatic building modelling it is also applicable to other suitable objects from the industrial domain.

In the next section a selection of related work from literature will be shortly presented and commented, while in section 3 our advanced approach is explained in detail. In the following section some practical tests and applications are described which clarify the advantages and disadvantages of this method. Concluding remarks and possible further developments will finish this contribution.

2 Related Work

For modelling of a great variety of building shapes – as well as for other objects – only a generic approach seems to be suitable, while only a limited number of different object types may be acquired by model-driven approaches (GRÜN 1997, HAALA & BRENNER 1997, MAAS 1999a, MAAS 1999b). Generic data-driven methods extract surface primitives (planes, cylindrical or conic elements, etc.) from the point cloud and combine them to 3D object models. Therefore, a higher flexibility concerning the variety of object shapes can be obtained. A general problem of a subsequent 3D modelling based on these approaches is, that topological relations between the single surface parts have to be extracted separately in a second step by a more or less extensive algorithm.

Some of these approaches reduce the spatial distributed point cloud (3D) to 2.5D by creating image information (depth image or a matrix sorted according to horizontal and vertical angles of the laser measurements). The extraction of surface primitives is now based on either image processing routines or 2-dimensional Delaunay triangulation (KERN 2003). A restrictive precondition is that only separate original scans can be used as input data and therefore extracted primitives have to be merged in the overlapping parts of several single scans after registration. Another method is the reduction of the point cloud into 2D. (SCHWALBE et al. 2005) determine in a first step the main orientation and contour of a building by generating horizontal cross-sections in different heights. After rotation of the point cloud into the main building directions planes are represented by linear parts of high point density which can be used to extract these planes. (BIENERT 2006) uses horizontal cross-sections in different heights to extract a set of contour lines. From each contour line the linear elements are determined. By combining corresponding linear elements of adjacent contour lines building planes could be derived.

In other approaches a 3D triangulation of the point cloud is carried out. (BERNARDINI et al. 1999) approximate 3D objects by triangles without extracting primitives. Therefore, no data reduction and a high redundancy for ob-

jects of lower complexity will be obtained. (VERBREE & VAN OOSTEROM 2003) start with a 2D triangulation. Tetrahedrons are created by adding further points which fulfil specific conditions (data dependent TIN), e. g., minimal area of surface or minimal volume which leads to a so-called Delaunay tetrahedronised irregular network. Again no significant data reduction and high redundancy will occur. (TOVARI & PFEIFER 2005) determine normal vectors using n nearest neighbours of a point and extract surface segments by a region growing process based on special homogeneity criteria, e. g., similarity of normal vectors, point distance to an adjusting local plane. (FILIN & PFEIFER 2006) propose a similar approach working in a slope adaptive neighbourhood to reduce the influences of noise and micro structures of the object surface. The extraction of surface segments is obtained by a feature-based clustering. A very robust method with regard to noise is an approach based on the well-known RANSAC algorithm (BOULAASSAL et al. 2007, HANSEN 2007). Elementary surface primitives (in these cases planes) are extracted by a great amount of random combinations of three laser points and the combination with the smallest residuals of the laser points is chosen. Normally this leads to an acceptable solution even if it is not the optimal one. (VISINTINI et al. 2006) and (CROSILLA et al. 2007) present a method which uses not only planes as surface primitives but also elements of higher order, e. g., hyperbolic, parabolic and elliptic surface parts, taking a distance dependent weighting function into account. Each primitive is determined in a local surrounding and can be described easily by features like Gaussian, mean or main curvature which is characteristic for these basic geometric shapes. A region growing algorithm merges adjacent elements to planes, cylindrical, spherical or hyperbolic object surfaces.

Another way to handle large point clouds – commonly millions of points – is a subdivision of the measurement domain into volume elements (voxels) and a sorting of the laser points according to their corresponding voxel. For each voxel (HANSEN 2006) determines a local dominant plane by means of the RANSAC algorithm. The planes of neighbouring voxels are merged if their normal vectors are similar.

Therefore, a remarkable data reduction can be obtained. (BUCKSCH & LINDENBERGH 2008) subdivide the 3D space in octree cells by defined rules to obtain sets of points and describe the links between them (graph description). The critical point of these approaches may be the choice of a suitable edge length of the voxels.

3 IPF-Approach

Due to the discussion of existing algorithms, the benefits and advantages of an advanced approach should have are:

- High flexibility: approximation of any object shape (buildings, industrial objects etc.) in a generic data-driven way. Additionally applicable to any point cloud (not only to single scans).
- Topology extraction: determination of edges and corners at the boundary of extracted surface elements for subsequent 3D modelling.
- Robustness concerning noise, surface roughness, remaining errors after registration and outliers.
- Level Of Detail / Generalisation: selectable degree of generalisation by user-defined parameters.

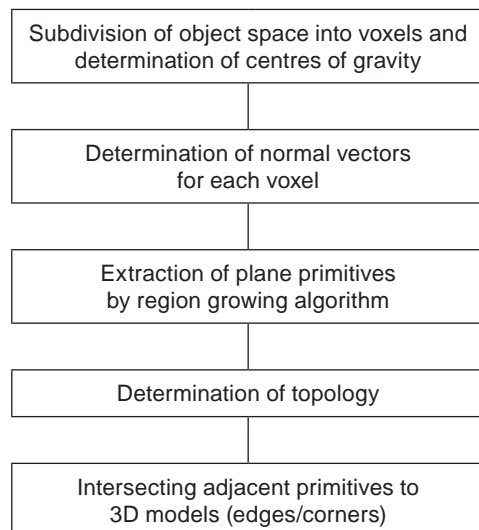


Fig. 1: Steps of the IPF-algorithm.

Another aspect is minimisation of running time, but it is not required in advance. To have a view of the procedure, the single steps are presented in a scheme (cf. Fig. 1) and explained in the following paragraphs.

3.1 Subdivision of Object Space into Voxels

The initial idea is to subdivide the object space into regular volume elements (voxels). To each of these voxels their corresponding laser points are related (cf. Fig. 2). The minimum number of related measurement points is used as criterion to reject voxels that probably only contains outliers. The centre of gravity is determined for each voxel as a representative geometric location for the points inside. Therefore, a high degree of data reduction will be obtained. The parameters (voxel size, minimal number of points per voxel etc.) are user-defined because they highly depend on the complexity of the object and the intended level of detail of the application. The voxel size can, e. g., be defined by the dimension of the smallest detail which should be acquired. Thus, the user can control the generalisation effect by these parameters.

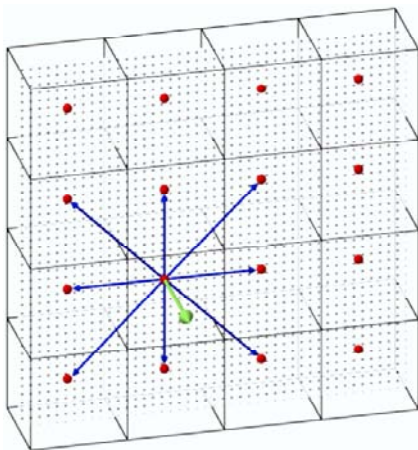


Fig. 2: Main normal vector (green) derived from the centres of gravity (red points).

3.2 Determination of Normal Vectors for Each Voxel

For each voxel the vectors starting from its centre of gravity to all (existing) neighbouring voxel barycentres are determined (dark vectors in Figs. 2 and 3). Normal vectors are calculated based on all possible combinations of two of these vectors – almost parallel vectors are excluded by a minimum angle criterion – by the cross product, i. e., in Fig. 2 there are 21 suitable combinations. In the case of a plane most of these normal vectors have similar directions. Those normals differing less than a maximum acceptable deviation are fused (mean direction) and the number of involved vectors (NOV) is stored. Afterwards the remaining normals are sorted by their NOV. If one vector (the grey one in Fig. 2) is obviously more frequent than all the others, there is one main direction of the normals and this voxel centre is situated on a local planar surface (cf. Fig. 2). If there are two main directions found, the voxel contains an edge (two main normal vectors in Fig. 3), in case of three it is a corner.

3.3 Region Growing Process and Robust Plane Estimation

Every normal vector of a voxel belonging to a local plane surface can become seed region in

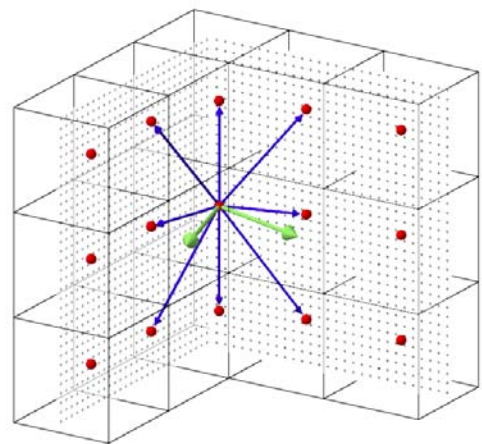


Fig. 3: Two main normal vectors (green) derived from centres of gravity at an edge.

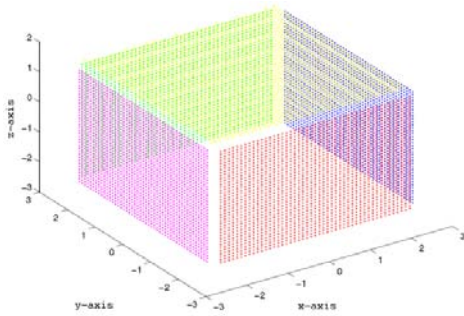


Fig. 4: Extracted planes in a synthetic point cloud of a cuboid (without ground area).

the subsequent region growing process. Two criteria define the homogeneity for a new attached voxel:

- The deviation of the (main) normal vector directions has to be smaller than a maximum acceptable angle.
- The number of vectors (NOV) of the new attached voxel has to exceed a certain minimal number.

The averaged normal vector (based on the attached normals) is continuously re-calculated. If no more suitable voxels are found the process stops. To estimate the optimal plane equation a L1-norm estimator is used. This procedure weights down the influence of probably false classified voxels and fits the plane iteratively to the remaining centres of gravity

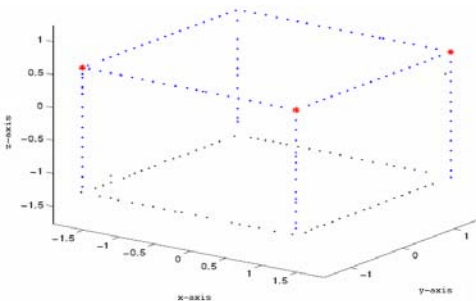


Fig. 6: Extracted edge (dark) and corner points (grey) in a synthetic point cloud of a cuboid without ground area (cf. Fig. 4).

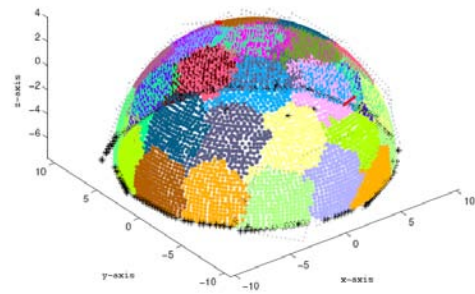


Fig. 5: Segmentation of a synthetic point cloud of a hemisphere.

(cf. Fig. 4). Even if this procedure is applied on curved surfaces like a hemisphere (cf. Fig. 5) approximate plane surface parts are achieved. Surfaces which are too small can be rejected by their low number of attached voxel centres.

3.4 Determination of Edges and Corner Points

As explained above voxels whose normal vectors show more than one main direction can be assigned to several planes. They represent edges and corners (cf. Fig. 6). In the example of Fig. 6 all edges and three corners out of four are detected, the missing one may be caused by noise or an unfavourable relative position

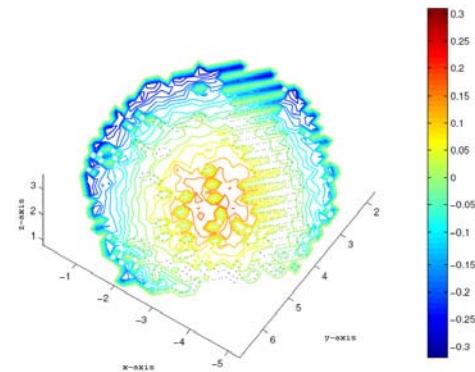


Fig. 7: Isolines for the control of the approximation by planes: here one surface part (cf. Fig. 5) is depicted where – due to the curvature of the object surface – the largest deviations can be found in the middle and near the boundary.

to the voxel structure. If only few neighbouring voxel barycentres can be found, this voxel is classified as boundary voxel (cf. Fig. 6). As the barycentres do not represent the optimal edge or corner coordinates these are calculated by intersection of the assigned (adjacent) planes. The topology information that is derived from the edge and corner voxels can be summarized in a graph to be used in a further 3D reconstruction.

3.5 *Extraction of Details – Boundaries and Isolines*

To extract more detailed information – on the one hand the boundaries of surface parts without neighbouring surfaces, on the other hand the deviations from the extracted planes – the original measurement points are attached and transformed to their corresponding plane. In a first step the minimal enclosing rectangle is determined for each plane (cf. Fig. 8 left). For the points inside this rectangle a fine structured new boundary line is determined (cf. Fig. 8 middle) based on a contour tracking algorithm after rasterisation of the transformed points. By means of the distances between the original points and the adjusted plane isolines can be calculated which are used to inspect the approximation – especially in cases of more complex or curved surfaces (cf. Fig. 7) – as well as for the extraction of finer structures

like cornices etc., i. e., specific details of the surface (cf. Fig. 8 right).

4 Examples

The IPF-algorithm being developed for practical use has been applied to several real data sets from which two results are presented in the following. The measurements have been carried out by the INSA (Institut National des Sciences Appliquées), Strasbourg (F), with the terrestrial laser scanner TRIMBLE GX in the year 2006. The point clouds of different scan positions have already been registered by using markers.

4.1 *Castle of Andlau*

The castle of Andlau is situated in the Vosges Mountains near Strasbourg in the Alsace region in north-eastern France. From the medieval building the fortification walls and towers still remain. Because of the wooded downward slopes around the castle many scan positions are necessary to record the whole structures of the building. Fig. 9 shows the scanned point cloud of one tower, whereas Fig. 10 represents the voxel centres of gravity using a voxel grid length of 30 cm. The algorithm reconstructs the walls as large plane surfaces (cf. Fig. 11). The curved – almost cylindrical

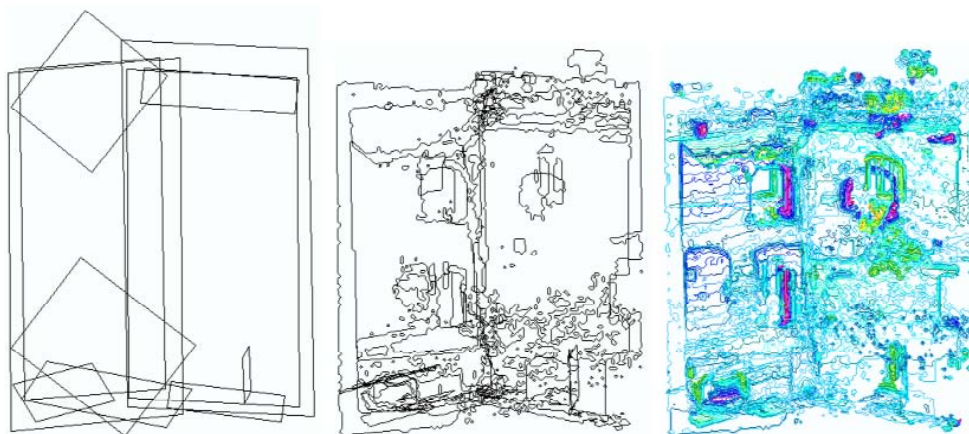


Fig. 8: Minimal enclosing rectangles (left), detailed boundaries (middle) and isolines (right) of a scanned courtyard corner in the castle of Andlau (cf. Sect. 4.1).

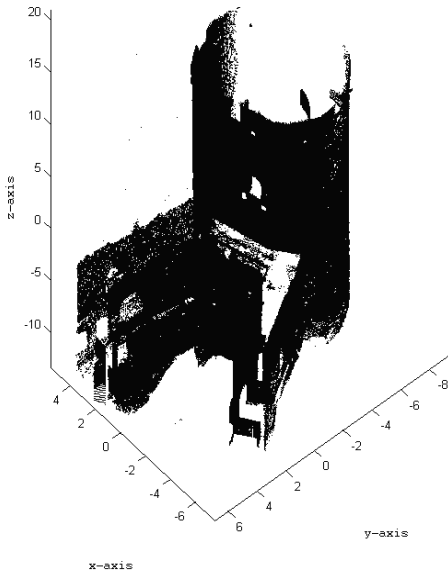


Fig. 9: Andlau castle (subset) – original point cloud.

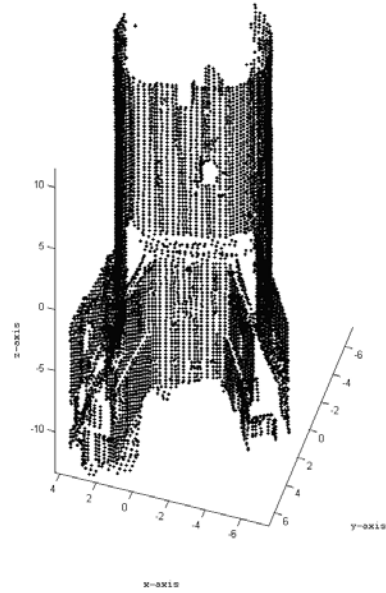


Fig. 10: Andlau castle (subset) – voxel centres of gravity.

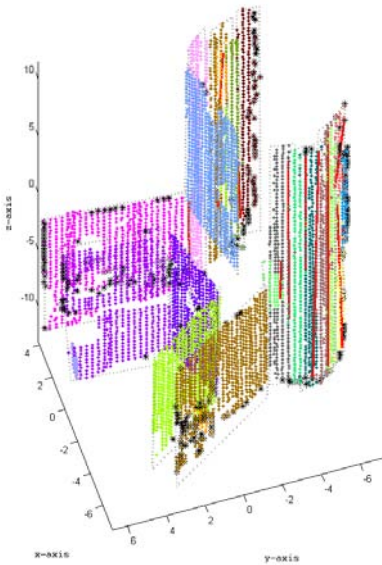


Fig. 11: Andlau castle (subset) – segmented voxel centres of gravity of the extracted plane surfaces (in different colours).

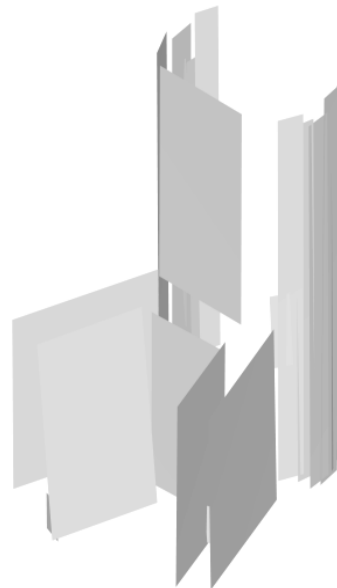


Fig. 12: Andlau castle (subset) – minimal enclosing rectangles of the segmented planes.

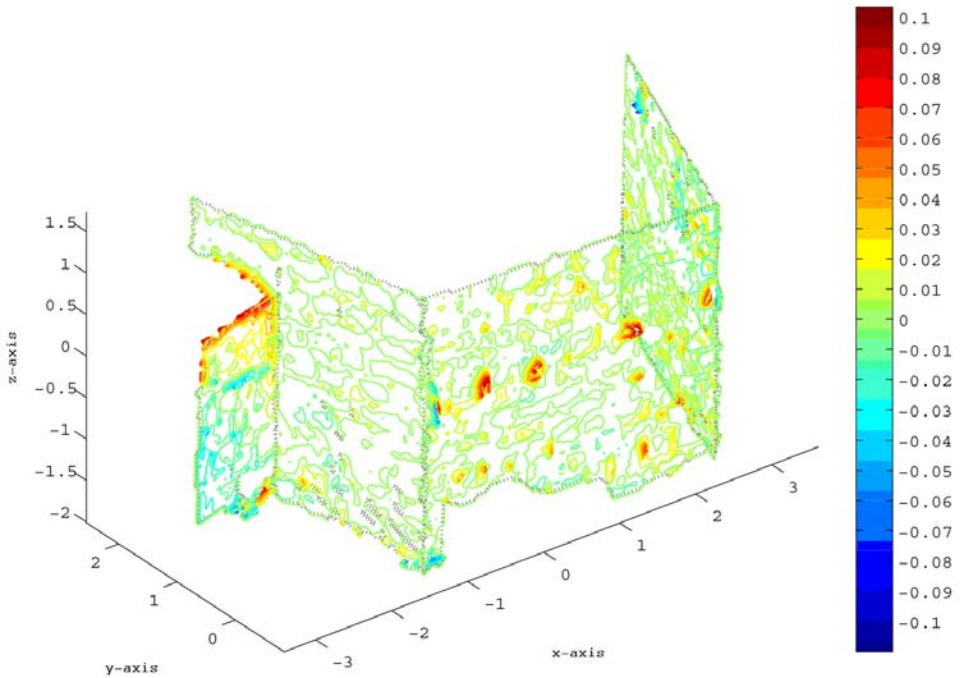


Fig. 13: Andlau castle (subset) – isolines illustrating the height above the adjusted plane, fine wall structures like four holes or bigger stones can easily be recognized.

– surface of the tower is approximated by narrow stripes. The representation in a CAD system (cf. Fig. 12) shows the minimal enclosing rectangles as rough approximation of the boundaries. Much more detailed information can be derived from the isolines (cf. Fig. 13) which depict the fine structures of the wall, e. g., ancient holes for beams of wood. In addition the isolines visualize the quality of the ap-

proximation, as mostly lines of low height above the adjusted plane are found and no trend is recognizable.

4.2 INSA Building

The INSA building in Strasbourg (F) is a modern school building. In contrast to the previous

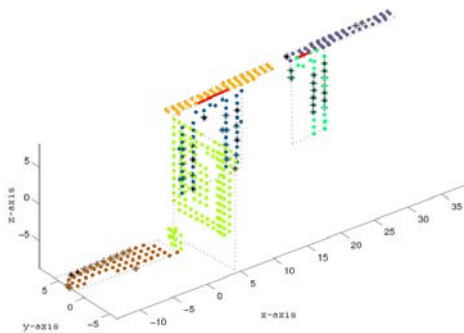


Fig. 14: INSA building (subset) – voxel centres of gravity of the extracted plane surfaces.



Fig. 15: INSA building (subset) – minimal enclosing rectangles of the segmented planes.

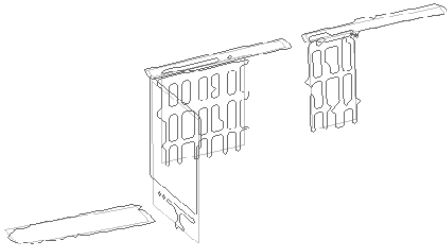


Fig. 16: INSA building (subset) – minimal enclosing rectangles and boundary lines.

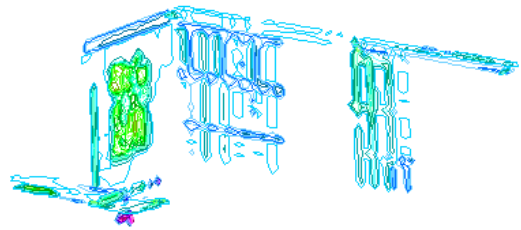


Fig. 17: INSA building (subset) – isolines depicting the minor structures like the relief on the left facade.

example only rectangular structures are found on the facades with exception of a large relief located in the middle of a wall. The original point cloud includes many outliers. But after the first step (cf. Section 3.1) only voxel centres near the building remain. The robustness concerning noise is illustrated in Fig. 14 and Fig. 15, because the algorithm only extracts the large plane surfaces: three walls, two roof surfaces and one floor in the interior of the building. Whereas Fig. 15 gives a rough approximation of the boundaries, the lines in Fig. 16 especially draw the window structures in a fine resolution. The isolines in Fig. 17 show again the quality of the plane estimation. While the relief is modelled in an adequate way by the isolines, no large deviation or trend can be recognized on the other facades.

5 Conclusions

An advanced approach for the extraction of plane surface elements was presented. It is based on main normal vectors of voxel barycentres which lead to the required planes by means of a region growing algorithm. First experiences have shown satisfying results and the method has proved to be robust concerning noise and outliers. The advantages of this approach are the high degree of data reduction and the generation of topological relations between the extracted primitives. Furthermore it can be extended to primitives of higher order, e. g., cylindrical or spherical surfaces. One disadvantage may be a certain generalisation effect due to the voxel structure. However, if the deviations of the laser points from the ex-

tracted planes (e. g., as isolines) are included much more details can be modelled.

In the future this method will be applied to additional buildings of different structures as well as to other objects, especially industrial products where its suitability has to be verified. The generation of topology has to be improved for complex or uncompleted object parts where the method obtains fragmentary results. Moreover, the neighbourhood information about the extracted surface primitives has to be extended to the whole object, e. g., in a complete neighbourhood graph, to obtain a higher level of automation.

References

- BERNARDINI, F., MITTLEMAN, J., RUSHMEIER, H., SILVA, C. & TAUBIN, G., 1999: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. – *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **5**: 349–359.
- BIENERT, A., 2006: Glättung von aus Laserscannerpunktewolken extrahierten Profilen. – *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*, Wichmann, Heidelberg, Heidelberg, **2006**: 214–221.
- BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. & TARSHA-KURDI, F., 2007: Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W52): 65–70.
- BUCKSCH, A. & LINDENBERGH, R., 2008: CAMPINO – A skeletonization method for point cloud processing. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **63** (1): 115–127.
- CROSILLA, F., VISINTINI, D. & SEPIC, F., 2007: An automatic classification and robust segmentation

- procedure of spatial objects. – *Statistical Methods and Applications* **15** (3): 329–341.
- FILIN, S. & PFEIFER, N., 2006: Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **60** (2006): 71–80.
- GRÜN, A., 1997: Automation in Building Reconstruction. – *Photogrammetric Week'97*, Wichmann, Heidelberg: 175–186.
- HAALA, N. & BRENNER, C., 1997: Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. – *Proceedings of the EARSeL 3rd Workshop on LIDAR Remote Sensing of Land and Sea*, Tallinn.
- HANSEN, W. VON, 2006: Robust automatic marker-free registration of terrestrial scan data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3): 105–110.
- KERN, F., 2003: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. – *Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig* **19**.
- MAAS, H.-G., 1999a: Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeugscanning. – *Kartographische Nachrichten* **55** (3): 3–11.
- MAAS, H.-G., 1999b: Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **32** (3/2W5): 193–199.
- SCHWALBE, E., MAAS, H.-G. & SEIDEL, F., 2005: 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GRID data and orthogonal point cloud projections. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W19): 209–214.
- TOVARI, D. & PFEIFER, N., 2005: Segmentation based robust interpolation – a new approach to laser data filtering. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W19): 79–84.
- VERBREE, E. & OOSTEROM, P. VAN, 2003: The STIN method: 3D-Surface reconstruction by observation lines and delaunay tens. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (3/W13).
- VISINTINI, D., CROSILLA, F. & SEPIC, F., 2006: Laser scanning survey of the Aquileia Basilica (Italy) and automatic modeling of the volumetric primitives. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (5), on CD.

