

— | | —

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Journal for Photogrammetry, Remote Sensing
and Geoinformation Science

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

Jahrgang 2015, Heft 3

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse

Schriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Prof. Dr. techn. Franz Rottensteiner,
Prof. Dr. rer. nat. Christopher Conrad, Prof. Dr. rer. nat. Lars
Bernard und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

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



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2015

— | | —



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:

© 2015 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsident: Prof. Dr. Thomas Kolbe, Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel. +49-89-289-23888
Geschäftsstelle: Tanja Nyc, c/o Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel.: +49-89-289-22578, e-mail: geschaeftsstelle@dgpf.de

Published by: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0, Fax: +49-711 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 / e-ISSN 2363-7145

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition

Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik, Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg, Germany, e-mail: kresse@hs-nb.de

Schriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe, Germany, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de, Prof. Dr. techn. Franz Rottensteiner, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, Germany, e-mail: rottensteiner@ipi.uni-hannover.de, Prof. Dr. rer. nat. Christopher Conrad, Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie, Oswald-Külpe-Weg 86, 97074 Würzburg, Germany, e-mail: christopher.conrad@uni-wuerzburg.de, Prof. Dr. rer. nat. Lars Bernard, Technische Universität Dresden, Fachrichtung Geowissenschaften, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, Germany, e-mail: lars.bernard@tu-dresden.de, und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam, Germany, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 249,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im regulären Subskriptionspreis enthalten.

Anzeigenverwaltung: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0; Fax: +49-711 351456-99.

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

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, 76227 Karlsruhe, Germany, Tel.: +49-721 944020, Fax: +49-721 9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

Printed in Germany by Tutte Druckerei & Verlagsservice GmbH, 94121 Salzweg, Germany.

PFG – Jahrgang 2015, Heft 3 Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

JÓZKÓW, G., TOTH, C., QUIRK, M. & GREJNER-BRZEZINSKA, D.: Study on Sensor Level LiDAR Waveform Data Compression Using JPEG-2000 Standard Multi-Component Transform	201
SHUNYI, Z., RONGYONG, H., ZHENG, W. & JIAN, L.: Reassembling 3D Thin Fragments of Unknown Geometry in Cultural Heritage	215
BUDDENBAUM, H. & HILL, J.: PROSPECT Inversions of Leaf Laboratory Imaging Spectroscopy – A Comparison of Spectral Range and Inversion Technique Influences.	231
LAMPRECHT, S., STOFFELS, J. & UDELHOVEN, T.: VecTree – Konzepte zur 3D Modellierung von Laubbäumen aus terrestrischem Lidar	241

Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen	
14. Oldenburger 3D-Tage, 4. und 5. Februar 2015	257
Hochschulnachrichten	
Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation von Tobias Strauß	262
Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation von Stephan Hilgert.	262
Universität der Bundeswehr, München, Dissertation von Andreas Kuhn	263
In eigener Sache	264
Veranstaltungskalender	265
Korporative Mitglieder	267

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





Study on Sensor Level LiDAR Waveform Data Compression Using JPEG-2000 Standard Multi-Component Transform

GRZEGORZ JÓŻKÓW, CHARLES TOTH, Columbus, OH, USA, MIHAELA QUIRK, Washington D.C., USA & DOROTA GREJNER-BRZEZINSKA, Columbus, OH, USA

Keywords: LiDAR, full-waveform, compression, JPEG-2000 Standard, decorrelation, performance analysis

Summary: In contrast to LiDAR data provided by discrete return systems, full waveform LiDAR data (FWD) improve the quality of products and extend the possibilities of their application. Beside evident benefits, FWD imposes strong requirements on the sensor acquisition and storage hardware. At the moment, there is little effort reported on sensor level waveform data compression. Vendor specified waveform data formats are generally not published for the users and do not mention compression options. Since the recorded waveform is intrinsically noisy, there is less practical need to use lossless compression methods. As long as the properties of FWD are preserved, in other words, as long as it is possible to extract the same FWD features, and the compression noise is below or comparable to the noise of the signal, lossy compression methods are suitable. Such compression of FWD was studied in previous work where waveforms were compressed individually or in groups forming images, which is considered as 1D and 2D compression, respectively. This work presents a strategy for FWD compression that is based on multi-component transforms, which is included in JPEG-2000 Standard Part 2. This extension to JPEG-2000 Standard exploits the 3D correlation between waveform samples and allows compressing waveform cubes without organizing samples. The results of this study indicate that the removal of data redundancies in all three dimensions results in slightly better compression performance than using 1D or 2D approaches. More importantly, the user has the flexibility to decide on how much the data should be compressed or what level of the reconstruction error is allowed. Besides JPEG-2000 compression, this investigation includes experiments with additional data decorrelators, such as Karhunen-Loève transform and wavelet transform. The conclusion of this study is that the JPEG-2000 Standard is an effective method for FWD compression of waveform cubes, resulting in high compression ratios and low data degradation.

Zusammenfassung: Untersuchung zur Kompression von Full Waveform LiDAR-Daten auf Sensorebene unter Verwendung der JPEG-2000 Multi-Komponenten-Transformation. Im Gegensatz zu den üblichen Discrete Return Systemen können Full Waveform LiDAR-Daten (FWD) die Qualität der Produkte verbessern und erweitern somit ihre Anwendungsmöglichkeiten. Neben diesen offensichtlichen Vorteilen stellen FWD sehr hohe Anforderungen an den Sensoraufbau und die verfügbare Speicherkapazität. Bisher gibt es noch wenige Arbeiten zur Datenkompression der FWD-Daten auf Sensorebene. Herstellerspezifische Full Waveform Datenformate werden in aller Regel nicht dem Anwender zur Verfügung gestellt und erwähnen keine Möglichkeit der Datenkompression. Da die aufgetzeichneten FWD ohnehin verrauscht sind, ist es nicht nötig, eine verlustfreie Kompression zu verwenden. Solange die Eigenschaften der FWD erhalten bleiben, das heißt, dieselben FWD-Merkmale extrahiert werden können und das Kompressionsrauschen unter oder vergleichbar dem Signalausrauschen ist, können auch verlustbehaftete Kompressionsmethoden genutzt werden. Diese Art der FWD-Kompression ist aus vorherigen Studien als 1D- oder 2D-Kompression bekannt, bei denen einzelne oder Gruppen von Wellenformen als Bilder interpretiert und komprimiert werden. In dieser Arbeit wird eine Strategie zur FWD-Kompression präsentiert, welche auf einer Multikomponenten-Transformation basiert und im JPEG-2000 Standard Teil 2 beschrieben ist. Diese ist eine Erweiterung zum JPEG-2000-Standard, die die 3D-Korrelation zwischen Waveform-Proben auswertet und damit die Kompression eines kompletten Waveform-Kubus ohne Proben als Startwerte erlaubt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass das Entfernen von Redundanzen in allen drei Dimensionen zu einer geringfügig besseren Kompression als die ausschließliche Nutzung von 1D- oder 2D-Informationen führt. Zusätzlich eröffnet sich dem Nutzer jedoch die Möglichkeit zu entscheiden, wie

stark die Daten komprimiert werden sollen oder welcher maximale Fehler bei der Rekonstruktion zugelassen wird. Neben der JPEG-2000-Kompression beinhaltet unsere Untersuchung Experimente mit zusätzlicher Datendekorrelation wie der Karhunen-Loève-Transformation und der Wavelet-

Transformation. Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass der JPEG-2000-Standard eine effektive Methode für FWD-Kompression in Form eines Waveform-Kubus bietet. Daraus resultiert eine hohe Kompressionsrate bei nur geringem Qualitätsverlust der Daten.

1 Introduction

The hardware developments of laser scanning technology continuously provide new application possibilities, though, limitations and difficulties are frequently encountered in the introduction phase. Starting from 2004, when the full-waveform digitization became available for the commercial airborne scanning systems (HUG et al. 2004, MALLET & BRETAR 2009), improvements of quality of LiDAR data and products have been observed. The main advantages of the full waveform data (FWD) are: (1) denser and more accurate point cloud generation (MALLET & BRETAR 2009, PARRISH & NOWAK 2009), (2) improved results in vegetation mapping, e.g. for forestry applications (PIROTTI 2011), and (3) better point cloud classification (REITBERGER et al. 2008, TOTH et al. 2010, HEINZEL & KOCH 2011, MALLET et al. 2011). Despite of the advantages of FWD, technology limitations are still present. For example, waveform data may not be recorded at maximum pulse rate designated for the discrete return systems; there is also a lack of vendor independent tools for waveform data processing; finally, the most common problem is the amount of FWD. Typically, FWD binary files, e.g. Riegler SDF, are 3–4 times larger than the binary files (LAS) containing corresponding point clouds. Although storage technologies continue to develop, allowing for faster read/write operation and accommodation of larger data volumes, the drawback of the increasing size of FWD continues to be an issue.

Most of the activities of LiDAR data compression are concerned with the reduction of the point cloud size to better support the dissemination of primary LiDAR products. The most widely used solutions in practice are the lossless LASzip (ISENBURG 2011), LASCompression (GEMMA LAB 2009, MONGUS & ŽALIK 2011) and the lossy/lossless LiDAR Compres-

or (LIZARDTECH 2014). Other approaches are hardware accelerated compression (BIASIZZO & NOVAK 2013) or considering the point cloud thinning as lossy compression in topographic applications (PRADHAN et al. 2005). Although the need for FWD compression is indisputable, there is rather limited research related to sensor level waveform compression. Work on compressing each waveform separately (TOTH et al. 2010) and exploiting 2D correlation between waveform samples for more efficient compression is reported in JÓZKÓW et al. (2015). BUNTING et al. (2013) proposed the Sorted Pulse Data (SPD) format for storing LiDAR data, implemented in the open source software library SPDLIB (SPDLIB 2013). SPD follows the Hierarchical Data Format version 5.0 (HDF5) (KORANNE 2011, THE HDF GROUP 2014) which supports lossless compression using the zlib deflate algorithm (THE INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF) 1996). Since this compression does not exploit LiDAR data properties, e.g. spatial or temporal correlation, the compression ratio is likely to be limited. Due to the complexity of data stored in SPD, it is difficult to compare the compression ratios with those obtained using other methods. Though there are results reported on SPD file compression, they are based on limited experiments (BUNTING et al. 2013). Another proposed waveform exchange standard, PulseWaves (ISENBURG 2014) provides an option for file compression, but it is still in the development phase, so details are unknown at the moment. Additionally, waveform decomposition for a sum of components or echoes (CHAUVE et al. 2007, MALLET & BRETAR 2009) also represents lossy FWD compression allowing for reconstruction/decompression. Obviously, the compression rate and data distortion strongly depend on the number of detected echoes. According to the authors' knowledge, there is no work published assessing the performance in

terms of ratio and reconstruction noise of the lossy compression represented by waveform decomposition parameters.

Since there is little need for lossless compression of FWD (Józków et al. 2015), this paper investigates a lossy compression approach which employs the extensions of JPEG-2000 Standard Part 2 of multi-component transform. This transform allows exploiting the correlation of waveform samples along three directions: waveform, scan line, flight line, and then compresses the entire waveform cube without the need of separating and compressing single waveforms or arranging them into groups, etc. In relation to 1D (TOTH et al. 2010), and 2D (Józków et al. 2015) compression of FWD, the expected gain of the approach proposed here is a higher compression ratio, as the data redundancy may be better removed by considering full spatial (3D) correlation of the waveforms. Additionally, two other transforms for FWD decorrelation were tested to investigate whether the reported high performance of compression based on JPEG-2000 Standard could be further improved.

2 Waveform Data Arrangement

2.1 Waveform Cube

Full waveform data is not necessarily restricted to the digitized waveform, but is usually identified with waveform signal samples, the essential data for further processing. Additional data, such as time and pointers to flight navigation parameters are necessary to compute geolocation and, finally, to create the point cloud. The size of the mandatory metadata, however, is much smaller than the size of waveform samples, which implies that the compression is mainly considered for waveform samples. Besides the vendor specified formats for waveform data storage, which are usually unknown, there are independent standards allowing the waveform data exchange, such as the LAS format (ASPRS 2013); note that only point data record formats starting from LAS v1.3 are able to store FWD, and the PulseWaves tool (ISENBURG 2014) or SPDLib (SPDLIB 2013) have this capacity, too. The strategy used in the approach proposed here

for waveforms compression is based on a 3D waveform data structure, called a waveform cube (Józków et al. 2015), due to its similarity to the image cube of hyper-spectral images. A very similar idea of representing waveforms in a volumetric data structure, but for static terrestrial scanning, was presented earlier by STILLA & JUTZI (2008). The waveform cube is not a standard or a file format, but the structure of FWD arrangement that maintains the topology of waveform samples according to the data acquisition process (Fig. 1). The three dimensions of the waveform cube are: flight direction of the aircraft, scan line (cross flight direction), and the direction of the laser pulse propagation (waveform). It must be emphasized that the waveform cube is not a georeferenced structure, such as an orthophoto or a digital terrain model (DTM) grid, i.e. the distance in the 3D space between any two elements of the cube cannot be calculated based in the cube indices; however, the topology of waveform samples is always related to the spatial order of the laser pulses, i.e. the sequence, as they are acquired in time.

While the formation of the waveform cube is simple, there are a few additional aspects that should be mentioned. First, the outgoing pulse is also digitized as part of the waveform record, since this information is essential for waveform decomposition. There are two ways to compress the outgoing waveform: either jointly with the return waveform or independently, by forming another waveform

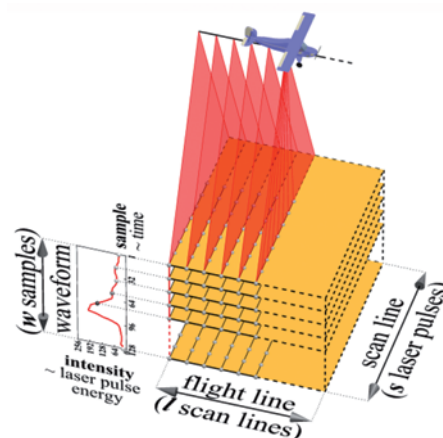


Fig. 1: Waveform cube structure.

cube. Since the size of the outgoing waveform is fixed, the second option is preferred. Similarly, for multi-wavelength LiDAR systems, waveform cubes can be formed for each sensor; note the correlation among the different wavelength waveform could be potentially exploited for compression in the future. The second aspect is the object space complexity, which has a paramount effect on the spatial correlation of the waveforms. Neighbouring waveforms are generally similar to each other over open and slowly changing areas, whereas in built-up areas, such as urban canyons, their

shape can change abruptly, resulting in a less efficient compression.