Addresses of the Authors:

Dipl.-Ing. ANDREAS SCHMITT, Hasenweg 30, D-76779 Scheibhardt, Tel. & Fax: +49-7277-207, e-mail: andreas.schmitt@dlr.de

Dr.-Ing. THOMAS VÖGTLER, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstraße 7, D-76131 Karlsruhe, Tel.: +49-721-608-3675, Fax: +49-721-608-8450, e-mail: thomas.voegtler@ipf.uni-karlsruhe.de

Manuskript eingereicht: Juni 2008

Angenommen: November 2008

3D Filtering of High-Resolution Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Documentation

CLEMENS NOTHEGGER & PETER DORNINGER, Vienna

Keywords: Point Processing, 3D Reconstruction, Visualization, Surface Normals

Summary: Terrestrial Laserscanning has proved to be an important tool for documentation of cultural heritage objects. The latest generation of phase shift scanners features an extremely high scanning speed and improved accuracy, thus making it possible to capture surface detail in the millimetre range. This was previously the exclusive domain of close range triangulation scanners. Triangulation scanners, however, usually have a very limited field of view, thus requiring a large number of scans even for relatively small objects. This can be economically prohibitive. Phase shift scanners, on the other hand, produce huge amounts of data, which commonly used modelling software cannot handle properly. In this paper we present a chain of pre-processing steps which utilizes redundancy to reduce the amount of data without losing detail at edges. We compare the results obtained by applying our method with the results obtained with commercially available software packages. Since our method is computationally intensive, it is designed to be applied in a batch process, rather than interactively. Therefore, we present a method for estimating necessary parameters. Furthermore we show that a global set of parameters is not suitable, since the point density varies significantly within a single scan and suggest a way to set these parameters adaptively.

Zusammenfassung: 3D-Filterung hoch auflösender Terrestrischer Laserscanner-Punktwolken zur Kulturgutdokumentation. Im letzten Jahrzehnt haben sich terrestrische Laserscanner als Werkzeug zur Geometrieerfassung von Kulturgütern etabliert. Die rasante Steigerung von Messrate und Messgenauigkeit bei Phasenvergleichs-Scannern ermöglicht die Erfassung von Details, die bislang ausschließlich mit Nahbereichsscanner erfasst werden konnten. Allerdings ist der Aufnahmebereich dieser Scanner stark limitiert, wodurch selbst für die Erfassung verhältnismäßig kleiner Objekte viele Einzelaufnahmen erforderlich sind. Dies macht den Einsatz derartiger Geräte für große Objekte unwirtschaftlich. Eine Herausforderung bei Phasenvergleichs-Scannern sind die enormen Datenmengen. So können kommerzielle Softwareprodukte derartige Punktmengen oft nicht angemessen bearbeiten. In diesem Beitrag wird eine Prozessierungskette zur Vorverarbeitung hoch auflösender Laserscanner-Daten vorgestellt. Diese ermöglicht durch Ausnutzung der Redundanz die Punktzahl signifikant zu reduzieren und gleichzeitig alle Details – beispielsweise scharfe Kanten – zu erhalten. Wir vergleichen unsere Ergebnisse mit jenen, die mittels kommerzieller Softwareprodukte generiert wurden. Da die vorgestellte Methode rechenintensiv ist, ist sie nicht zur interaktiven Bearbeitung geeignet. Daher wird ein automatischer Ansatz zur Schätzung der notwendigen Parameter vorgestellt, wodurch eine automatische Batch-Prozessierung ermöglicht wird. Außerdem wird gezeigt, dass eine adaptive Anpassung der notwendigen Parameter – wie dies die vorgestellte Methode anwendet – notwendig ist, da die Punktdichte innerhalb eines Scans stark variieren kann.

1 Introduction

For the management of cultural heritage sites it is essential that their assets and all provisions aimed at their preservation are documented. Detailed three dimensional geometrical models are becoming more important, supplementing the traditional photogrammetric and tachymetric records. Terrestrial laser scanners have recently been successfully used to capture the data needed for the construction of such models.

There are three different types of terrestrial laser scanners: instruments utilizing the time-of-flight (TOF) measurement principle for ranges up to one kilometre, instruments utilizing the phase shift measurement principle for ranges of a few dozens of meters and instruments using triangulation for ranges of a few meters or less. Currently available TOF scanners are either slow or have a limited accuracy with their high range being of relatively little importance for the task of cultural heritage documentation at mm-resolution. Triangulation scanners on the other hand have a very small field of view, requiring a large number of individual scans and labour-intensive post processing, which can be economically prohibitive.

The latest generation of phase shift scanners features an extremely high scanning speed and improved accuracy, thus making it possible to capture surface detail with a resolution of up to one millimetre. This was previously the exclusive domain of close range triangulation scanners. Further advantages of phase shift scanners are the much larger field of view and greater potential for automated post-processing which is economically advantageous, thus making them a viable choice if sub-millimetre accuracy is not required.

The use of phase shift scanners is not without challenges, however. With measurement rates of up to 500 kHz, a high resolution point cloud contains a huge number of points (up to 600 mio.), which commercial of the shelf (COTS) modelling software cannot handle directly. It is therefore necessary to apply thinning to reduce the quantity of data. While being fairly homogeneous locally, the point density at different parts of the scan can vary significantly, depending mainly on the polar

range and angle of incidence. This makes it necessary to set parameters adaptively if optimal results are to be achieved in the processing of the point cloud. This, however, is usually not possible with COTS software. If this pre-processing is not done carefully loss of detail or even larger scale model deformation can occur, which can be hard to detect at later stages of the processing.

In this paper we propose a chain of pre-processing steps for thinning and smoothing, i. e., 3D filtering, of point clouds acquired with phase shift terrestrial laser scanners. The pre-processing steps include surface normal estimation, surface roughness classification, outlier detection and removal, thinning, and smoothing. Our goal is to avoid loss of detail, especially around edges, while also avoiding model deformations, to achieve millimetre resolution and accuracy of the geometric models.

Since this pre-processing is time-consuming it is designed to be applied in a batch process, rather than interactively. This means that all parameters of the computation must be known in advance. We show how the parameters needed in the computation can be estimated. We also show how to set these parameters adaptively.

To evaluate whether we achieved our goals, we compare the models generated after applying the pre-processing to the original point cloud to see whether there are any major differences. We also compare our results with the results obtained by using COTS software.

2 Related Work

A typical workflow from data (point cloud) acquisition to the final, geometrical surface model, e. g., triangulation (AMENTA et al. 2001), or manual construction of primitives (BÖHM et al. 2007) comprises the following steps:

- *Data acquisition*: Measurement of the point cloud
- *Calibration*: Elimination of systematic effects
- *Thinning*: Reducing the amount of data
- *Smoothing*: minimization of measurement noise

- *Registration*: Transformation of the individual point clouds (scans) into a project coordinate system (in photogrammetric context often referred to as orientation)
- *Merging*: Combining multiple point clouds into one cloud, possibly including thinning
- *Surface modelling*: Triangulation, freeform surface estimation, or primitive fitting

Note that the order of the steps can vary, especially the registration and surface modelling is sometimes applied before the thinning and smoothing steps.

Within the introduction, we gave a coarse overview on laser scanning techniques for point cloud acquisition. A survey of some TLS instruments can be found in (KERSTEN et al. 2008).

Calibration, i. e., the correction of systematic errors, is extremely important to achieve good accuracy. Ideally this is done by the instrument manufacturer and applied transparently during data acquisition. However, sometimes there are systematic errors which are not handled properly by the built in calibration (NOTHEGGER & DORNINGER 2007). In this case additional calibration functions need to be determined and applied (DORNINGER et al. 2008, GIELSDORF et al. 2004, LICHTI 2007).

While calibration tries to eliminate systematic errors, smoothing is used to reduce the effect of random measurement errors by using averaging. Smoothing can be applied either to the point cloud (LEVIN 2003), or to a mesh. Mesh smoothing is well studied. For a recent comparison of common methods see for example (BELYAEV & OHTAKE 2003).

Thinning is used to reduce the amount of data to process or store. Just like smoothing it can either be applied to the point cloud or to a polygonal mesh. Mesh simplification or reduction is well studied and has also been studied in the context of cultural heritage documentation (LINDSTAEDT et al. 2008). Thinning of point clouds ranges from simple resampling to sophisticated point cloud simplification methods (PAULY et al. 2002, MOENNING & DODGSON 2003, SONG & FENG 2007). The advantage of using the mesh based methods for thinning and smoothing is that they can take advantage of topological relations given by the mesh. This is also their drawback since it is not easy

to generate a sufficiently good mesh from the raw point cloud.

The registration of point clouds can be realized by means of tie points (signalized points or points that can be identified within a scene), relatively (i. e., minimizing the distances of the points belonging to the individual point clouds), or as a combination of both. For registration based on tie points, the achievable accuracy increases with the number and geometric distribution of given tie points. In many cases, extensive use of signalized points is not feasible (too few natural points and the placement of signalized points on the object is prohibited), possibly leading to insufficient results. For relative registration, the iterative closest point (ICP) algorithm (RUSINKIEWICZ & LEVOY 2001) is commonly used. For that, overlapping scenes and an approximation of the solution are required. A method, combining tie point observations and relative registration is described by (AKCA & GRUEN 2007).

The triangulation of point clouds has been actively studied in computer graphics. Numerous algorithms exist that can be used to reconstruct surfaces from noise-free point samples (HOPPE et al. 1992, AMENTA & BERN 1999, or DEY & GOSWAMI 2003). Some of these algorithms have been extended such that they also work with noisy data (DEY & GOSWAMI 2006, KOLLURI et al. 2004, KAZHDAN et al. 2006). They work best when the noise level is low, which makes it necessary to reduce measurement noise in situations where noise levels are high. Another problem with the latter two algorithms is that they optimize globally, which makes them unsuitable for large datasets. Currently efforts are being made to derive localized algorithms (SCHALL et al. 2007).

3 Pre-processing

The goal of our proposed pre-processing chain is to reduce point density and measurement noise considerably while preserving richness in detail as best as possible. The first step in the chain is the analysis of the surface and a classification according to the local curvature. The second step consists of a computation of robust surface normal vectors with outlier detection and elimination. The third step is a

thinning step, which is followed by a forth and final smoothing step.

All steps require the local neighbourhood of a point p . As the local neighbourhood of a point p we use the k points which are closest to p . These k points can be found efficiently by using the *kd-tree* data structure (BERG et al. 2000). The choice of k is crucial, however, if consistent results are to be achieved. (MITRA et al. 2004) therefore suggest using all points within a certain radius instead. This radius depends on local point density and curvature. For locally homogeneous point distribution, however, this is comparable to choosing an individual k for each point. The choice of k is described in more detail in Sections 3.4 and 3.5.

3.1 Surface Analysis

The surface analysis we perform is based on the covariance analysis of the local neighbourhood. (PAULY et al. 2002) have shown that the surface variation – which can be computed from the eigenvalues of the covariance matrix – can be used instead of the local surface curvature for estimating surface roughness. In some cases it is even advantageous to use surface variation instead of curvature estimation based on function fitting. The surface is then classified into smooth, rough and intermediate areas by using the maximum surface variation in the neighbourhood and applying some thresholds. Note that these thresholds heavily depend on the choice of k .

3.2 Normal Vector Estimation

Normal vectors can be estimated quite easily from the covariance analysis of the local neighbourhood (DEY et al. 2005). The problem with this approach is that it only works for continuous and smooth surfaces, i. e., surfaces not containing any sharp features. This problem can be circumvented by first segmenting the point cloud into piecewise smooth patches. (FLEISHMAN et al. 2005) proposed a method based on region growing in conjunction with robust estimation to reconstruct these piecewise smooth surfaces.

We propose a different approach, which is also based on robust estimation, but it avoids the need to explicitly segment the point cloud. We use the Fast Minimum Covariance Determinant (FMCD) estimator (ROUSSEEUW & van DRIESSEN 1999) for the highly robust estimation of surface normal vectors. The FMCD estimator robustly determines a covariance matrix C from the local neighbourhood k . It works by starting with a minimal subset of known good, i. e., belonging to the same smooth surface patch, points needed to compute a non-singular covariance matrix C_0 . This set is then enlarged to contain at least $k/2+2$ points by including those points which have the highest probability of being good points as well and afterwards, a new covariance matrix C_1 is computed. This step is iterated by again selecting the $k/2+2$ points having the highest probability of being good points and computing C_{i+1} until convergence. That last covariance matrix is used to select all points from the original neighbourhood that are also good points, up to a certain error bound. The surface normal vector is then computed from this set of points which probably belongs to the same smooth surface patch by taking the eigenvector corresponding to the least eigenvector of the covariance matrix C_{good} .

As described above the algorithm needs at least four known good points to start with. The original algorithm uses random sampling to get as many starting sets as are needed to have at least one set of only good points, up to a certain probability, and iterating the most promising sets. Depending on the neighbourhood size this would require up to several hundred start sets. This is not really much, but since the iteration is computationally expensive and hundreds of millions of points need to be processed this would result in quite unacceptable computation times.

Thus we replaced the random sampling with a heuristic which utilizes the fact that the points are in fact point samples of a surface. If the surface was classified as being smooth, only as single start set is used consisting of the points having the least distance to an adjusting plane. This is sufficient since in this case we do not expect any points belonging to different surface patches. If the surface was classified

as being rough – thus possibly containing sharp edges – we subdivide the points into octants arranged around the centroid and use one starting set from each octant by choosing the points closest to an adjusting plane for that octant.

Robust estimation can be used to detect outliers, i. e., data not originating from the same underlying process as the majority of the other data, more reliably; since it is not affected by leverage points (ROUSSEEUW & LEROY 1987). Outliers in TLS may be caused, for example, by specular reflections, or if the laser beam hits multiple surfaces. For outlier determination we use the result from the normal vector estimation. A point is classified as an outlier and deleted, if it is not contained in the final set of points which contains all points that are likely to be part of the same surface.

3.3 Thinning and Smoothing

In the thinning step (cf. Fig. 1), the estimated normal vectors are used to determine points having the highest probability of being closest to the real surface. We start by selecting a random point. From this point we take all points within a cylinder defined by a radius r around that point and having normal vectors differing by no more than a certain angle. The cylinder axis is defined by the normal vector. For optimal results r should be chosen such that the

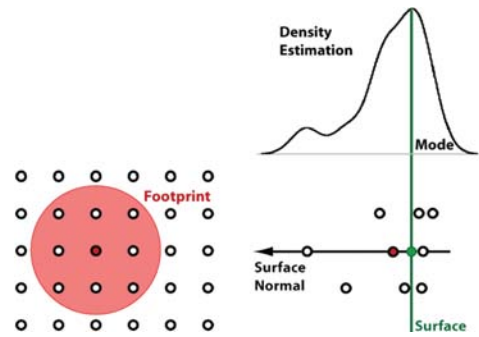


Fig. 1: Illustration of the thinning step. Left: point distribution and footprint extension. Right: distribution of the points within the footprint in a profile view, local surface normal and finally estimated surface at the mode of the locally estimated density.

points within this radius can be considered to be redundant measurements of more or less the same area. This can be assumed if the point spacing is smaller than the laser footprint. The points within the cylinder are projected onto the cylinder axis. Along the cylinder's axis a univariate density is estimated and the point being closest to the mode of this distribution is chosen as the representative point. The other points are removed from the dataset. The mode of the distribution is found by applying the mean-shift algorithm (CHENG 1995).

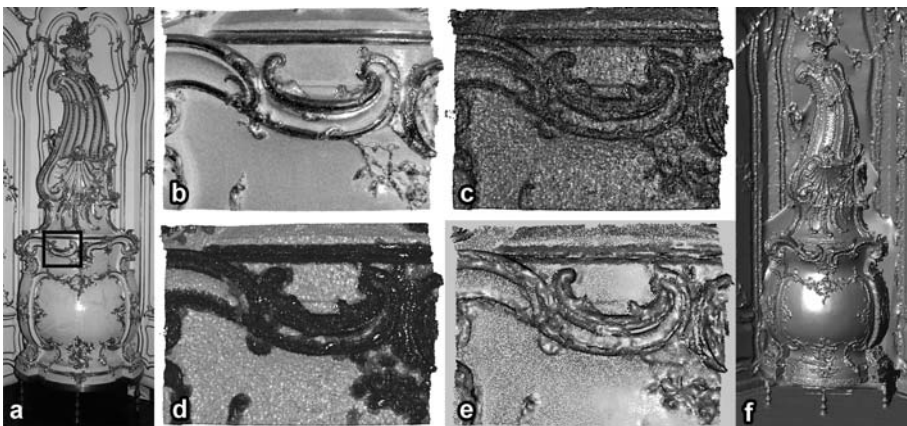


Fig. 2: Photo of a Rocaille stove showing the test area (black rectangle) covering about 45 by 35 cm (a: whole object, b: test area). c shows the original point cloud, d the classification result and e the filtered point cloud. A triangulation of the whole object is shown in f.

This is repeated until the desired point density is reached. The result is a resampled point cloud in which random measurement noise is reduced and which has a more homogeneous spacing of points while preserving detail. This is because in areas with higher point densities – either because of being closer to the scanner, because of the incidence angle, or because of overlapping scans – more points are deleted than in areas of low point densities. The radius r can be chosen adaptively depending on the roughness classification (cf. Section 3.1) and thus allowing for curvature based thinning, i. e., more points are retained in rough areas than in smooth areas.

Fig. 2 shows the described processing steps applied to a test dataset. Images of the whole object and the testing area are shown in (a) and (b). A rendering of the original point cloud is shown in (c). The result of the classification step is shown in (d) and the result of the 3D filtering, i. e., smoothing and thinning, in (e). Fig. 2f shows a triangulation of the whole object.

3.4 Parameter Estimation

As explained above, the choice of k is crucial for consistent and reliable results for the entire scan. We want to choose k such that for all flat

surfaces the surface variation is constant, i. e., the ratio of the smallest to the largest eigenvalue of the covariance matrix of the neighbourhood must be constant:

$$\lambda_3 / \lambda_1 = \text{const} \quad (\text{with } \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3) \quad (1)$$

Note that for larger k , λ_3 converges to the random measurement error σ^2 . σ^2 is also assumed to be constant, meaning that λ_1 must also be constant. λ_1 depends on the neighbourhood size k , the local point density, and the local curvature. But since we are only considering flat areas, we can disregard the curvature. In other words k is proportional to λ_1 up to a factor depending on the local density.

For a given start point, we can compute the ratio λ_3 / λ_1 for increasing k . At a certain point this ratio will drop below a threshold τ . k is then chosen as the point where the ratio falls below the threshold τ . The value of τ can be chosen empirically. It depends on the error bounds for the normal vectors.

3.5 Parameter Adaptation

As described above, the optimal k depends on the relation between measurement noise and point density. For TLS the measurement noise is fairly constant, increasing just slightly with

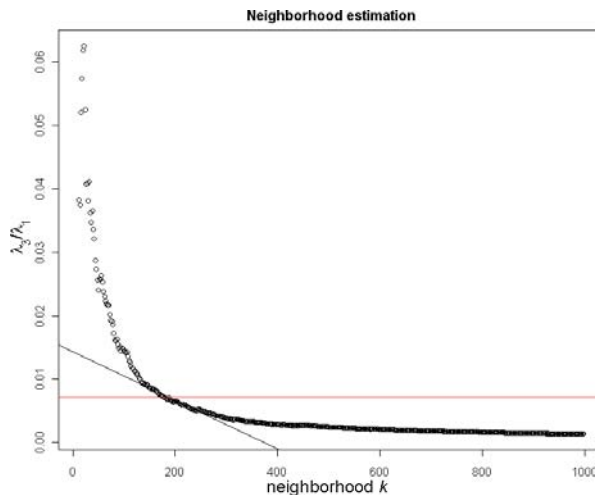


Fig. 3: Neighborhood estimation based on λ_3/λ_1 for increasing k . Threshold τ (red line) and the tangent fitted to the curve for the intersection point determination (black line) are shown.

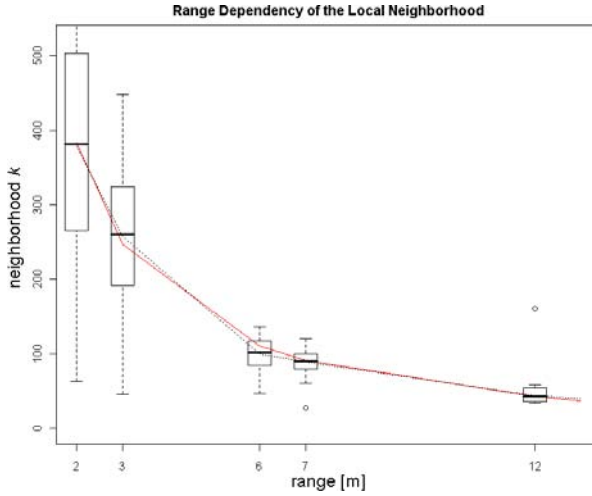


Fig. 4: Range dependency of local neighbourhood. Shown are neighbourhood estimates (black dotted line), fitted function (red line), and boxplots of the samples for each interval.

increasing range. The point density, however, decreases rapidly, proportional to the square of the range. Another influence is the angle of incidence. As the angle of incidence increases, the point density decreases. Some scanners do not correct the convergence of scan lines at the zenith and nadir, thus they exhibit an increased point density towards these points.

We propose the following empirical formula to compute k :

$$k = a \cdot \cos(\alpha) / (r \cdot \sin(\theta)) + b \quad (2)$$

where α is the angle of incidence, r is the range, θ is the zenith angle and a and b are coefficients. The term $\sin(\theta)$ must only be used if the scanner does not compensate the convergence of scan lines. Fig. 4 shows the estimations for k at different ranges and the fitted function. The estimation was performed as described above using 250 random samples for which $\cos(\alpha)$ and $\sin(\theta)$ were approximately 1.0. The samples were divided into 1 m range intervals and the median in each interval was taken as the estimate for that range. The large variation in the estimation for short ranges is to be expected because for these ranges the aggregation interval is fairly large.

4 Application and Discussion

All point clouds presented in this paper were acquired in *Schönbrunn Palace*, Vienna, Austria using *Faro* scanners (www.faro.com). The detail of a pillar was acquired using a *Faro Photon* and the point cloud representing the historic stove (see also Section 3.3) was acquired using a *Faro LS 880HE*. Both scanners apply the phase shift measurement principle. They emit a laser beam with a wavelength of 785 nm, their maximum sampling rate is 120000 Hz, and the distance measurement range is between 1 and 70 m. The beam divergences and diameters are slightly different (0.16 mrad and 3.3 mm at exit for the *Photon* resp. 0.25 mrad and 3 mm for the *880HE*). The achievable precision of the *Photon* (rms@25 m: 2.2 mm) is better than that of the *880HE* (rms@10 m: 3 mm).

We processed the data on a dual Xeon X5355 workstation (2.66 GHz, 8 cores). On this machine our algorithm processes 0.5 million points per minute on average. The estimation of the parameters takes about an hour, however, this has to be done only once for each type of application.

To evaluate the quality of a triangulated model, we compare the model to the original point cloud using difference models. All triangulations were determined by *Geomagic Stu-*

dio 10 (www.geomagic.com). For a best fitting model we expect randomly distributed differences with a magnitude equal to that of the measurement noise level, no systematic deformations, but possibly large differences at erroneously measured points.

The first test dataset is an 80 by 40 cm part of a pillar of an arcade of *Schönbrunn Palace*. The point cloud consists of 1.2 million points acquired from four scan positions at a scanning distance of 1.5 m. The mean point spacing was 2 mm. This object mainly consists of planar faces which are bounded by sharp edges. We chose this object to test our method's behaviour at these edges. Fig. 5, left, shows the result of a processing with *Geomagic*, whereas the right image shows the result obtained by applying our pre-processing prior to triangulation. The noise level of the scanner is approximately 2 mm, thus we would expect that a mesh which faithfully models the original point cloud show only green, yellow or cyan colours in the difference model, whereas orange, red or blue indicate significant deviations. It can clearly be seen that we mostly achieve our goal, whereas the model derived with *Geomagic* only shows deviations of approximately 3 mm around the sharp edges.

The second test dataset is a 45 by 35 cm part of a historic stove (cf. Fig. 2b). The point cloud

consists of 348921 points with a mean point spacing of 0.7 mm at the scanning distance of 5 m. This dataset contains surfaces of varying curvatures, some sharp edges but no flat surfaces. First, we determined triangulation models using the instrument vendor's software *FaroScene*, and *Geomagic*. We tested numerous, different workflows to determine triangulation models using these two software packages. Apparently the best results were achieved, combining functionality of both products. Model 1, shown in Fig. 6a, was generated by applying only a little smoothing in *FaroScene* and successive triangulation with noise reduction in *Geomagic*. It represents the surface detail almost properly (cf. Figure 6b: low differences at sharp structures and almost no global deformations), but the influence of the noise was not suppressed sufficiently. Hence, we increased the smoothing in *FaroScene* to generate model 2 (cf. Fig. 6c). Apparently, the noise was eliminated, but systematic differences occur at detailed structures (red and blue coloured regions) and additionally, sharp edges are smoothed (cf. Fig. 6d). Model 3 was determined from a point cloud after applying our pre-processing method resulting in a filtered point cloud of 75000 points.

Due to the slightly higher noise level (approx. 3 mm) of the *880HE* scanner used for

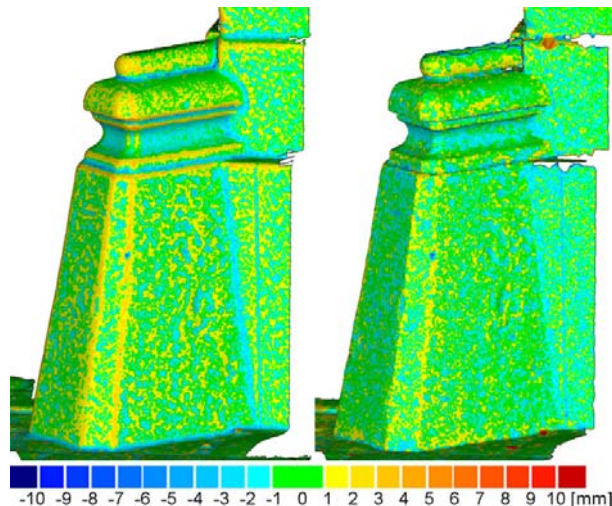


Fig. 5: Detail of a pillar. Left: Model generated using *Geomagic* only. Right: Model generated by combining our method with a triangulation by *Geomagic*. The color coding represents the differences of the models to the original point cloud and ranges from -10 (blue) to +10 mm (red) with 1 mm intervals. Differences of ± 1 mm are shown in green.

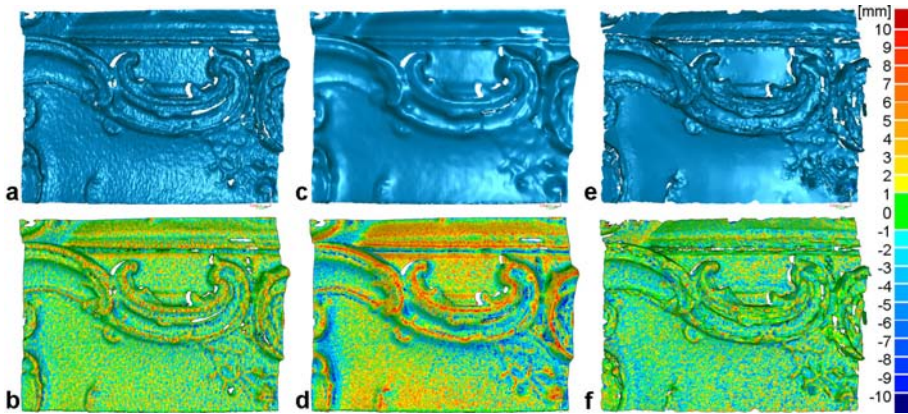


Fig. 6: Rendered triangulations of model 1 (a), 2 (c), and 3 (e). Differences of these models to the original point cloud are shown below ((b), (d), and (f)). Color coding as in Fig. 5.

data acquisition, also orange and light blue colours are acceptable. Here also we succeeded in achieving our goals as our model features the advantages of the other two models: The noise is suppressed sufficiently within the whole testing area (cf. Fig. 6e) and the mean systematic differences at detailed surface structures, i. e., stuccoes, are within the range of the noise (cf. Fig. 6f), hence preserving richness in detail. Moreover, no global deformations – as occurring in model 2 – are introduced by this approach and sharp structures (edges) are well preserved (cf. Fig. 6e, upper, left region).