The third aspect is the waveform cube size which is defined in two directions by the waveform record length and the number of pulses per scan line. Both may fluctuate on some systems, in which case, empty waveform samples or records can be inserted, respectively. The third dimension, however, can be set arbitrarily, ranging from a few scan lines to all the scan lines in a strip. Given the spatial extent and the computational aspects, a nearly equal size in the horizontal dimensions is preferred,

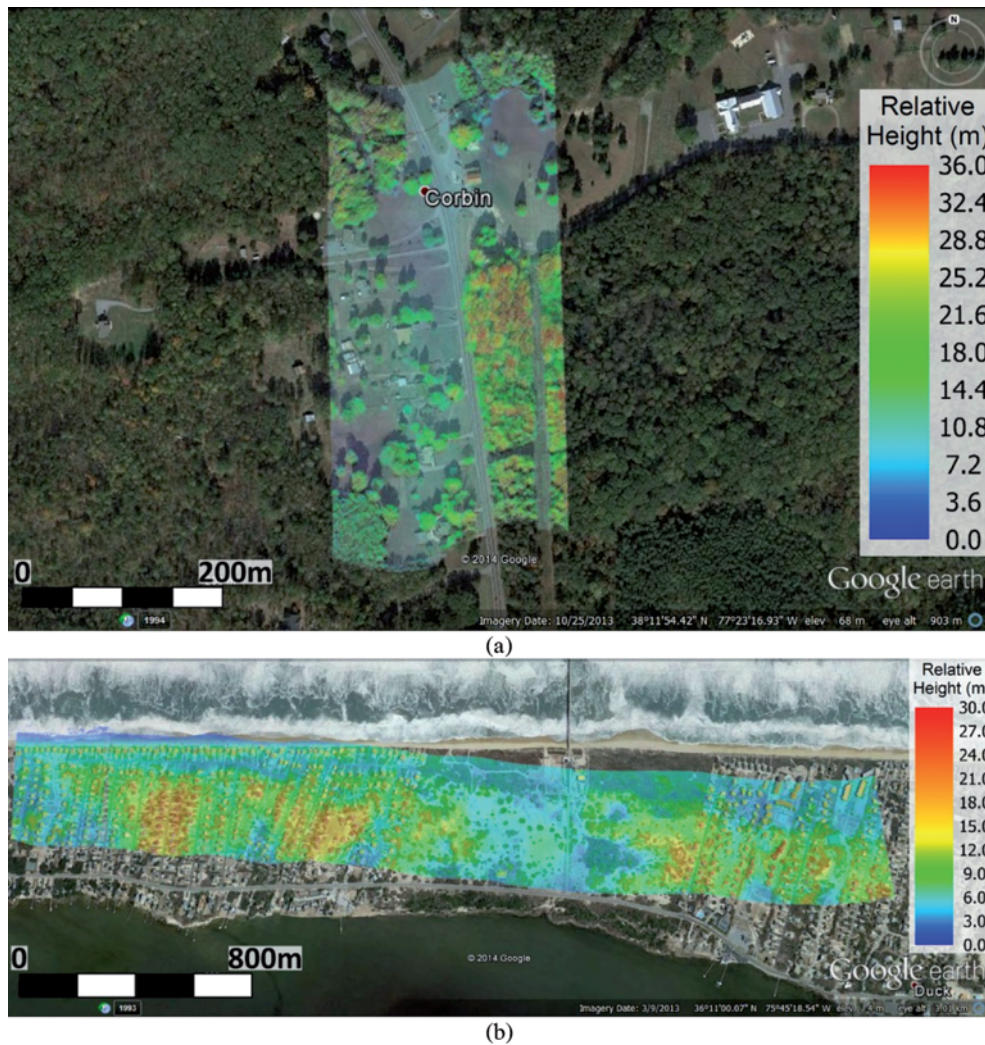


Fig. 2: Test waveform cube location: (a) Area covered by both the C1 and C2 cubes, Corbin, Virginia, USA, (b) C3 cube, Duck, North Carolina, USA.

which is similar to the standard practice of tiling large geospatial data. Note that some sensors use multiple waveform digitizers, requiring the use of multiple cubes.

In summary, the idea of the waveform cube is not ideal in terms of implementation, as it may not be directly applicable to all scanners; for example, waveform sample rearrangement may be needed. Yet in a statistical sense, the waveform cube provides an effective way to achieve high compression performance due to its ability to exploit 3D correlation.

2.2 Test Data

The data variability greatly affects compression performance manifested by the value of the compression ratio; usually data with a low variation can be compressed with higher ratio than more varying data. Consequently, test data for the assessment of compression performance should be chosen carefully, avoiding the extreme conditions of high and low data complexity. The test site, shown in Fig. 2a, contains a mixture of topographic elements, such as buildings, road infrastructure, dense forest, single trees, and open terrain. To support this study, two waveform cubes were extracted and used in extensive tests, covering nearly the same area and acquired by using two different LiDAR systems (Riegl Q680i and Riegl Q780) on the same flight. This explains a slightly different size of both test waveform cubes of $504 \times 1200 \times 120$ and $488 \times 1170 \times 120$ scan lines, waveforms per scan line, and samples in the waveform (l, s, w dimensions in Fig. 1), for the first (C1) and the second (C2) cube, respectively. Additionally, a 3 km single strip, C3 (Fig. 2b), acquired using a Riegl Q780 scanner, was processed, allowing to test the algorithm in diverse conditions, in terms of topographical objects. Tests for C3 data included both emitted and returned waveform cubes; the numbers of waveform samples were 28 and 120, respectively. The strip was divided into 12 cubes, each containing 496 scan lines, and the number of pulses was 1170 per scan line.

For all datasets, the signal intensity was sampled at 1 ns with 8 bit resolution. Thus, the waveform consisting of 120 samples represent

a vertical range of 36 m, clearly sufficient to include all the natural and man-made objects in these areas.

3 Compression Strategy

Similarly to our previous work, only lossy compression methods were considered because a perfect reconstruction of recorded FWD is practically not necessary, as discussed in details by Józków et al. (2015). Based on those results, it was concluded that JPEG-2000 Standard was the most efficient among the tested 2D strategies of waveform data compression. Here the objective is to extend the compression from 2D to 3D, so the goal of this study is to benefit waveform data compression by exploiting the correlation of waveform samples in each of three dimensions: along flight line, scan line, and waveform direction. Extensions of the JPEG-2000 Part 2 (TAUBMAN & MARCELLIN 2002) introduce a multi-component transform resulting in the ability to compress multi-band images. In short, the simplest multi-component transform first applies a decorrelating transform, e.g. 1D wavelet transform, to each pixel of the image in the third dimension, and then each image component, e.g. band, follows the JPEG-2000 Part 1 compression schema. Due to the Part 2 extension, previous JPEG-2000 restrictions of compression only single band or three band images, as RGB, were removed and the possibility of applying JPEG-2000 compression to hyper-spectral images consisting of multiple bands became available (KULKARNI et al. 2006). Since the structure of hyper-spectral images and waveform cubes are identical, both data types can be compressed using the same strategies. The extension of the JPEG-2000 Part 2 containing multi-component transform is implemented only in a few specialized software packages, such as the PICTools Medical SDK for compressing volumetric medical scans (ACCUSOFT 2014), LEADTOOLS JPEG 2000 Image Compression SDK (LEADTOOLS 2014), OpenJPEG library (OPENJPEG 2014), and Kakadu Software (KAKADU SOFTWARE 2013) which, in version 7.2, was used in this study. In order to investigate the variability of the waveform

cube affecting compression, additional operations were also performed prior to Kakadu compression. The flowchart of all performed operations is presented in Fig. 3 and discussed below in details.

Since the actual range of waveform sample intensities (values) varies for each band of the waveform cube and, thus, may adversely affect the decorrelating transforms, waveform cube bands were normalized before applying these transforms. In this study, three variants of the band-wise normalization were tested:

- zero-mean (ZM), where the mean value of the band was subtracted from the waveform samples for each band,
- unit-variance (UV), where beside the mean removal, sample normalization was applied so that each band had unit variance,
- no normalization, i.e. using the original cube data (OC) for comparison purposes.
- JPEG-2000 contains the full lossy compression scheme, including (1) the transform engine for data decorrelation, (2) the quantization engine for data loss/reduction, and (3) the bit encoding engine for lossless compression. Nevertheless, the influence of using data decorrelations prior to JPEG-2000 is of interest since better decorrelation usually results in a better compression rate. Therefore, as a preprocessing step, three different decorrelation methods were tested:

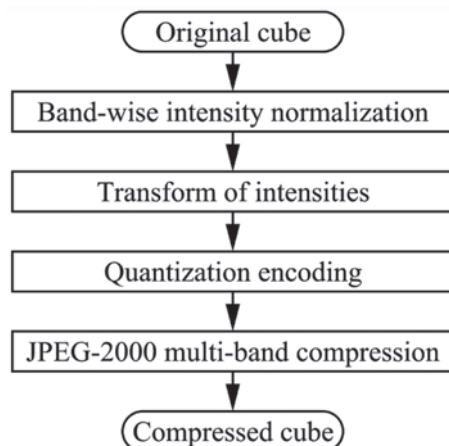


Fig. 3: Flowchart of operations executed during experiments.

- Karhunen-Loève transform (KLT) (KARHUNEN 1947, QUIRK 2003),
- wavelet transform (WLT) using Cohen-Daubechies-Feauveau 5/3 wavelet (CDF 5/3) (COHEN et al. 1992),
- no transform (NOT) for comparison purposes.

KLT was applied to the cube regarded as a discrete vector stochastic process (QUIRK 2003). This means that the whole waveform cube should be considered as a single large image which is the result of 'gluing' together slices of the cube along the waveform-scan line plane. Considering dimensions of the cube as l , s , and w according to Fig. 1, the single large image B will have the size of w , and $l \cdot s$ (shown on the right side in Fig. 4) and then KL-transform is calculated as:

$$C = K^T \cdot B \quad (1)$$

where:

$$K = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \cdots & k_{1,w} \\ k_{2,1} & k_{2,2} & \cdots & k_{2,w} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{w,1} & k_{w,2} & \cdots & k_{w,w} \end{bmatrix}$$

is the KLT matrix whose columns are the eigenvectors of the covariance matrix of image B . Note that covariance of the image can be calculated two ways, depending on whether columns or rows of the image are treated as random variables. In this work, the first method was applied. C is the KL-transformed single large image which is reshaped backward into the cube, and then subjected to the subsequent operations. The key of such use of KLT is the data decorrelation, resulting in packing the energy of the signal mostly in the first few bands (QUIRK 2003, VAIDYANATHAN 1998). This could benefit the JPEG-2000 multi-band compression, where many compressed bands may contain almost no energy. KLT is reversible, which means the original image B can be reconstructed based on the transformed data C and the transformation matrix K :

$$B = K \cdot C \quad (2)$$

The inverse KLT was applied for the reconstruction (decompression) process, which in-

cludes data reshaping between waveform cube and single large image, but in the reverse order as in the compression process.

In the second test, 1D WLT was applied to each waveform separately (Fig. 4). The results of WLT are low- and high-frequency components, denoted here as Lo and Hi . Considering 1D WLT as applied in this work, both Lo and Hi components have the same length, equal to half of the length of the original signal (waveform). Note that the low-frequency component contains most of the original signal energy, thus considering such transform for all waveforms, the energy would be packed into one half of the cube bands. Similarly, the Lo component can be subjected to another WLT resulting in two new components having half of the length of the parent, so the original sig-

nal content will be included only in one quarter of the cube. This sequential WLT known as multi-resolution analysis (MRA) (MALLAT 1989) will finally result in packing the energy of the signal in the first few bands, similar to KLT (see the length of Lo component in Fig. 4). The number, n , of possible levels of MRA depends on the length of the original signal. n is less than $\log_2(m)$, where m is the length of the signal; for example, for a waveform length of 120, used in this study, the maximum MRA is 7 levels; however, only three levels were used here to avoid edge effects and length extension of the WLT components. Similarly to KLT, WLT is totally reversible.

From the perspective of compression of an 8 bit waveform cube, data normalization and transforms contradict to the idea of data re-

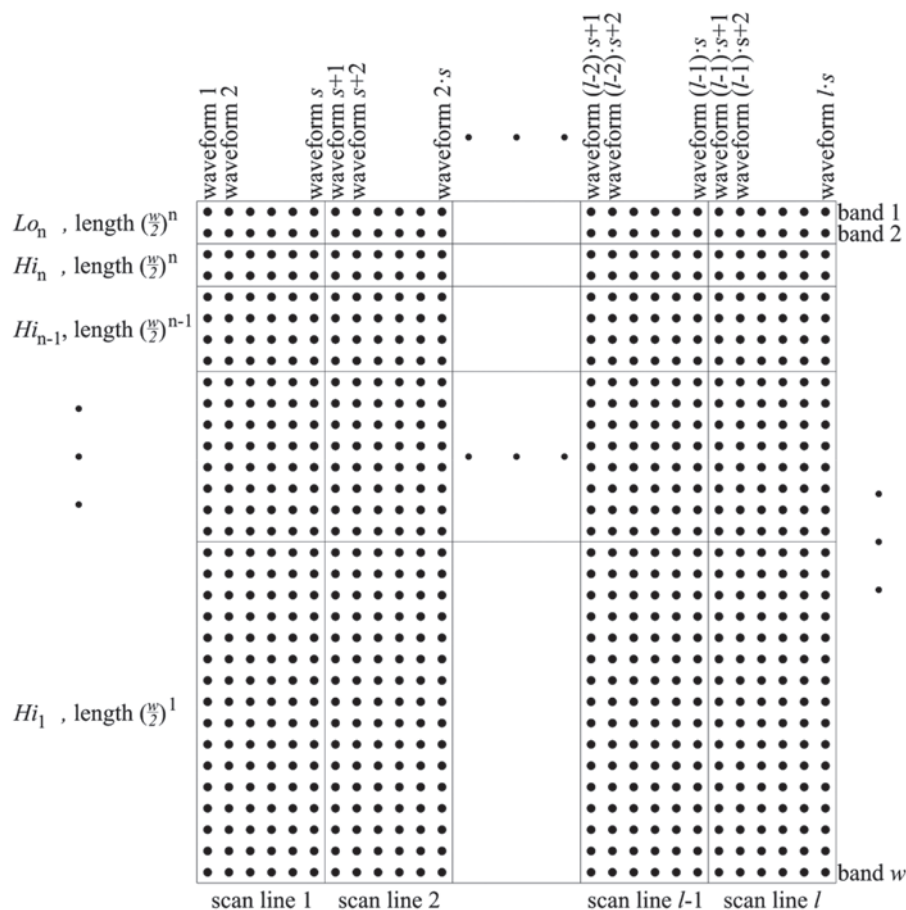


Fig. 4: Wavelet transform applied on the large image of the whole waveform cube.

duction since these operations result in a larger data size due to a conversion from integers into real numbers, usually in 32 bit or 64 bit representation. Additionally, some of the compressing tools do not allow floating point numbers as input pixel (sample) values. For example, the Kakadu Software accepts only 32 bit input. Therefore, the quantization encoding is needed to allow mapping floating point numbers into integers. Note that this process is invertible, known as quantization decoding, but provides no perfect reconstruction. The experiments on the test data showed that an 8 bit range would be too short to avoid large quantization errors, and, thus, more bits for the quantization base are needed. In this experiment, a linear quantizer with a 28 bit base length was used providing much larger dynamic range than that of the original data (8 bits). The amount of the introduced quantization noise and other data distortion, such as numerical errors of data normalization and transforms not caused by JPEG-2000 compression, was empirically evaluated. First, the test waveform cubes were subjected to forward processing, including data normalization, transform, and quantization encoding; and then, the inverse operation, i.e. quantization decoding, inverse transform, and reverse data normalization, was carried out. The observed maximal absolute difference between the value of the original and reconstructed waveform sample was on the level of $1e-4$ that equals to 0 in integer terms.

The results of the investigation of image based waveform cube compression (Józków et al. 2015) showed that the best compression performance was obtained for the set of images where the single image was formed by all waveforms of a single scan line (according to s and w dimensions in Fig. 1). Therefore, the waveform cube was rotated prior to multi-band compression in the Kakadu Software, thus the dimension l of the cube was treated as the band during JPEG-2000 multi-component transform.

In the case of lossy compression, the user can decide partially about the amount of data degradation and compression ratio. Depending on the implementation, a quality factor is used to control the desired compression ratio. In the Kakadu Software, this user input pa-

rameter is the bits per pixel ratio, i.e. the average number of bits for a single pixel in the compressed file. Obviously, this value must be smaller than the bit depth in the original image in order to gain a reduction in the file size, but a smaller ratio means a larger data distortion due to compression. The resulting ratio might be slightly different from the value given by the user because the compression strength depends also on the inherent parameters of the data. Since the original waveform data is 8 bits, experiments were executed for 20 parameters, ranging from 0.4 to 8 bits with a step size of 0.4 bits. Note that Kakadu compressed JPEG-2000 file might include several reconstruction qualities, in other words, one file may contain data compressed with different ratios at the same time, but this option was not tested during this investigation.

4 Performance of Waveform Data Compression

Compression performance might be evaluated from different perspectives, such as the achieved compression ratio and reconstruction error. The compression ratio is defined by the percentage of the compressed file size with respect to the original one. In the case of image compression, the bits per pixel ratio (BPP) or the bits per pixel per band ratio (BPPPB) are frequently used to describe the compression ratio, depending whether a single- or a multi-band image is compressed. The BPP value is the number of bits used to store a single pixel in the compressed image. Due to the similarity of multi-band images and waveform cubes, the BPPPB was used in this study. Note that a pixel of the image cube is equivalent to a waveform sample in the waveform cube. Knowing the BPPPB ratio for the original and compressed cubes, the compression ratio or percentage ratio can be easily calculated. The compression ratio is also affected by the file header, or metadata, essential for decompression. This data is kept in the compressed file, increasing its size. The final BPPPB ratio was calculated on the basis of the file size produced by the Kakadu Software and the number of waveform samples in the waveform cube. Note that the size of oth-

er data, mandatory for reconstruction, such as mean values of bands in the case of ZM data or K matrix in the case of KLT transform and quantization parameters, were not included in this calculation. The omission of these parameters in the size calculations does not change the BPPPB ratio significantly, because the size of these parameters is much smaller than the size of the compressed cube.

The performance of lossy compression methods is related to the data degradation, the distortion (noise) introduced due to quantization included in the compression process. Reconstruction noise (error) can be measured by different parameters, such as signal to noise ratio (SNR), peak signal to noise ratio (PSNR) (VAIDYANATHAN 1993), or just by giving simple statistics of the differences between reconstructed and original data. In this work data distortion was measured by the SNR, which is based on the variance of waveform samples and their differences:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{\sigma_o^2}{\sigma_{o-r}^2} \quad (3)$$

where

σ_o^2 – variance of all the original waveform samples,

σ_{o-r}^2 – variance of waveform sample differences between original and compressed data.

For a low data degradation, the SNR is large, and it approaches infinity for a perfect reconstruction. Note that the calculated SNR describes only quantization noise of the original waveform signal.

Another aspect of compression performance is the computational cost, the compression and decompression speed and use of computer resources. In our previous work (JÓŻKÓW et al. 2015), it was concluded that 2D JPEG-2000 based compression is fast enough to support waveform compression during the acquisition process in the sensor system, as waveforms forming single scan lines might be compressed progressively. Similarly, waveform cubes might be compressed progressively by the approach presented in this work. However, the additional transforms for data decorrelation introduced in this experiment, e.g. KLT, make the algorithm much more complex and,

consequently, resulting in a much slower execution than the 2D compression. Obviously, any computation on larger datasets like waveform cubes requires much more memory resources than computation performed on a small part of this data like the single image slice. These issues were not considered in this work in evaluating the computational expenses of the compression performance.

Finally, the impact of compression noise can be evaluated looking at the results of subsequent waveform data post processing tasks, but executed on the decompressed data. For example, the Gaussian waveform decomposition should result in the same number of detected echoes with insignificantly different parameters from those obtained in processing the original uncompressed FWD. Note that even well-established waveform decomposition methods produce varying results, just as the number of parameters used to describe the components can be different, for example, 3 and 4 (CHAUVE et al. 2007), or even 5 (LAKY et al. 2010). Based on the earlier investigation (JÓŻKÓW et al. 2015), it was concluded that the SNR of above 30 dB – 35 dB in typical airborne LiDAR data assures an acceptable waveform reconstruction error which will not cause significant changes in waveform shape and, consequently, does not affect the results of subsequent FWD processing, in particular waveform decomposition.

5 Results and Discussion

Numerical experiments were performed with all combinations of the three decorrelation techniques (OC, ZM, UV) and three transforms (NOT, KLT, WLT) at 20 different user specified compression ratios for two test waveform cubes C1 and C2. To discuss and analyze the effects, experimental results are visualized by showing the SNR as a function of the obtained BPPPB in Fig. 5. For comparison purposes, results obtained for the same data but using the earlier proposed approach, based on JPEG-2000 compression of waveforms arranged in the set of 2D images (JÓŻKÓW et al. 2015) was added to the figures. It should be also explained why 2D compression did not result in large SNR or BPPPB ra-

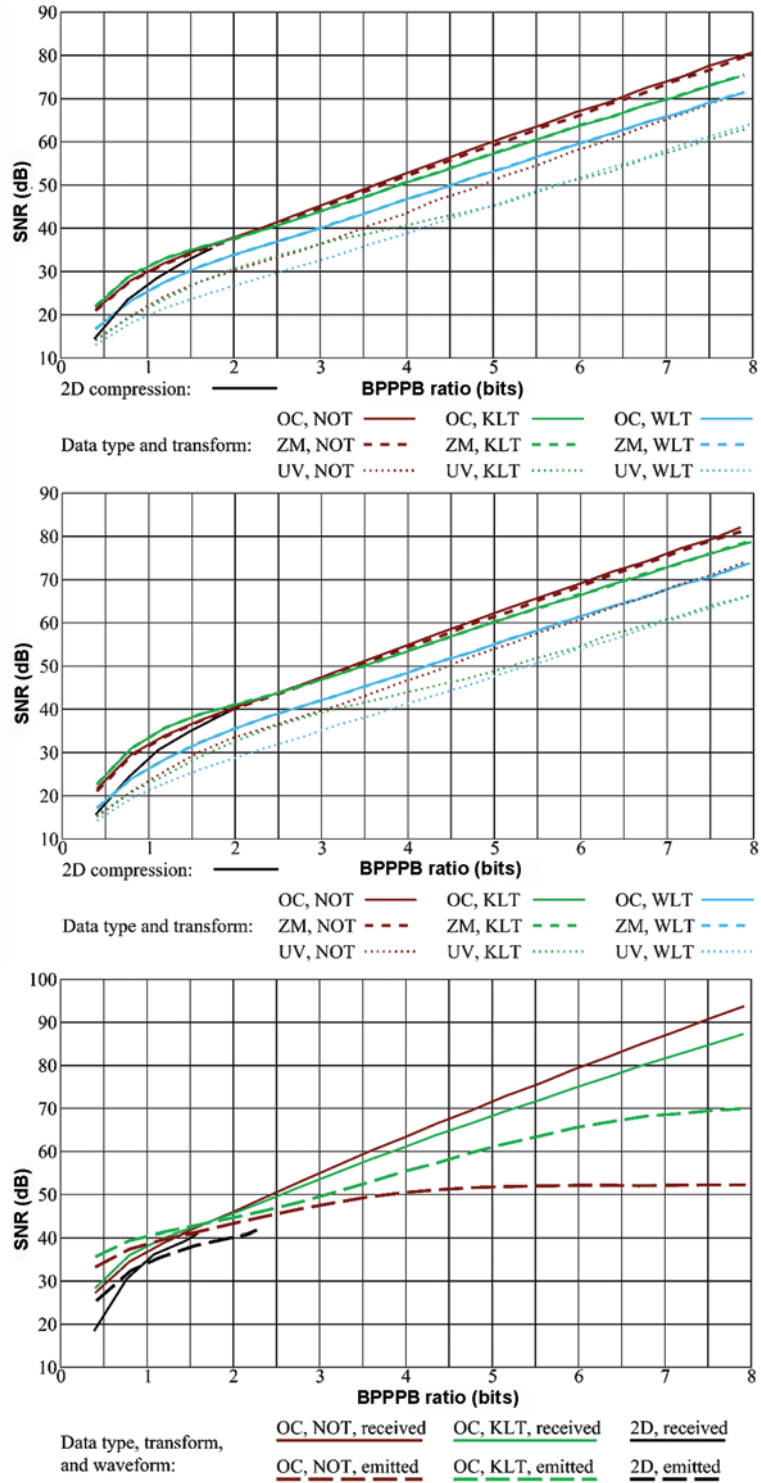


Fig. 5: SNR as a function of BPPP ratio, BPPP = bits per pixel per band ratio.

tio. For the user input ratios 2.4 bits and larger, the obtained SNR was always similar, about 35 dB and 41 dB for C1 and C2, respectively, as well as similar was the BPPPB ratio, about 1.7 and 2 bits for C1 and C2, respectively. This explains the higher dynamic of JPEG-2000 based 3D compression than 2D compression of the waveform cube.

Comparing results obtained for C1 and C2 test cubes, it is clearly seen that the impact of using different sensors for collecting FWD for the same area is insignificant; a slightly larger (maximally 5 dB) SNR was obtained for the test cube C2. The most likely reason is the lower internal complexity of cube C2, as the compression of images containing less details results in lower reconstruction noise for the same compression rate. Among the used transforms, the worst SNR was obtained for WLT. This could be explained with the fact that *Lo* and *Hi* components are usually in very different ranges and, thus, a non-linear quantizer might be more appropriate for preserving better dynamic range of the quantized component values prior to JPEG-2000 compression. Differences between the other two transforms, KLT and NOT, are maximally of about 5 dB for the same BPPPB ratio, where higher SNR was obtained for KLT in the case of small ratios and NOT in the case of large ratios. Considering that the used KLT is adaptive (needs to be calculated for every dataset), and therefore highly computational expensive, and the improvement of the SNR by a few dB only for small BPPPB ratios compared to the case of using no transform (NOT), it is clearly not beneficial in practice. Obviously, a fixed KLT matrix for similar datasets might be used to reduce the number of computations, but it is extremely difficult to find representative datasets of FWD to create a fixed KLT base (Józków et al. 2015). The last aspect of the investigated approach is the data normalization method. The worst SNR was obtained for UV. Differences between OC and ZM are insignificant, which implies that data do not require any normalization and the intensities of the original waveform samples are suitable for the compression.

Based on the C1 and C2 results, compression experiments with the C3 dataset were executed only for the best performing data nor-

malization (OC) and transforms (NOT, KLT), resulting in similar performance for compressing received waveforms. SNR obtained for C3, however, was about 10 dB larger than for the C1 and C2 cubes. This may be explained by the simpler object complexity of the C3 area. Similarly, a difference of performance between compressing cubes of emitted and received waveforms was observed, as a large number of zero samples in the received cube resulted in higher SNR for large compression ratios. In contrast, the strong similarity of the emitted waveforms allowed for higher SNR for small compression ratios. This close similarity of the outgoing waveforms was also exploited by applying an additional decorrelating transform. For example, KLT applied to the emitted cube resulted in higher SNR, especially for large compression ratios, than in the case where the preprocessing transform was not applied (NOT). Since the outgoing waveforms change very little, instead of using adaptive KLT, a fixed KLT may be applied to reduce the computational expenses. Finally, comparing results of 2D with 3D compression approaches, the same observations can be noted as for the smaller cubes C1 and C2. Compression performance differences for emitted and received cubes in the 2D approach follow the same pattern as for 3D approach.

Comparing waveform compression results of the earlier 2D and here proposed 3D methods, both based on the JPEG-2000 Standard, the difference is not significant; for example, for unnormalized and untransformed data, the 3D approach for small BPPPB ratio gives a slightly larger SNR than the 2D approach, the difference being about 5 dB – 10 dB. Clearly, the flexibility of the 3D approach to adjust the data degradation and compression ratio is an obvious advantage.

6 Conclusions

This work investigated the feasibility of compressing waveform cube using multi-component JPEG-2000 extension. The tested approaches included additional computations, such as data normalization and transforms prior to JPEG-2000 compression.

Based on the numerical experiments performed on three waveform cubes, it was concluded that in relation to 2D JPEG-2000 based compression, the multi-component extension is more flexible, because the user can choose between a larger range of compression ratios and select larger file sizes to obtain very low data loss, which was not possible for the 2D approach. For larger compression ratios (small BPPPB ratio), however, both 2D and 3D approaches result in similar performance in terms of data degradation and reduction of the file size. Note that for both approaches, this similar performance was obtained for the same cube orientation where bands (images) were formed from waveforms representing single scan lines, offering more flexibility for the practical use where the same compression tool might be used with two different variants depending on the available computational power. More importantly, both single images and waveform cubes can be then progressively compressed according to the waveform data acquisition order. The advantage of 2D approach is speed, but the disadvantage is the low dynamic range and the inability to achieve a large SNR. Multi-component compression is slower, but gives the user more choices on deciding about the amount of data degradation.

The used implementation of the JPEG-2000 Standard with wavelet-based multi-component transform performed well in decorrelating the original waveform cube data. Additional data normalization or transform of the original waveform cube did not show significant improvements in 3D compression performance, and only caused extra computational costs.

Finally, one more advantage of using JPEG-2000 Standard for compressing waveforms in both approaches is the possibility of keeping different reconstruction levels in one, but larger file. It can be useful for data distribution with different distortion and compression levels depending on the application requirements.

References

- ACCUSOFT, 2014: PICTools Medical SDK. – <http://www.accusoft.com/picmedx.htm> (31.10.2014).
- ASPRS, 2013: LAS specification, version 1.4 – R13. – http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf (12.6.2014).
- BIASIZZO, A. & NOVAK, F., 2013: Hardware Accelerated Compression of LIDAR Data Using FPGA Devices. – *Sensors* **13** (5): 6405–6422.
- BUNTING, P., ARMSTON, J., LUCAS, R.M. & CLEWLEY, D., 2013: Sorted Pulse Data (SPD) Library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. – *Computers & Geosciences* **56**: 197–206.
- CHAUVE, A., MALLET, C., BRETAR, F., DURRIEU, S., PIERROT-DESEILLIGNY, M. & PUECH, W., 2007: Processing full-waveform lidar data: Modelling raw signals. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (Part 3/W52): 102–107.
- COHEN, A., DAUBECHIES, I. & FEAUVEAU, J.-C., 1992: Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. – *Communications on Pure and Applied Mathematics* **45** (5): 485–560.
- GEMMA LAB, 2009: LASCompression. – <http://gemma.uni-mb.si/lascompression> (12.6.2014).
- HUG, C., ULLRICH, A. & GRIMM, A., 2004: Litemapper-5600-a waveform-digitizing LiDAR terrain and vegetation mapping system. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (Part 8/W2): 24–29.
- HEINZEL, J. & KOCH, B., 2011: Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **13** (1): 152–160.
- ISENBURG, M., 2011: LASzip: lossless compression of LiDAR data. – <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/download/laszip.pdf> (12.6.2014).
- ISENBURG, M., 2014: PulseWaves. – <https://github.com/PulseWaves> (12.6.2014).
- JÓZKÓW, G., TOTH, C., QUIRK, M. & GREJNER-BRZEZINSKA, D., 2015: Compression Strategies for LiDAR Waveform Cube. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **99** (1): 1–13.
- KAKADU SOFTWARE, 2013: Kakadu Software – Home. – <http://www.kakadusoftware.com> (12.6.2014).
- KARHUNEN, K., 1947: Über lineare Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. – *Annales Academiae scientiarum Fennicae: Mathematica – Physica* **37**: 1–79, Universität Helsinki, Finland.
- KULKARNI, P., BILGIN, A., MARCELLIN, M.W., DAGHER, J.C., KASNER, J.H., FLOHR, T.J. & ROUNTREE, J.C., 2006: Compression of earth science data with JPEG2000. – *Motta, G., Rizzo, F. &*