These findings are further illustrated by Tab. 1. The first column lists the number of points from which the model was created. In our pre-processing we reduced the number of points to about 22%. For the construction of the models 1 and 2 only smoothing and outlier elimination was used such that no loss of de-

tail resulting from resampling was incurred. Nonetheless it can be seen that Model 3 has the lowest average deviation from the original point cloud, despite the other models being derived from more points. The deviations of Model 2 are almost 50% higher than those of Model 3. To assess the smoothness of the models we computed the angles between neighbouring triangles. We then computed the average of the 25% and 10% smallest angles respectively. Model 1 clearly has the roughest surface of all models. Considering the 10% smallest angles the Models 2 and 3 are equal, however, considering the 25% smallest angles shows that Model 2 is smoother in this respect. This is because the 10% of smallest angles are exclusively in the flat areas while the 25% also contain triangles which are within the feature rich areas. Fig. 6 also shows that in feature rich areas Model 2 is clearly smoother, if not overly smooth.

Tab. 1: Comparison of the models. The table lists the number of points from which the model was derived, the standard deviation of the distance to the original points, the average of the positive and negative distances and the average angle between neighboring triangles considering small angles only.

Model	Points used	Triangles	Standard Deviation	Av. Pos. Distances	Av. Neg. Distances	Av. Angle 25%	Av. Angle 10%
1	343010	199999	3.1 mm	2.4 mm	-2.2 mm	4.66°	0.97°
2	346295	199999	4.0 mm	3.1 mm	-2.9 mm	1.05°	0.21°
3	76377	156841	2.7 mm	2.0 mm	-2.1 mm	1.94°	0.22°

5 Conclusions

Phase shift laser scanning is an efficient data acquisition technique that is suitable for many purposes. Compared to triangulation scanners, data acquisition can be performed faster and the effort for registration of individual scans can be reduced significantly. Nevertheless the processing of the point cloud poses a number of challenges that must be overcome if the full potential of the instruments is to be tapped. These challenges are the need to verify the calibration of the instrument, the huge size of the point cloud and the relatively high noise level.

We presented a method for pre-processing point clouds from phase shift laser scanners, which can be applied fully automatically, since it only requires one parameter to be set – the size of the local neighbourhood – and this parameter can be chosen adaptively according to well known criteria. We demonstrated that it does neither introduce smoothing around edges nor any global deformations. The result of this pre-processing is a point cloud which is reduced in size and has a more homogeneous point density.

The point cloud simplification methods cited in Section 2 are much more aggressive in their reduction of the size of the point cloud. They are, however, aiming at deriving a final point set for storage and display, where efficient use of storage space is important. We consider the thinned point cloud only as the input for later processing steps, i. e., triangulation, where a homogeneous, dense sampling of the surface is required.

Our algorithm works by fitting planes to the surface. This works well in most circumstances, but for surfaces with high curvature it leads to some deformation. It remains to be examined if this algorithm can be extended to robustly fit second order surfaces if a smooth, but highly curved surface is detected. Another issue that should be investigated is whether the initial surface analysis can be made more reliable by using a hierarchical approach.

To determine 3D models by triangulating the pre-processed points, we used the commercial software package *Geomagic*. Unfortunately, the triangulation algorithm suffers from certain deficiencies. For example, the re-

sulting model is (in general) not watertight requiring interactive post processing, very large datasets cannot be processed properly, control parameters are used globally, etc. Hence, advances in triangulation methods will improve the automation and the achievable quality of 3D models determined from terrestrial laser scanner data.

Concluding, it can be stated that the presented method allows pre-processing of points acquired by phase shift scanners for subsequent model generation at millimetre scale. This increases the economical attractiveness for the application of laser scanner technology, especially in the field of cultural heritage documentation.

Acknowledgements

We would like to thank the private management of *Schönbrunn Palace* and *Steinmetzbetriebe Bamberger* as members of the *Christian Doppler-Laboratory* for supporting our investigations.

References

- AKCA, D. & GRUEN, A., 2007: Generalized least squares multiple 3D surface matching. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W52): 1–7.
- AMENTA, N. & BERN, M., 1999: Surface reconstruction by voronoi filtering. – Discrete and Computational Geometry **22** (4): 481–504.
- AMENTA, N., CHOI, S. & KOLLURI, R.K., 2001: The power crust, unions of balls, and the medial axis transform. – Computational Geometry **19** (2–3): 127–153.
- BELYAEV, A. & OHTAKE, Y., 2003: A Comparison of Mesh Smoothing Methods. – Israel-Korea Bi-National Conference on Geometric Modeling and Computer Graphics **2003**: 83–87.
- BERG, M.D., KREFELD, M.V., OVERMARS, M. & SCHWARZKOPF, O., 2000: Computational Geometry Algorithms and Applications. Springer.
- BÖHM, J., HAALA N. & BECKER, S., 2007: Facade modelling for historical architecture. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/C53): 147–152.
- CHENG, Y., 1995: Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering. – IEEE Transactions in Pattern

- Analysis and Machine Intelligence **17** (8): 790–799.
- DEY, T.K. & GOSWAMI, S., 2003: Tight cocone: A water-tight surface reconstructor. – *Journal of Computing and Information Science in Engineering* **3**: 302.
- DEY, T.K., LI, G. & SUN, J., 2005: Normal estimation for point clouds: A comparison study for a Voronoi based method. – *Symposium on Point-Based Graphics 2005*: 39–46.
- DEY, T.K. & GOSWAMI, S., 2006: Provable surface reconstruction from noisy samples. – *Computational Geometry: Theory and Applications* **35** (1–2): 124–141.
- DORNINGER, P., NOTHEGGER, C., PFEIFER, N. & MOLNAR, G., 2008: On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. – *Journal of Applied Geodesy*, to appear.
- FLEISHMAN, S., COHEN-OR, D. & SILVA, C.T., 2005: Robust moving least-squares fitting with sharp features. – *ACM Transactions on Graphics* **24** (3): 544–552.
- GIELSDORF, F., RIETDORF, A. & GRUENDIG, L., 2004: A Concept for the calibration of terrestrial laser scanners. – *FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22–27*, on CD-ROM.
- HOPPE, H., DE ROSE, T., DUCHAMP, T., McDONALD, J. & STUETZLE, W., 1992: Surface reconstruction from unorganized points. – 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques: 71–78.
- KAZHDAN, M., BOLITHO, M. & HOPPE, H., 2006: Poisson surface reconstruction. – *Fourth eurographics symposium on geometry processing 2004*: 61–70.
- KERSTEN, TH., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M., STERNBERG, H., 2008: Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. – *FIG Working Week 2008, Integrating Generations, Stockholm, Sweden, June 14–19*.
- KOLLURI, R., SHEWCHUK, J.R. & O'BRIEN, J.F., 2004: Spectral surface reconstruction from noisy point clouds. – *2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing* **71**: 11–21.
- LEVIN, D., 2003: Mesh-independent surface interpolation. – *Geometric Modeling for Scientific Visualization*, Springer: 37–49.
- LICHTI, D.D., 2007: Error modeling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (5): 307–324.
- LINDSTAEDT, M., KERSTEN, TH., MECHELKE, K., GÖTTING, M. & HEIDEN, R., 2008: Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie. – *Publikationen der DGPF* **17**: 59–68.
- MITRA, N.J., NGUYEN, A. & GUIBAS, L., 2004: Estimating surface normals in noisy point cloud data. – *International Journal of Computational Geometry and Applications* **14** (4/5): 261–276.
- MOENNING, C. & DODGSON, N.A., 2003: A new point cloud simplification algorithm. – 3rd IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, Benalmadena, Spain: 1027–1033.
- NOTHEGGER, C. & DORNINGER, P., 2007: Automated Modeling of Surface Detail from Point Clouds of Historical Objects. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (5/C53): 538–543.
- PAULY, M., GROSS, M. & KOBELT, L.P., 2002: Efficient simplification of point-sampled surfaces. – *Conference on Visualization, IEEE Computer Society*: 163–170.
- ROUSSEEUW, P.J. & VAN DRIESSEN, K., 1999: A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator. – *Technometrics* **41** (3): 212–223.
- ROUSSEEUW, P.J. & LEROY, A.M., 2003: Robust Regression and Outlier Detection. – *Wiley Series in Probability and Statistics*.
- RUSINKIEWICZ, S. & LEVOY, M., 2001: Efficient variants of the ICP algorithm. – 3rd International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, Quebec, Canada: 145–152.
- SCHALL, O., BELYAEV, A. & SEIDEL, H.-P., 2007: Error-guided adaptive fourier-based surface reconstruction. – *Computer-Aided Design* **39** (5): 421–426.
- SONG, H. & FENG, H., 2007: Point-cloud simplification with bounded geometric deviations. – *International Journal of Computer Applications in Technology* **30** (4): 236–244.

Address of the Authors:

CLEMENS NOTHEGGER & PETER DORNINGER, Technische Universität Wien, Christian Doppler Laboratory for “Spatial Data from Laserscanning and Remote Sensing”, A-1040 Vienna, Tel.: +43-1-58801-12233, Fax: +43-1-58801-12299, e-mail: {cn, pdo}@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: Juni 2008
Angenommen: November 2008

Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen

FRANK BOOCHS, FREDIE KERN, RAINER SCHÜTZE & ANDREAS MARBS, Mainz

Keywords: Terrestrisches Laserscanning, Segmentierung, Semantische Modellierung, Ontologie, Rekonstruktion

Summary: *Approaches for geometrical and semantic modelling of huge unstructured 3D point clouds.* There is an increasing interest to work with terrestrial laser scanner (TLS) for applications in fields like civil engineering, architecture and archaeology surveys. Capturing millions of points from any surface is simply done within a couple of minutes, whereas a subsequent modelling of such unstructured cloud of points is a demanding task needing powerful software tools, allowing a fast processing and easy handling in order to provide an efficient work flow. This survey presents different concepts and approaches for semi and fully automatic algorithms for segmentation and modelling of 3D data. The tasks to be executed, i. e. reconstruction of spheres or extraction of building elements, are simplified in an adopted manner, allowing achieving an automatic processing under practical conditions. The algorithms described in this paper work either on a geometrical base or in combination with knowledge introduced by ontology. Some algorithms are working more data-driven other ones more model-driven. The examples show the extraction of spheres for geo-referencing, the analysis of vertical cross sections from track facilities and the modelling of building elements. The solutions shown can be transferred to other similar applications with slight modification of some input parameters.

Zusammenfassung: Der zunehmende Einsatz des terrestrischen 3D-Laserscannings (TLS) für die Bereiche Bauwesen, Architektur und Archäologie liefert immer umfangreichere TLS-Punktmengen in immer kürzerer Messzeit vor Ort. Auf der Auswerteseite erfordern diese per se unstrukturierten Datenmengen in zunehmendem Maße Softwaremodule, die ebenso eine zügige und bequeme, somit auch effiziente, Verarbeitung erlauben. In diesem Artikel werden verschiedene Konzepte und Ansätze zur Konstruktion von halb- und vollautomatisierten Auswertelgorithmen für 3D-Punktmengen vorgestellt. Dabei werden die zu bewältigenden Aufgabenstellungen, wie z. B. Kugel- und Gebäuderekonstruktion, auf spezielle exakt formulierte Detailprobleme begrenzt, sodass das Ziel eines automatisierten Auswertungsprozesses auch in der Praxis erreicht wird. Die Algorithmen arbeiten entweder auf rein geometrischer Basis oder unter Zuhilfenahme von Vorwissen in Form einer Ontologie. Die Verarbeitungsprozesse sind sowohl daten- als auch modellgetrieben. Die Anwendungsbeispiele beschäftigen sich u. a. mit der Passkugelextraktion, der Querprofilableitung bei Schienenverkehrsanlagen und der Modellierung von Gebäudeinnerräumen. Teilweise lassen sich die dargestellten Lösungen durch einfache Variation der Eingangsparameter auf vergleichbare Anwendungsbereiche übertragen.

1 Einleitung

Der zunehmende Einsatz von 3D-Laserscanning für die Bereiche Bauwesen, Architektur und Archäologie erfordert entsprechende Software zur zügigen und bequemen Verarbeitung der umfangreichen Scan-Punktmengen. Die Auswertung von Laserscans ist dabei

um ein Vielfaches komplexer und zeitintensiver als das Scanning selbst, weil etablierte Software überwiegend interaktiv ausgelegt ist und bestenfalls bestimmte mathematische Methoden zum Auffinden und Modellieren einfacher Regelgeometrien benutzt. Die wenigen Werkzeuge zur automatisierten Segmentierung und Modellierung beschränken sich auf eine Zerlegung der Punktwolken anhand

von Koordinatenintervallen, z. B. durch sogenannte Schnitte, oder Wertebereiche der erfassten Remission je Messpunkt sowie andere einfache Abfragen an die Datenbasis, wie z. B. das Setzen einer maximalen Messentfernung.

Einen krümmungsbasierten Ansatz zur Segmentierung von Ebenen und Flächen 2. Ordnung (Quadriken) wurde von (BECKER 2005) vorgestellt. Zur Partionierung der Punktwolke wählt er das Verfahren der sequentiellen Aggregation im Ortsraum. Homogene Bereiche innerhalb einer lokalen Umgebung, die durch die Topologie einer 3D-Delaunay-Triangulation realisiert wird, werden dabei durch differentialgeometrische Krümmungsmaße festgelegt. Die resultierenden Segmente werden anschließend durch idealgeometrische Flächenfunktionen robust approximiert. Danach werden sukzessiv benachbarte Segmente zu gemeinsamen Bereichen zusammengefasst. Das Verfahren wurde für Rohrleitungssysteme im Anlagenbau realisiert.

Einen etwas anderen Weg gehen (PU & VOSSELMAN 2006, 2007). Für die automatische Extraktion von Gebäudemerkmalen aus TLS-Daten erfolgt in den Punktwolken zunächst eine Segmentierung mittels herkömmlichen Region-Grow-Algorithmen. Anschließend erfolgt jedoch im Gegensatz zu den bisher diskutierten Verfahren eine automatische Erkennung von Objektteilen basierend auf menschlichem Wissen über Gebäudemerkmale. Zu diesem Zweck werden vorher sogenannte „Feature constraints“ (Merkmalsbedingungen) definiert. Dazu gehören Bedingungen über die Größe, die Position, die Richtung oder die Topologie von Objekten. So sind beispielsweise Wände üblicherweise vertikal, Fenster und Türen haben eine bestimmte Größe und befinden sich innerhalb der Wände, Dächer schneiden sich mit Wänden aber nicht mit dem Boden, und so weiter. Alle Bedingungen wurden in einer einfachen Programmiersprache implementiert und anschließend auf die segmentierte Punktwolke angewandt.

Eine noch konsequentere Einbindung von objektbezogenem Vorwissen schlagen (CRUZ & BOOCHS 2007) vor. Ihr Ansatz zielt auf die Einbindung eines semantischen Modelles des kompletten Objektes ab, aus dem das geometrische und topologische Zusammenspiel aller

zu erkennenden Objektteile hervorgeht und mit dem eine maximale Steuerung des Auswerteprozesses erreicht wird.

2 Teilaspekte der Auswertung und Modellierung

Ein vollständiger Auswerteprozess von TLS-Daten beinhaltet u. a. das Filtern zur Verminde rung des Messrauschens, das Löschen unnötiger, unerwünschter oder ausreißer behafteter Bereiche und die sukzessive Auswahl von homogenen Bereichen (Cluster), aus denen eine Oberflächengeometrie modelliert wird, sowie das Ableiten eines konsistenten Gesamtmodells und dessen Export in ein Standard-Austauschformat. An ein operables Auswertesystem werden daher unter anderem folgende Anforderungen gestellt (KERN 2003):

- große Datenmengen (Punktwolken) müssen verarbeitet werden können,
- wesentliche, die Objektgeometrie eindeutig beschreibende Informationen, sind von unnützen zu trennen,
- nach der Auswertung sollte ein vektorielles Geometriemodell vorliegen (2D oder 3D).

Der Auswerteprozess kann somit in folgende Teilaspekte zerlegt werden, die sich in jeder der oben zitierten Arbeiten, sowie generell bei der Verarbeitung von unstrukturierten Messdaten, mehr oder minder fein ausdifferenziert wieder erkennen lassen. Zum einen sind Aufgaben der **Segmentierung** zu lösen. Unter Segmentierung verstehen die Autoren die Bestimmung von benachbarten und zusammenhängenden Punktwolkenbereichen anhand von festen Merkmalen und eines Ähnlichkeitsmaßes. Andererseits liegen **Modellierungsaufgaben** vor. Allgemein kann unter Modellierung die Überführung des Segmentierungsergebnisses in eine andere Darstellungsform (Modell) höherer Abstraktionsstufe verstanden werden. Unterschiede bestehen zwischen der **geometrischen Modellierung**, die einen Modellübergang auf rein geometrischer Basis vollzieht, und der **semantischen Modellierung**, die einen Übergang von einem geometrischen oder semantischen zu einem anderen semantischen Modell leistet.

Die gewählte Annäherungsrichtung kann bei jedem Prozessschritt dabei zwischen **daten-** (bottom-up) oder **modellgetrieben** (top-down) gewählt werden, aber auch einer gemischten Strategie folgen (hypothesis-and-test). Algorithmen zur Segmentierung und Modellierung können zudem für die direkte Bearbeitung im kartesischen 3D-Raum entworfen werden oder in einem abgeleiteten, mitunter synthetischen, Parameterraum geringerer Dimension ausgeführt werden. Beispiele für solche Räume, **Projektionen** genannt, sind Distanzbilder, Zellzerlegungen, Histogramme sowie 2,5D-Dreiecksvermaschungen, Profile et cetera. Je nachdem für welche Projektion man sich entscheidet, lassen sich dann Segmentierungen und Modellierungen mit bekannten Algorithmen anderer Disziplinen, insbesondere der digitalen Bildverarbeitung, anwenden. Welche Vorteile und Möglichkeiten sich daraus für die Analyse großer Punktwolken ergeben, wird im Folgenden an fünf Ansätzen aufgezeigt. Welche Vereinfachungen sich z. B. für die Gebäudemodellierung durch konsequente Nutzung von Vorwissen ergeben, wird abschließend an einem Ansatz zur semantischen Modellierung dargelegt.

3 Segmentierung

3.1 Bildverarbeitungsgestützte Segmentierung von Kugeln

Als Ansatz für eine rein datengetriebene Segmentierung mittels Bildverarbeitung soll das

Problem der automatischen Passkugelfindung in Punktwolken dargestellt werden.

Ausgangspunkt ist eine einzelne Punktwolke (siehe Abb. 1 links), die als Distanzbild aufbereitet wird (siehe Abb. 1 rechts). Hierbei werden die Messentfernungen, die beim terrestrischen Laserscanning üblicherweise einen reellwertigen Wertebereich von 0 bis etwa 200 m annehmen können, auf die 256 Stufen eines Grauwertbildes quantisiert (kürzere Strecken erscheinen dann heller als lange) und einer linearen Streckung mit der n -fachen Standardabweichung zur Kontraststeigerung unterzogen. Im Distanzbild zeigen sich nun Kugeln als lokales Grauwertgebirge, dessen lokales Maximum mit der Blickrichtung des Scanners zum Kugelzentrum übereinstimmt. Zur Kugeldetektion ist also das Distanzbild lediglich auf lokale Maxima zu durchsuchen. Anhand der Bildpyramide des Distanzbildes kann dabei der Suchraum sukzessive eingeschränkt werden. Die Zentren der detektierten lokalen Maxima werden über die Center-of-Gravity-Berechnung abschließend subpixelgenau bestimmt. Nach der Umrechnung der Zentren vom Bildraum in den kartesischen Raum der Punktwolke dienen diese in Zusammenhang mit den vorhandenen Sollradien als Näherungswerte zur Segmentierung der Passkugel-Punktmengen.

Ein Anwendungsbeispiel ist in Abb. 1 zu sehen, die eine Testpunktwolke als Remissionsbild und das Detektionsergebnis zeigt. Die Testpunktwolke enthält u. a. acht Passkugeln mit einem Radius von 38,1 mm; aufgenommen mit einer mittleren Messentfernung von 2,5 m. Das daraus abgeleitete Distanzbild weist vor allem Grauwertsprünge an den Passkugelpo-

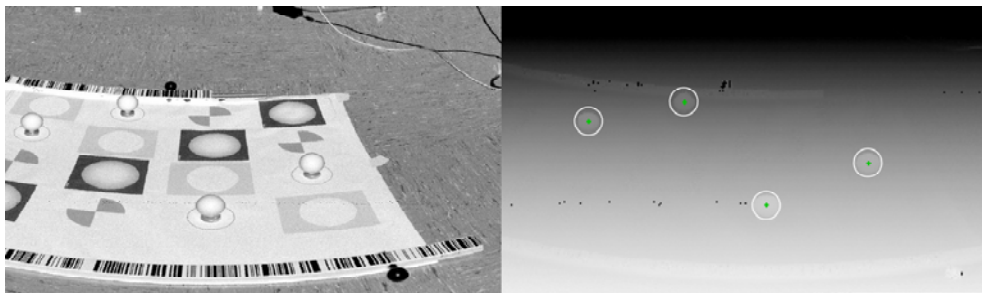


Abb. 1: Links: Remissionsbild einer Testpunktwolke (Ausschnitt). Rechts: Ergebnis der bildverarbeitungsgestützten Segmentierung zur Passkugeldetektion (Kreuze) angewandt auf das Distanzbild der Testpunktwolke (Ausschnitt).

sitionen auf. Die Kugeln heben sich deutlich von der ebenen Grundfläche ab. Für dieses als ideal anzusehende TestszENARIO erweist sich der Algorithmus als überaus nützlich, da er sehr schnell und zuverlässig arbeitet. Er wird fast ausschließlich im Zusammenhang mit TLS-Prüfmessungen im Labor eingesetzt. Sind keine Idealbedingungen vorhanden, so ist der in Abschnitt 4.1 beschriebene Algorithmus diesem hinsichtlich Ergebnisqualität, insb. Robustheit, deutlich überlegen. Dies liegt u. a. auch darin begründet, dass dieser ohne verlustbehaftete 8-Bit-Quantisierung der Streckeninformationen auskommt.

3.2 Geometrische Segmentierung von Konturen und Profilen

Die Verwendung polarer Beschreibungsgeometrien von Punktwolken kann zur stabilen Detektion eingesetzt werden, wie sich am Beispiel der Engstellenvermessung der Bahn AG aufzeigen lässt.

Die Bahn AG setzt zur Erkennung und Vermessung von Engstellen entlang von Gleistrassen einen mit mehreren Laserscannern ausgestatteten Lichttraummesszug ein. Auf Grundlage der Messdaten werden Fahrwegsimulationen durchgeführt, um mögliche Kollisions- und Konfliktsituationen feststellen zu können.

Da bei einer Tagesleistung von 500 km Gleistrasse eine Punktwolke entsteht, die etwa 250 GByte umfasst, ist es erforderlich, die Punktwolke auf die Engstellenbereiche (Querprofile) einzugrenzen (WIRTH 2008). Die Punktwolke einer Gleistrasse wird hierzu interaktiv hinsichtlich möglicher Engstellen untersucht und vorsegmentiert. Der Auswerter bearbeitet Abschnitt für Abschnitt, selektiert visuell mögliche Engstellenbereiche und stößt dann die automatische Engstellenextraktion an.

Als Engstellenkontur wird dabei das Profil quer zur Gleisrichtung betrachtet und als Linienzug aus der Punktwolke heraus modelliert. Dabei sind einerseits ins Gleis hineinragende konkave Gebiete der Kontur zu erhalten und andererseits isolierte Einzelpunkte innerhalb der geschlossenen Kontur als Ausreißer zu eliminieren. Die entwickelte Engstellenextraktion projiziert hierzu die 3D-Punktwolke auf die Ebene quer zur Fahrrichtung (Trajektorie). In dieser Querprofilebene (siehe Abb. 2a) werden die Winkel γ und Entfernungen s der Einzelpunkte zum angegebenen Scannerstandpunkt sp berechnet. Die ermittelten Winkel und Strecken werden sodann aufsteigend nach γ sortiert. Über einen Schwellwert, der den maximalen Punktabstand als Fächerweite ξ

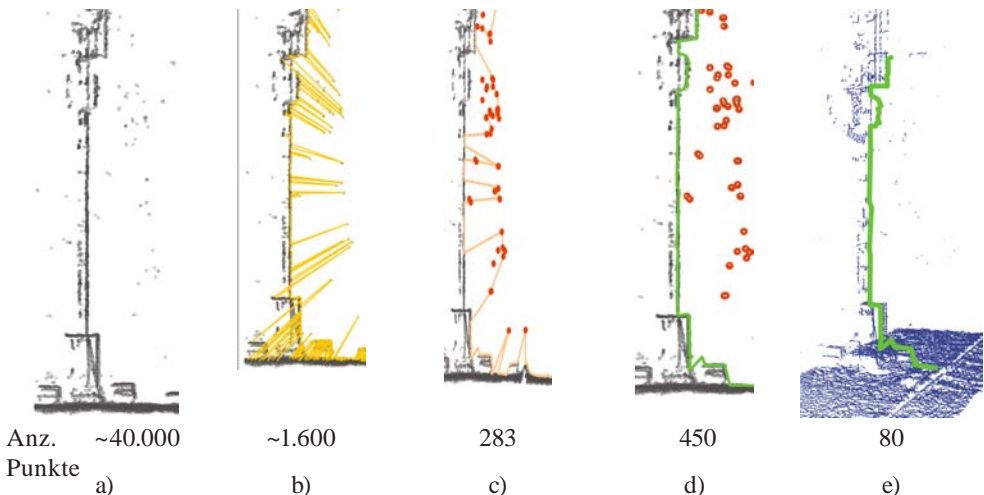


Abb. 2: a) Auf die Querprofilebene projizierte Punktmenge. b) Grobe Kontur bestimmt über die sortierten Winkel γ . c) Verfeinerte Kontur mit detektierten Ausreißern (rote Kreise). d) Kontur ohne Ausreißer. e) Endgültige Engstellenkontur (grün) nach Ausdünnung (Douglas-Peucker-Algorithmus) in 3D-Ansicht.

definiert, werden Winkelbündel zusammengefasst und deren kürzeste Strecke verwendet. Die sortierten Winkel und die zugehörigen Strecken definieren die Nachbarschaftsbeziehung der Punkte und beschreiben die erste grobe Kontur (siehe Abb. 2b).

Diese Kontur wird weiter generalisiert. Für die Generalisierung werden jene Punkte verwendet, bei denen die Entfernung d zwischen Punkt p_i und nachfolgenden Punkten $\{p_{i+1} \dots p_n\}$ minimal wird. Die mit diesem Verfahren eliminierten Punkte werden gesondert betrachtet und diejenigen, welche in den Innenbereich ragen, bleiben in der Kontur erhalten (siehe Abb. 2c).

Mögliche Ausreißer kann der Nutzer halbautomatisch herausfiltern. Um einzuschätzen, ob es sich bei den Punkten um Ausreißer handelt, gleicht der Bearbeiter diesen Bereich mit den Daten des Videomesssystems ab. Durch Definition der Mindestanzahl von Punkten pro Fläche, bei der Punkte noch als Ausreißer angesehen werden, werden diese in der örtlichen Nachbarschaft detektiert und aus der Kontur eliminiert (siehe Abb. 2d). Die Engstellenkontur wird zum Schluss mittels Douglas-Peucker-Algorithmus ausgedünnt (siehe Abb. 2e).

Der hier vorgestellte Algorithmus benötigt kein exaktes geometrisches Modell des Objektes und nutzt das Vorwissen über die primäre (vertikale) Ausrichtung der Engstellenkontur aus. Die Anzahl, die für die Beschreibung der Engstelle erforderlichen Punkte, wird im Vergleich zur originären Punktwolke sehr stark reduziert. Sofern es gelingt, vorhandenes Planwerk (GIS) mit den erfassten TLS-Daten zu verschneiden, könnten Veränderungen in der Örtlichkeit gegenüber dem Planzustand automatisch erkannt werden. Dies würde den bislang erforderlichen Aufwand der manuellen Vorauswahl auf ein Minimum reduzieren.

3.3 Einsatz von Histogrammen bei der Segmentierung

Ein anderer Ansatz der Segmentierung basiert auf der Analyse der Punktdichte einer in Raster unterteilten Punktwolke. Bei richtiger Zusammenfassung der Einzelpunkte müssen

sich dann die gesuchten Objektelemente in mehrfach belegten Rasterzellen abzeichnen. SCHELLER & SCHNEIDER (2006) gliedern hierzu den Objektraum in rasterförmige Punktcluster und stellen über die Nachbarschaftsbeziehungen der Cluster Objektzusammenhänge her.

(BIENERT et al. 2007) und (BIENERT & SCHELLER 2008) nutzen den Ansatz der Clusterbildung als Mittel zur Vorsegmentierung für einen scheibenförmigen Ausschnitt einer Punktwolke, um Bäume zu segmentieren. Hierbei nehmen sie an, dass die Bäume in Richtung einer Koordinatenachse ragen. Die gefundenen Punktcluster werden in die XY -Richtung projiziert und durch eine Kreisgleichung wird überprüft, ob es sich bei dem Segment um einen Baum handelt.

Dieser Segmentierungsansatz kann auch bei der Extraktion von langgestreckten Bauwerken oder Objekten angewandt werden. Beispielhaft seien hier Gebäude, Hauswände oder Gleise genannt. Voraussetzung für eine sichere Extraktion ist das Vorwissen über die Ausrichtung des Objektes bezüglich der Koordinatenachsen und somit die Kenntnis über eine geeignete Rotation des Objektes zur Achsausrichtung. So wäre eine Bedingung, dass die Längenausdehnung von Eisenbahngleisen in der X -Achse liegt. Im Folgenden wird das Beispiel des Gleises weiter behandelt.

Zur Segmentierung wird die Punktwolke auf eine Ebene projiziert, die senkrecht zur Längsachse des Objektes steht. Im Beispiel des Gleises ist das die YZ -Ebene (Querprofilebene). Diese Fläche wird in ein Raster mit gleichgroßen Zellen unterteilt. Die Größe der quadratischen Zelle dx, dy des Rasters wird so gewählt, dass das zu segmentierende Objekt mindestens in zwei Zellen fällt. Der Algorithmus zählt nun die Anzahl der Punkte, die in den Zellen liegen. Dabei entsteht eine 2D-Histogramm-Matrix, deren Koordinatenachsen denen des Rasters entsprechen und die Wertigkeit steht für die Häufigkeit der Punkte pro Zelle. Die Histogramm-Matrix kann durch Normierung mittels des Maximalzählwertes in ein Grauwertbild umgewandelt werden und dann mit Operationen der Bildverarbeitung weiter analysiert werden.

In Abb. 3 ist die Extraktion zweier Gleisköpfe auf der Basis der Histogramm-Segmen-



Abb. 3: a) Punkte eines Querprofils über einem Gleiskörper. b) Summenbild über mehrere (hier 77) Querprofile mit 2,5 cm Raster. c) Überlagerung des Querprofils mit seinem Summenbild. d) Summenbild als Histogramm; Gleisköpfe sind mit einem Kreis markiert.

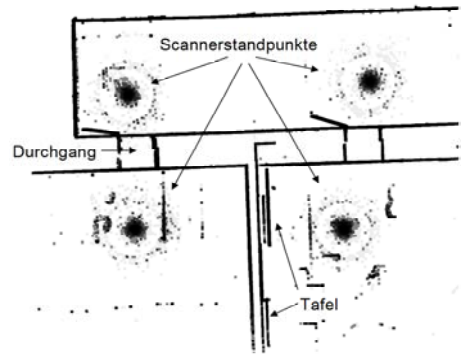
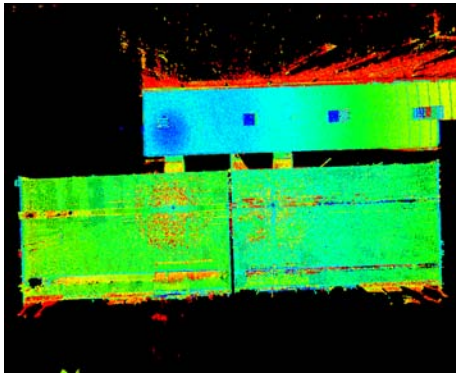


Abb. 4: Links: Georeferenzierte Punktwolke einer Innenraumsituation. Rechts: Wandsegmentierung im Histogrammbild.

tiertung dargestellt. Erst durch die Histogramm-Segmentierung mit nachgeschalteter Bildverarbeitung unter Verwendung einer Histogrammanalyse ist es möglich, den Bereich des Gleises zu ermitteln (siehe Abb. 3c u. 3d). Hingegen kann die Extraktion des Bahngleises aus einem einzelnen Scanning-Profil (siehe Abb. 3a) nicht geleistet werden. Die geringe Punktdichte des einzelnen Querprofils lässt keinen Aufschluss über die Lage der Gleisköpfe zu.

Ein anderer Anwendungsbereich liegt in der Segmentierung von Gebäudewänden in Punktwolken. Ziel dabei ist es, die Regionen, in denen Wände zu finden sind von dem Rest der Punktwolke zu trennen (siehe Abb. 4). Die so vorselektierten Regionen werden mittels einer Linienextraktion segmentiert, vom Bildraum in den kartesischen Raum überführt und dienen als Grundlage für mögliche Modellierungsaufgaben, wie z. B. der Ebenenextraktion.

4 Modellierung

4.1 Geometrische Modellierung für die Passkugelbestimmung

Die Schwäche der oben beschriebenen bildverarbeitungsgestützten Kugelsegmentierung (siehe Abschnitt 3.1) liegt in der mangelnden Ausnutzung der bei Kugeln ableitbaren geometrischen Merkmale. Benutzt man nur die Clustereigenschaft im Distanzbild, so geht mit wachsendem Abstand zur Kugel die Eindeutigkeit verloren, da zunehmend andere Elemente im Objektraum vergleichbar in der Punktwolke erscheinen. Das lässt sich verhindern, wenn die Kugelform als solches auch mit einbezogen wird, und führt auf einen Ansatz zur simultanen geometrischen Modellierung von Passkugeln unterschiedlicher Größe.

In einer polar erfassten Punktwolke gilt es dabei sämtliche Regionen zu finden, die zu ei-

ner Kugeloberfläche mit vorgegebenem Maximalradius gehören. Dazu reicht die Analyse rein geometrischer Größen aus, die aus den benachbarten Einzelpunkten abgeleitet werden. Dieser pragmatische Ansatz ist eine Erweiterung des in (KERN 2003) vorgestellten Algorithmus, der lediglich für Kugeln mit fest vorgegebenem Radius vorgesehen ist.

Durch die besondere polare Aufnahmesituation ergibt sich eine 2,5D-Struktur der Punktwolke, die ausgenutzt werden kann, um flächenbasiert vorzugehen (KERN 2003). Werden die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten α ; β und D umgerechnet, können die Raumstrecken D bezüglich der Aufnahmerichtung α und β in ein rechtwinkliges 2D-Koordinatensystem aufgetragen werden. Die so umstrukturierte Punktwolke kann mit einer herkömmlichen 2D-Delaunay-Triangulation in ein lochfreies 3D-Dreiecksnetz überführt werden. Dieses bildet mit seinen Dreieckseiten die Basis für Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Einzelpunkten der Punktwolke. Im nächsten Schritt wird für jedes Dreieck aus seinen Eckpunkten und denen der benachbarten Dreiecke der n -ten Ordnung eine Kugel (Mittelpunkt und Radius) approximiert (siehe Abb. 5), wobei eine gewisse Robustheit gegenüber Ausreißern über den Einsatz des Data-Snoopings erzielt wird. Über den geschätzten Kugelmittelpunkt

und Kugelradius als vektorielles Merkmal werden anschließend die Dreiecksnachbarschaften zu Segmenten im Sinne eines Bereichswachstums aggregiert. Oberflächenabschnitte, die zu ein und derselben Kugel gehören, erzeugen so im vierwertigen Parameterraum ein Cluster (siehe Abb. 5, links). Am Ende steht eine Liste von Kugelsegmenten aus der diejenigen als Resultat herausgegriffen werden, die über eine Mindestanzahl an Stützpunkten verfügen, deren Kugelapproximation eine ausreichende Güte (Standardabweichung der Gewichtseinheit) besitzt und deren Kugelradien einen Maximalradius nicht überschreiten.

Die skizzierte Kugelsegmentierung wurde für die automatisierte TLS-Prüfung am i3mainz implementiert, um die aufwändigen Auswertearbeiten zu beschleunigen und um die Unabhängigkeit der Ergebnisse von subjektiven Punktmengenselektionen des Auswerters garantieren zu können (KERN 2008). Im praktischen Einsatz zeigte sich eine gegenüber der Methode aus Abschnitt 3.1 wesentlich bessere Unempfindlichkeit gegenüber großen Variationen in der Ortsauflösung innerhalb der Punktwolke, geringen „Kontrasten“ zwischen Kugelvordergrund- und Hintergrundsituation und dem Messrauschen. Einzige derzeit noch lange Ausführungszeit bei Punktwolken von mehreren Millionen Punk-

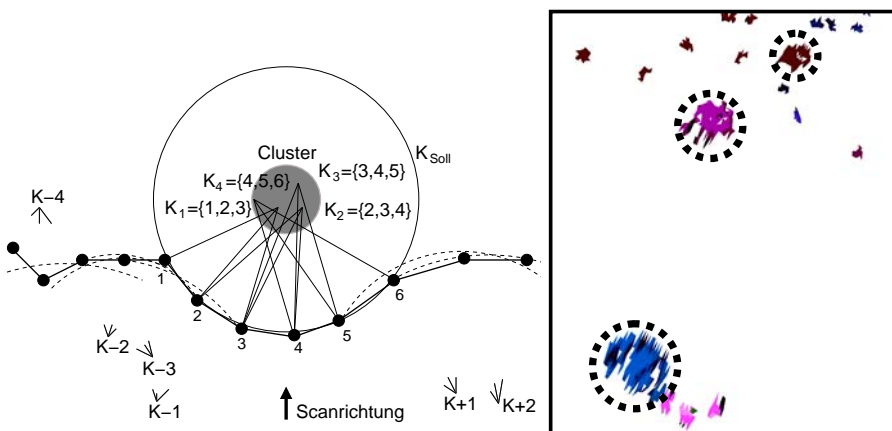


Abb. 5: Links: Prinzipskizze zur Kugelmodellierung. Rechts: Segmentierungsergebnis für die Punktwolke aus Abb. 1 in 3D-Darstellung (Ausschnitt) – markiert sind jene Segmente, die anhand ihrer Punktanzahl und Approximationsgüte letztendlich ausgewählt wurden und abschließend zweifelsfrei als Kugel modellierbar sind.

ten muss vor einem allgemeinen Einsatz des Algorithmus zur pauschalen Kugelsegmentierung noch verbessert werden.

4.2 Modellierung mit semantischer Unterstützung

Oben geschilderte Ansätze zur Segmentierung und Modellierung nutzen im Wesentlichen allein die Daten selbst, bzw. bringen ihr Gruppen- und Geometrieverhalten ins Spiel. Dabei lassen sich, wie die gezeigten Anwendungen dokumentieren, durchaus Erfolge erzielen, die zur Vereinfachung weiterer Verarbeitungsschritte und Verringerung evtl. noch erforderlicher Eingriffe durch den Anwender beitragen. Für die Erkennung von hoch komplexen Objekten sind diese Methoden allerdings weniger gut geeignet, weil mit wachsender Komplexität des Datenmaterials die Mehrdeutigkeiten in Bezug auf seine Bewertung zunehmen und die Grundlage für eindeutige Entscheidungen verloren geht.

Diese Problematik lässt sich nur durch weitergehende Zusatzinformationen umgehen, die der Algorithmik einen Rahmen geben mit dem die Bewertungsvielfalt eingeschränkt und damit die Entscheidungsgrundlage robuster wird. Als Zusatzinformationen kommen im Prinzip alle denkbaren Kenntnisse zum prinzipiellen Aufbau des Objektes in Frage. Das könnte beispielsweise Vorwissen sein, das aus Bestands- oder Planungsdaten abgeleitet wurde und in generalisierter und auf zwei Dimensionen reduzierten Form Objekte dokumentiert oder es sind verallgemeinerte Angaben, die sich aus Kategorien ergeben können (Räume setzen sich aus n Wänden zusammen, die wiederum Türen und Fenster enthalten). Der Ursprung des Vorwissens kann beliebig sein, entscheidend ist seine Formalisierung und die Verbindung mit verwertbaren Merkmalen des Datenbestandes, damit es zur Unterstützung der Punktwolkenverarbeitung taugt. Je nach dem Grad der Verallgemeinerung wären denkbar:

- Parametrisches Konzept

In diesem Fall beschränkt sich die Aussage allein auf geometrische Größen, von denen eine oder mehrere zu schätzen wären (Form gegeben: Zylinder, Parameter zu bestimm-

men: Höhe, Durchmesser). Die Konzeptdefinition ist hierbei nicht mit größerem Aufwand verbunden und enthält nur minimale Semantik, weshalb dieses Vorgehen oft auch den rein datengetriebenen Ansätzen zugeordnet wird. Die mögliche Unterstützung des Analyseprozesses bleibt aber sehr eingeschränkt.

- Generisches Konzept

Im Sinne einer Objektorientierung könnte man dies auch als Definition einer Basis-Klasse verstehen, mit der die wichtigsten allgemeinen Charakteristiken eines Objekttyps festgelegt sind. Hierin kommen neben geometrischen Merkmalen auch Beziehungen und weitere kennzeichnende Eigenschaften (Symmetrie, Bedingungen, ...) zum Tragen. Die Zahl der verwertbaren Kriterien ist hier wesentlich höher, die Anwendbarkeit kann aber durch die verallgemeinernde Charakteristik etwas eingeschränkt werden (z. B. allgemeines Raummodell mit vier Wänden, angewandt auf einen Datensatz, der auch einen Erker enthält).

- Spezifisches Konzept

Auf diesem Weg käme das Konzept dem zu erkennenden Objekt am nächsten und man hätte es im Sinne der Objektorientierung mit einem Instanzgebilde aus einer oder mehreren Klassen zu tun. Der Aufwand für die Definition wäre natürlich am größten, der potenzielle Nutzen für die Analyse aber auch (Gebäude mit n Etagen, jede Etage zusammengesetzt aus m Räumen ggf. unterschiedlicher Prägung, der einzelne Raum bestehend aus ...) (siehe Abb. 6).

Das im Sinne obiger Konzepte formalisierte Wissen muss für die Punktwolkenverarbeitung nutzbar gemacht werden. Dazu muss aus dem Konzept ein konkretes Modell für das gesuchte Objekt gebildet und mit Werten gefüllt werden. Außerdem bedarf es einer Verbindung zwischen einzelnen Bestandteilen des Modells, ihren Ausprägungen im Datenmaterial und den zur Erkennung anzuwendenden algorithmischen Werkzeugen. Ist z. B. der Ort eines Objektes gesucht, so könnte im aller einfachsten Fall die Ermittlung des Schwerpunk-

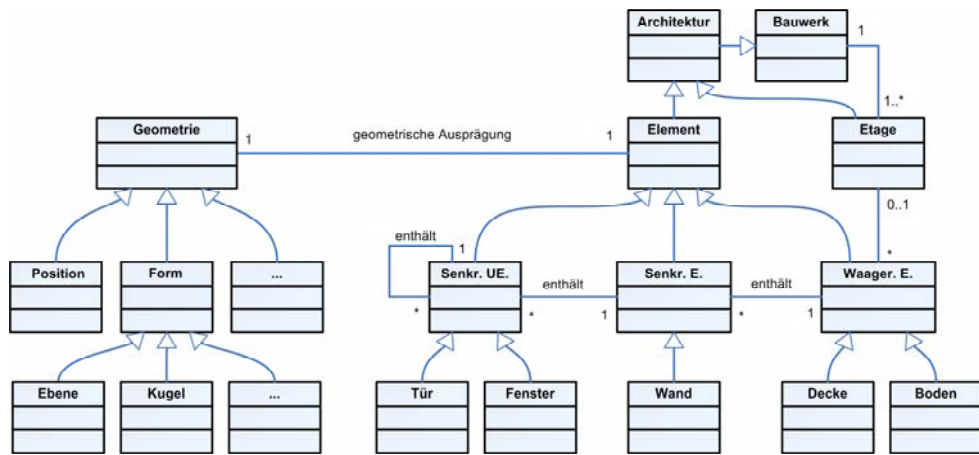


Abb. 6: Beispiel für die Modellierung von Bauwerkbestandteilen in der objektorientierten Beschreibungssprache OWL.

tes einer Gruppe von Punkten ausreichen. Hierfür bedarf es auf algorithmischer Seite dann lediglich eines Operators zur Abgrenzung der Punktgruppe und eines Schwerpunktoperators. Wird der Ort komplexer beschrieben (z. B. durch ein Grundrisspolygon) sind die Abläufe zwangsläufig umfangreicher. Im Prinzip ist das grundsätzliche Vorgehen wie in Abb. 7 dargestellt zu verstehen.

Der gesamte Prozess besteht also aus einem sukzessiven Durcharbeiten des Datenbestandes, mit dem Ziel, die zu den im Modell enthaltenen Elementen die Entsprechungen in der Punktwolke wiederzufinden. Damit gibt die Semantik zum Objekt der Algorithmik einen übergeordneten Rahmen, der die mathematische Prozessierung sowie die Entscheidungsabläufe kontrolliert und die Verarbeitung robuster ablaufen lässt. Mit den extrahierten Elementen wird das gesamte Objekt schrittweise aufgebaut, wobei die Geometrie der gefundenen Teile zu seiner Verbesserung herangezogen wird und auf diese Weise wieder in den weiteren Analyseprozess zurückfließt.

Ursprung und Komplexität der Objektinformationen können sich stark unterscheiden. Ein simples Modell ließe sich beispielsweise aus einem stark vereinfachenden Konstruktionsprozess heraus ableiten, aber auch vorgeschaltete Segmentierungen (z. B. Gebäudegrundriss s.o.) wären verwertbar. Je umfangreicher die parametrisierbaren Informationen und je eindeutiger der Zusammenhang zum Verhal-

ten der Daten umso weiter kann eine Objekterkennung gestützt werden.

An einem kleinen Beispiel kann das Vorgehen verdeutlicht werden. Dabei besteht die Aufgabe in der Extraktion aller Bestandteile eines Raumes aus einer Punktwolke. Eine Fragestellung, die sich im Zusammenhang mit der Überprüfung der Errichtung eines Bauwerks stellen kann, wenn die exakte Geometrie aller Gebäudeelemente den Planungsdaten gegenüberzustellen ist. Die Aufgabe der Extraktion aller Elemente des Gebäudes ist dann nur eine Erweiterung der Detektionsaufgabe in einem einzelnen Raum. Auf Seiten der Daten liegt dann eine entsprechende Punktwolke vor, die den Raum komplett erfasst (siehe Abb. 4). Auf der anderen Seite liegt das über das Regelwerk in das Konzept übertragene Wissen vor, das die zu erkennenden Bestandteile des Raumes abbildet (siehe Abb. 6).

Die einfachste Variante wäre ein Boxmodell aus vier Wänden und je einem Boden und einer Decke. Weitergehende Beschreibungen könnten zusätzliche Dinge wie Türen und Fenster enthalten. Diese Bestandteile sind mit ihren wichtigsten Merkmalen in einem Modell abzulegen. Als Hilfsmittel können dafür Werkzeuge der objektorientierten Informationsverarbeitung dienen, z. B. OWL als objektorientierte Beschreibungssprache für Ontologien. Abb. 6 veranschaulicht grafisch eine beispielhafte Elementhierarchie eines Raumes. In dieser Hierarchie stecken nun die ver-

wertbaren Informationen für die Bearbeitung der Punktwolke. Dazu zählen z. B. Angaben zur Geometrie und Topologie (Element wird durch eine Ebene beschrieben, Element ist Nachbar von, Element befindet sich an Näherungsposition XYZ , ...). Anhand dieser Information wird der Extraktionsprozess gesteuert, indem zunächst noch interaktiv ein Startelement zu identifizieren ist, von dort aus die Prozessierung startet und sich dann propagierend durch den Raum fortpflanzt.

Nach Initialisierung des Vorgangs durch die Auswahl des ersten Elementes in der

Punktwolke wird durch Bereichsauswahl eine Teilpunktwolke definiert in der das zu suchende Element liegen muss. Anhand der im Modell abgelegten Information, dass es sich um ein ebenes Objekt handeln muss, wird eine entsprechende mathematische Verarbeitung (siehe Abb. 7) angewandt. Diese muss ausreichend robust sein, um auch eine evtl. größere Anzahl von falschen Punkten als solche detektieren zu können, da die Vorselektion ggf. mit größeren Unsicherheiten behaftet sein kann. Aus diesem Grund ist in der konkreten Umsetzung ein RANSAC-Algorithmus im-

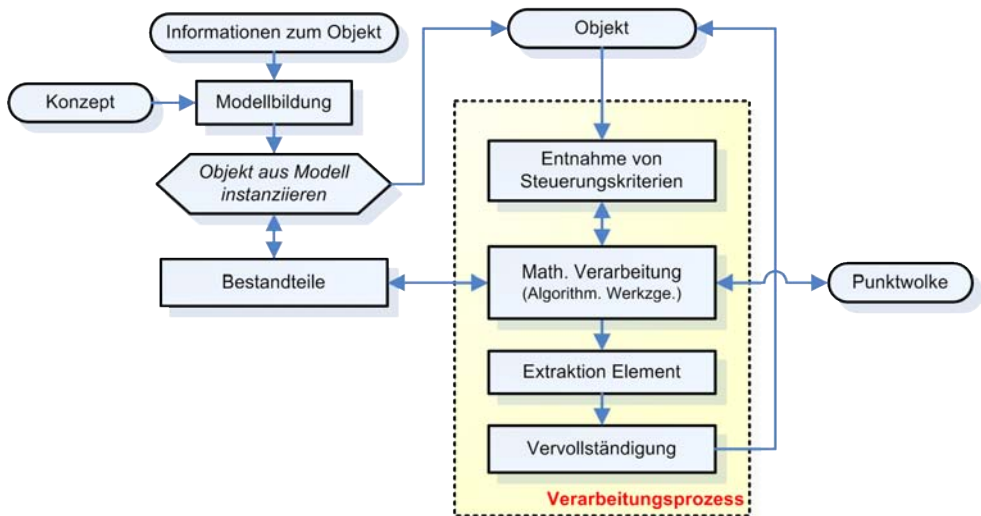


Abb. 7: Schema zum grundsätzlichen Vorgehen bei der semantischen Modellierung.

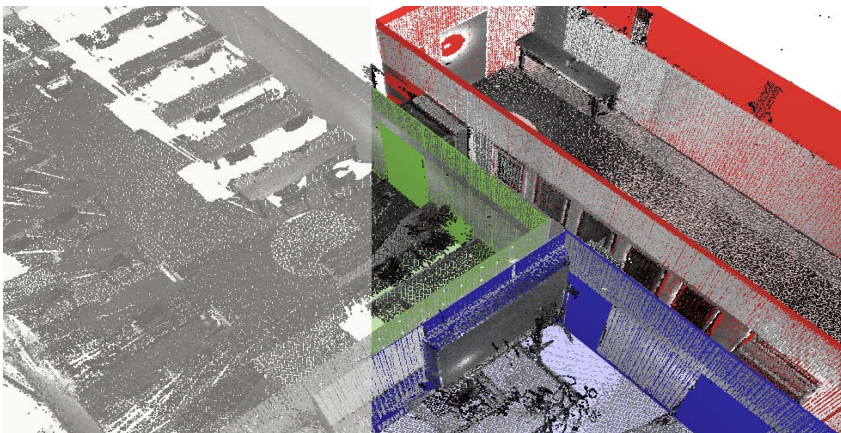


Abb. 8: Links: Originalpunktwolke. Rechts: Punktwolke mit modellierten Wänden.

plementiert. Nach erfolgreicher Erkennung des Elementes ist der erste Baustein des Objektes gegeben. Die weiteren Schritte bestehen nun noch aus der Auswahl der jeweiligen Nachbar-elemente aus dem Modell, die dann in vergleichbarer Weise erkannt werden. Im Falle von weitergehenden Differenzierungen (Wand enthält Fenster o.ä.) ist der Verarbeitungsprozess insgesamt entsprechend zu ergänzen. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die Charakteristik des Elementes auch in den Daten widerspiegelt – z. B. ein Fenster nicht bündig mit der Wand abschließt. Das Ergebnis der Verarbeitung ist in Abb. 8 zu sehen.

Dass die Verwendung von Semantik einen Nutzen für die Verarbeitung besitzt, hat sich auch schon in der Vergangenheit gezeigt. Schon (BRAUN et al. 1995) haben diesen Weg zur Extraktion von Gebäuden auf der Basis von Luftbildmaterial gewählt. Mit vergleichbarem Datenmaterial aber mit einem etwas stärker auf Interpretation zielenden Anspruch ist das System AIDA entstanden (LIEDTKE et al. 1997) während (LÜSCHER et al. 2007) sich im Rahmen der Generalisierungsaufgabe von Landkarten mit einer ontologie-getriebene Herangehensweise beschäftigt haben und ebenfalls zum Schluss kommen, dass Ontologien grundsätzliche geeignet sind, derartige Prozesse zu steuern. Insofern belegen verschiedene Untersuchungen den generellen Nutzen solcher Strategien, weshalb eine Anwendung auf TLS Daten aufgrund ihrer Komplexität nur zwangsläufig ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt bleibt es, trotz der hier aufgezeigten Vielfalt an Lösungsansätzen, schwierig, die in einer Punktwolke implizit enthaltenen, redundanten Informationen über Lage, Orientierung, Form, Größe, etc. der abgescannten Objektoberflächen durch Automatismen effizient und zuverlässig zu extrahieren. Grund hierfür ist neben der beachtlichen Problemgröße bei einer Punktmenge jenseits der 100 Millionen Punkte und der vielfältigen Einflüsse auf das Signal-/Rauschverhältnis vor allem der oftmals hochkomplexe Aufbau der mit der

Punktwolke erfassten Objekte und ihrer Bestandteile.

Bei der Zusammenschau der fünf dargelegten Ansätze bilden sich deutlich zwei Problemebenen heraus. Zum einen ist dies die Datenreduktion im Sinne einer Segmentierung (Unterscheidung von wichtigen zu unwichtigen, bzw. Objekt/Vordergrund und Hintergrund). Die zweite Ebene ist die zweckmäßige und exakte Formulierung des zu rekonstruierenden Modells (Wahl der Abstraktionsstufe wie z. B. Kugel mit Radius r) in Verbindung mit einem mehrstufigen Auswerteprozess (erst Grob- und dann darauf aufbauend eine Feinsegmentierung bzw. -modellierung). Auf welcher Ebene angesetzt wird, hängt stark davon ab, mit welcher Prägnanz sich charakteristische Merkmale (z. B. Kugel-Parametervektor, räumliche Häufung von Messpunkten) für das zu rekonstruierende Objekt (Passkugel, Signalmast bzw. Wandlinie) bestimmen und aufbereiten lassen. Dabei zeichnet sich die Regel ab, dass Objekte mit einfacher Geometrie (wenige Parameter, kaum Mehrdeutigkeiten in der Interpretation) sich bereits auf rein geometrischer Basis, also datengetrieben, rekonstruieren lassen (siehe Abschnitte 3 und 4.1) und mit zunehmender Komplexität der Geometrie ein modellgetriebener Ansatz unumgänglich wird, der verstärkt weitere Informationen bzw. Vorwissen benötigt (siehe Abschnitt 4.2). Interessant ist, dass sich die unterschiedlichen Ansätze sinnvoll in einem mehrstufigen Prozess kombinieren lassen. So ist die histogrammbasierte Segmentierung (siehe Abschnitt 3.3) von Wand-, Decken- und Bodenlinien eine ideales Start- bzw. Grobmodell für die semantische Modellierung mittels Ontologie (siehe Abschnitt 4.2).