- STORER, J.A. (eds.): *Hyperspectral Data Compression*. – Springer: 347–378.
- KORANNE, S., 2011: Hierarchical data format 5: HDF5. – *Handbook of Open Source Tools*: 191–200, Springer.
- LAKY, S., ZALETNYIK, P. & TOTH, C., 2010: Land classification of wavelet-compressed full-waveform LiDAR data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (Part 3A): 115–119.
- LEADTOOLS, 2014: LEADTOOLS JPEG 2000 Image Compression SDK. – <https://www.leadtools.com/sdk/compression/jpeg2000.htm> (31.10.2014).
- LIZARDTECH, 2014: LiDAR Compressor. – <http://www.lizardtech.com/products/lidar> (6.12.2014).
- MALLAT, S.G., 1989: A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis, and Machine Intelligence* **11** (7): 674–693.
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (1): 1–16.
- MALLET, C., BRETAR, F., ROUX, M., SOERGEL, U. & HEIPKE, C., 2011: Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **66** (6): 71–84.
- MONGUS, D. & ŻALIK, B., 2011: Efficient method for lossless LIDAR data compression. – *International Journal of Remote Sensing* **32** (9): 2507–2518.
- OPENJPEG, 2014: OpenJPEG library: an open source JPEG 2000 codec. – <http://www.openjpeg.org/> (31.10.2014).
- PARRISH, C.E. & NOWAK, R.D., 2009: Improved Approach to LIDAR Airport Obstruction Surveying Using Full-Waveform Data. – *Journal of Surveying Engineering* **135** (2): 72–82.
- PIROTTI, F., 2011: Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. – *iForest-Biogeosciences and Forestry* **4** (3): 100–106.
- PRADHAN, B., KUMAR, S., MANSOR, S., RAMLI, A.R. & SHARIF, A.R.B.M., 2005: Light detection and ranging (LIDAR) data compression. – *KMITL Science and Technology Journal* **5** (3): 515–523.
- QUIRK, M.D., 2003: *Theory of Principal Component Filter Banks with Applications to Multi-component Imagery*. – Ph.D. thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- REITBERGER, J., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2008: Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. – *International Journal of Remote Sensing* **29** (5): 1407–1431.
- SPDLIB, 2013: The SPDLib Documentation Wiki. – <http://www.spdlib.org/> (30.10.2014).
- STILLA, U. & JUTZI, B., 2008: Waveform analysis for small-footprint pulsed laser systems. – SHAN, J. & TOTH, C.K. (eds.): *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*: 215–234, CRC Press.
- TAUBMAN, D. & MARCELLIN, M., 2002: *JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*. – Springer.
- THE HDF GROUP, 2014: HDF Group – HDF5. – <http://www.hdfgroup.org/HDF5/> (30.10.2014).
- THE INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF), 1996: RFC 1951 – DEFLATE Compressed Data Format Specification Version 1.3. – <http://tools.ietf.org/html/rfc1951> (30.10.2014).
- TOTH, C., LAKY, S., ZALETNYIK, P. & GREJNER-BRZEZINSKA, D., 2010: Compressing and classifying LiDAR waveform data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (Part 1): (on CD-ROM).
- VAIDYANATHAN, P.P., 1993: *Multirate Systems and Filter Banks*. – Prentice Hall PTR.
- VAIDYANATHAN, P.P., 1998: *Theory of Optimal Orthogonal Subband Coders*. – *IEEE Transactions on Signal Processing* **46** (6): 1528–1545.

Address of the Authors:

GRZEGORZ JÓZKÓW, CHARLES TOTH & DOROTA GREJNER-BRZEZINSKA, Department of Civil, Environmental and Geodetic Engineering, The Ohio State University, Hitchcock Hall, 2070 Neil Avenue, US-43210 Columbus, OH, USA, Tel.: +1-614-292-7681, +1-614-292-8787, e-mail: {jozkow.1} {toth.2} {grejner-brzezinska.1}@osu.edu

MIHAELA QUIRK, The National Intelligence University, e-mail: mihaela.quirk@dodiis.mil

Manuskript eingereicht: August 2014
Angenommen: Februar 2015





Reassembling 3D Thin Fragments of Unknown Geometry in Cultural Heritage

ZHENG SHUNYI, HUANG RONGYONG, WANG ZHENG, Wuhan, China & LI JIAN, Zhengzhou, China

Keywords: photogrammetry, reassembling, cultural heritage, matching, adjustment

Summary: Many fragile antiques have already been broken when being discovered at archaeological sites. Such antiques are a precious part of our cultural heritage. However, the fragments cannot be effectively interpreted and studied unless they are successfully reassembled. Additionally, there still exist many problems in the reassembly procedure in existing methods, such as numerical instabilities of curvature and torsion based methods, the limitations of geometric assumptions, the error accumulation of pairwise matching approaches, etc. Regarding these problems, this paper proposes an approach to match the fragments to each other for their original 3D reconstruction. Instead of curvatures and torsions, the approach is based on establishing a local Cartesian coordinate system at every point of the 3D contour curves. First of all, the 3D meshes of the fragments are acquired by a structured-light based method, with the corresponding 3D contour curves extracted from the outer boundaries. The contour curves are matched and aligned to each other by estimating all the possible 3D rigid transformations of the curve pairs based on the local Cartesian coordinate systems, and then the maximum likelihood rigid transformations are selected. Finally, a global refinement is introduced to adjust the alignment errors and improve the final reassembling accuracy. Experiments with several groups of fragments suggest that this approach cannot only match and align fragments effectively, but also improve the accuracy significantly, which promises the potential to be able to apply it to fragments in cultural heritage. Comparing with the original 3D model acquired before being broken, the final reassembling accuracy reaches 0.47 mm.

Zusammenfassung: Zusammenfügen dünner 3D-Fragmente mit unbekannter Geometrie in der Denkmalpflege. Viele antike Fundstücke sind bei ihrer Ausgrabung bereits zerbrochen. Solche Fundstücke sind ein wertvoller Teil unseres Kulturerbes. Die Fragmente können jedoch nicht effektiv interpretiert und studiert werden, solange sie nicht erfolgreich wieder zusammengesetzt worden sind. Bei diesem Zusammenfügen haben aktuelle Verfahren noch viele Probleme, z.B. die numerische Instabilitäten bei auf Krümmung und Torsion basierenden Methoden, die Limitierungen durch Annahmen über die Objektgeometrie oder das kumulative Anwachsen der Fehler bei paarweiser Anpassung der Teile. In diesem Artikel wird eine neue Methode für das Zusammenfügen solcher Fragmente vorgestellt. Statt auf Krümmung und Torsion beruht dieser Ansatz auf der Definition lokaler kartesischer Koordinatensysteme an jedem Punkt der 3D Konturlinien der Fragmente, welche dazu genutzt werden, um die Linien miteinander zu verknüpfen und dadurch das Gesamtobjekt zusammenzustellen. Zunächst werden digitale Oberflächenmodelle durch ein auf strukturiertem Licht basierendes Verfahren erfasst und danach die 3D-Konturlinien aus den Außenkonturen der Modelle extrahiert. Anschließend werden die Konturlinien unter Einbeziehung aller möglichen starren 3D-Transformationen zwischen Punkten auf Kurvenpaaren basierend auf den lokalen kartesischen Koordinaten einander zugeordnet und ausgerichtet. Dabei wird für die Auswahl der am besten passenden Lösungen die Maximum-Likelihood-Methode angewendet. Um die Genauigkeit der Rekombination zu erhöhen, werden im Zuge einer globalen Ausgleichung kumulative Fehler iterativ beseitigt. In mehreren Experimenten mit verschiedenen Gruppen von Fragmenten zeigte sich, dass durch diese Methode nicht nur die dünnen Fragmente der Fundstücke effektiv wieder zusammengesetzt werden konnten, sondern auch die Genauigkeit der wieder zusammengeführten Objekte deutlich gesteigert

werden konnte. Im Vergleich zum ursprünglichen 3D Modell, das vor dem Zerbrechen erstellt worden war, ließ sich eine Genauigkeit der Rekombination

von 0,47 mm erreichen. Das zeigt das vielversprechende Potenzial dieser Methode für die praktische Anwendung in der Denkmalpflege.

1 Introduction

A large quantity of fragile antiques may be found at archaeological sites. Such antiques are a precious part of our cultural heritage, but they are often discovered in broken form due to having been buried for a long time and due to their fragility. They must be reassembled before any other academic procedures. For example, the site's chronology, the population's socioeconomic standards, or even the extent of local or international trade can be indicated by potteries or vessels reconstructed from the found shards. However, most 3D fragments are reassembled and restored manually, so the task requires tedious work from archaeologists and restoration personnel. Thus, a lot of ancient artifacts from fragments found at archaeological sites remain unstudied. Furthermore, the reassembling effects always turn out to depend on the personal experience of the involved archaeologists and restoration personnel, and the excavated fragments are vulnerable in case of any wrong manual operation.

Computer technology can be used to automatically or semi-automatically reassemble such fragments without the risk of damage. However, it is still very challenging to do so because the fragments are thin and do not have surfaces suitable for matching. That is, only the contour curves of the fragments can be utilized for matching and the alignment of adjacent shards. Although there are many methods dealing with such challenges, they have some disadvantages nonetheless. For example, in order to simplify the problem and to improve robustness, some authors (COOPER et al. 2001, WILLIS & COOPER 2004, KAMPPEL et al. 2002, RAZDAN et al. 2001) imposed the assumption of a global model with known geometry to the original object, e.g. assuming the object to be axially symmetric. Such an assumption may not be fulfilled in many cases. Methods relying on representing the curve with shape feature strings, such as curvatures and torsions (KONG & KIMIA 2001, ÜÇOLUK & HAKKI

TOROSLU 1999, GRUEN & AKCA 2005, OXHOLM & NISHINO 2013) are fast. But the main problem is that the computation of curvature and torsion involves up to third-order derivatives, which is sensitive to noise and local discontinuity (WILLIS & COOPER 2008). In addition, the alignment after the matching process necessarily suffers from error accumulation, because it usually relies on a pairwise approach. Even the extension of the pairwise approach (COOPER et al. 2001, KONG & KIMIA 2001), which delays the alignment phase until clusters of three matching fragments have been found, cannot completely improve the alignment accuracy due to local optimization. WILLIS & COOPER (2008) have provided a detailed survey of the state-of-the-art in both automatic and semi-automatic ancient artifact reconstruction systems, including almost all of the current 2D and 3D artifact reconstruction methods and their extensions. However, as is pointed out by WILLIS & COOPER (2008), there are still some aspects to be improved in the future, such as the efficiency, the incorporation of more available information, the development of an information-theoretic basis for searching compatible matches, etc.

PAPAIOANNOU & KARABASSI (2003) combined curve matching techniques with a surface matching algorithm to estimate the positioning and respective matching error for the joining of three-dimensional fragmented objects. FILIPPAS & GEORGOPOULOS (2013) presented the Fragmatch Algorithm that accepted data point clouds as input, i.e. X, Y, and Z for each point of the broken surfaces and not of the whole fragment. HUANG et al. (2006) also presented a system for automatic reassembly of broken 3D solids, in which they developed several new techniques in the area of geometry processing, including the novel integral invariants for computing multi-scale surface characteristics, registration based on forward search techniques and surface consistency, and a non-penetrating iterative closest point algorithm. BROWN et al. (2008) focused on the

specific problem of documenting and reconstructing fragments of wall paintings from the site of Akrotiri on the volcanic island of Thera. They take advantage of the fragments' flat front surfaces to limit their search space to planar transformations.

In general, fragments found at archaeological sites can be divided into two categories: thick and thin fragments. Current research on fragment reassembling can also be divided into aiming at thick and aiming at thin fragments accordingly. This paper focuses on the assembling of 3D thin shards, which cannot be converted into a 2D problem. In other words, an approach is put forward to match and align the shards for recovering their original 3D shapes, which is based on establishing local Cartesian coordinates at every point of the contour curves. The approach is free from any geometry assumption about the original shape and computation of curvatures and torsions. The initial matching and alignment of the proposed approach are both based on a pairwise estimation of the transformations between fragments. Besides, similar to OXHOLM & NISHINO (2013), the alignment is refined global-

ly by utilizing the core functionality of the iterative closest point (ICP) algorithm (BESL & MCKAY 1992). But instead of OXHOLM and NISHINO's original approach that iterates between optimizing the transformations and updating the correspondences of a subset (OXHOLM & NISHINO 2013), this paper takes advantage of the idea of adjustment (TRIGGS et al. 2000) in photogrammetry, which optimizes the transformations of all the fragments in each iteration. In other words, considering the practical necessity of reconstruction of antiques from 3D thin fragments found at archaeological sites, this paper aims to propose an approach to reassemble and reconstruct 3D thin fragments without known geometric shape assumption. The proposed method has the potential to be applied to the restoration of cultural relics from 3D thin fragments with an acceptable accuracy.

In the following sections, this paper will introduce the proposed approach according to the organization as shown in Fig. 1, including data acquisition and pre-processing, initial matching and alignment, global refinement, followed by experiments and an evaluation.

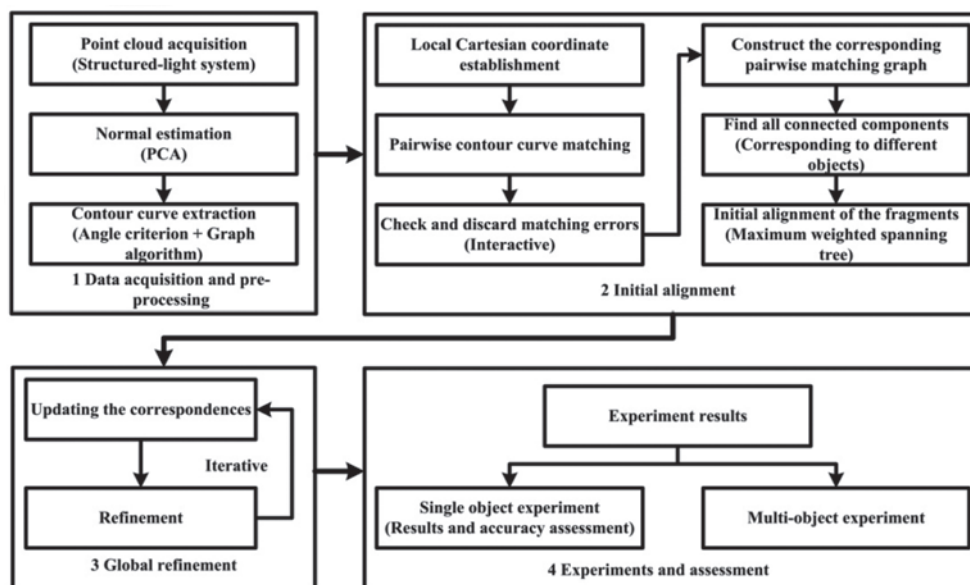


Fig. 1: Paper organizational structure.

2 Data Acquisition and Pre-Processing

Three-dimensional measurement and reconstruction of fragments, which is the prerequisite for reassembling fragments in cultural heritage research, is based on accurate extraction of the fragments' geometry information. In general, any commercially available 3-D laser-scanners are able to digitize fragments. Particularly, with its abilities to acquire reliable, precise, and dense point clouds at a low cost even when objects lack texture, the structured-light based method is chosen in our experiments to extract the fragments' geometry. Many existing structured-light based methods can be used. We utilize the system developed by ZHENG et al. (2012) for that purpose (Fig. 2). After the acquisition of the point cloud, we need to further estimate the surface normals and extract the contour curves for reassembling the fragments.

Like most surface normal estimation schemes (HUANG et al. 2009, RUSU 2010), we also make use of principal component analysis (PCA) (RUSU 2010). As the orientation of the normals computed via PCA is ambiguous, i.e. each normal can direct to two different directions, we need some additional work to compute a consistent normal orientation, and the problem turns out to be very difficult in general. Fortunately, in this paper, we employed a structured-light based system for the data acquisition, so each viewpoint of the point clouds is known as the projective centre of the corresponding camera. As a result, the normals can be consistently oriented towards the known viewpoint. As an example of data ac-

quisition, one broken bowl is shown in Fig. 3, where (a) is the original fragments' photo, and (b) is a visualisation of the corresponding point clouds rendered by their normals.

Note that although our reassembly approach only needs the contours to match the fragments, we need the neighbouring points to estimate the normal of each point of the contours, as described in the next section.