Eine weitere Analyse der vorgestellten Ansätze führt auf folgende Systematik, die mit Abb. 9 grob veranschaulicht werden soll. Auf der einen Seite ist da die Leistungsfähigkeit der Ansätze und auf der anderen die Komplexität des Modells, das mit dem jeweiligen Ansatz abgeleitet werden kann. Unter Leistungsfähigkeit werden dabei subsumiert: die Robustheit gegenüber Modellabweichungen, die erforderliche Signifikanz im Ausgangsdatenmaterial und die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsgebiete sowie die erzielbare geometrische und semantische Qualität der Er-

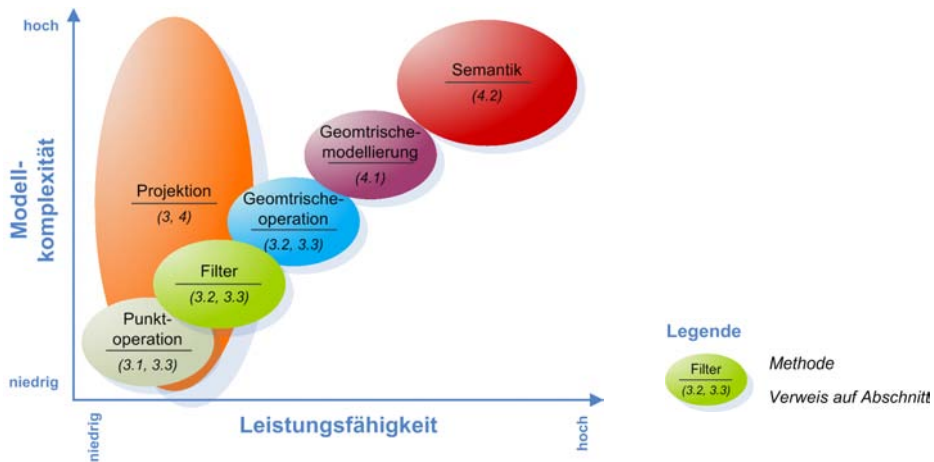


Abb. 9: Grobe Systematik der vorgestellten Ansätze, geordnet nach ihrer Leistungsfähigkeit und der mit ihnen generierbaren Modellkomplexität. Lesebeispiel: Punktoperationen können nur für Modelle mit geringer Komplexität angewendet werden und besitzen eine geringe Leistungsfähigkeit (Anwendungsspektrum). Hingegen besteht die semantische Modellierung mit einer hohen Leistungsfähigkeit (Robustheit) und ist auch für hoch komplexe Modelle geeignet.

gebnisse. So sind die Punktoperationsansätze (siehe Abschnitte 3.1 und 3.3) gegenüber den Ansätzen der geometrischen Segmentierung und Modellierung (siehe Abschnitte 3.2, 3.3 und 4.1) weniger leistungsfähig, da hohe Anforderungen an die Signifikanz der zu selektierenden Merkmale zu stellen sind, und weniger übertragbar, da sehr spezielle Anforderungen an die Objektgeometrie (z. B. einfache Beschreibbarkeit, idealgeometrische Formen) zu stellen sind. Es lassen sich auch nur gering komplexe Objekte mit ihnen bearbeiten. Auf dem höchsten Niveau steht der Ansatz der semantischen Modellierung. Wenn es gelingt die Realität nur ausreichend fein z. B. durch eine Ontologie formal zu beschreiben, stehen die Chancen sehr gut, hoch komplexe Modelle aus wenig signifikanten Punktwolken zu generieren, bei minimaler Fehlerrate. Der semantische Modellierungsansatz deutet so die möglichen Potentiale für weitere Automatisierungen in der Verarbeitung von unstrukturierten 3D-Punktmengen an.

Literatur

BECKER, R., 2005: Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestri-

schen Laserscannerdaten. – Geodätische Schriftenreihe der RWTH Aachen **63**.

BIENERT, A. & SCHELLER, S., 2008: Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken. – Publikationen der DGPF **17**: 39–49.

BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., MULLOOLY, G. & MOHAN, F., 2007: Automatische Erfassung forstinventurrelevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 216–225.

BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. & TARSHA-KURDI, F., 2007: Automatic Segmentation of Building Facades Using Terrestrial Laser Data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W52): 65–70.

BRAUN, C., KOLBE, TH., LANG, F., SCHICKLER, W., STEINHAGE, V., CREMERS, A.B., FÖRSTNER, W. & PLÜMER, L., 1995: Models for Photogrammetric Building Reconstruction. – Computers & Graphics **19** (1): 109–118.

CRUZ, CH. & BOOCHS, F., 2007: Reconstruction of Architectural Objects from 3D Scanner Survey. – Publikationen der DGPF **16**: 95–102.

KERN, F., 2003: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Geodätische Schriftenreihe der TU Braunschweig **19**.

- KERN, F., 2008: Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 306–316.
- LIEDTKE, C.-E., BÜCKNER, J., GROWE S. & TÖNJES, R., 1997: AIDA: A System for the Knowledge Based Interpretation of Remote Sensing Data. – 3rd International Airborne Remote Sensing Conference & Exhibition, Copenhagen, Denmark, **2**: 313–320.
- LÜSCHER, P., BURGHARDT, D. & WEIBEL, R., 2007: Ontology-driven Enrichment of Spatial Databases. – 10th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2006: Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (5), on CD.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2007: Extracting windows from terrestrial laser scanning. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W52): 320–325.
- SHELLER, S. & SCHNEIDER, D., 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktewolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Wichmann, Heidelberg: 156–163.
- WIRTH, H., 2008: Der neue Lichtraummesszug LI-MEZ III der Deutschen Bahn AG. – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement **133** (3): 180–186.
- VOSSELMAN, G., GORT, B.G.H., SITHOLE, G. & RABBANI, T., 2004: Recognising structure in laser scanner point clouds. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Spatial Information Sciences **36** (8/W2): 33–38.

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. FRANK BOOCHS, Prof. Dr.-Ing. FREDIE KERN, Dipl.-Ing. (FH) RAINER SCHÜTZE, m. Eng. ANDREAS MARBS: Fachhochschule Mainz, i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, D-55116 Mainz, Tel.: +49-6131-2859-666, Fax: +49-6131-2859-699, e-mail: {boochs, kern, schuetze, marbs}@geoinform.fh-mainz.de

Manuskript eingereicht: Juni 2008
Angenommen: November 2008

Preserve the Past for the Future – Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island’s Moai

THOMAS P. KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT, Hamburg & BURKHARD VOGT, Bonn

Keywords: Cultural Heritage, Deformation, Modelling, Monitoring, Point Cloud, TLS

Summary: Since 1995, the Moai of Easter Island, the island’s huge volcanic rock statues, have been protected as UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) World Cultural Heritage monuments, but so far, although the Moai are increasingly at risk of damage by exposure to wind and weather or by vandalism, they were never digitally documented and copied using an appropriate technique. The Department Geomatics of the HafenCity University Hamburg (HCU) started the documentation of the Moai in 2007 in cooperation with the German Archaeological Institute (DAI), Bonn, when the first three Moai sites were recorded by terrestrial laser scanning. In 2008 eight more Moai complexes were scanned. The long term goal of the project is to document and to catalogue the remaining Moai as well as assemble all relevant data into a Geographic Information System (GIS). Additionally, the analysis of possible deformation and the monitoring of conservation activities for selected Moai is an objective of the project. The recording of the statues by terrestrial laser scanning, the modelling into meshed 3D models and the texture mapping using high-resolution imagery are described in this paper. Furthermore, first tests for deformation analysis by 3D comparison of selected Moai were carried out. However, so far significant changes could not be detected for the short time interval of one year.

Zusammenfassung: *Bewahre die Vergangenheit für die Zukunft – Terrestrisches Laserscanning für die Dokumentation und Deformationsanalyse der Moai von der Osterinsel.* Seit 1995 stehen die Moai der Osterinsel, die sehr großen vulkanischen Steinfiguren der Insel, als Weltkulturerbe der UNESCO (Organisation für Ausbildung, Wissenschaft und Kultur der Vereinten Nationen) unter Schutz, aber bis heute wurden sie nie digital mit einer geeigneten Aufnahmetechnik dokumentiert und kopiert, obgleich die Moai in zunehmendem Maße der Gefahr einer Beschädigung durch Erosion von Wind und Regen oder durch Vandalismus ausgesetzt sind. Das Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg (HCU) begann die Dokumentation der Moai 2007 in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI) in Bonn, als die ersten drei Moai-Stätten durch terrestrisches Laserscanning erfasst wurden. 2008 wurden weitere acht Moai-Stätten gescannt. Das langfristige Ziel des Projektes ist, die verbliebenen Moai zu dokumentieren und zu katalogisieren, um alle relevanten Daten in einem Geoinformationssystem (GIS) zusammenzufassen. Zusätzlich ist die Analyse möglicher Deformationen und die Überwachung geplanter Konservierungsmaßnahmen für ausgewählte Moai eine weitere Zielsetzung des Projektes. Die Aufnahme der Statuen durch terrestrisches Laserscanning, das Modellieren durch Dreiecksvermaschung und deren Texturierung mit hoch auflösenden Bildern werden in diesem Beitrag beschrieben. Außerdem wurden erste Tests einer Deformationsanalyse durch 3D-Vergleich ausgewählter Moai durchgeführt. Jedoch konnten bis jetzt keine signifikanten Änderungen für den kurzen Zeitabstand von einem Jahr ermittelt werden.

1 Introduction

One of the most unique – and remote – areas on Earth, Easter Island was named for the day Dutch Admiral Roggeveen first discovered the island in 1722. How the island initially became inhabited remains speculative; legend claims Polynesian King Hoto Matua and others sailed double-hulled canoes to begin occupying the island around 1000 AD. The island's huge volcanic rock statues – called Moai by the islanders – have also puzzled ethnographers, archaeologists and island visitors. On average standing 4 m (13 ft) high and weighing 14 tons, the Moai are believed to have been carved, transported and erected between 1400–1600 AD. Most archaeologists believe the Moai are standardized representations of powerful leaders on early Easter Island, or Rapa Nui, the name given to their land by islanders. Today, the German Archaeological Mission is seeking to help document and conserve these historical monuments. Using terrestrial laser scanning systems, the expedition team is helping preserve the past for the future – today.

A triangle of volcanic rock, Easter Island lies about 3,800 km (2,361 mi) west of Chile in the Southeast Pacific Ocean. A Chilean province, the 163 km² (63 mi²) island has more than 800 Moai remaining, yet most are in poor condition. The statues were almost all erected singly or in a few groups along the coast on stone platforms known as Ahu. The Moai and Ahu are increasingly at risk of damage by exposure to wind and weather or by vandalism; most of the statues have been toppled due to human activity or natural events – such as tsunamis – and lie face down on the ground. Since 1995, the Moai have been protected as UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) World Cultural Heritage monuments, but so far they were never documented via digital copies.

Risk of damage is one reason the German Archaeological Mission conducted four weeks of field studies on Rapa Nui in each of February 2007 and in February/March 2008. The expedition is a cooperative project between the German Archaeological Institute (DAI), Bonn; the Geomatics Department of Hafen-City University, Hamburg (HCU); and the Bavarian State Department of Monuments and

Sites, Munich. Work was closely coordinated with Chile's Consejo de Monumentos Nacionales, Santiago, and local island authorities. The project's objective is to further research the island's history, its inhabitants and the still largely unknown Moai. In addition, the DAI will document and catalogue the remaining Moai as well as assemble all relevant data into a Geographic Information System (GIS) (KERSTEN & LINDSTAEDT 2007, VOGT et al. 2007). Furthermore, the project will test whether deformations on the Moai can be clearly identified using the terrestrial laser scanning technology. Additionally, conservation processes could be monitored at specified time intervals by TLS.

As known from the literature a terrestrial laser scanning system was used for the first time on Easter Island, when amongst other the Moai at the Museo Antropologico P. Sebastian Englert and the petroglyphs at Orongo were scanned by a CYRAX 2500 in 2003 for the University of Hawaii, Department of Anthropology (WELLMAN 2003).

2 System Used for Object Recording

The scanning of the objects was performed with the following terrestrial laser scanning systems: Trimble GX (2007), Trimble GS101 and the IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich (2008). Additionally, some of the Moai (Vaihu, Huri A Urenga and Akapu) were documented by photographic image acquisition using a commercial digital SLR camera Nikon D40 (28mm lens).

The 3D terrestrial laser scanning systems GX and GS101 (cf. Fig. 1 left), which are manufactured by Mensi S.A., France for Trimble, consist of a laser scanner (weight 13.5 kg), accessories (consisting of a backpack and a notebook for controlling the unit during data acquisition) and appropriate software for data acquisition and post processing. The IMAGER 5006 (weight 14 kg) is produced by the German company Zoller + Fröhlich. This scanner can be used as a stand-alone system or with a notebook. The optimal scanning range is between 2 and 100 m for the GS101 (with the option OverScan up to 150 m), and up to 200 m

Tab. 1: Summary of technical specifications of the laser scanning systems used.

Scanner / Criterion	Trimble GX	Trimble GS101	Z+F IMAGER 5006
Scan method	Time-of-flight		Phase shift
Field of view [°]	360×60		360×310
Scan distance [m]	< 200 (<350)	< 100 (<150)	< 79
Scanning speed	≤ 5000pts/s		≤ 500000pts/s
Angular resolution [°]	0,0017		0,0018
3D scan precision	12mm/100m		2.5-7.5mm/50m ¹
Camera	integrated		add-on option
Inclination sensor	yes	no	yes

¹ range noise depending on object colour



Fig. 1: Terrestrial laser scanner Trimble GX (used in 2007), Trimble GS101, IMAGER 5006 from Zoller & Fröhlich (both used in 2008).

for the GX (with the option OverScan up to 350 m), while the IMAGER 5006 (cf. Fig. 1 right) is only able to scan up to 79 m. All scanners used are panoramic view scanners (field of view 360° horizontal, 60° vertically for GX/GS101, and 360°×310° for the IMAGER 5006). The laser beam has a diameter of 3 mm at 50 m distance (GX/GS101) and 14 mm at 50 m distance for the IMAGER 5006, whereby the 3D scan precision is 12 mm at 100 m dis-

tance (GX/GS101), and 10 mm at 50 m distance (IMAGER 5006). The distance measurements are performed by pulsed time-of-flight laser ranging using a green laser (532 nm, laser class II or III) for both Trimble scanners, while the IMAGER 5006 is a phase-shift scanner with a red laser. The GX/GS101 is able to measure up to 5000 points per second, but in the practical use on Easter Island the scanner was not able to scan more than 1000 points per second. In contrast to this slow scanning speed the IMAGER 5006 offers high speed scanning with up to 500,000 points per second.

The technical specifications and the important features of the three used laser scanners are summarised in Tab. 1. The three scanners represent two different principles of distance measurement: Z+F IMAGER 5006 uses phase shift method, while Trimble GS101/GX scans with the time-of-flight method. In general it can be stated that the phase shift method is

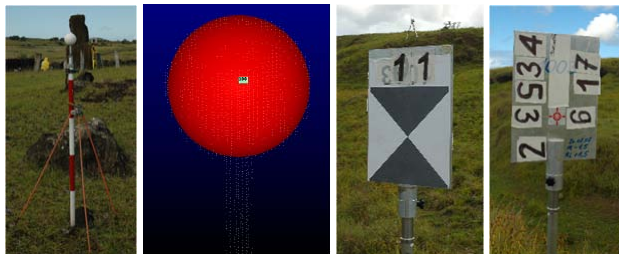


Fig. 2: From left to right: Marked point with white sphere for registration and geo-referencing of scans from GX/GS101, scanned and recognised sphere for GS101, front side of the target for IMAGER 5006 and back side of the same target for geodetic point determination and a flexible numbering system.

fast but signal to noise ratio depends on distance range and lighting conditions. If one compares scan distance and scanning speed in Tab. 1, it can be clearly seen, that the scanners using the time-of-flight method measure longer distances but are relatively slow compared to the phase shift scanner. For the GS101/GX power supply the Honda power generator was necessary, while for the IMAGER 5006 two internal batteries were available, which offers high flexibility for scanning in the field for approx. 4 hours.

For all of the scanned objects spheres (GX/GS101) or targets (IMAGER 5006) were used for registration and geo-referencing of the scans from different scan stations (cf. Fig. 2). The diameters of the spheres used were 76.2mm. To obtain centre positions of the spheres and targets, the point clouds representing the sphere were automatically fitted using algorithms of the Trimble software PointScape or RealWorks Survey, while for the determination of the target centre the software LaserControl from Zoller + Fröhlich was used.

3 The Scanned Objects – Moai of Easter Island

The Moai are monolithic statues carved from rock on Rapa Nui (Easter Island). Nearly half

(397) of the 887 Moai are still around the main Moai quarry (Rano Raraku), but 288 were transported from there and set on Ahu (platforms) which were mostly close to the sea at the island's perimeter. 92 Moai are on a route to an Ahu. Almost all have overly large heads three fifths the size of their body. The Moai are the 'living faces' and representations of chiefly, deified ancestors, sitting on their Ahu with their backs to the sea. Nowadays, most are toppled due to earlier tsunamis, earthquakes and conflicts between different clans on the island. The tallest Moai erected was almost 10 metres (33 ft) high and weighed 75 tonnes; the heaviest erected was a shorter but squatter Moai at Ahu Tongariki which weighed 86 tons; while one unfinished sculpture, which is still in the quarry at Rano Raraku, would have been approximately 21 metres (69 ft) tall with a weight of about 270 tons.

The distribution of Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008 by the Department Geomatics from the HafenCity University Hamburg, is illustrated in Fig. 3. The Moai at Vaipuu, at Hanga Mea, and at Akahanga are toppled, while all other scanned Moai stand erect.

In total, eleven object sites were scanned in the two field campaigns 2007 and 2008, whereby three Moai sites (Akivi, Ko Te Riku, and Vaihu) were scanned in both years for deformation analysis of statues. The list of Moai



Fig. 3: Distribution of Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008, illustrated in Google Earth.

Tab. 2: List of Moai scanned in 2007.

Object	Scanner	Date	Scan time
Vaihu Moai	GX	07.02.2007	½ day
Ahu Akivi	GX	09.–10., 12.–14.02.07	3 ½ days
Ahu Ko Te Riku	GX	13./20.02.2007	2 days

Tab. 3: List of Moai scanned in 2008.

Object	S	Date	Scan time
Vaihu Moai	a	19.02.2008	½ day
Huri A Urenga	b	19.02.2008	½ day
Tongariki	a, b	20.02.2008	1 day
Ahu Akivi	a	21.–22.02.2008	2 days
Ahu Nau Nau	b	25.–26.02.2008	2 days
Ahu Ature Huki	a	26.02.2008	½ day
Ahu Akahanga	b	28.02./02.–03.03.2008	3 days
Hanga Kio'e	a	28.02.2008	1 day
Represa Vaipu	a, b	29.02./04.03.2008	2 days
Hanga Mea	a	03.03.2008	1 day
Tahai, Ko Te Riku	a	04.03.2008	1 day
S = Scanner, a = GS101, b = IMAGER 5006			

scanned in 2007 is summarised in Tab. 2, while the scanned Moai in 2008 are listed in Tab. 3.

4 Object Recording

Prior to this project, the only available documentation of the Moai had been in the form of pictures and drawings, combined with sketches of a few selected figures. To perform a comprehensive analysis of weathering and erosion for all the Moai, the three above-mentioned scanners were used to record the objects. The choice of a non-contact measurement method was very important as walking on the Ahu or touching the Moai is not permitted. As the local surroundings of some Moai were also to be scanned, it was necessary to use a scanner that had a wide range as well as high measurement precision. The goal was to produce exact 3D models of three selected Moai (Akivi, Ko Te Riku, and Vaihu) to record the deterioration

process within millimetre accuracy by follow-up scanning on an annual basis. The focus of this paper is on these three Moai, which were scanned with Trimble scanners. The data of all other sites scanned with IMAGER 5006 is still in the processing phase.

Using the Trimble scanners the 3D geometry of the different Ahu and Moai could be scanned and the intensity values of the laser beam and the RGB values of the internal video camera were also stored for each 3D point. Firstly, the initialization of the scanner and the definition of the relevant scanning station were performed using the scanning program Point-Scape V3.1. After scanner initialization the scanning area was specified in real time via the displayed video frame from the scanner's internal camera. This process is particularly recommended, in order to avoid unnecessary data volumes from the environmental area of the sites and to optimize scanning time. To ensure complete object scanning different scanner stations around the object were needed.



Fig. 4: Moai on Easter Island, which were scanned in 2007 and 2008 for deformation analysis: Vaihu (top), Akivi (centre), and Ko Te Riku (bottom).



Fig. 5: Representation of point cloud with intensity values, which were scanned from one scanner station at Ahu Nau Nau with the terrestrial laser scanning system Z+F IMAGER 5006.

Furthermore, spheres (cf. Fig. 2 left) were placed on all marked points in the field for use in registration and geo-referencing and these were scanned from each scanner station. The scanned spheres could be automatically recognised in the point cloud by the software (cf. Fig. 2). In total approximately one hour scanning was required for each scan station.

The scanning strategy using the Z+F IMAGER 5006 was different to the scanning with the GX/GS101. Due to the huge data volume of each scan it was more appropriate to use targets for direct geo-referencing of each scan (cf. Fig. 2 right). Therefore, at least three, but in the most cases four, well-distributed targets were included in each scan. The coordinates of the targets were determined simul-

taneously by a total station using a special red target on the back side of the laser scanning target (cf. also Fig. 2 right), while the scanner position could be determined by measuring an eccentric 360° prism on top of the scanner. All targets are determined by polars in a local geodetic network, which will later be transformed to the network of the island using GPS measurements. The precision of the direct geo-referencing is in the range of 1 to 5 millimetres. The parameter for scan resolution was set to high or super high with low noise depending on the distance to the object. In total 25 minutes were used for each scan station. This included the geodetic measurements of the total station and the move to the next station. Direct geo-referencing was performed in 10 minutes per station in the post processing phase. In summary, 112 scan stations were used to scan the objects listed in Tab. 3, which yielded 31.3 GB of data and 1.8 GB of digital images using the add-on camera Nikon D40. The digital images could be used in a post processing procedure to integrate the imagery as RGB values into the point cloud. Fig. 5 illustrates a scan of the IMAGER 5006 representing some Moai of Ahu Nau Nau. The data evaluation of IMAGER 5006 scans is planned for 2009.

4.1 *Vaihu*

The single Moai at Vaihu (cf. Fig. 4 top) was the first statue scanned in 2007 and in 2008 using the Trimble scanners. Just four scanner positions were necessary for scanning the Moai each year, using four spheres for registration and three of them for geo-referencing. For geo-referencing three points were marked with wooden sticks sunk into the ground and measured by GPS. The same points were available for both 2007 and 2008. In total 2.3 million points were scanned with a grid density of 7 mm each year.

4.2 *Ahu Akivi*

The stone figures of Ahu Akivi (cf. Fig. 4 centre) were scanned in 2007 and in 2008 using the Trimble scanners. This group of seven

Moai, about 4.5 m (15 ft) tall, is one of the few statues looking out to the ocean; most statues face inland. The group was restored and set upright again in 1960 a few kilometres inland from the coast. The figures symbolize the seven scouts, which according to legend were sent across the ocean by Polynesian chief Hotu Matua to locate Rapa Nui.

To fully document the Moai (with a scanning grid size of 5–20 mm at 10 m distance) and surroundings, a total of 9.5 million points were recorded from twelve scanner stations in 2007. The Ahu, the remains of two cremation chambers behind the Moai, and the open space in front of the statues were also scanned. Eleven control points (spheres) around the object were marked and determined by differential GPS (DGPS), so an identical coordinate system could be recreated for the subsequent scans in 2008. In 2008 only the Ahu and the seven Moai were scanned with grid size of 20 mm at 50 m distance from six scanner stations (3.7 million points) using four of the marked control points. The Moai are illustrated in different states (as point cloud with RGB values of the internal video camera, as point cloud with intensity values, and as meshed 3D model) in Fig. 6.

4.3 *Ko Te Riku*

The third object scanned was the single Moai Ko Te Riku at the Tahai Ceremonial Complex, located on the coast in Hanga Roa, the island's only settlement. Due to its head covering (Pukao) of reddish volcanic rock, this Moai could not be completely surveyed using the four scanner positions on the ground. Due to a crash of the laser scanning system Trimble GX on February 20th 2007, which could not be repaired on the island, the scanning of Ahu Ko Te Riku could not be completed, i.e. ca. 20% of the Moai was not scanned. Therefore, only 730,000 points were available for the Moai, which was scanned with grid size of 5–7 mm at 10 m distance for the back of the statue.

In 2008 the Moai and its Ahu were scanned from six scanner stations (grid size 10 mm at 30 m distance, 1.2 million points) using nine spheres on marked control points, which were

well-distributed around the object, for registration and geo-referencing.

4.4 GPS Measurements

For the geo-referencing of the laser scanning data and for the geodetic documentation of all excavation sites in the island's coordinate system SIRGAS (FORTES et al. 2006, GONZÁLEZ 2007) at least three points were marked in the field per object site. All marked points were determined by differential GPS measurements (interval 15 seconds) using two Ashtech ProMark2 instruments simultaneously, one as a reference station on a reference point of the coordinate system SIRGAS and one as a rover on marked points. Therefore, the coordinates have been determined by post processing using additional GPS data from the local permanent GPS station ISPA. For the transformation of the GPS measurements into the island's coordinate system SIRGAS the six reference points were measured. The determination of the WGS84 coordinates of all points from 2007 yielded a standard deviation in $s_{xy} = 5$ mm (max. 18.5 mm) and $s_z = 10$ mm (max. 29.1 mm), while for the transformation into the UTM coordinate system of the island a precision for $s_{xy} = 10$ mm and for $s_z = 50$ mm was achieved.

5 Data Processing and Modelling

5.1 Registration and Geo-referencing of Scans

The automatic sphere-based registration of the three-dimensional point clouds of each laser scanner station for the GX/GS101 was accomplished with the software RealWorks Survey 5.1 (RWS). The number of scanner stations, number of marked points used, number of points per point cloud per object and the precision of the registration and geo-referencing are summarized in Tab. 4.

Only three spheres were available for geo-referencing of Ko Te Riku (cf. Tab. 4), while for all other sites all spheres could be used for geo-referencing. For the IMAGER 5006 scan data the direct geo-referencing was tested exemplarily for some scans in the local geodetic network to see the precision potential, which was in the range of 1 to 5 millimetres as mentioned before. It was decided to perform the direct geo-referencing of all IMAGER 5006 scans only when the GPS data have been processed and all absolute coordinates of all targets are available.

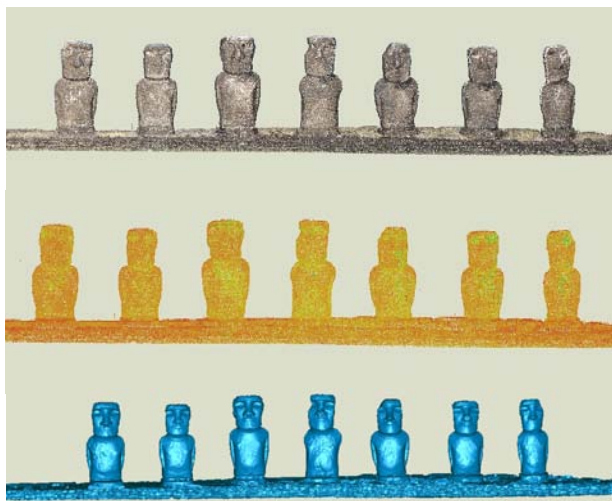


Fig. 6: Ahu Akivi represented as point cloud with RGB values of the internal video camera, as point cloud with intensity values, and as meshed 3D model.

Tab. 4: Precision of registration & geo-referencing for three objects scanned in 2007 with GX and in 2008 with GS101.

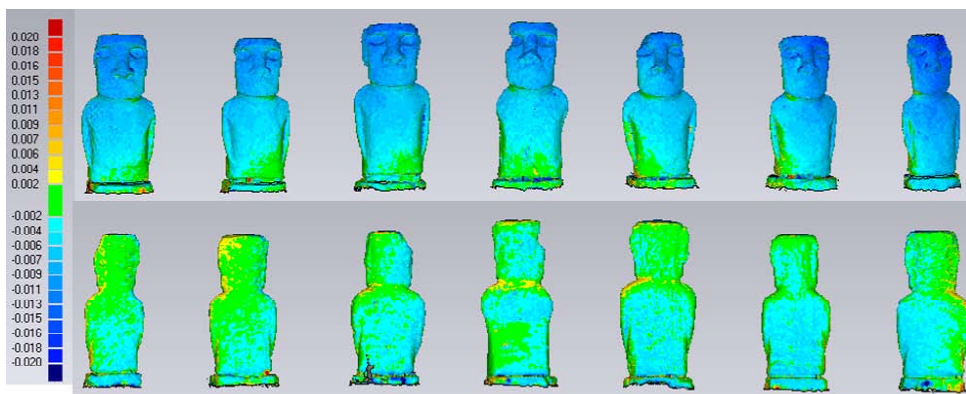
Site	System	# station/ spheres	# points [mio.]	Precis. registr. [mm]	Precis. geo-ref. [mm]
Vaihu	GX	4 / 4	2,3	2	6.8
Akivi	GX	12 / 9	8,9	5	8.3
KoTeRiku	GX	4 / 6 (3)	0,7	5	6.5
Vaihu	GS101	4 / 4	2,3	3	12.2
Akivi	GS101	6 / 4	3,7	6	21.0
KoTeRiku	GS101	6 / 9 (3)	1,2	9	9.0

5.2 Modelling of the Point Clouds

After registering and geo-referencing the scans the entire point cloud of each object will be segmented in RealWorks Survey 5.1, i.e. all points, which do not belong to the object or which are not necessary, will be deleted. Thus, the point cloud can be slightly reduced. Another option to reduce the point cloud is resampling into regular point grid spacing. The point clouds were exported in an ASCII format, in order to transfer the data to the modelling software Geomagic 10. Here, the point clouds were additionally resampled by decreasing the grid spacing, e.g., 20 mm, which offers faster visualisation performance on a standard notebook. The quality of the point cloud can be improved by filtering and following elimination of blunders, which could cause

a further reduction of 10% for the point cloud. Finally, a triangulation (meshing) of the point cloud results in 3D models of the Moai, which are shown in Fig. 7. These models (cf. Fig. 6 bottom) can now be used for further investigations such as volume calculations, cutting slices, etc. and also for visualisation tasks using texture mapping as shown in Fig. 10. Furthermore, these models are the basic data set for deformation analysis, thus it is possible to analyse the changes on the Moai between 2007 and 2008, caused by erosion, weather or other climatic aspects.

Additionally, scanning the surrounding area enables both a site plan and a terrain model to be generated, providing the archaeologists with important base-line data for later excavation work.

**Fig. 7:** Front and back view of the Moai at Ahu Akivi illustrating the differences between two 3D models from 2007 and 2008.

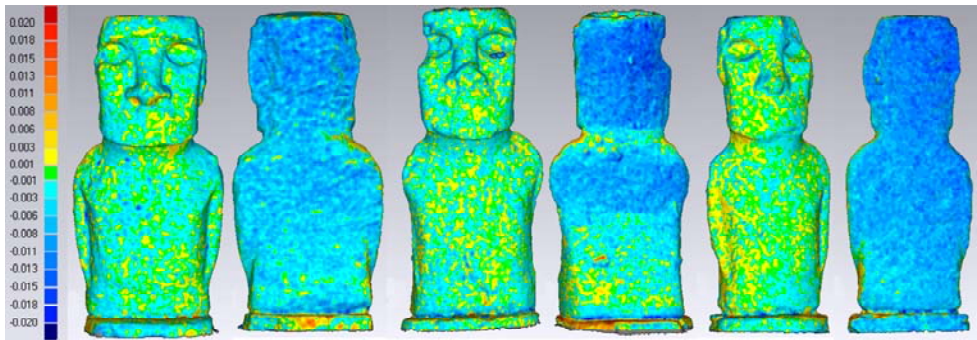


Fig. 8: Front and back view of three Moai (left, centre, right) at Ahu Akivi illustrating the differences between two 3D models from 2007 and 2008 (after separate model-to-model registration for each Moai).

5.3 Deformation Analysis

To analyse changes and deformation of the Moai within a specified time interval a 3D comparison of the two triangulated meshes of both epochs using Geomagic is required. The 3D model-to-model registration was computed based on the ICP algorithm (iterative closest point) using just the 3D models of each epoch and not any GPS data for the geo-referencing. Therefore, the figures were modelled using a high-resolution point cloud with a point grid of 5mm for the Moai at Vaihu and 2mm for Ahu Akivi. This 3D comparison could allow signs of existing erosion to be clearly identi-

fied or changes from conservation to be explicitly monitored; more significantly, it will enable future scanning at set time intervals to quantify possible erosion processes and show the progress of conservation measures applied to statues.

Currently, it is difficult to specify the range of expected changes/deformations on the Moai, but it could be a change of some millimetres in a ten year period. Changes or deformations can be caused by erosion or weather conditions, which could leave traces on the whole bodies of the statues. On the other hand unstable ground from the renovation of the platform could cause slightly increasing incli-

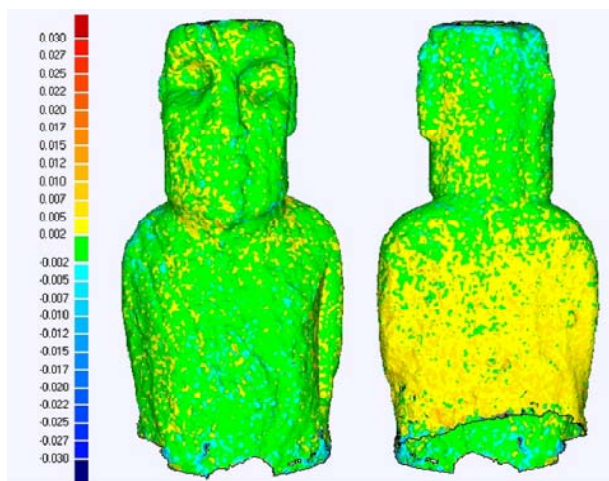


Fig. 9: Presentation of differences (± 2 mm in average) between two 3D models of the Moai at Vaihu (2007–2008).

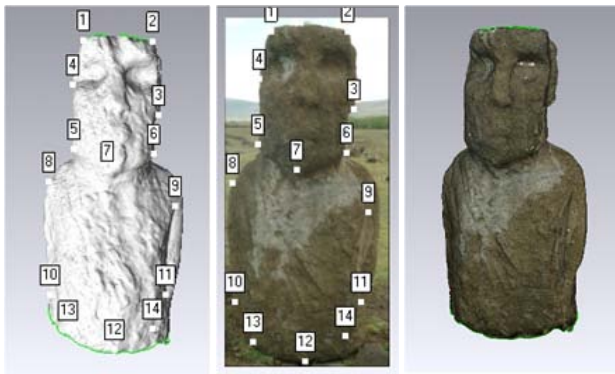


Fig. 10: Texture mapping of the front part of the Moai at Vaihu using the software Geomagic Studio 10.

nation or/and a vertical shift of the erect Moai, which could only be detected if the two temporally different 3D models could be compared in the same fixed coordinate system. Therefore, a precise geodetic network is required, although it has not yet been established. Fig. 7, 8, and 9 represent the model-to-model differences between 2007 and 2008 for Ahu Akivi and the Moai at Vaihu. The deviation was 5 mm on average for all models, which is the absolute value of the precision of the systems. Due to slight systematic effects, which can be seen in Fig. 7, an additional model-to-model registration was carried out for three individual Moai (left, centre and right statue). Fig. 8 illustrates the results of the 3D comparison for the three Moai as front and back view. It is obvious, that the back part of the Moai could be slightly eroded, but this effect is still within the precision of the systems. These deviations are influenced by the precision of the laser scanning systems, by errors from the registration, and possibly by blunders from the 3D modelling in Geomagic. Currently it is difficult to explicitly address an error source to a specific effect. To prove significant changes in the statues more investigations are required.

5.4 Texture Mapping

The texture mapping of the Moai using high resolution imagery could be applied with two different methods: (i) by registration of the photo and the meshed 3D model via measured

control points (cf. Fig. 10 left) or (ii) by automatic texturing using the orientation parameters of each photo, which are in the same coordinate systems as the scanned point cloud, and its related camera calibration parameters (ABDELHAFIZ & NIEMEIER 2006).

First tests for texture mapping were carried out using the software Geomagic 10. Therefore, a triangulated mesh of the point cloud was created and the Moai was textured by registration of high-resolution images from the Nikon D40 and the meshed 3D model (cf. Fig. 10). The results were not satisfactory due to unexpected white patterns on the textured model (see right eye of the Moai in Fig. 10 right) and due to smearing effects in the overlapping area of photos, which might be caused by bad registration. Therefore, further different software packages, e.g., QTScultor from Polygon Technologies, will be tested to generate textured 3D models of the Moai.

6 Conclusions and Outlook

Terrestrial laser scanning offers an efficient technique for the documentation of Easter Island's cultural heritage – the Ahu and Moai. In the past the statues were mainly toppled by natural disasters like earth quakes and tsunamis, today's disasters are ignorant tourists, who do not respect the cultural heritage and even destroy the Moai by vandalism, as it happened in March 2008, when a Finnish tourist damaged one statue of Ahu Nau Nau. This demonstrates clearly that it is absolutely es-

sential to scan the Moai for documentation and to generate 3D models as a digital copy of the Moai from scanned point clouds. In 2007 and 2008 eleven object sites (Ahu and Moai) were scanned with Trimble and Z+F scanner, whereby three objects were scanned in both years for testing deformation analysis by 3D comparison. As expected no significant changes on the Moai could be detected within the short time interval of one year. Nevertheless, the same Moai will be scanned in the next years to document possible deformations and to estimate its possible deformation range. Nevertheless, the scanning of the top of a Moai is not possible due to the height of the statues compared to the low scanner stations.

During the scanning project the importance of proper preparation for local weather conditions became clear. Hot temperatures – 27–33° C or 81–91° F – caused scanner operating temperatures of more than 40° C (104° F) at times. The scanner worked absolute perfectly the entire time in 2008, but the island's heat, wind and sudden showers added to the project's challenge. Due to a close position of most platforms to the sea the scanner also needed to be positioned close to the ocean when scanning the back of the Ahu/Moai. Here, the salty humidity trickling off the glass plate of the scanner caused problems (no returned signals) for the Trimble scanners during scanning.

The generation of 3D models for the scanned Moai is still in progress. Here, the challenge is to model the Moai with geometrical correctness although the data volume needed to be reduced to an accepted minimum while the meshed models should be visualised interactively with high resolution photo-realistic texture mapping. However, some software packages will be tested for texture mapping of the models of the Moai.

Finally, the scanning of all erect Moai outside the quarry in Rano Raraku could be finished during the next German expedition in 2009. The scanning and documentation of all 887 Moai might take some more years.

References

- ABDELHAFIZ, A. & NIEMEIER, W., 2006: Developed technique for automatic cloud texturing using multi images applied to a complex site. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (5): 1–7.
- FORTES, L.P., LAURÍA, E., BRUNINI, C., AMAYA, W., SÁNCHEZ, L., DREWES, H. & SEEMÜLLER, W., 2006: Current Status and Future Developments of the SIRGAS Project. – Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover **258**: 59–70.
- GONZÁLEZ, V.F.H., 2007: Geomatics Technologies Applied for Land Use on Easter Island (Chile). – Ingeniare, Revista chilena de ingeniería **15** (2): 193–198.
- KERSTEN, TH. & LINDSTAEDT, M., 2007: Scanning Easter Island's Moai. – Technology & More, Trimble Engineering & Construction **2007** (3): 12–14.
- WELLMAN, D., 2003: Archaeological 3D Laser-scanning in the South Pacific. Rapa Nui: Easter Island. – GIM International **17** (8): 40–43.
- VOGT, B., KERSTEN, TH., LINDSTAEDT, M., FASSBINDER, J. & MOSER, J., 2007: Terrestrial Laser Scanning and Geophysical Prospection of Selected Ahu and Moai – The First Field Season of the German Archaeological Mission to Rapa Nui in 2007. – VII International Conference on Easter Island and the Pacific - Migration, Identity and Cultural Heritage, Gotland University, Sweden.

Addresses of the Authors:

THOMAS P. KERSTEN & MAREN LINDSTAEDT, HafenCity University Hamburg, Department Geomatics, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5343, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: {Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt}@hcu-hamburg.de

BURKHARD VOGT, German Archaeological Institute, Commission for the Archaeology of Extra-European Cultures, Dürenstraße 35-37, D-53173 Bonn, Tel.: +49-1888-7712-12, Fax: +49-1888-7712-49, e-mail: vogt@kaak.dainst.de

Manuskript eingereicht: Juni 2008
Angenommen: November 2008

Bewegungsanalyse schnell fließender Gletscher aus multi-temporalen terrestrischen Laserscanneraufnahmen

ELLEN SCHWALBE & HANS-GERD MAAS, Dresden

Keywords: Glaciology, point cloud matching, terrestrial laser scanning, tracking

Summary: *Motion Analysis of Fast Flowing Glaciers from Multi-temporal Terrestrial Laser Scanning.* Long range terrestrial laser scanners may depict a rather interesting measuring device for glaciology research. The paper reports on practical experiences using a Riegl LPM-321 laser scanner at an outlet glacier in West Greenland. With the instrument positioned on a hill, a maximum range of 4000 meter could be achieved on glacier ice. The scanner delivers a high quality glacier surface model, which can be used to determine parameters such as the height of the glacier front and the width of crevasses. Moreover, multi-temporal scans allow for the determination of 3D glacier surface velocity information by point cloud matching techniques. For the Jacobshavn Isbræ glacier velocities up to 40 meter per day could be observed.

Zusammenfassung: Terrestrische Laserscanner mit hoher Reichweite stellen ein interessantes Messwerkzeug für die Glaziologie dar. Der Beitrag berichtet über praktische Erfahrungen mit einem Laserscanner Riegl LPM-321 an einem grönländischen Gletscher, an dem die lokale Topographie die Messung der Gletscheroberfläche von einem Hügel erlaubte. Bei der Messung auf Gletschereis konnte eine Reichweite von 4000 Meter erreicht werden. Der Scanner liefert ein hochwertiges Modell der Gletscheroberfläche, aus dem u. a. die Höhe der Gletscherfront und die Breite von Gletscherspalten extrahiert werden kann. Multi-temporale Laserscanneraufnahmen erlauben über die Herstellung von Korrespondenzen in 3D-Punktwolken die Bestimmung von Bewegungen der Oberfläche des Gletschers, der eine Geschwindigkeit von bis zu 40 Metern pro Tag aufweist. Hierzu wurden Verfahren der Kreuzkorrelation sowie eine Iterative Closest Point (ICP)-Implementation verwendet.

1 Einleitung

Mehrere grönländische Gletscher zeigen seit einigen Jahren signifikante Änderungen ihres Bewegungsverhaltens. Der größte und prominenteste unter diesen Gletschern ist der Jacobshavn Isbræ an der Westküste Grönlands (Abb. 1), der einer der schnellsten und produktivsten Gletscher der Welt ist. Seine Gletscherfront hat sich innerhalb weniger Jahre um fast 15 km zurückgezogen (WEIDICK et al. 2004), und seine Bewegungsgeschwindigkeit hat sich von 20 Meter pro Tag auf bis zu 40 Meter pro Tag verdoppelt (MAAS et al. 2008).

Eine Reihe von Publikationen beschreiben Messverfahren zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Jacobshavn Isbræ: (HAM-

MER 1893) und (ENGELL 1904) nutzten geodätische Messverfahren zur Bestimmung der Gletschergeschwindigkeit. (BAUER 1968) und (CARBONELL & BAUER 1968) bestimmten Geschwindigkeitsprofile aus monokularen kleinmaßstäbigen Luftbildern, die in einem Zeitabstand von wenigen Tagen aufgenommen wurden. (JOUGHIN et al. 2004) nutzten multi-temporale Satellitenradaraufnahmen. (ROSENAU 2008) bestimmte die Fließgeschwindigkeit aus multi-temporalen ASTER-Aufnahmen. Bei den vorliegenden Geschwindigkeitsspektren weisen Satellitenbilddaten den Nachteil relativ großer Zeitabstände auf. Schrägvisuren hoch auflösender optischer Satelliten verbieten sich aufgrund der stark zerklüfteten Gletscheroberfläche (Abb. 2), welche zudem



Abb. 1: Jakobshavn Isbræ (Landsat-Aufnahme 2001).



— Gletscherfront

Abb. 2: Helikopteraufnahme im Bereich der Gletscherfront des Jakobshavn Isbræ.

einer großen zeitlichen Variabilität unterworfen ist.

Geschwindigkeitsfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung können durch die Aufnahme und Auswertung terrestrischer Bildsequenzen einer stationären hoch auflösenden digitalen Kamera bestimmt werden.

Im arktischen Sommer sind dank der Mitternachtssonne 24-Stunden-Aufnahmen möglich. Aufgrund des Bewegungsverhaltens des Gletschers reicht hier eine monokulare Aufnahme aus. Bei entsprechend hoher Bildrate ist auch die Analyse von Gezeitenabhängigkeiten in Geschwindigkeitsfeldern möglich

(MAAS et al. 2006, 2008). (DIETRICH et al. 2007) ermittelten aus solchen Geschwindigkeitsfeldern die Aufsetzlinie des Gletschers. Als recht aufwendig erweist sich bei der Auswertung monokularer Bildsequenzen die Bestimmung lokaler Maßstabsinformation zur Transformation vom Bildraum in den Objekt-raum. Eine automatische Auswertung stereoskopischer Bilddaten scheitert in vielen Bereichen an einer zu großen Dekorrelation, welche durch die zerklüftete Gletscheroberfläche verursacht wird. Weitere Schwierigkeiten bei der Bildsequenzanalyse ergeben sich durch Schatten, welche während der Mitternachtssonne eine 360°-Wanderung ausführen.

Eine interessante Alternative zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern ergibt sich durch multi-temporales Laserscanning. (ABDALATI & KRABILL 1999) verwendeten hierzu Flugzeuglaserscannerdaten aus niedriger Flughöhe. Wenn eine hohe zeitliche Auflösung gefragt ist, wird der Aufwand der mehrfachen Laserscannerbefliegung allerdings sehr groß. Die Topographie am Jacobshavn Isbræ erlaubt die Aufnahme größerer Teilgebiete der Gletscheroberfläche im Bereich der Gletscherfront mit einem auf einem Hügel aufgebauten terrestrischen Laserscanner. Hierdurch werden Wiederholungsmessungen in kurzen Zeitabständen möglich. Die Aufgabe bei der Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsfeldern besteht dann in der Zuordnung von Oberflächenstrukturen in aufeinanderfolgenden Scan-Epochen. Die zerklüftete Gletscheroberfläche (siehe Abb. 2) mit

Strukturen von mehreren Metern Höhe und Ausdehnung liefert hierzu genügend Information. Im Gegensatz zur Bildsequenzanalyse ist die Verfolgung von Oberflächenstrukturen in multi-temporalen Laserscannerdatensätzen unabhängig von variierenden Beleuchtungsverhältnissen und Schattenwurf. Durch die direkte 3D-Messung entfällt außerdem die aufwendige Prozedur der Bestimmung lokaler Bildmaßstabsinformation. Einschränkungen ergeben sich bei der Anwendung eines terrestrischen Laserscanners allerdings durch den deutlich höheren logistischen Aufwand sowie durch die beschränkte Messrate und Reichweite aktueller Instrumente.

2 Instrument und Aufnahme

Die Topographie am Jacobshavn Isbræ erlaubt die Aufnahme des Gletschers von einem Hügel am südlichen Gletscherrand, der sich etwa 150 m über die Oberfläche des Gletscherstroms erhebt. Die Entfernung zum südlichen Rand des mehrere Kilometer breiten Hauptstroms beträgt dabei etwa 1,5 km. Diese Minimalentfernung liegt jenseits der Reichweite fast aller Instrumente am Markt, zumal die Reflektivität von Gletschereis im Wellenlängenbereich der meisten Scanner eher ungünstig ist. Das einzige Gerät, das nach seinen Spezifikationen für die Messung in Frage kommt, ist der Riegler LPM-321 (siehe Abb. 3). Dieser ist mit einer maximalen Reichweite von bis zu 6 km spezifiziert, welche allerdings



Abb. 3: Riegler LPM-321 am Jacobshavn Isbræ.

nur bei einer sehr niedrigen Messrate von 10 Punkten pro Sekunde erzielt wird. Von der Firma Riegl wurde zur Unterstützung einer Messkampagne am Jacobshavn Isbræ im Juli 2007 ein Prototyp des Geräts zur Verfügung gestellt.

In der praktischen Anwendung konnten mit dem Instrument Reichweiten bis 4 km erzielt werden, was angesichts der Reflektivitätseigenschaften von Gletschereis als sehr guter Wert zu betrachten ist. Bei einer Strahldivergenz von 0,8 mrad entspricht dies einem Punktdurchmesser von 3,2 Metern. Ein-

schränkungen ergeben sich durch die niedrige Messrate von 10 Punkten pro Sekunde: Für die Aufnahme eines Oberflächenmodells mit 250'000 Punkten ergibt sich ein Zeitaufwand von ca. sieben Stunden. Die Sicherstellung der Energieversorgung während dieses Zeitraums unter Expeditionsbedingungen erwies sich als recht aufwendig.

Aus den Daten lässt sich beispielsweise direkt die Höhe der Gletscherfront entnehmen (siehe Abb. 4 links), für die an der höchsten Stelle 135 Meter ermittelt wurden. Zudem erlaubt das Oberflächenmodell Aussagen über

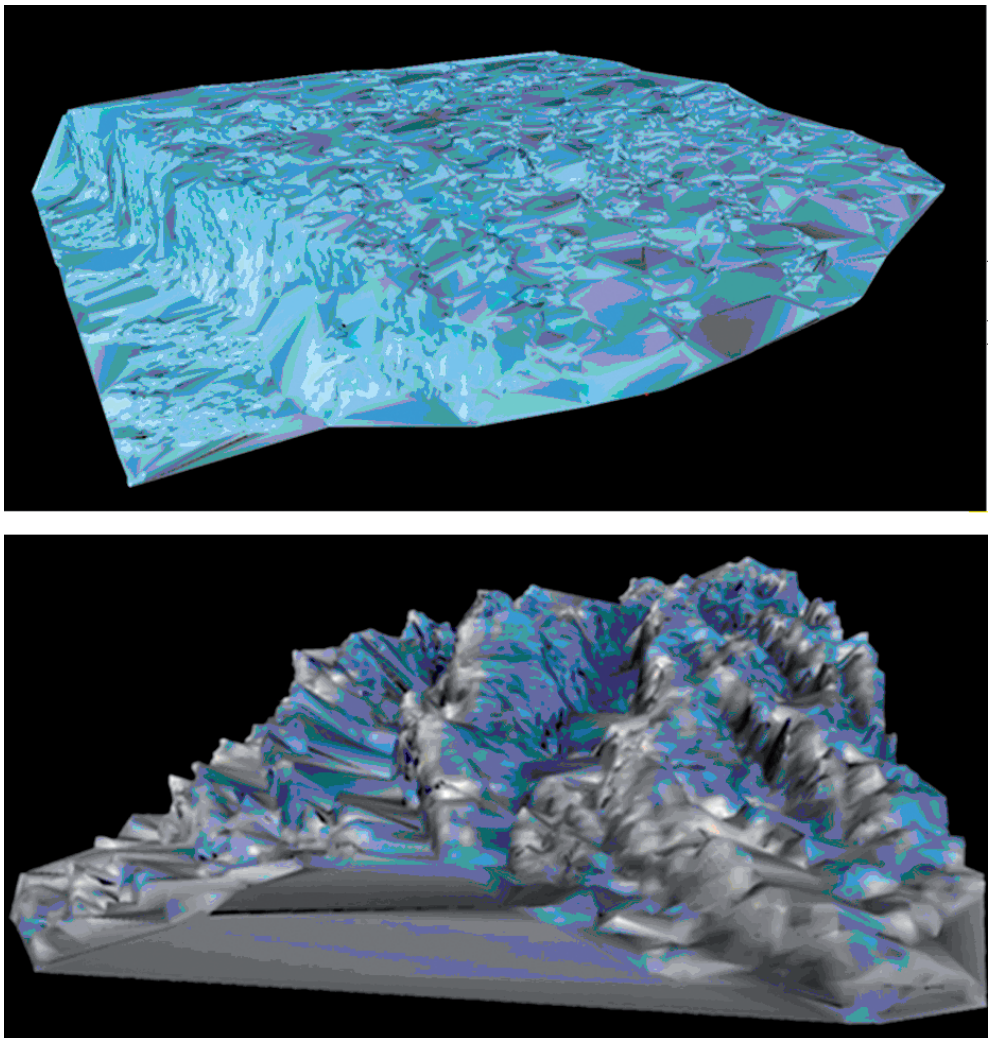


Abb. 4: Oberflächenmodell im Bereich der Gletscherfront (links, Scanfläche ca. 0,8 km², 29'000 Punkte); Detail (rechts, Scanfläche ca. 16'000 m², 13'000 Punkte).

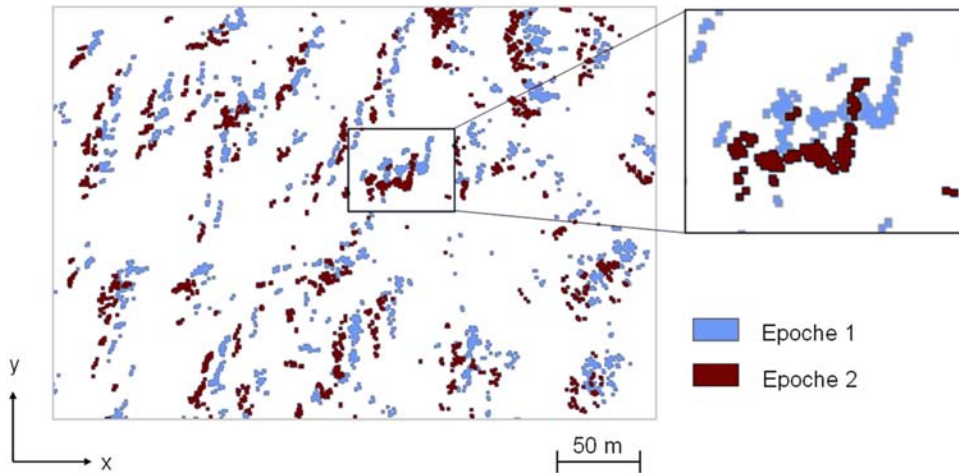


Abb. 5: Punktkonstellationen in aufeinander folgenden Epochen.

Struktur und Verlauf von Gletscherspalten und die Struktur des randlichen Toteises (siehe Abb. 4 rechts). Gleichzeitig stellt das Oberflächenmodell eine wertvolle Grundlage für die Georeferenzierung und lokale Maßstabsbestimmung simultan aufgenommener terrestrischer Bildsequenzen dar.

Durch mehrmaliges Scannen in kurzen Zeitabständen kann auch hier die Zeit als vierte Dimension eingeführt werden, wodurch sich die Möglichkeit der Bestimmung von räumlich-zeitlich aufgelösten 3D-Geschwindigkeitsfeldern ergibt.