As one of the most important operations of our reassembly approach, contour curves are extracted after the normal estimation is finished. In this paper, an angle criterion that is similar to GUMHOLD et al. (2001) is employed to extract coarse contour curve points. Details are as follows:

- 1) For each point \mathbf{P} in one point cloud, we project \mathbf{P} and its neighbours into a xy-coordinate system orthogonal to the normal direction, where \mathbf{P} is the origin.
- 2) Let β be the maximum angle interval that does not contain any neighbour point in the defined xy-coordinate system. The bigger β is, the higher is the probability that \mathbf{P} is a contour curve point.

If β is larger than a threshold, i.e. 90° in this paper, the corresponding point \mathbf{P} is selected as a candidate contour curve point.

It is obvious that coarse contour curve points are unorganized, and errors are inevitable, as is shown in Fig. 3c. In order to estimate the arc length of contour curves for the following contour curve matching, we need to discard errors and order contour curve points properly as follows:

- 1) Let $G = (V, E)$ be a graph, where V corresponds to the set of all contour candidate points, each edge $e \in E$ connects a



Fig. 2: Structured-light scanning system (ZHENG et al. 2012).

- point $P \in V$ to another point $Q \in V$ in the neighbourhood of P , and the corresponding weight $W(e)$ of e is the length of \overline{PQ} i.e. $W(e) = |\overline{PQ}|$.
- 2) Find the minimum weighted spanning tree $T(G)$ of G , and replace each edge weight of the minimum weighted spanning tree by 1.
 - 3) Find all shortest paths between any pair of vertices in $T(G)$ – we use the Floyd-Warshall algorithm (FLOYD 1962) in our experiments – and then select the path that has the maximum path length as the final extracted contour curve. As a result, the contour curve points can also be ordered along the path.

As can be seen in Fig. 3c, the errors can be successfully excluded in the final ordered contour curves in comparison to the initial ones.

We just make use of these original ordered points instead of the curvatures and torsions to represent the contour curves, thus avoiding the computation of curvatures and torsions.

3 Initial Matching and Alignment

To measure the degree of correspondence between one 3D contour curve and another, a local coordinate system is firstly established at each point of the contour curves (section 3.1). After that, a new similarity measure is used to find pairs of potentially matching fragments (section 3.2). Based on this similarity measure, we apply a pairwise strategy to find the initial matching and alignment of the fragments, i.e. we calculate the similarity measure for every pair of the contour curves of the

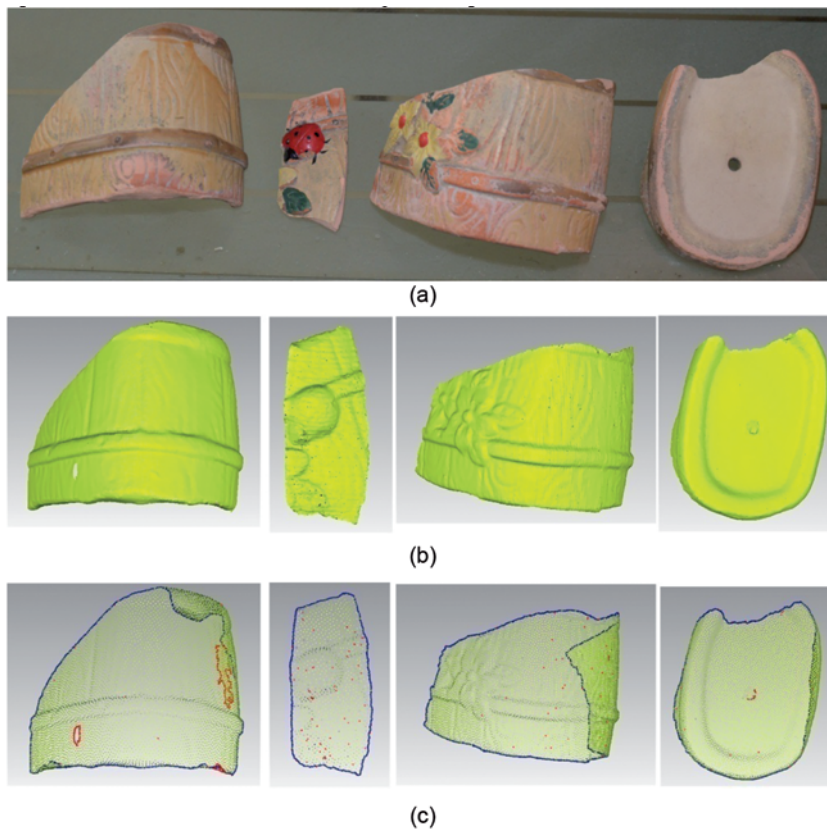


Fig. 3: Geometry information of one broken bowl acquired by a structured-light system: (a) Original fragments of the broken bowl, (b) Point clouds of the fragments rendered by their normals, (c) Coarse and final ordered contour curves, where red points are the discarded errors.

fragments, and then construct a graph to encode the matching degree of all pairs of the contour curves. In the graph, nodes represent individual contour curves of the fragments, and each pair of nodes is connected by an edge weighted by the matching degree of the corresponding two contour curves. As a result, we can find the maximum likelihood matching of the fragments by generating the maximum weighted spanning tree of the graph, and furthermore estimate the initial transformations of the fragments according to the maximum weighted spanning tree.

3.1 Establishment of a Local Coordinate System

When 3D contour curves are extracted successfully, every curve point is associated with a unique normal, which is estimated earlier in the course of normal estimation and contour curve extraction, as is shown in the left of Fig. 4. In order to establish local Cartesian coordinate systems for matching and alignment, the tangent at a curve point is estimated by line fitting based on curve points located in the neighbourhood of that point. After that, the tangential directions of one contour curve are chosen in a way to make sure that the contour curve goes counter-clockwise around the region of the corresponding point cloud, as is shown in the middle of Fig. 4. The local Cartesian coordinate system can be successfully established by the normal and the tangent at the corresponding point: The position of the point is defined as the coordinate origin, the tangent is defined as the x axis, the normal is defined as the z axis, and the y axis is finally

defined by the cross product of z axis and x axis with the right hand rule, as is shown in the right of Fig. 4.

3.2 Pairwise and Multi-piece Matching

Once the local Cartesian coordinate systems are established, the initial pairwise matches of fragments can be found based on the local Cartesian coordinates of the contour curves. When we find a pair of matching points located in two different contour curves, we can estimate the three-dimensional rigid transformation between the two curves according to the local Cartesian coordinates of the matching points. Our pairwise matching algorithm is based on this principle, i.e. we define the similarity measurement from one fragment contour curve to another and design the initial matching and alignment of the fragments as follows:

- 1) For each pair of fragments, we test all combinations of pairs of contours, i.e. for any two contour curve points of the pair, a rigid transformation is estimated according to the corresponding local Cartesian coordinate systems of the point pair, in which the local system of the first fragment is selected as the origin. Then the two contour curves are converted to the same coordinate system by the estimated rigid transformation.
- 2) For any point P_i located in one of the converted curves, we search the nearest point Q_i from the other curve, and then the distance d_i is calculated as follows:

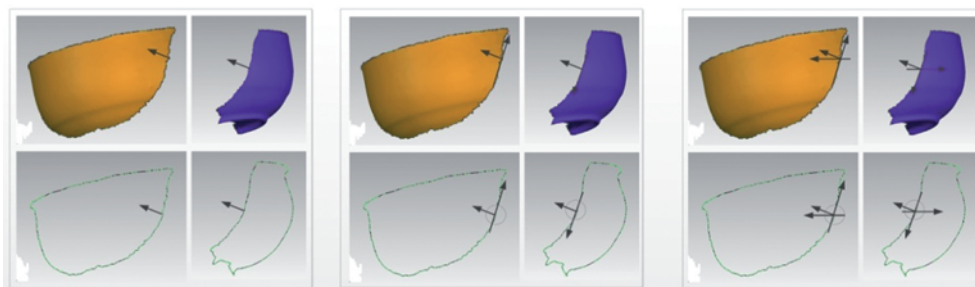


Fig. 4: The establishment of a local Cartesian coordinate system.

$$d_i = \|\mathbf{P}_i - \mathbf{Q}_i\| \quad (1)$$

Finally, we make use of a fixed threshold – about 6 times of the average distance between points on the contour or 2.0 mm in this paper – to distinguish the outliers from the inliers of the matching. The outliers and the inliers are respectively signed **O** and **I** in the follow sections.

- 3) After that, the arc length along the trajectory of the inliers is estimated. The similarity measure proposed in this paper is defined by (2):

$$g_i = \frac{L_i}{c + \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{P}_j \in \mathbf{I}} d_j^2}{N}}} = \frac{L_i}{c + \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{P}_j \in \mathbf{I}} \|\mathbf{P}_j - \mathbf{Q}_j\|^2}{N}}} \quad (2)$$

where c is a constant which is used to avoid the denominator becoming zero under the ideal condition that all residuals are zeroes, and N is the number of the inliers. As the contour curves have been ordered in pre-processing (cf. section 2), the arc length L_i can be easily estimated by adding up all adjacent point pairs' Euclidean distances along the inliers according to the order.

- 4) The matching degree D of this pair of fragments is then computed by finding the maximum g_i value of the contour curve pair:

$$D = \max_i \{g_i\} \quad (3)$$

It should be noted that when we find the maximum g_i value, we can also acquire the max-

imum likelihood alignment of the curve pair because of step (1) above.

In order to align the fragments to a common coordinate system (multi-piece matching), we proceed as follows. As soon as all matching degrees have been calculated, we build a graph in which each vertex represents an individual contour curve, and each pair of the vertices is connected by an edge weighted by the matching degree. We only need $n-1$ pairs of pairwise matchings to align the fragments to a common coordinate system, where n is the number of the fragments of an object. In other words, in order to find the maximum likelihood matching and alignment of the fragments, the maximum weighted spanning tree of the graph is generated, and then the transformations of the fragments to a common coordinate system are estimated based on the spanning tree. An example of the matching and alignment corresponding to the data in Fig. 3 is shown in Fig. 5a and b.

The above process illustrates the basic steps of pairwise matching and alignment, and its feasibility can be seen in Fig. 5. However, there are still some problems needed to solve for more common fragment reassembly, such as the computation of each point pair of the curves is time consuming, and the trouble in reassembling of multi-object fragments. In the following sections, we will further introduce our improvements in solving these problems.

3.3 Sampling Contour Curve Points to Reduce the Computational Complexity

Intuitively, we apply down-sampling of the contour curve points to reduce the computa-

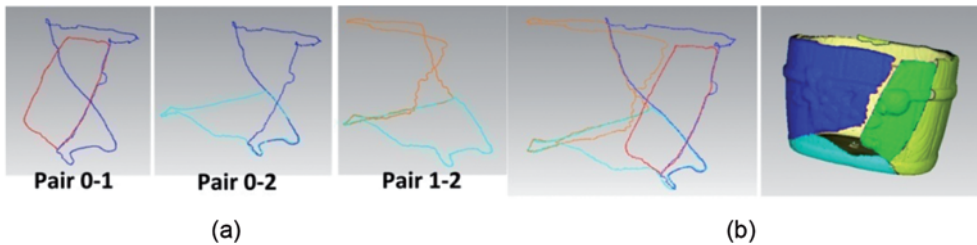


Fig. 5: Pairwise and multi-piece matching examples. (a) Examples for pairwise matching and alignment, (b) Initial multi-piece matching.

tional complexity of the proposed approach. In order to make sure that the down-sampling imposes no significant negative effect on the matching process, we only keep points that have the maximum curvature in a local sense to perform the matching process. However, as is known, almost all curvature and torsion computations suffer from numerical instabilities. Fortunately, we only need a coarse estimation of the curvatures and thus we can calculate the average curvature as proposed by GUMHOLD et al. (2001):

- 1) For each point **P** find two points **A** and **B** so that the arc length $\widehat{AP} = \widehat{PB} = s$ where s is a given constant arc length, i.e. 3.0 mm in the experiments (about 8 times of the average distance between points on the contour).
- 2) Calculate the Euclidean distance between points **A** and **B**, i.e. $d = |\mathbf{AB}|$.
- 3) Calculate the Euclidean distance h from point **P** to line **AB**, as is shown in Fig. 6a.
- 4) Finally, similar to GUMHOLD et al. (2001), the average curvature κ of point **P** can be estimated using the following equation:

$$\kappa = \theta \approx \frac{2s}{R} = \frac{16sh}{d^2 + 4h^2} \quad (4)$$

Once the average curvatures of the contour curve points have been estimated based on (4), the contour curve points can be down-sampled by keeping only points that correspond to local maxima of the average curvature. Consequently, we only need to check the points of the down-sampled sets to find potential matches, with the matching degrees still being calculated based on the original contour curve

points. A typical sampling example can be seen in Fig. 6b, in which 1.199 contour curve points are down-sampled to 72 points.

3.4 Dealing with Wrong Matches of Single- or Multi-Object Fragment Reassembly

In order to deal with wrong matches of single- or multi-object fragment reassembly, we would like to improve our strategy after the pairwise matching process described in section 3.2. To facilitate the further discussion, the weighted graph that encodes the pairwise matching is denoted by $\mathbf{G}' = (\mathbf{V}', \mathbf{E}')$ in the following sections, where \mathbf{V}' is the set of contour curves, the set of edges \mathbf{E}' is based on matching pairs of the contour curves, and according to section 3.2, each edge is weighted by the matching degree defined by (3).

Because it is impossible to know how many objects can be assembled from the given fragments before the reassembling is finished, it is important to identify errors in the pairwise matching and alignments. However, although almost all correct matching pairs have a larger matching degree than the errors, there is a small quantity of erroneous matching pairs also having high matching degrees, as is shown in Fig. 7. It turns out to be very difficult to automatically distinguish the errors from correct matches.

For this reason, it is necessary to introduce some amount of manual work to check the matching results and discard the errors. To reduce the workload, we employ the following strategy:

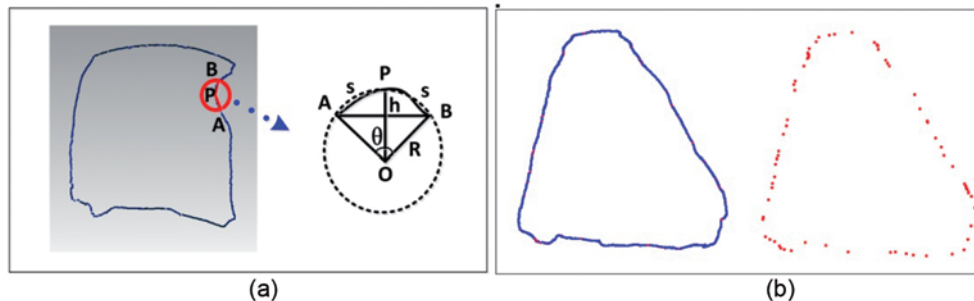


Fig. 6: Down-sampling the contour curve based on local average curvature. (a) Average curvature estimation, (b) Down sampling example.

- 1) For each vertex of G' , we order the corresponding incidence edges according to their weights.
- 2) We check whether the edges correspond to correct matches interactively: For each vertex, only a certain percentage of the incidence edges with the largest weights have to be checked. That is, if a certain percentage of the incidence edges prove to be correct matching pairs, then the checking work of this vertex can stop, and the user can go on to check other vertices. Besides, all the edges that found to correspond to correct matching pairs are labelled as "correct" in this step.
- 3) When all the vertices are checked, we discard all the edges that are not labelled to be correct, so a new graph $G'' = (V', E'')$ can be induced from the graph G' . This graph G'' has the same vertices as the graph G' , and E'' is the edge subset consisting only of the correct matching pairs.

According to the construction of graph G'' , each connected component of G'' corresponds to a possible reassembly object, so we can extract all the connected components to find the number of the reassembly objects. For each connected component, we can easily find the maximum likelihood matching and alignment through its maximum weighted spanning tree, which is similar to the process described in section 3.2.