3 Tracking in 3D-Punktwolken

Die Verarbeitung multi-temporaler 3D-Punktwolken der Gletscheroberfläche erlaubt die Bestimmung aller drei Komponenten des Bewegungsfeldes ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Messungen zur Skalierung der Trajektorien. Dazu bietet sich die Anwendung von Verfahren der Objektverfolgung in Punktwolken an. Die Grundidee der Geschwindigkeitsbestimmung aus multi-temporalen Punktwolken liegt in der Zuordnung von Punktmustern auf der Zeitachse. Bewegungen der Gletscheroberfläche sind dank der durch Spaltenbildung geprägten Gletschertopographie aus Punktwolken gut erkennbar. Abb. 5 zeigt die

XY-Projektion der Laserscannerdaten aus zwei Aufnahmeepochen. Durch den flachen Winkel, mit dem der Laserstrahl auf dem Gletscher auftrifft, werden stark geneigte, zum Scanner hin ausgerichtete Bereiche der Eisstrukturen mit großer Punktdichte gescannt. An der Rückseite der Eisstrukturen entstehen jedoch Scanschatten. Dies führt zu einer unregelmäßigen Punktverteilung in der XY-Projektion der Laserscannerdaten und zu der Tatsache, dass sich einzelne Eisstrukturen gut voneinander trennen lassen.

Für die Zuordnung bieten sich prinzipiell zwei Vorgehensweisen an:

1. Die Z-Koordinaten der Einzelpunkte werden auf ein regelmäßiges XY-Raster interpoliert, in dem dann die Zuordnung in einem flächenbasierten Ansatz (Kreuzkorrelation, Least-Squares-Matching o. ä.) mit vorgegebener Patch-Größe erfolgt.
2. Die Zuordnung erfolgt anhand geeigneter 3D-Matchingverfahren direkt auf der Basis von 3D Punktwolken, die aus dem Gesamtdatensatz segmentiert wurden.

Für den ersten Ansatz wurden die Z-Koordinaten der Einzelpunkte in ein regelmäßiges XY-Raster projiziert. Als Rasterweite wurde in Anlehnung an den Punktabstand und die Struktur der Gletscheroberfläche eine Patchgröße von 50×50 Meter gewählt. Aus Gründen der Kompatibilität mit vorhandener Bild-

Analysesoftware wurden die Z-Koordinaten innerhalb eines Patches und des entsprechenden Suchbereichs auf 8 bit skaliert. Da das Bewegungsverhalten des Gletschers lokal primär durch eine Translation quer zur Beobachtungsrichtung des Scanners geprägt ist, können Bewegungen durch eine einfache Kreuzkorrelation mit Subpixelschätzung bestimmt werden (SCHWALBE et al. 2008). Vertikalkomponenten in der Bewegung entsprechen dabei einem Helligkeitsunterschied zwischen Patches bei der Kreuzkorrelation mit Bilddaten und werden über die Mittelwerte der Höhe in den Patches zweier Epochen erfasst. Anhand der Zeitinformation für die Punkte beider Epochen kann anschließend aus der durch die Kreuzkorrelation bestimmten Translation eine Geschwindigkeit berechnet werden.

Ein recht aufwendiger Vorverarbeitungsschritt ergibt sich hier in der Bestimmung einer korrekten Zeitinformation für jeden Messpunkt. Angesichts einer Bewegung des Gletschers von bis zu 40 Metern pro Tag und einer Scazeit von mehreren Stunden können Fehler in der Zeitinformation erhebliche Fehler im Geschwindigkeitsfeld bewirken. Aus Gründen des Energiemanagements unter Expeditionsbedingungen wurden die Scans zum Teil in mehrere Teilscans unterteilt. Damit ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Zeitdifferenz zwischen den Teilscans und von Nullrichtungsfehlern. Ein aufwendiges Schema zur Bestimmung einer korrekten punktweisen Zeitinformation und der Eliminierung der Nullrichtungsfehler wird in (SCHWALBE et al. 2008) gezeigt.

Für den zweiten Ansatz ist es notwendig, den Gesamtscan des Gletschers in zahlreiche geeignete kleine Punktwolken zu unterteilen (Segmentierung), für die jeweils ein Bewegungsvektor ermittelt werden kann. Für zwei korrespondierende segmentierte Punktwolken aus zwei Aufnahmeepochen können dann mittels ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point – CHEN & MEDIONI 1991, BESL & MCKAY 1992) die Transformationsparameter bestimmt werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich im Scan Punkte auf einzelnen Eisstrukturen konzentrieren und diese Bereiche durch Scanschatten klar voneinander getrennt sind (siehe Abb. 5) bietet sich als Segmentierungsverfahren eine Clusteranalyse an. Eine weitere Mög-

lichkeit, besteht darin, die Ergebnisse des Kreuzkorrelationsbasierten Ansatzes zur Segmentierung zu nutzen. Wurde zu einem Patch aus Scanepoche 1 das korrespondierende Patch aus Scanepoche 2 gefunden, können die Punkte, die innerhalb dieser Patches liegen, verwendet werden, um deren Translationsparameter mittels ICP-Algorithmus genauer zu bestimmen. Vorteilhaft ist hier außerdem, dass die mittels des Kreuzkorrelationsbasierten Ansatzes bestimmten Translationen als Näherungswerte für die ICP-Auswertung genutzt werden können.

Im Rahmen einer Diplomarbeit (JUNKER 2008) wurde ermittelt, dass der ICP-Algorithmus in der Lage ist, die Translationsparameter mit einer Genauigkeit zu bestimmen, welche kleiner als der Punktabstand ist. Dies stellt eine Analogie zur Subpixelgenauigkeit bei bildbasierten Matchingverfahren und zur Genauigkeit beim Matching in TIN-Daten (MAAS 2000) dar. Da die Punktdichte der Scans mit zunehmender Entfernung abnimmt, können Bewegungsvektoren am Rand des Gletscherflusses (Entfernung zum Scanner ca. 1500 m) mit einer größeren Genauigkeit bestimmt werden, als in der Gletschermitte (Entfernung zum Scanner ca. 4000 m). Der mittlere Punktabstand in den segmentierten Punktwolken am Gletscherrand beträgt ca. 1 m, der mittlere Punktabstand in Punktwolken in der größten Entfernung zum Scanner ca. 3 m.

Zukünftige Arbeiten sollen weitere Möglichkeiten einer direkten und genauen Zuordnung auf Basis der Laserscannerdaten untersuchen, indem z.B. die Zuordnung zwischen zwei oder mehr Epochen durch Least-Squares-Matching in einer TIN-Struktur (Triangulated Irregular Network) der Punktwolke durchgeführt wird. Ansätze dazu werden in (MAAS 2000) und (AKCA 2007) gezeigt.

Eine auf den ersten Blick nahe liegende flächenbasierte Zuordnung im Polarkoordinatensystem des Scanners, bei der die Entfernung als Attribut im durch die beiden Richtungskomponenten gegebenen Raster verwendet wird, verbietet sich aufgrund der schrägen Visur, die aufgrund der Topographie der Gletscheroberfläche zu großen Diskontinuitäten in Tiefenrichtung und damit zu starken Schereffekten innerhalb der Suchbereiche führt.

4 Resultate

Abb. 6 zeigt das durch Kreuzkorrelation bestimmte Geschwindigkeitsfeld. Lücken sind bedingt durch Verdeckungen. Im rechten Teil der Abbildung ist der Übergang vom Toteis (dunkler Bereich) in den Hauptstrom des Gletschers und eine hohe Richtungsuniformität der Geschwindigkeitsvektoren im Hauptstrom zu erkennen. Der rechte Teil der Abbildung zeigt eine farbocodierte Überlagerung des Geschwindigkeitsfeldes auf eine 10 Tage zuvor aufgenommene Landsat-Aufnahme. Die Geschwindigkeiten betragen bis ca. 40 Meter pro Tag und bestätigen aktuelle Messungen (MAAS et al. 2008, ROSENAU 2008).

5 Ausblick

Die Auswertung multi-temporalen terrestrischer Laserscannerdaten kann – geeignete Topographie vorausgesetzt – einen wertvollen Beitrag zur glaziologischen Forschung an sich schnell bewegenden Gletschern liefern. Ober-

flächenmodelle im Bereich der Gletscherfront erlauben die Bestimmung der Gletscherfronthöhe und eine Analyse der Spaltenstruktur. Sie stellen zudem eine wertvolle Grundlage für die Georeferenzierung der Resultate der Verarbeitung terrestrisch aufgenommenen Bildsequenzen dar. Durch Verfahren der Zuordnung zwischen Punktwolken können 3D-Geschwindigkeitsfelder bestimmt werden. Im Vergleich zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aus terrestrischen Bildsequenzen bietet die Laserscanneraufnahme einige Vorteile: Die Daten liegen direkt dreidimensional vor, und die Aufnahme ist unabhängig von Beleuchtungsbedingungen und Oberflächentextur. Andererseits ist der instrumentelle Aufwand deutlich höher, und die technischen Daten aktueller Geräte setzen vielfältige Limitierungen. Als unter dem Aspekt der maximalen Reichweite geeignetes Gerät erwies sich der Riegl LPM-321, welcher allerdings eine geringe Messrate und eine relative große Strahldivergenz aufweist.

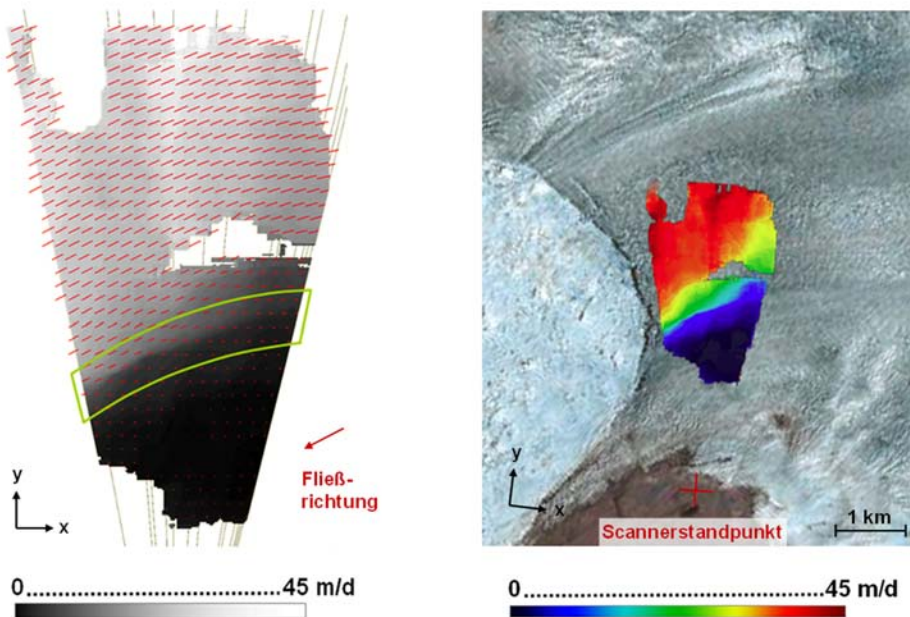


Abb. 6: Geschwindigkeitsfeld aus zwei aufeinanderfolgenden Laserscanneraufnahmen (rechts: überlagert auf aktuelle Landsat-Aufnahme).

Danksagung

Die Arbeiten am Jakobshavn Isbræ sowie die Entwicklung der Auswerteverfahren wurden durch die DFG unterstützt. Für die Ausleihe des Riegl LPM-321 für die 2007er Messkampagne am Jakobshavn Isbræ möchten wir der Firma Riegl herzlich danken.

Literatur

- ABDALATI, W. & KRABILL, W., 1999: Calculation of Ice Velocities in the Jakobshavn Isbræ Area using Airborne Laser Altimetry. – *Remote Sensing of Environment* **67**: 194–204.
- AKCA, D., 2007: Matching of 3D surfaces and their intensities. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **62** (2): 112–121.
- BAUER, A., 1968: Missions Aériennes de reconnaissance au Groenland 1957–1958. – Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland **173** (3).
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: A Method for Registration of 3-D Shapes. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14** (2): 239–256.
- CARBONELL, M. & BAUER, A., 1968: Exploitation des couvertures photographiques aériennes répétées du front des glaciers vélant dans Disko Bugt et Umanak Fjord, juin-juillet 1964. – Meddeleser om Grønland, Kommissionen for videnskabelige Undersøgelser i Grønland **173** (5).
- CHEN, Y. & MEDIONI, G., 1991: Object modeling by registration of multiple range images. – *IEEE International Conference on Robotics and Automation* **3**: 2724–2729.
- DIETRICH, R., MAAS, H.-G., BAESSLER, M., RÜLKE, A., RICHTER, A., SCHWALBE, E. & WESTFELD, P., 2007: Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations. – *Journal of Geophysical Research* **112** (f3): F03S21.
- ENGBELL, M., 1904: Undersøgelser og Opmaalinger ved Jakobshavns Isfjord og i Orpigsuit I Sommersen 1902. – Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland **4**.
- HAMMER, R., 1893: Undersøgelser ved Jakobshavns Isfjord og nærmeste Omegn i Vinteren 1879-1880. – Meddeleser om Grønland, Kommissionen for Ledelsen af de geologiske og geografiske Undersøgelser i Grønland **26**.
- JOUGHIN, I., ABDALATI, J. & FAHNESTOCK, M., 2004: Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. – *Nature* **432**: 608–610.
- JUNKER, S., 2008: Untersuchung zum Potential des ICP-Algorithmus bei der Auswertung von multi-temporalen terrestrischen Laserscannerdaten zur 3D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie. – Diplomarbeit, TU Dresden.
- MAAS, H.-G., 2000: Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **33** (3A): 548–555.
- MAAS, H.-G., DIETRICH, D., SCHWALBE, E., BÄSSLER, M. & WESTFELD, P., 2006: Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers in Grønland durch monokulare Bildsequenzanalyse. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2006** (1): 93–102.
- MAAS, H.-G., SCHWALBE, E., DIETRICH, R., BÄSSLER, M. & EWERT, H., 2008: Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B8): 1419–1424.
- ROSENAU, R., 2008: Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten grönländischer Gletscher mittels Feature Tracking in Satellitenbildern. – Diplomarbeit, TU Dresden.
- SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., DIETRICH, R. & EWERT, H., 2008: Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range laserscanner point clouds. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B5).
- WEIDICK, A., MIKKELSEN, N., MAYER, CHR., PODLECH, S., 2004: Jakobshavn Isbræ, West Greenland: The 2002–2003 collapse and nomination for the UNESCO World Heritage List. – *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* **4**: 85–88.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ELLEN SCHWALBE, Prof. Dr. habil. HANS-GERD MAAS, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstr. 10, D-01062 Dresden, Tel.: +49-351-463-32645, Fax: +49-351-463-37266, e-mail: {Ellen.Schwalbe, Hans-Gerd.Maas}@tu-dresden.de

Manuskript eingereicht: Juli 2008
 Angenommen: November 2008

Berichte von Veranstaltungen

8th International Scientific and Technical Conference “From imagery to map: digital photogrammetric technologies” vom 15.–18. September 2008 in Porec, Kroatien

From Monday, September 15 to Thursday, September 18, 2008 the Russian Photogrammetric Software Company RACURS held its annual Conference. This was the 8th event of this kind, and it was held in Porec, Croatia in a resort hotel in very pleasant surroundings.

The times are long gone, since photogrammetric hardware and software manufacturers have held such user conferences. Photogrammetric software is still being produced in central Europe, but successful larger commercial ventures have in the age of globalization all been bought up by global or American mother companies. Academic institutions are still participating in the software effort, but for various reasons they have generally never managed to become commercial entities.

It is professionally all the more commendable, that RACURS is taking over the former rich tradition of European photogrammetric hard- and software companies.

Like Intergraph in Huntsville, Alabama, like Leica and Erdas in Atlanta, Georgia, like BAE with SOCET SET in San Diego, California, like Inpho in Stuttgart for Trimble in USA, RACURS produces photogrammetric workstations and associated software, the “Photomod” system. It is a tool for all standard and automated stereo photogrammetric operations, such as image orientation, stereo viewing, aerial triangulation and its block adjustment, DEM generation, orthophoto production, mosaicking as well as manual feature extraction.

The new modules of Photomod presented at the Conference were “GCP Survey” for planning and field measurements of the ground control points directly in PHOTOMOD projects and StereoACAD, which permits stereo plotting in an AutoCAD Environment.

Not only scanned aerial photography, but also digital camera images, such as the DMC

and the UltraCam may be used for plotting, as well as the ADS40 with a special option. The software is also adapted to make use of high resolution satellite imagery, such as SPOT 5, IKONOS and others. Photomod also permits radar image processing through special modules including radar interferometric processing.

There were over 120 international participants at the conference. Most were Photomod users from the Russian Federation and from the neighbouring countries, such as Belarus, Bulgaria, Croatia, Czech Republic, Greece, Iran, Kazakhstan, Latvia, Lithuania, Serbia, and Turkey. In addition speakers were invited from Austria, France, Germany, India, Israel, Switzerland, and the U.K.

The Photomod content of the program was presented by V. ADROV, the CEO of the company and his capable staff: A. SECHIN, D. KOCHERGIN, A. ELIZAROV, and V. LAZAREVA. But these deliberations were concentrated on the third day in the so-called “MasterClass”.

The first two days were devoted to general themes of modern technology organized in four topics:

- mapping activities in different regions
- large format digital camera uses
- radar data processing
- space data processing

Topic 1: Mapping

1. GIS Sofia Bulgaria reported on a mapping project with 6900 photos covering 1467 km² with 10cm urban and 20cm rural GSD pixels.
2. In Belarus 49 districts have been mapped at scales 1:10 000 (rural) and 1:2000 (urban) for cadastral purposes.
3. For India Map World, Hyderabad reported on their 3D New Delhi project with a financial volume of 30M \$. First, Sanborn Mapping Company created a 1:2000 topographic base map. Then a cadastral information system was developed including

3D visualization. The project duration is one year.

4. G. KONECNY discussed the economic aspects of photogrammetric mapping: Labour intensive and costly line mapping has been, wherever possible, substituted by automated orthophoto mapping and DTM generation at 20% of the cost. Orthophoto technology lends itself to rapid updating tasks, while vector feature extraction still requires costly human operators. In globalization these operations are being outsourced from North America and Europe to partners in low cost labour countries, such as China and India. Globalization had still another effect: As the photogrammetric hardware/software industry sector with a global volume of less than 100 M \$ per year is really too small to matter economically, this sector is being bought up as a niche sector within the GIS/GPS-GNSS industry, which is predominantly in North American hands. RACURS remains as an independent European photogrammetric software manufacturer. But photogrammetric industry is still being challenged to produce international and governmental datasets for GEO and GMES for an economic sustainable monitoring of the planet.
5. In Lithuania a LIDAR project was combined with orthophoto production
6. In Yakutsk 4700 km² and in the Omsk region 68 000 km² have been covered by orthophotos 1:10 000 and 1:2000 for resource development.
7. Reports on orthophoto projects were given by JOVIC of the Croatian company Geofoto for the city of Narajok.
8. SINKOVA discussed orthophoto mapping for the Russian cadastre.
9. STRASHKO of Belarus talked on orthophotos for topo mapping.
10. BABEEVA of Novosibirsk reported on photomosaic experiences.
11. ZUNINO of Savona in Italy discussed flight results with a Rollei camera in Italy.

Topic 2: Digital Cameras

1. P. SCHREIBER of Leica, Heerbrugg, Switzerland described the development of the ADS80, which had recently been announced at the ISPRS Congress 2008 in Beijing.
2. E. MEDVEDEV of Geolidar introduced F. LEBERL, professor at the Technical University of Graz and former CEO of Vexcel (now part of Microsoft) as a guest speaker. His paper "3D geospatial data for the Internet" described Microsoft's use of "Virtual Earth" as a platform incorporating maps, orthophotos, and oblique imagery for the purposes of search, navigation, e-commerce and tourism. The new capabilities rely on digital aerial imagery (e.g. UltraCam), processing of highly overlapping imagery using petabytes of data in an automated process (SeaDragon and DragonFly), and high geometric accuracy achieved by in-flight GPS-GNSS and IMU. Apparently an automated way to extract facades for 3D city models is now available. The discussion clarified, that the details are contained in the dissertation of Andreas Klaus at the TU Graz. Unfortunately this University has blocked the public availability of this document for a period of three years.
3. SECHIN of RACURS discussed the various possibilities to generate images by digital cameras.
4. G. PETRIE of the University of Glasgow gave an excellent review on oblique aerial surveys, with special reference to Pictometry, which attempts to generate a systematic coverage of urban areas for emergency services and for 3D city models. Oblique imagery is a pre-world war established technology, which has recently been revived using digital cameras.
5. RAIZMAN from Israel reported on the Vision Map A3 system, with two rotating cameras that produce 27 double images at one rotation reaching a 104° wide opening angle for fast area coverage and for multiple station geometric restitution. Three such cameras exist in Israel.

Topic 3: Radar

1. The introductory paper was given by G. PETRIE, giving a historical account of Satellite imaging radar systems, such as ERS, Radarsat, JERS, Envisat, and SRTM.
2. R. LANZL of Infoterra reported on the TerraSAR X success and its image products (basic single look, ground range, orthorectified to generated DEM or to existing DEM) with the anticipation that Tandem X will generate a high accuracy global DTM.
3. VASILEYSKIJ of the NIIAS Space Technology Applications Centre in Moscow and SHUVALOV of Racurs showed applications of radar mapping and radar interferometry for Russian catastrophic events (landslides, Karst).
4. SHAGAROVA from Kazakhstan presented examples of oil spill monitoring by radar imagery in the Caspian Sea.
5. VICTORIA LAZAROVA reported about estimation of photo-interpretation properties of the TerraSAR-X imagery.
6. KAZARUMOV investigated the upheaval of oil and gas fields by radar interferometry in Western Siberia

Topic 4: Space Data Processing

The conference papers were concluded by a demonstration of applications of optical satellite imagery:

1. BARANOV discussed Gazprom environmental monitoring using space images.
2. TATIANA CHERNENKOVA showed forest ecology monitoring applications
3. BONYAD from Iran established a forest inventory using Landsat images.

Social Program

What would a conference be without a social program and an excursion? Everyday in the evening there were social events (games, dinners). In the cultural environment of Istria the excursion on the last day was one of the highlights with a visit to the Roman amphitheatre of Pula, the delicious sea food of the Lim Fjord and the charm of the city of Rovinj. This was

followed by a gala dinner, where the participants not only enjoyed food and the traditional Slavic drinks, but also appreciated the excellent dancing skills of the many Russian lady colleagues. The conference has not only succeeded in providing an excellent professional discussion forum, but it has also significantly contributed to the growth of friendly relations between Eastern and Western European professionals in photogrammetry, thanks to Racurs.

GOTTFRIED KONECNY, Hannover

10. Europäische Konferenz für Computer Vision (ECCV'08) vom 13.–16. Oktober in Marseille, Frankreich

Vom 13. bis zum 16. Oktober fand in Marseille, Frankreich die mit 850 Teilnehmern gut besuchte 10. Konferenz für Computer Vision ECCV'08 statt. Die Hauptkonferenz wurde im Vorfeld von Tutorials und mehreren Workshops im Anschluss begleitet.



Blick über den Hafen von Marseille

Hauptthemen der Konferenz waren Stereo, Modellierung von Personen und Gesichtern in Bildfolgen, Tracking- und Zuordnungsverfahren, Lernverfahren, Merkmale, Markov Random Fields, Segmentierung, maschinelle Photographie sowie Aktive Rekonstruktion.

Von den 871 eingereichten Beiträgen wurden in dem doppelt blinden Review-Prozess lediglich 40 für eine mündliche Präsentation und 203 für eine Posterpräsentation ausgewählt. Das entspricht einer Annahmquote

von 4,6% bzw. 23,3%. Durch diese starke Selektion war eine hohe Qualität der vorgestellten Arbeiten garantiert.



Das Auditorium

Als Gastredner war Prof. Jan Koenderink vom Department Physics of Man der Universität Utrecht geladen. Sein Vortrag mit dem Titel „Something Old, Something New, Something Borrowed, Something Blue“ behandelte Probleme der Geometrie und der Physik des Abbildungsvorgangs für die Rekonstruktion von Flächen und bestach durch die Plastizität der graphischen Darstellungen und den reichen Schatz an Erfahrungen im Bereich Computer Vision.

In den thematischen Sessions hatten die Preisträger der besten Aufsätze Gelegenheit ihre Arbeiten vorzustellen. Der Preis für den besten Aufsatz ging an GEREY HEITZ und DAPHNE KOLLER vom Department of Computer Science der Stanford University für „Learning Spatial Context: Using Stuff to Find Things“. MATTHEW B. BLASCHKO und CHRISTOPH H. LAMPERT vom Max Planck Institute for Biological Cybernetics in Tübingen erhielten für den Aufsatz „Learning to Localize Objects with Structured Output Regression“ den Nachwuchspreis. Erstmals wurde der KOENDERINK Preis für grundlegende Beiträge zur Computer Vision vergeben. Dieser Preis ist eine Auszeichnung für Veröffentlichungen auf der ECCV, die die Forschung über lange Zeit in besonderem Maße beeinflusst haben. Er ist vergleichbar mit dem LONGUET-HIGGINS-Preis der CVPR. In diesem Jahr wurden Aufsätze bis 1998 berücksichtigt. In Zukunft wird er beschränkt auf Veröffentlichungen der ECCV, die mindestens 10 Jahre alt sind. Die ersten Preisträger waren in diesem Jahr MICHAEL

ISARD und ANDREW BLAKE für ihren 1996 erschienen Aufsatz „Contour Tracking by Stochastic Propagation of Conditional Density“ sowie OLIVIER FAUGERAS, QUANG-TUAN LUONG und STEVE MAYBANK für den 1992 erschienen Beitrag „Camera self-calibration: theory and experiments“.



Viele Diskussionen bei den Postersessions

Es ist zu beobachten, dass viele der auf der Konferenz vorgestellten Beiträge von Gruppen verschiedener internationaler Institutionen erarbeitet wurden. Dies ist ein Indiz dafür, dass internationaler Austausch von Wissen, Kapazitäten und Fertigkeiten über Netzwerkarbeit die Qualität der Forschung entscheidend zu beeinflussen scheint. Inhaltlich sind die herausragenden Arbeiten dadurch gekennzeichnet, dass die eigenen Ergebnisse umfassend mit bestehenden und konkurrierenden Verfahren verglichen werden. Nur eigene Konzepte und Ergebnisse vorzustellen, wird offenbar durch den Begutachtungsprozess nicht unterstützt. Eine vollständige Bewertung von Verfahren ist nur durch gewissenhafte Vergleichsstudien möglich, wozu der Austausch der Methoden in Form von Quellcode wesentlich beiträgt.

Die nächste ECCV wird vom 5. bis 11. September 2010 in Hersonissos, Kreta, Griechenland stattfinden.

SUSANNE WENZEL, Bonn

Denkmäler3.de vom 5.–7. November 2008 in Essen

Vom 5.–7. November fand in Essen die Tagung Denkmäler3.de in der Zollverein School auf dem Gelände des Weltkulturerbes Zeche

Zollverein statt. Der Schwerpunkt der Veranstaltung lag auf den Themen Industriearchäologie und Aktuelle Archäologische Dokumentationsverfahren. Veranstaltet wurde die Tagung vom Labor für Photogrammetrie der Hochschule Bochum, dem i3mainz, dem Landschaftsverband Rheinland, dem Landschaftsverband Westfalen Lippe, den Arbeitskreisen Nahbereichsphotogrammetrie sowie Bildanalyse und Bildverstehen der DGPF, dem Institut für Denkmalschutz und Denkmalpflege/Stadtarchäologie der Stadt Essen und der Denkmalbehörde der Stadt Dortmund.

Die 110 Teilnehmer setzten sich vor allem aus Experten aus den Bereichen Architektur, Denkmalpflege, Archäologie und Geomatik zusammen. Am Mittwoch, den 5.11. begann das Programm mit der Fachausstellung, bei der verschiedene Firmen und Hochschulen ihre aktuellen Produkte, Projekte und Anwendungen demonstrierten, im einzelnen die Hochschule Bochum, das i3mainz und das Projekt RuhrZeiten, sowie Leica Geosystems, Riegl, Zoller & Fröhlich, Kubit, Lupos3D, Archbau und Bennert. Eine Ausstellung des Fotografen Dirk Thomas aus Moers, die verschiedene Objekte der Industriekultur zeigte, rundete die Ausstellung ab. Es folgte ein geführter Rundgang über das Gelände des Weltkulturerbes zur Besichtigung der Zeche Zollverein unter architektonischen Gesichtspunkten. Im Anschluss stellten einzelne Aussteller in Firmenvorträgen ihr Angebotsspektrum vor. Der Abend klang dann bei einem Emp-



Fachausstellung Denkmäler3.de in der Zollverein School (im Hintergrund) und Fachgespräch zwischen H.–J. Przybilla und J. Peipe (im Vordergrund)

fang und einem Willkommensgruß des Essener Bürgermeisters Herrn ROLF FLISS aus.

Die Veranstaltung wurde am Donnerstag, den 6.11. von den Veranstaltern offiziell eröffnet, wobei Prof. Dr. JÜRGEN KUNOW, Leiter des Rheinischen Amtes für Bodendenkmalpflege, die Grußworte des Landschaftsverbandes Rheinland, und Prof. Dr.–Ing. THOMAS NIEDMENNINGER, Vizepräsident für Lehre, Studium und Studienreform die Grußworte der Hochschule Bochum überbrachte. Im anschließenden Vortragsprogramm lagen die Schwerpunkte auf der Industriearchäologie, insbesondere wurde nach einer ersten Einführungssession auf Räumliche Informationssysteme und die Verwaltung und Nutzung erfasster industrie-archäologischer Daten eingegangen. Das Projekt RIO (Räumliches Informationssystem zur Erfassung, Dokumentation und Analyse industriearchäologischer Objekte) der HS Bochum und FH Mainz (Förderung im Rahmen des FHprofUnd-Programms des BMBF) wurde in mehreren Vorträgen unter verschiedenen Aspekten beleuchtet. Es diente als Beispiel für neue Ansätze der Dokumentation mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) und Luftbildern (A. GRÜNKEMEIER) und der Modellierung industriearchäologischen Wissens unter Berücksichtigung des Raumbegzugs mit Ontologien (F. BOOCHS). Einen interessanten Einblick in den Entwicklungsstand des 3D-Informationssystems CISAR der TU Cottbus gab F. HENZE. In der letzten Session des Tages wurde das Thema Industriearchäologie noch einmal aus Sicht der Bodendenkmalpflege (M. VOLLMER-KÖNIG) und anhand verschiedener Projekte, beispielsweise der Präsentation der Zeche Nachtigall in Witten (O. SCHMIDT-RUTSCH) vertieft.

Am Freitag, den 7.11. begann das Vortragsprogramm mit zwei Sessions zu den Themen Archäologische Dokumentation – Aufnahmeverfahren und Visualisierung. Im Bereich der Aufnahmeverfahren stand vor allem das terrestrische Laserscanning im Vordergrund (M. SCHAICH, C. BRAND), jedoch wurde auch auf photogrammetrische und hydrographische Messmethoden (M. SAUERBIER, A. SAUER) eingegangen. Im Themenbereich Visualisierung stellte zunächst G. POMASKA die Möglichkeiten interaktiver Darstellung mittels X3D vor, bevor C. ACEVEDO PARDO mit der an der Haf-

City Universität Hamburg entwickelten 3D-Software ViewDSGK3D, H. BRINK-KLOKE mit der Google-Earth-Visualisierung von Ruhr-Zeiten und T. JEDRZEJAS mit der Modellierung und Visualisierung der mittelalterlichen Stadtmodelle von Duisburg drei beeindruckende Projekte vorstellten. In der abschließenden Session gab u.a. T. KERSTEN einen interessanten Überblick über die Dokumentation der Moai auf der Osterinsel mittels terrestrischem Laserscanning.

In der anschließenden Podiumsdiskussion wurde zunächst diskutiert, inwieweit moderne Messverfahren wie Laserscanning bereits für den Praxiseinsatz geeignet sind. Hierbei verwies H.-J. PRZYBILLA auf die Tatsache, dass Laserscanning bereits seit einigen Jahren in vielen Anwendungsgebieten erfolgreich eingesetzt wird. Von mehreren Teilnehmern wurde die Entwicklung von Standards für die Aufnahme von Bodendenkmälern und anderen Industrieobjekten mit TLS gefordert.

Die Tagung wurde durch eine zweite Besichtigung der Zeche Zollverein, diesmal unter industriearchäologischen Aspekten, abgeschlossen.

Als Fazit dieser Tagung kann festgestellt werden, dass es sich bei Denkmäler3.de um ein gelungenes Forum aller Beteiligten im Bereich der Industriearchäologie, sowohl aus der Geomatik und verwandten technischen Disziplinen, als auch aus Archäologie und Architektur handelte. Die vielen angeregten Diskussionen im Anschluss an die Vorträge und in den Kaffeepausen belegen, dass eine solche gemeinsame Veranstaltung wichtig ist, um einerseits moderne Technologien in der archäologischen Praxis zu etablieren und andererseits das Verständnis für die archäologischen Bedürfnisse auf Seiten der technischen Disziplinen zu intensivieren. Die Beiträge stehen als PDF-Dokumente auf der Website www.Denkmäler3.de zum Download zur Verfügung.

MARTIN SAUERBIER, Zürich

ISDE Summit „Digital Earth Summit on Geoinformatics: Tools for Global Change Research“ vom 12.–14. November in Potsdam

Vom 12.–14. November fand im Wissenschaftspark Albert Einstein in Potsdam der ISDE Summit *“Digital Earth Summit on Geoinformatics: Tools for Global Change Research“* statt. Veranstalter waren die Gesellschaft für Geoinformatik (GfGI) sowie die „International Society for Digital Earth“ (ISDE). Als Co-Veranstalter fungierten das GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ), das Institut für Klimafolgenforschung Potsdam (PIK) und das Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) der Universität Osnabrück. Großzügig unterstützt wurde die Veranstaltung von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und den Sponsoren „*Environmental Systems Research Institute*“ (ESRI) sowie dem „*Joint Research Centre*“ (JRC) der Europäischen Kommission. Anwesend waren über 100 internationale Teilnehmer aus annähernd 20 unterschiedlichen Nationen.

Das Programm bestand aus insgesamt 48 Vorträgen ausgezeichneter Wissenschaftler aus den Bereichen Global Change Forschung, Geodateninfrastrukturen, Digital Earth Initiativen, Erdbeobachtungsaktivitäten und Geoinformatik. Unter den insgesamt zehn Keynote-Sprechern stellte Prof. Dr. MICHAEL GOODCHILD (University of California, Santa Barbara/USA) den aktuellen Stand der Geoinformatik-Forschung dar, Prof. Dr. MOJIB LATIF (IFM Geomar) sprach zum Thema Klimawandel im 20. und 21. Jahrhundert, ALESSANDRO ANNONI (JRC) berichtete über die Rolle von Geodateninfrastrukturen zur Analyse von Umweltveränderungen und Prof. Dr. DIETMAR GRÜNREICH (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) referierte über die Verbindung zwischen Politik und GDI.

Neben den hochwertigen Vorträgen fand ein interaktiver Posterwettbewerb statt. Den ersten Preis – ausgezeichnet mit 300 Euro – gewann Dr. SERGE SHUMILOV vom Institut für Informatik III der Universität Bonn.

Erstmals wurde eine internationale Konferenz durchgeführt, in welcher Wissenschaftler aus Digital Earth Initiativen und Global Change Forschung gemeinsam Konzepte und

Werkzeuge zur Lösung heutiger sowie kommender Umweltprobleme präsentierten. Insbesondere zeigten sich anwesende Wissenschaftler der Global Change Forschung beeindruckt über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten geographischer Informationssysteme und angelegter Technologien in der Umweltforschung. Besonders zufrieden zeigt sich der Summit Chair Prof. Dr. MANFRED EHLERS (zugleich Präsident der Gesellschaft für Geoinformatik): „Der hohe Zuspruch zeigt, dass die Kombination aus Global Change Forschung und Geoinformatik voll im Trend liegt. In der Zukunft ist eine weitere Zusammenarbeit zu erwarten.“

Den Abschluss der dreitägigen Tagung stellte eine hochinteressante Podiumsdiskussion mit vier eingeladenen Vertretern beider Forschungsdisziplinen dar. Dr. SIEGFRIED SCHUBERT (Global Modeling & Assimilation Office, NASA/Goddard Space Flight Center, USA), Prof. Dr. MICHAEL GOODCHILD, Dr. MICHAEL BÖTTINGER und Dr. PETER WOODGATE (Cooperative Research Centre for Spatial Information, Australia) stellten sich den Fragen von Prof. Dr. MANFRED EHLERS. In der Diskussion wurde auf das zukünftige Problem der Datenspeicherung aufmerksam gemacht. Es wurde betont, dass es sehr wichtig sei, zur Lösung künftiger Probleme auf einen historisch

gewachsenen und vollständigen Datenpool zugreifen zu können. Zudem wurde hervorgehoben, dass ein allgemeiner Zugang auf spezifische Geodaten wichtig sei. In diesem Zusammenhang äußerte MICHAEL GOODCHILD auch die Wichtigkeit eines leistungsfähigen Open Source Digital Earth Projektes (mehrfach wurde geäußert, dass „NASA World Wind“ in der Zukunft an Bedeutung gewinnen könnte). Betont wurde zudem, dass eventuelle Unsicherheiten bei Geodaten (in Bezug auf Genauigkeit und Aktualität) ein Problem darstellen könnten. Auch in diesem Sektor müssten in der Zukunft Maßnahmen stattfinden, allerdings bestünde hierbei letztlich immer auch eine Abhängigkeit von politischen Entscheidungsträgern.

Alle Beteiligten sprachen sich für weitere gemeinsame Aktivitäten aus. Als nächsten Schritt wird die Gesellschaft für Geoinformatik im kommenden Jahr einen Workshop veranstalten, in welchem sich Entwickler von Softwaretools der beiden Forschungssektoren austauschen werden.

Die Beiträge des ISDE Summit werden auf der Homepage www.isde-summit-2008.org Interessierten zur Verfügung gestellt.

KAI BEHNCKE & FLORIAN HILLEN, Osnabrück

Mitteilungen

Laserscanning im Deutschen Markscheidewesen

Der Deutsche Markscheider-Verein e.V. (DMV) gibt Grundsätze zum Einsatz von luftgestützten und terrestrischen Laserscannerverfahren im Bergbau heraus.

In den letzten Jahren wurde die Technologie des Laserscannings deutlich weiterentwickelt und hat mit luftgestützten (Flugzeug, Helikopter) und terrestrischen Verfahren zunehmend Eingang in die Vermessung, auch für Aufgabenstellungen in Bergbau und Rohstoffgewinnung, gefunden. Zur Verdeutlichung der Potentiale der Technologie für Bergbau und Roh-

stoffwirtschaft sowie zur Vereinbarkeit mit den Bestimmungen der Markscheider-Bergverordnung (MarschBergV) hat der DMV die „Grundsätze zum Einsatz von luftgestützten und terrestrischen Laserscannerverfahren im Bergbau“ erarbeitet.

Diese Grundsätze geben den Anwendern und verantwortlichen Personen in der betrieblichen und behördlichen Praxis des Bergbaus und der unter Bergaufsicht stehenden Rohstoffgewinnungsbetrieben grundlegende Informationen zu den Laserscannerverfahren und ihren möglichen Einsatzgebieten. Dabei wird auf die Anwendung von Laserscannermessungen für gesetzlich und behördlich vorgeschriebene markscheiderische Aufgaben,

z. B. Übernahme von Messergebnissen in das gem. § 63 BBergG zu führende Risswerk oder Beobachtung der Oberfläche nach § 125 BBergG, und auf besondere betriebliche Nutzungen eingegangen.

Der DMV hatte im Herbst 2006 eine ad-hoc-Arbeitsgruppe eingesetzt, bestehend aus Anwendern und Anbietern von Laserscannerverfahren im Bergbau sowie einem Vertreter der Bergbehörden. Innerhalb eines Jahres wurden diese Grundsätze dann erarbeitet und anschließend mit dem Arbeitskreis Marktscheidewesen des Länderausschusses Bergbau, dem Koordinierungsgremium auf Ebene der Bergbehörden, abgestimmt.

Der DMV hat die Grundsätze nun herausgegeben und auf seiner Homepage veröffent-

licht: www.dmv-ev.de/upload/pdf/Laserscanner_Grundsaeetze_Endversion_2008_06_26.pdf.

Damit steht für die betriebliche und behördliche Praxis ein Dokument zur Verfügung, das den derzeitigen Stand der Technik verdeutlicht und die Anwendung von Laserscannerverfahren in Bergbau und Rohstoffwirtschaft unterstützt.

Durch die Beachtung der Grundsätze kann der Markscheider bzw. eine anerkannte Person sicherstellen, dass er/sie die Anforderungen der MarktschBergV, insbesondere hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit von Messungen, einhält.

NORBERT BENECKE, Essen

Buchbesprechung

ADRIJANA CAR, GERALD GRIESEBNER, JOSEF STROBL (HRSG.), 2008: Geospatial Crossroads @ GI_Forum. Proceedings of the First Geoinformatics Forum Salzburg, Herbert Wichmann Verlag

Das Buch stellt die Proceedings des gleichnamigen Forums in Salzburg, anlässlich der AGIT Tagung 2008 dar. Der Tagungsband, mit seinen 39 englischsprachigen Einzelbeiträgen unterschiedlicher Länge und Tiefe umfasst eine sehr große Breite verschiedenster Themen mit einem GIS Bezug.

Die größte Schwachstelle des Tagungsbandes ist, dass die Artikel in alphabetischer Reihenfolge des Erstautors aneinander gereiht sind. Hier hätten sich die Herausgeber etwas Mühe geben können, denn es ist für den Leser sehr schwierig, thematisch ähnliche Beiträge zu finden. Da diese, wie erwähnt, in alle Richtungen streuen, muss man sich sehr intensiv mit dem Inhaltsverzeichnis auseinandersetzen, um an die für einen relevanten Artikel zu kommen. Wenn man den Beitrag gefunden hat, hilft der Review-Status eines Papers ein bisschen, um die Qualität des Beitrags abschätzen zu können.

Inhaltlich enthält das Buch neun Artikel, die sich mit methodischen Grundlagen, fehlertheoretischen Betrachtungen und GIS-Analysemethoden beschäftigen. Z. B. behandelt der Artikel von F. ALBRECHT Genauigkeitsuntersuchungen objektorientierter Klassifikationsverfahren. H. HOCHMAIR und G. NARVATIL berichten über Analyse- und Optimierungsansätze zur GIS-gestützten Ermittlung von landschaftlich ansprechenden Straßen für Navigationssysteme.

Standards im GIS Bereich sind mit fünf Artikeln ein weiteres Thema des Buches. So stellt der Beitrag von J. ALBRECHT eine Liste von Anforderungen für Geo-Ontologiewerkzeuge auf. G. JOOS und L. GIETLER vergleichen verschiedene Standards zur Verwaltung von Metadaten.

Die Visualisierung steht in zwei Artikeln im Vordergrund. C. AUBRECHT, M. KÖSTL und K. STEINACHER berichten z. B. über das Problem, dass herkömmliche GIS-Programme für die Abbildung der Realität sehr gut geeignet sind, planerische Konzepte und Entwürfe jedoch schwer visualisieren können.

Die Vorstellung von angewandten GIS-Projekten und Konzepten macht mit 23 Artikeln den Schwerpunkt des Buches aus. Dabei beschreiben 16 Beiträge internationale Frage-

stellungen und sieben Beiträge berichten über Projekte im deutschsprachigen Raum. Aufgrund der Fülle der Themen soll an dieser Stelle die Spannung für den Leser gewahrt bleiben. Nur so viel: Die Titel der Beiträge reichen vom Aufbau eines Internet GIS WaldIS als Bestandteil einer GDI in Deutschland bis hin zur GIS basierten Berechnungen und Darstellung der Mächtigkeit eines Aquifers in der libyschen Wüste. Das Thema GIS wird in den Beiträgen sehr weit definiert.

Die Stärke des Tagungsbands besteht darin, GIS-Anwendungen in Themen vorzustellen, in denen GIS üblicherweise selten eingesetzt wird. Als Beispiel sei der Beitrag von F. FISCHER genannt, der Location Based Services (LBS) als Werkzeug sozialer Netzwerke im Internet untersucht. Mein Fazit: Ein interessantes Buch für die Universitätsbibliothek, das verdeutlicht, in welcher Breite heutzutage GIS eingesetzt wird bzw. welche Bedeutung GIS haben kann.

GÖRRES GRENZDÖRFFER, ROSTOCK

Veranstaltungskalender

2009

3.–5. März: 14. **Münchner Fortbildungseminar Geoinformationssysteme in München**. www.rtg.bv.tum.de

3.–5. März: **GeoViz Hamburg** an der Hafencity Universität **Hamburg**. Informationen: Prof. Dr. Jochen Schiewe: e-mail jochen.schiewe@hcu-hamburg.de oder www.geovisualisierung.net/geoviz_hamburg/

3.–5. März: 8th **International Geomatic Week** in **Barcelona**. www.setmana-geomatiga.org/front/en/

16.–19. März: **ISPRS WG VIII/12, 6th EAR-SeL SIG IS Workshop "IMAGING SPECTROSCOPY: Imaging Spectroscopy: Innovative tool for scientific & commercial environmental applications"** in **Tel-Aviv, Israel**. Auskünfte: Prof. Eyal Ben-Dor, e-mail: ben-dor@post.tau.ac.il, www.earsel6th.tau.ac.il

24.–25. März: **GI-TAGE-NORD 2009** in **Osnabrück**. www.gi-tage-nord.de

24.–26. März: **100 Jahre DGPF-Festveranstaltung** und 29. **Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF** in **Jena**. www.dgpf.de/neu/jahrestagung/informationen.htm

31. März – 2. April: **GEOINFORMATIK 2009**: Nutzen der Geoinformatik für Umwelt und Gesellschaft an der Universität **Osnabrück**. www.geoinformatik2009.de

4.–8. Mai: 7th **IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation** in **Berlin**. www.dlr.de/iaa.symp

20.–22. Mai: 5th **GRSS/ WG III/5 Workshop on Data Fusion & Remote Sensing over Urban Areas (URBAN 2009)** in **Shanghai, China**. www.urban-remote-sensing-2009.org.cn

2.–5. Juni: 12th **AGILE International Conference on Geographic Information Science - Advances in GIScience** und Hannover Workshop **"High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information"** an der Leibniz Universität **Hannover**, www.agile2009.de und www.ipi.uni-hannover.de/ipi_ws_2009.html

15.–19. Juni: **GSDI 11 World Conference "Spatial Data Infrastructure Convergence: Building SDI Bridges to Address Global Challenges"** in **Rotterdam, Niederlande**. gsdi.org/gsdil1/

16. Juni: 3. **Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning** an der Hafencity Universität **Hamburg**. www.hcu-hamburg.de/geomatik/tls2009/

24.–26. Juni: 27th **Urban Data Management Symposium** in **Ljubljana**, Slowenien. www.udms.net

1.–2. Juli: 9th **Conference on Optical 3-D Measurement Techniques** in **Wien**. info.tuwien.ac.at/ingeo/optical3d/

21.–24. Juli: 6th **International Symposium on Mobile Mapping Technology – MMT'09** in

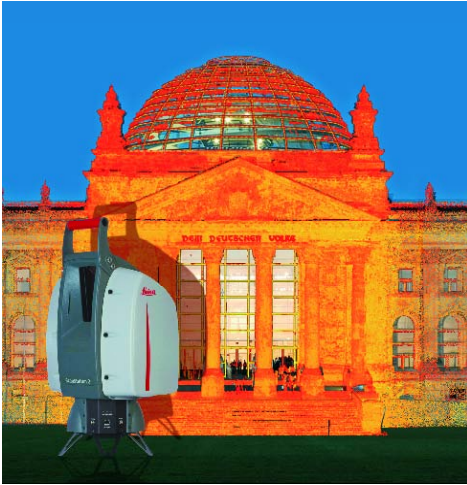
Presidente Prudente, Brasil. www.fct.unesp.br/eventos/simposio/mmt09/ingles/

7.–11. September: 52. **Photogrammetrische Woche 2009** in **Stuttgart**. www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/

29. September – 2. Oktober: **ICCV2009 – International Conference on Computer Vision** in **Kyoto**, Japan. www.iccv2009.org

Zum Titelbild

High-Definition Surveying von Leica Geosystems



High-Definition Surveying (HDS) von Leica Geosystems ist eine komplette 3D-Laserscanning-Systemlösung. Neben präzisen Sensoren bietet HDS eine durchgängige, klar strukturierte und einfach zu bedienende Software. Je nach den Bedürfnissen der Anwender werden verschiedene Software-Pakete aus dem Hause Leica Geosystems angeboten.

Anwendungen finden sich besonders im Bereich Architektur und Denkmalpflege. Das klassische Fassadenaufmaß wie hier am Beispiel Reichstagsgebäude dargestellt, erfordert eine hoch auflösende und verformungsgerechte Aufnahme des Bestands. Ergänzend hierzu erfolgt das Innenaufmaß. Nach der Verknüpfung und Georeferenzierung der einzelnen Standpunkte entsteht ein vollständiges dreidimensionales Abbild des Gebäudes. Die Auswertung erfolgt dann meist direkt im CAD Zielsystem. Der klassische Fassadenplan kann mithilfe der CAD Funktionen gezeichnet werden, zusätzlich entstehen Grund- und Aufrisse.

Unter Verwendung der entsprechenden Architektur-Software entsteht in einem weiteren Schritt ein intelligentes 3D Modell.

Hardware:

Der HDS6000 ist das erste kompakte Scanning System im Markt. Der extrem schnelle und genaue Phasenvergleich-Scanner misst mit bis zu 500.000 Punkten pro Sek. bei einer Reichweite von 79 m. Die auf dem Titelblatt abgebildete ScanStation 2 vertritt die Gruppe der Laufzeit-Scanner. Die ScanStation 2 besticht durch überdurchschnittliche Einzelpunktgenauigkeiten. Die Stärke der HDS Lösungen liegt in der Kombinierbarkeit beider Systeme.

Software:

Es stehen verschiedene Cyclone Module zur Verfügung. Das Cyclone MODEL Modul ist für die eigentliche Auswertung der Daten zuständig und bietet viele verschiedene Funktionen zur Bearbeitung von Punktwolken. Eine weitere Auswerteschiene ist das Anhängen der Cyclone Datenbank an gängige CAD Programme mit der sehr beliebten CloudWorx Software für AutoCAD, und MicroStation.

Eine weitere Möglichkeit die reichhaltigen 3D Laserscannerdaten bereitzustellen, bietet das kostenlose Plugin TruView für den Microsoft Internet Explorer. Eine Datenbank mit verschiedenen Scannerstandpunkten kann aus Cyclone heraus mit dem PUBLISHER publiziert werden. Daraus entstehen die TruViews.

Diese können dann im Internet Explorer über das einmal zu installierende Plugin dargestellt werden. Zusätzlich kann die Umgebung fotorealistisch betrachtet werden. Darüber hinaus kann in diesen Daten auch gemessen werden.

Weitere Informationen:

Dipl.-Ing. HARALD SAEGER
 Leica Geosystems GmbH Vertrieb
 Triebstraße 14, D-80993 München
 Telefon +49 89 1498100
www.leica-geosystems.de

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
 AICON 3D Systems GmbH
 aphos Leipzig AG
 Applanix Corporation
 Becker & Keller, Beratende Ingenieure
 Bernhard Harzer Verlag GmbH
 Blom Deutschland GmbH
 Brockmann-Consult
 BSF Luftbild GmbH
 Büro Immekus
 CGI Systems GmbH
 con terra GmbH
 CONPIE GmbH
 Creaso GmbH
 DEFINIENS AG
 DELPHI IMM GmbH
 Deutsches Bergbau-Museum
 J. Linsinger ZT-GmbH
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
 ESRI Geoinformatik GmbH
 EUROPEAN SPACE IMAGING
 Erosense GmbH
 fokus GmbH
 fpi Fuchs Ingenieure GmbH
 FPK Ingenieurgesellschaft mbH
 g.on experience gmbh
 GAF GmbH
 GeoCad GmbH
 GeoCart Herten GmbH
 GeoContent GmbH
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
 GEOSPACE Beckel GmbH
 GEOSYSTEMS GmbH
 GGS – Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
 GIP Geoinformatics & Photogrammetric Engineering
 Hansa Luftbild AG
 Herbert Wichmann Verlag Hüthig GmbH
 IGI – Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
 ILV Ing.-büro für Luftbildausw. und Vermessung
 Imetric 3D GmbH
 Dr. H. Carls Luftbilddatenbank
 Inpho GmbH
 Intergraph GmbH, Geschäftsbereich Z/I Imaging
 INVERS – Industrievermessung & Systeme
 Jena-Optronik GmbH
 Johan Piedfort Photogrammétrie
 KAZ Bildmess GmbH

Leica Geosystems GmbH
 Luftbild Brandenburg GmbH
 MAPS geosystems GmbH
 Messbildstelle GmbH
 Microsoft Photogrammetry
 PHOENICS GmbH
 PMS – Photo Mess Systeme AG
 Rollei Metric GmbH
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Photogrammetrie
 technet GmbH
 TERRA-Bildmessflug GmbH & Co.
 TerraVista Umweltdaten GmbH
 TopoSys GmbH
 TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH

Behörden

Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
 Amt für ländliche Räume Husum
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Bundesmin. für Ern., Landw. und Verbraucherschutz
 DB Netz AG
 Hess. LA für Bodenmanagement und Geoinformation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Inst. für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 Landesbetrieb Geoinformation und Verm., Hamburg
 Landesvermessung und Geobasisinformation Nieders.
 Landesvermessungsamt Baden-Württemberg
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungsprä. Stuttgart, LA für Flurneuordnung
 Regierungsprä. Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31
 Stadt Düsseldorf, Vermessungs- und Katasteramt
 Stadt Köln, Amt für Liegensch., Verm. und Kataster
 Stadt Wuppertal, Verm., Katasteramt und Geodaten
 Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde
 HS Bochum, FB Vermessungs und Geoinformatik
 FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation

FH Karlsruhe, FB Geoinformationswesen
FH Mainz, Inst. f. Raumbezogene Informations-
und Messtechnik
FH Oldenburg, Inst. f. Angewandte Photogramme-
trie und Geoinformatik
HCU HafenCity Uni Hamburg, Department
Geomatik
HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartogra-
phie
Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut
RWTH Aachen, Geodätisches Institut
TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
TU Braunschweig, Inst. für Geodäsie und Photogr.
TU Clausthal, Inst. für Geotechnik und Mark-
scheidew.
TU Darmstadt, Inst. für Photogrammetrie und
Kartogr.
TU Dresden, Inst. für Photogrammetrie und
Fernerk.

TU Freiberg, Inst. für Geologie, RSG
TU München, FG Photogrammetrie und
Fernerk.
TU Wien, Inst. für Photogrammetrie und
Fernerk.
Uni Bonn, Inst. für Photogrammetrie
Uni Göttingen, Inst. für Waldinv. und Waldwachs-
tum
Uni Hannover, Inst. für Kartogr. und Geoinforma-
tik
Uni Hannover, Inst. für Photogrammetrie und
GeoInf.
Uni Heidelberg, IWR Interdis. Zentr. f. Wiss.
Rechnen
Uni Karlsruhe, Inst. für Photogrammetrie und
Fernerk.
Uni Kiel, Geographisches Institut
Uni zu Köln, Geographisches Institut
Uni Stuttgart, Inst. für Photogrammetrie
Uni Würzburg, Geographisches Institut