4 Global Refinement

Due to the employment of pairwise matching strategy, the matching and alignment suffers from serious error accumulation, as is shown in Fig. 9a. For the sake of a higher accuracy,

the alignment errors are iteratively and globally adjusted by a least-square method.

Suppose R_i and T_i are the rotation matrix and the translation vector, respectively, of the rigid transformation to the common coordinate system of the i -th fragment, which have been estimated by the initial matching and alignment proposed in section 3, i.e.

$$P_g = R_i P_i + T_i \quad (5)$$

$$n_g = R_i n_i \quad (6)$$

where P_i is one point in the i -th fragment, P_g is the corresponding point in the common coordinate system, and n_i and n_g are the corresponding normal vectors.

In order to adjust the alignment errors effectively, we need to search for the nearest points of a given point from other contour curves according to the current alignment. Suppose that $P_i^{(i)}$ is one point in the i -th contour curve of the fragments, we can convert it to the coordinate system of the j -th contour curve using the following equation:

$$P_i^{(j)} = R_j^T [R_i P_i^{(i)} + T_i - T_j] \quad (7)$$

The nearest point to $P_i^{(j)}$ is easy to be found in the j -th contour curve according to the coordinate system of the j -th fragment. Then our least-square method is equivalent to searching the minimum of the following function:

$$\begin{aligned} & C \left(\bigcup_i \{R_i \quad T_i\} \right) \\ &= w \sum_{i \neq j} \|P_g^{(i)} - P_g^{(j)}\|^2 + (1-w) \sum_{i \neq j} \|n_g^{(i)} - n_g^{(j)}\|^2 \\ &= w \sum_{i \neq j} \|R_i P_i^{(i)} - R_j P_j^{(j)} + T_i - T_j\|^2 \\ &\quad + (1-w) \sum_{i \neq j} \|R_i n_i^{(i)} - R_j n_j^{(j)}\|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

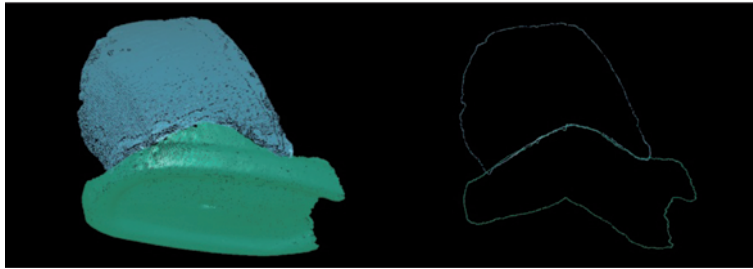


Fig. 7: Example of a false matched pair that has produced a large matching degree.

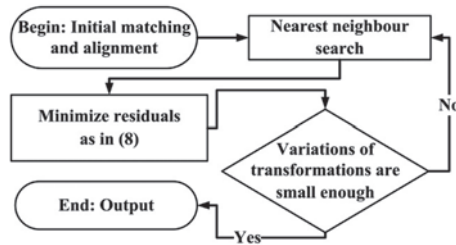


Fig. 8: Diagram of global refinement. Nearest Neighbour Search: For every point $\mathbf{P}^{(i)}$ in one of the contour curves, its nearest point is searched from other contour curves. If the distance to each other are larger than a given threshold (about 6 times of the average distance or 2.0 mm in this paper), the nearest point pair is discarded as a gross error.

where w is the weight for the first term of the function, which is between 0 and 1, $\mathbf{P}_i^{(i)}$ and $\mathbf{P}_j^{(j)}$ are the nearest pairs of points in the i -th and the j -th fragment respectively, $\mathbf{P}_g^{(i)}$ and $\mathbf{P}_g^{(j)}$ are the point coordinates corresponding to $\mathbf{P}_i^{(i)}$ and $\mathbf{P}_j^{(j)}$ in the estimated common coordinate system, and $\mathbf{n}_i^{(i)}$, $\mathbf{n}_j^{(j)}$, $\mathbf{n}_g^{(i)}$, and $\mathbf{n}_g^{(j)}$ are the corresponding normals.

The global refinement by adjusting the alignment errors is summarized in the diagram in Fig. 8.

The global refinement reduces the matching and alignment errors, as is shown in Fig. 9. Note that we can also employ the above global refinement process to deal with the multi-object fragment reassembling problem, because the multi-object fragments can be divided into several connected components according to section 3.4, and the components can be processed individually.

5 Experiments and Evaluation

5.1 Single Object Experiments

The proposed method has been tested on two additional groups of thin fragments to verify the effectiveness of the proposed reassembly approach. As is shown in Fig. 10, our experimental data contains three groups of fragments, namely Data I (5 pieces), Data II (4 pieces), and Data III (12 pieces); note that the broken bowl in Data II was used to illustrate our methodology in the previous sections. The experimental results of reassembling of Data II have already been illustrated in Fig. 9. The results of Data I and Data III are shown in Figs. 11 and 12 respectively. These results indicate that the proposed approach appears to be applicable and that the results are significantly improved due to the introduction of our global refinement. What is more, as original three-dimensional geometry models of our experimental data have been constructed before the corresponding objects were broken, we can assess the reconstruction results quantitatively in section 5.3, which will further support the mentioned conclusion.

5.2 Multi-Object Experiments

As described in section 3.4, we need to introduce some amount of manual work to check the matching results and discard the errors interactively. This strategy divides the multi-object reassembling problem into several sub-problems after the pairwise matching, so that the proposed global refinement process can be applied to tackle the sub-problems, as is shown in Fig. 13. In the experiment, we mixed

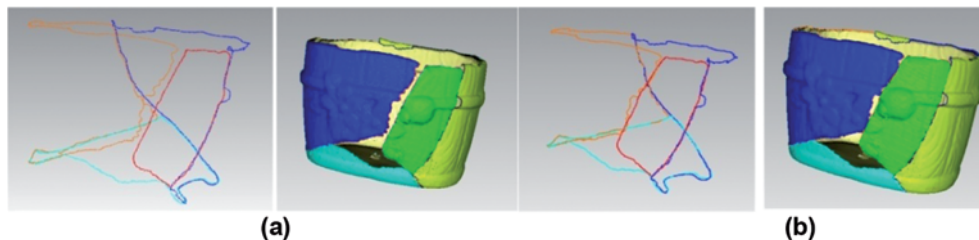


Fig. 9: Global refinement result: (a) Initial multi-piece matching, (b) Global refinement.

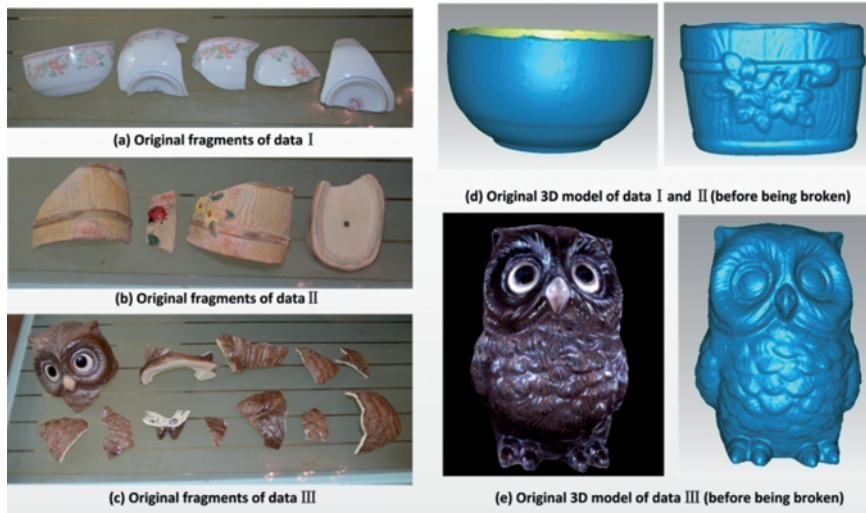


Fig. 10: Experimental data.

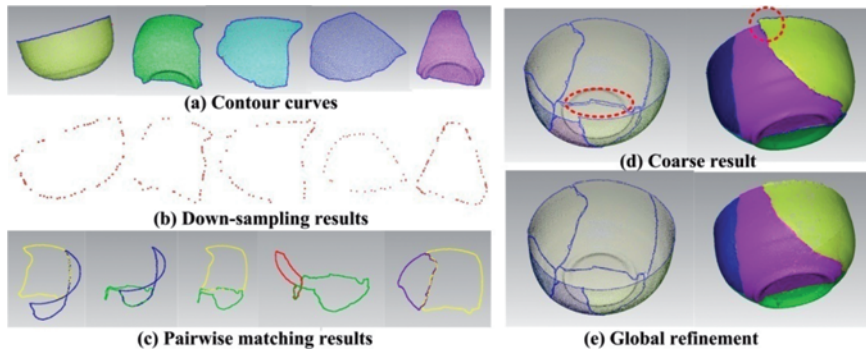


Fig. 11: Reassembling result of data I.

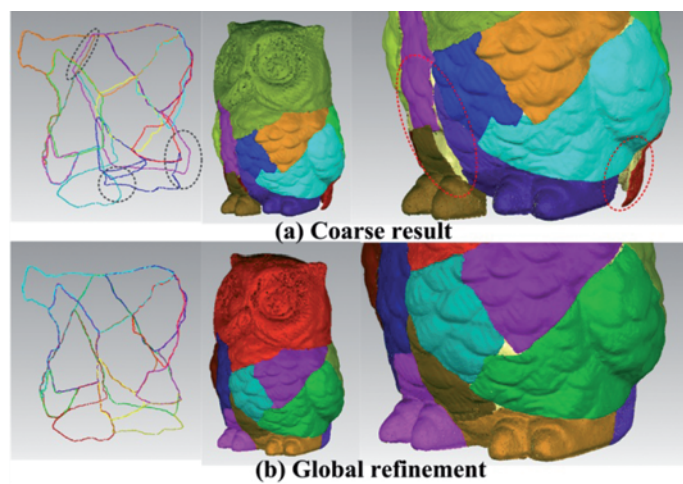


Fig. 12: Reassembling result of data III.

the three fragment sets, and then employed the proposed multi-object strategy to extract different objects through finding all the connected components of the induced sub-graph of the pairwise matching graph. Fig. 13 shows that the three different objects are successfully reassembled and the final global refinement promises the same effects as the single object

experiments for every component (less than 105 pairs are manually checked in Fig. 13).

5.3 Evaluation

In order to assess the external accuracy of the proposed approach, we firstly make use of the

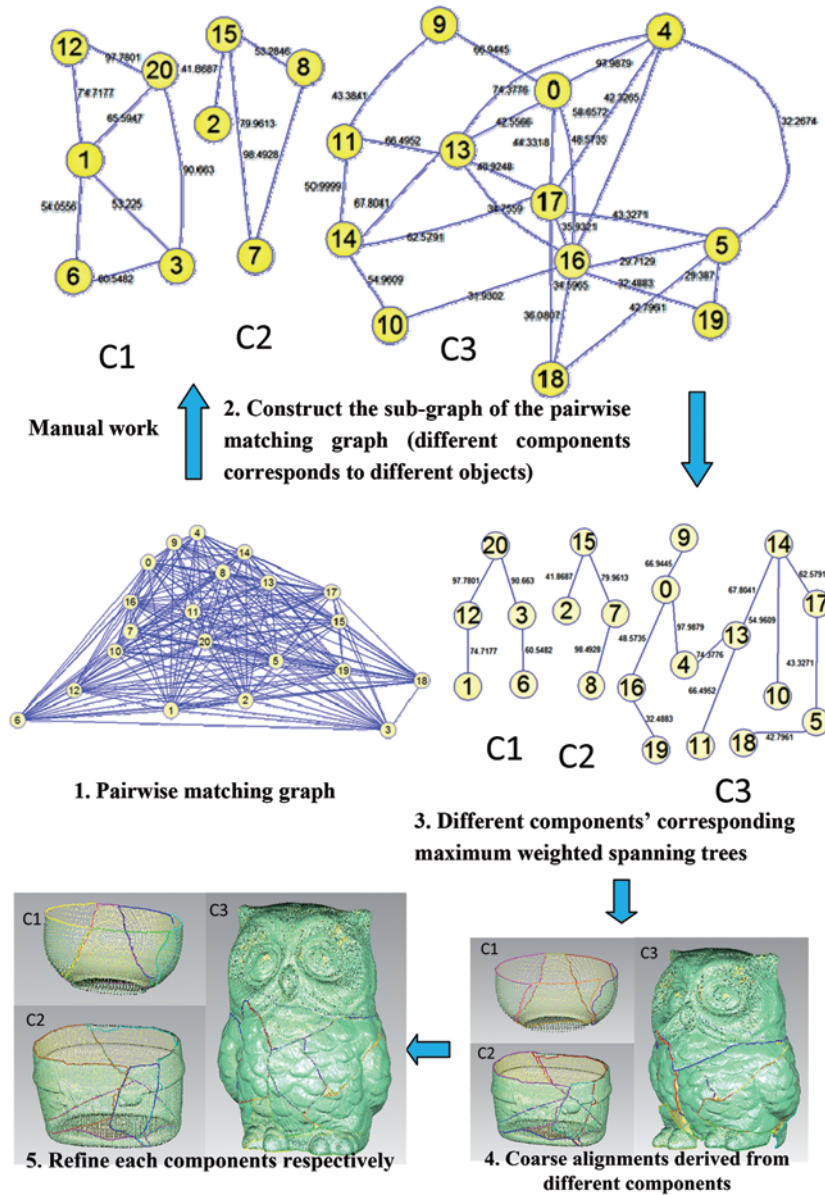


Fig. 13: Multi-object reassembling procedure and result.

Tab. 1: Statistics of reassembling errors before and after global refinement (mm).

Item	Coarse result				Global refinement			
	RMSE	Mean	Min	Max	RMSE	Mean	Min	Max
Data I	0.64	-0.173	-4.28	1.92	0.13	-0.001	-1.52	1.13
Data II	0.65	0.129	-1.84	4.39	0.16	-0.014	-1.74	1.88
Data III	1.12	-0.244	-12.05	7.86	0.47	-0.040	-1.99	1.66

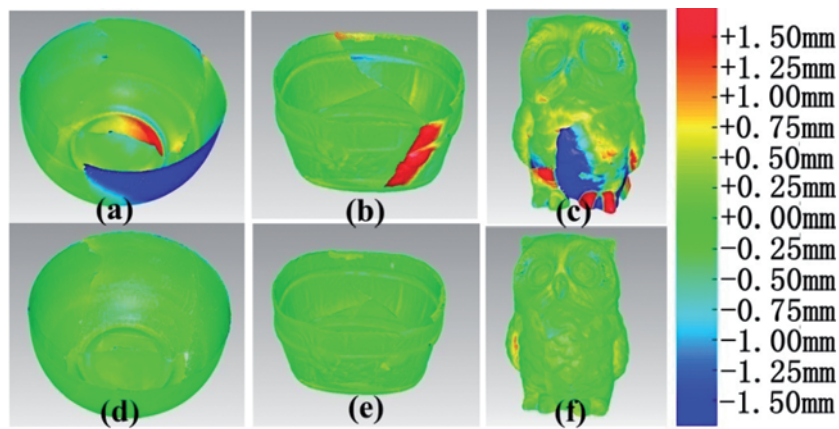


Fig. 14: Alignment errors, where (a), (b), and (c) illustrate the error distributions with respect to Data I, Data II, and Data III before the global refinement, and then (d), (e), and (f) illustrate the corresponding error distributions after the global refinement.

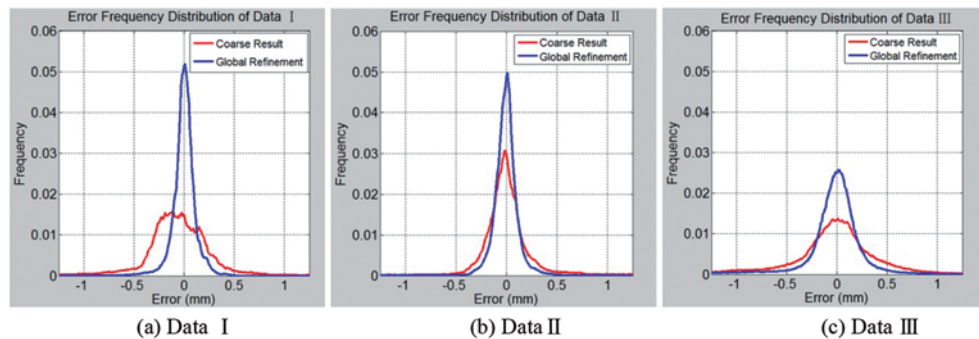


Fig. 15: Error distribution of results.

ICP algorithm (BESL & MCKAY 1992) to align the 3D model reassembled by the proposed approach with the original 3D model acquired before being broken. After that, errors are determined by estimating the directed distances from each point in the reassembled model to the original model's surface. Specifically, for each point in the reassembled model, we search the nearest point in the original model. Then the local tangent plane of the nearest point is obtained, taking into consideration the corresponding normal. Finally, the corresponding error is estimated by the directed distance from the point of the original reassembled model to the local tangent plane.

To exhibit the error distributions of different data before and after the global refinement, we render the errors of the reassembled models with false colours, as shown in Fig. 14. Furthermore, errors of Data I, Data II, and Data III are illustrated by their distribution in Fig. 15, where we can find that when the spatial information is ignored, errors of the test data are consistent with normal distributions before and after the global refinement. Accordingly, statistics of the reassembling errors are calculated and shown in Tab. 1 in detail. Tab. 1 shows that the root-mean-square error (RMSE) of Data I, Data II, and Data III can reach 0.13 mm, 0.16 mm, and 0.47 mm respectively. The RMSE here is calculated by the following equation:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i e_i^2} \quad (9)$$

where e_i is the i -th point error of the reassembled model, and N is the number of errors.

In summary, the proposed method is able to successfully reassemble the fragments of all test datasets. Moreover, the accuracies are significantly improved due to the introduction of the global refinement. Original models have also been constructed by the same structured-light scanning system, thus they have the same accuracy as each of the fragments. As the data is acquired at a distance of about 60 cm, the accuracy of the data is about 0.07 mm (about 0.10 mm while comparing two models) according to the reports of ZHENG et al. (2012). However, RMSEs of Data I, Data II, and Data III are 0.13 mm, 0.16 mm, and 0.47 mm respectively after the global refinement, which are larger than the structured-light scanning system's accuracy, but much less than the accuracies before the global refinement. There are four main reasons why RMSEs are larger than the structured-light scanning system's accuracy:

- 1) The presence of some damages in each fragments, e.g. losing of some small shards, losing of parts of the contour curves, and parts of the edges being round, etc.
- 2) The contour curves cannot supply as much information as usual surface-based ICP to reassemble and align the fragments. However, contour curves are generally the only constraints that can be used to reassemble the fragments.
- 3) The average sampling distance of each of our experimental data ranges from 0.30 mm to 0.45 mm, and the extracted contour curve points cannot always locate in the true edges of the fragments, thus the accuracy of the contour curves is expected

Tab. 2: Computation times for different stages of our algorithm.

	MO	TO (s/pair)	MS	TS (s/pair)	TG (s)
Data I	1249	--	70	22.3	4.2
Data II	806	2655.2	48	8.1	5.5
Data III	1638	--	89	54.5	29.6
Mixed Data	1366	--	75	42.2	39.3

MO = Mean number of curvature points, TO = Mean processing time of pairwise matching, MS = Mean number of sampled curvature points, TS = Mean processing time of pairwise matching based on sampled contour points, TG = Mean processing time of global refinement, Mixed Data = Multi-object experiments' data, and "--" indicates that the time is more than 3600.0 s (one hour).

to be lower than the structured-light scanning system's accuracy, i.e. the measurement accuracy.

- 4) Errors are also related to the number of fragments of the reassembled object. As is illustrated in the figures and the table, the errors of Data III are larger than both of Data I and Data II, mainly due to a greater number fragments contained in Data III. Even so, global refinement provides the proposed approach with the potential to be applied to reassemble thin 3D fragments from archaeological sites with an acceptable accuracy.

In our experiments, the reassembling program was developed with C++ and executed with an Asus notebook (Intel (R) Core (TM) i5-2450M CPU @ 2.50GHz (4 CPUs), ~2.50GHz, 4096 MB RAM, Windows 7) in a single thread, and the time consumption is summarized and shown in Tab. 2.

As shown Tab. 2, most of the time is spent in pairwise matching. Pairwise matching is so time consuming that it is impossible to reassemble the fragments when the original contour curves are used in the matching directly. Meanwhile, the sampling process makes the time consumption acceptable in the experiments.

6 Conclusions and Future Work

We have proposed an approach that has the potential to reassemble broken thin 3D fragments found at archaeological sites with an acceptable accuracy. In order to avoid the computation of the curvatures and torsions for matching the fragments' 3D contour curves, this approach defines and calculates a local 3D Cartesian coordinate at every contour curve point, and develops a method to find the maximum likelihood matching pairs of the contour curves. Unlike other current methods, this work does not rely on any assumption about the geometry of the original objects. Together with the maximum likelihood matching, the initial multi-piece alignment of the fragments is also accomplished simultaneously. However, the initial alignment suffers from serious error accumulation. In order to avoid this, we introduce a global refinement meth-

od to adjust the errors and improve the reassembling accuracy. Finally, experiments with several groups of fragments suggest that the proposed approach is able to align fragments successfully. Comparing the reassembled 3D model with the original one, the accuracy of the final model reaches acceptable dimensions (maximum of 0.47 mm) by integrating global refinement. This promises the potential of the proposed method to reassemble thin 3D fragments in archaeological sites. Besides, several schemes are also proposed in this paper to reduce the computational complexity and adapt our method to multi-object cases, and they are also shown to be feasible in the experiments.

However, further research is still needed in order to apply our method to more realistic reassembling projects. For example, because the computation will increase with an increasing number of fragments, we need to further improve the pairwise initial matching and alignment strategy, e.g. using efficient matching methods based on RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981). Furthermore, it is necessary to incorporate other information, e.g. texture, colour, and meeting point of 3 contours, etc., to adapt to the case of multi-object fragments for more automation. In a nutshell, this method still needs improvement for more complex real conditions in the future.

Acknowledgement

This research is supported by the Chinese National Natural Science Foundation Program (No. 41171357, No. 41301518). We are very grateful to the ISPRS Technical Commission V Symposium for the comments and suggestions for our researches, and special thanks are also given to the anonymous reviewers and members of the editorial board for their suggestions of improving this article.

References

- 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.
- BROWN, B.J., TOLER-FRANKLIN, C., NEHAB, D., BURNS, M., DOBKIN, D., VLACHOPOULOS, A., DOU-

- MAS, C., RUSINKIEWICZ, S. & WEYRICH, T., 2008: A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling Theran Wall Paintings. – *ACM Transactions on Graphics* **27** (3): Article 84: 1–9.
- COOPER, D.B., WILLIS, A., ANDREWS, S., BAKER, J., CAO, Y., HAN, D., KANG, K., KONG, W., LEYMARIE, F.F. & ORRIOLS, X., 2001: Assembling Virtual Pots from 3D Measurements of Their Fragments. – *VAST 2001 Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage*, ACM: 241–254, New York, NY, USA.
- FILIPPAS, D. & GEORGOPOULOS, A., 2013: Development of an Algorithmic Procedure for the Detection of Conjugate Fragments. – *ISPRS Annals – Volume II-5/W1, 2013 TC V XXIV International CIPA Symposium* **2–6**: 127–132, Strasbourg, France.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – *Communications of the Association for Computing Machinery* **6**: 381–395.
- FLOYD, R.W., 1962: Algorithm 97: shortest path. – *Communications of the ACM* **5** (6): 345.
- GRUEN, A. & AKCA, D., 2005: Least Squares 3D Surface and Curve Matching. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **59** (3): 151–174.
- GUMHOLD, S., WANG, X. & MACLEON, R., 2001: Feature Extraction from Point Clouds. – 10th International Meshing Roundtable: 293–305.
- HUANG, H., LI, D., ZHANG, H., ASCHER, U. & COHENOR, D., 2009: Consolidation of Unorganized Point Clouds for Surface Reconstruction. – *ACM Transactions on Graphics (TOG)* **28** (5): 176.
- HUANG, Q., FLÖRY, S., GELFAND, N., HOFER, M. & POTTMANN, H., 2006: Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching. – *ACM Transactions on Graphics (TOG)*: 569–578, New York, NY, USA.
- KAMPEL, M., SABLATNIG, R. & MARA, H., 2002: Automated Documentation System of Pottery. – 1st International Workshop On 3D Virtual Heritage: 14–20, Geneva, Switzerland.
- KONG, W. & KIMIA, B.B., 2001: On Solving 2D and 3D Puzzles Using Curve Matching. – *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2001*, IEEE Computer Society Conference **2** (II): 583–590.
- OXHOLM, G. & NISHINO, K., 2013: A Flexible Approach to Reassembling Thin Artifacts of Unknown Geometry. – *Journal of Cultural Heritage* **14** (1): 51–61.
- PAPAIANOANNOU, G. & KARABASSI, E., 2003: On the Automatic Assemblage of Arbitrary Broken Solid Artifacts. – *Image and Vision Computing* **21** (5): 401–412.
- RAZDAN, A., LIU, D., BAE, M., ZHU, M., FARIN, G., SIMON, A. & HENDERSON, M., 2001: Using geometric modeling for archiving and searching 3d archaeological vessels. – *CISST: 25–28*, Las Vegas, NV, USA.
- RUSU, R.B., 2010: Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments. – *KI-Künstliche Intelligenz* **24** (4): 345–348.
- TRIGGS, B., McLAUCHLAN, P.F., HARTLEY, R.I. & FITZGIBBON, A.W., 2000: Bundle Adjustment – a Modern Synthesis Vision Algorithms. – *Theory and Practice*: 298–372, Springer.
- ÜÇOLUK, G. & HAKKI TOROSLU, I., 1999: Automatic Reconstruction of Broken 3D Surface Objects. – *Computers & Graphics* **23** (4): 573–582.
- WILLIS, A.R. & COOPER, D.B., 2004: Bayesian Assembly of 3D Axially Symmetric Shapes from Fragments. – *Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society Conference **1** (I): 82–89.
- WILLIS, A.R. & COOPER, D.B., 2008: Computational reconstruction of ancient artifacts. – *Signal Processing Magazine*, IEEE **25** (4): 65–83.
- ZHENG, S.Y., ZHOU, Y., HUANG, R.Y., ZHOU, L.M., XU, X. & WANG, C.Y., 2012: A Method of 3D Measurement and Reconstruction for Cultural Relics in Museums. – *XXII International Society for Photogrammetry & Remote Sensing Congress*, Melbourne, Australia.

Addresses of the Authors:

Prof. Dr.-Ing. ZHENG SHUNYI, PD Dr.-Ing. HUANG RONGYONG & M.Sc. WANG ZHENG, School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, No. 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, PR China, Tel.: +86-027-68778010, Fax: +86-027-68778010, e-mail: syzheng@263.net, {hry} {zheng.wang}@whu.edu.cn

PD Dr.-Ing. LI JIAN, College of Water Conservancy & Environment Engineering, Zhengzhou University, No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, PR China, Tel.: +86-0371-68771852, Fax: +86-0371-68771852, e-mail: lijian5277@163.com

Manuskript eingereicht: September 2014
Angenommen: März 2015



PROSPECT Inversions of Leaf Laboratory Imaging Spectroscopy – a Comparison of Spectral Range and Inversion Technique Influences

HENNING BUDDENBAUM & JOACHIM HILL, Trier

Keywords: reflectance models, hyperspectral, inversion, LUT, leaf, VNIR, SWIR

Summary: Very high spatial resolution hyperspectral images of leaves were recorded using stationary pushbroom scanners and a translation stage. Separate images were recorded in the visible/near infrared (VNIR, 400 nm – 1000 nm) and in the shortwave infrared range (SWIR, 1000 nm – 2500 nm). We inverted the leaf reflectance model PROSPECT-5b on the image data in two different ways, by numerical inversion and by a lookup table approach. Inversion results using only VNIR images and combined VNIR/SWIR images were compared. We found that the inversion technique has only minor influence on inversion results, but the spectral range of the input data is crucial for some variables: While results for the PROSPECT structure parameter N , chlorophyll content (C_{ab}), carotenoid content (C_{ar}) and brown pigments (C_{brown}) are similar for both input datasets, results for water content (C_w) and dry matter (C_m) are not correlated between VNIR inversion and VNIR/SWIR inversion. Laboratory-based imaging spectroscopy in combination with radiative transfer model inversion is a technique capable of mapping chemical leaf parameters on a sub-millimetre scale.

Zusammenfassung: PROSPECT-Inversionen hyperspektraler Laborbilder von Blättern – Ein Vergleich der Einflüsse des Spektralbereichs und der Inversionstechnik. Höchstaufgelöste hyperspektrale Bilddatensätze von Blättern wurden mit einem stationären Pushbroom-Scanner mit einem Translationsschlitten aufgenommen. Dabei wurden separate Bilder im VNIR- (400 nm – 1000 nm) und im SWIR-Bereich (1000 nm – 2500 nm) angefertigt. Das Blattreflexionsmodell PROSPECT-5b wurde auf zwei unterschiedliche Weisen invertiert: Durch numerische Inversion und durch einen Lookup-Table-Ansatz. Die Inversionsergebnisse aus dem VNIR-Datensatz alleine wurden mit denen aus dem kombinierten VNIR/SWIR-Datensatz verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Inversionsmethode nur einen geringen Einfluss auf das Inversionsergebnis hat, wohingegen der Einfluss des Spektralbereichs für einige Variablen entscheidend ist. Während die Ergebnisse für den PROSPECT-Strukturparameter N , den Chlorophyllgehalt (C_{ab}), den Carotenoidgehalt (C_{ar}) und die braunen Pigmente (C_{brown}) für beide Eingangsdatensätze ähnlich sind, sind die Ergebnisse für den Wassergehalt (C_w) und die Trockenmasse (C_m) zwischen VNIR-Inversion und VNIR/SWIR-Inversion nicht korreliert. Es konnte gezeigt werden, dass laborbasierte abbildende Spektroskopie in Kombination mit der Inversion eines Strahlungstransfermodells in der Lage ist, chemische Blattparameter im Sub-Millimetermaßstab abzuleiten.

1 Introduction

Within-leaf variation of chemical and structural leaf properties has not gained much attention in the remote sensing community yet. In many reference measurements for remote

sensing campaigns leaf properties are measured with devices like field spectrometers or chlorophyll metres (ASNER et al. 2011, BUDDENBAUM et al. 2011). These typically measure certain spots on the leaf, but do not take the within-leaf variability into account. Laboratory imaging spectroscopy makes it pos-

sible to investigate leaf properties on much smaller scales than traditional laboratory spectroscopy. Images with pixel sizes in the sub-millimetre range can be recorded in high spectral resolution (STEFFENS & BUDDENBAUM 2013). Each pixel contains a reflectance spectrum that can be used to derive chemical and structural leaf properties, either by statistical means or by reflectance model inversion (SCHLERF & ATZBERGER 2006). The resulting leaf parameter maps can be used to assess the representability of spot measurements on the leaf or for studying biological processes in the leaf. In this study, we recorded hyperspectral images of two different leaves in the VNIR and in the SWIR spectral range, inverted the leaf reflectance model PROSPECT-5b for each pixel using two different inversion methods for VNIR and for full range datasets, respectively, and compared the results depending on spectral range and on the inversion method.

2 Material and Methods

2.1 Hyperspectral Images

Very high spatial resolution hyperspectral images of leaves were recorded using push-broom line scanners fixed in a laboratory frame. Usually, the scanners are installed in

an airplane and the images are created by flying the airplane over the target. In the laboratory, a translation stage is placed under the scanners and moves the samples. The moving speed of the translation stage and the recording time of the scanners is adapted so that an image with square pixels results (BUDDENBAUM & STEFFENS 2011). The leaves were placed on a black rubber foam mat with very low and flat reflectance throughout the spectral region considered (Fig. 1). Images were recorded in the VNIR range using a HySpex VNIR-1600 camera (STERN et al. 2014) and in the SWIR range with a HySpex SWIR-320m-e camera (Norsk Elektro Optikk AS, Lørenskog, Norway, see Tab. 1 for sensor properties). VNIR images have a pixel size of about $62 \mu\text{m} \times 62 \mu\text{m}$, SWIR resolution is about $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$. An image-to-image geometric correction was applied to the SWIR image with the VNIR image as reference. The VNIR image was then resampled to SWIR spatial resolution and the images were joined. Furthermore, SWIR spectra were adapted multiplicatively to VNIR spectra: For the spectral overlap region of 970 nm to 990 nm the mean factor of brightness differences between both sensors was determined, and SWIR spectra were divided by this factor. A white reference panel with known reflectance was recorded with the leaves so that reflectance could be

Tab. 1: Properties of the hyperspectral scanners used.

	VNIR-1600	SWIR-320m-e
Detector	Si CCD, 1600 x 1200 pixel	HgCdTe, 320 x 256 pixel
Spectral range	410 nm – 990 nm	967 nm – 2500 nm
Spatial pixels	1600	320
FOV across track	16.75° (0.29 rad)	13.30° (0.23 rad)
IFOV across track / along track (instantaneous field of view, pixel)	0.01035° / 0.0207° (0.18 mrad / 0.36 mrad)	0.043° (0.75 mrad)
Spectral sampling	3.7 nm	6.0 nm
Number of bands	160	256
Digitization	12 bit	14 bit

calculated from recorded radiance (PEDDLE et al. 2001, BUDDENBAUM et al. 2012). The background was masked out of the image.

2.2 Reflectance Model

PROSPECT-5b (FÉRET et al. 2008, JACQUEMOUD & BARET 1990) is a plate model that simulates the directional-hemispherical reflectance and transmittance of a leaf from 400 nm to 2500 nm. The imaging spectrometers employed in this study measure the biconical reflectance factor (SCHAEPMAN-STRUB et al. 2006). We assumed Lambertian behaviour (FOURTY & BARET 1997) and neglected the difference between the two quantities here. In forward mode, structural and chemical leaf parameters are input to the model, and the model calculates leaf reflectance and transmittance spectra as output (SCHLERF & ATZBERGER 2006). In an inversion, the spectra serve as input and the leaf parameters are output (GOEL 1988). The inversion problem is not always solvable because there is always noise in the measurements, the model is never perfect, and different combinations of input parameters may lead to nearly identical spectra (ill-posed problem, FÖRSTER et al. 2010). Since in this study only reflectance has been measured, transmittance is not used.

While PROSPECT-3 and -4 only use the structure parameter (N), chlorophyll a+b content (Cab), water content (Cw), and dry matter content (Cm) as input parameters, PROSPECT-5 adds carotenoid content (Car), and

PROSPECT-5b adds brown pigments content (Cbrown). The parameters are outlined in Tab. 2. Since the leaves considered contain brown patches we decided to use PROSPECT-5b in this study.

The reflective properties of leaves have been used to derive chemical leaf properties for a long time (CURRAN 1989). Since PROSPECT uses only a very limited amount of parameters, inversion is much easier than the inversion of canopy radiative transfer models (JACQUEMOUD et al. 2000, KOETZ et al. 2004). We inverted the model in two different ways: by numerical inversion and by a lookup table (LUT) approach (COMBAL et al. 2002).

In a LUT inversion approach, a large number of spectra is modelled with known parameters in forward mode as a first step. In the inversion step, for a measured spectrum with unknown parameters the most similar modelled spectrum is searched among the LUT spectra and its parameters are used as inversion result. The LUT can be filled systematically, i.e., every parameter is varied in fixed steps and a spectrum is modelled with each combination of parameters, or randomly, i.e., a fixed number of spectra is modelled with random parameter values in a fixed range. Further possible variations include using different merit functions for determining the most similar spectrum (FÉRET et al. 2011) or using the mean or median of several most similar spectra (KOETZ et al. 2004). For the LUT inversion in this study, 150,000 spectra were modelled with random values uniformly distributed in the range specified in Tab. 2 for the 6 input

Tab. 2: PROSPECT-5b parameters and boundaries for the inversion.

Parameter Name	Symbol	Unit	Minimum	Maximum
Structure parameter	N		0.8	3.0
Chlorophyll a+b content	Cab	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	0	40
Carotenoids content	Car	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	0	20
Brown pigments content	Cbrown	arbitrary units	0	4
Equivalent water thickness	Cw	g/cm^2 or cm	0.002	0.06
Dry matter content	Cm	g/cm^2	0.001	0.02

variables of PROSPECT-5b (DARVISHZADEH et al. 2011). The sum of squared differences between modeled and measured spectra for each wavelength was calculated as merit function for each pixel and the parameters of the nearest neighbour model spectrum were saved for each pixel.

Numerical inversions of reflectance models are less common in remote sensing. A mathematical optimisation routine is used to find the global minimum of deviation between modelled and measured spectra (KUUSK & NILSON 2000). Starting with an initial guess, parameters are varied within the given boundaries until a minimum is found. Some minimisation routines are discussed in KIMES et al. (2000). The numerical inversion was done in Matlab, using the function *fmincon* for constrained nonlinear multivariate function minimisation (POWELL 1978, MATHWORKS 2014), similar to the approach by JACQUEMOUD (2011). Parameters of the numeric inversion were also constrained to the values specified in Tab. 2.

Since no hard reference data of leaf properties in the high resolution necessary is avail-

able we only report correlations of the different inversion results. When a parameter is estimated consistently independent of the inversion method or the input data we assume that the inversions results for this parameter are close to the “true” value, while inconsistent inversion results, i.e. low correlations, hint to unreliable estimations of this parameter in at least one of the considered cases. Additionally, when the parameter is mapped for the whole leaf and the image has low noise and shows leaf structures well, the inversion of this parameter is considered consistent and thus more reliable than a parameter that leads to a noisy map.

3 Results

3.1 Hyperspectral Images

Mean spectra of the two leaves are shown in Fig. 1. It can be clearly seen that leaf 1 is a healthy green leaf while leaf 2 is brownish-yellowish and not very healthy. Fig. 2 depicts a true-colour and a false-colour representation of the leaves. One leaf is medium green and healthy, the other one is yellowish-brown with chlorosis patches. Four spectra are displayed. The left part of the figure only shows the VNIR spectra, in the right part VNIR and SWIR spectra are combined. The top left spectrum is a typical leaf spectrum showing the well-known features of absorption in the blue and red wavelength regions, green peak, red edge, near-infrared plateau and water absorption bands at 970 nm, 1200 nm, 1450 nm, and 1950 nm. The bottom left spectrum shows the reflectance of a leaf vein with less pronounced

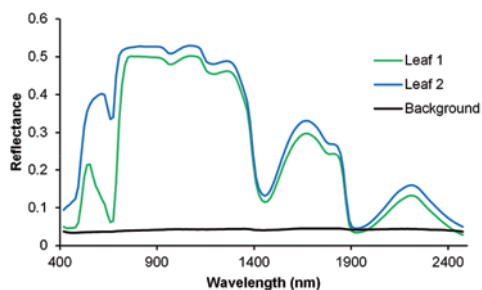


Fig. 1: Mean spectra of the two leaves and the background.

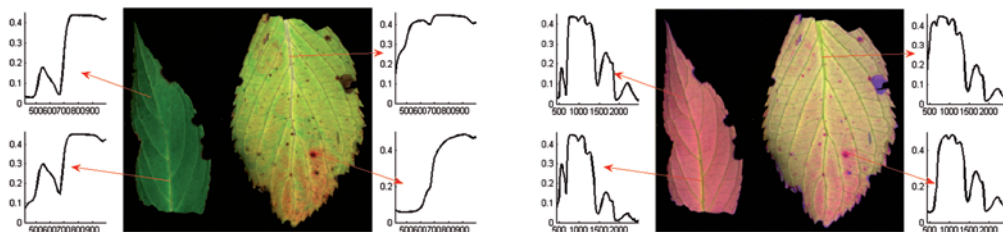


Fig. 2: Left: True colour image (RGB: 645 nm, 555 nm, 450 nm) and exemplary VNIR spectra of the two leaves considered, right: false-colour image (RGB: 795 nm, 555 nm, 1575 nm) and exemplary VNIR/SWIR spectra.

chlorophyll absorption and more pronounced water absorption. The right spectra do not have a green peak. The top right spectrum is of a yellow area next to the leaf vein, the bottom right spectrum shows the reflectance of a brown patch.

3.2 Inversion Results

Inversion results using only VNIR images and combined VNIR/SWIR (full range) images are compared in the following figures.

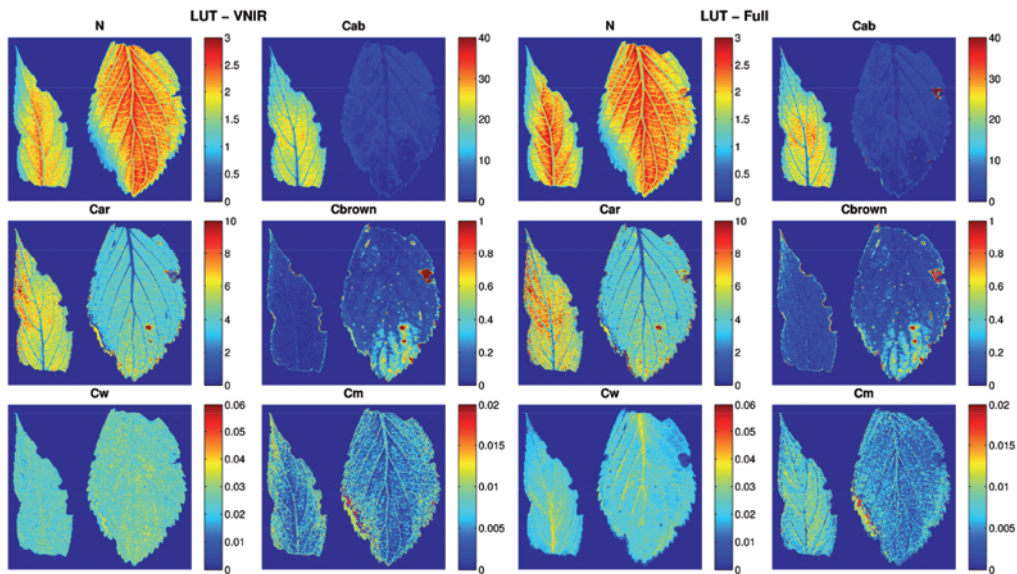


Fig. 3: Maps of PROSPECT-5b parameters resulting from lookup table inversion (LUT). Left: VNIR input data, right: full range input data.

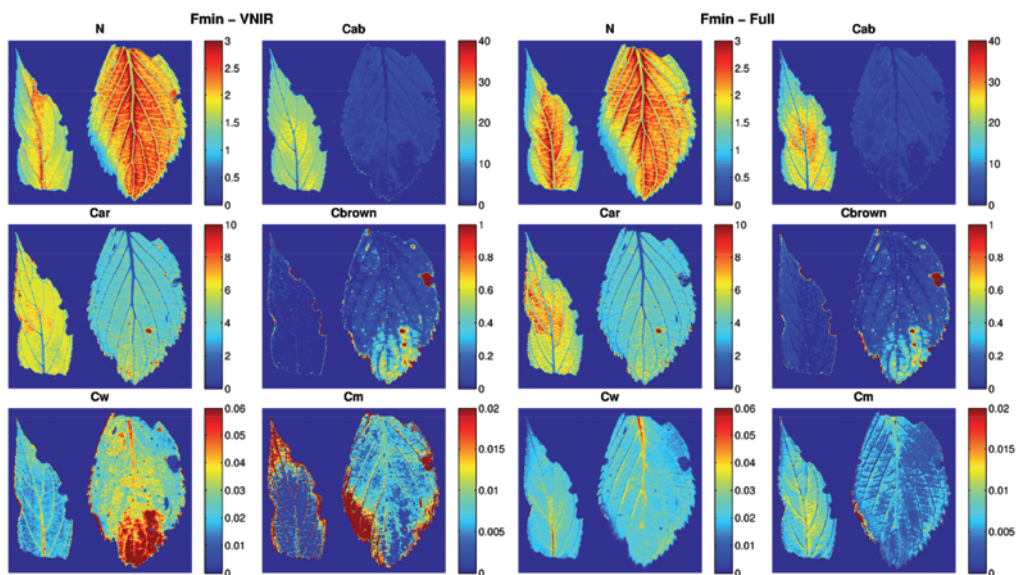


Fig. 4: Maps of PROSPECT-5b parameters resulting from numeric minimisation inversion (fmin). Left: VNIR only, right: VNIR/SWIR.

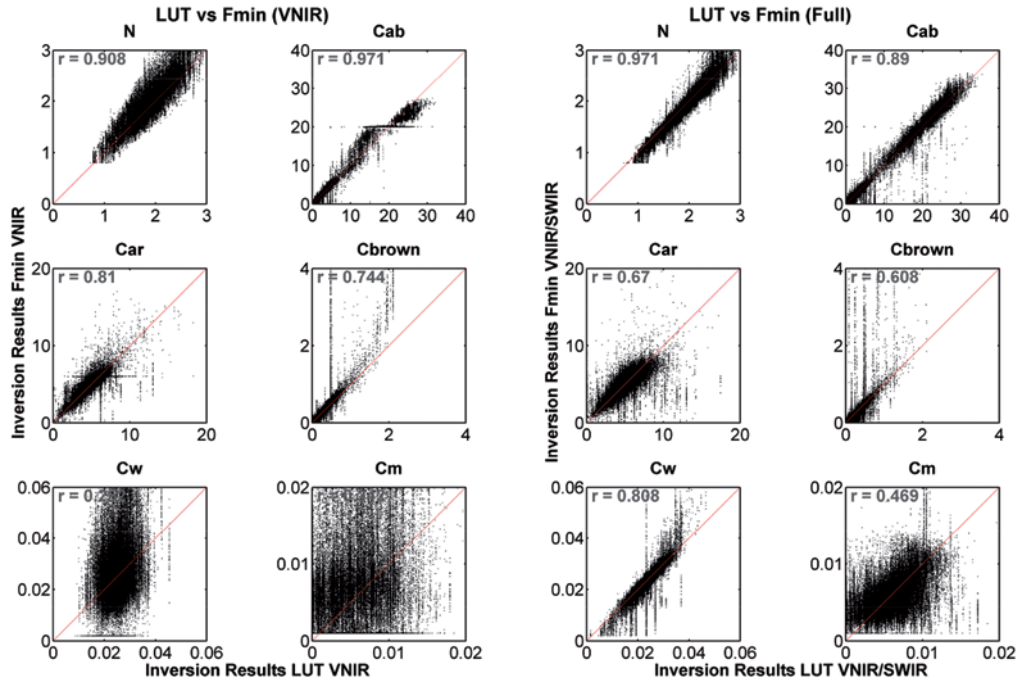


Fig. 5: Comparison of inverted PROSPECT-5b parameters, LUT inversion against numeric minimisation (Fmin). Left: VNIR only, right: VNIR/SWIR.

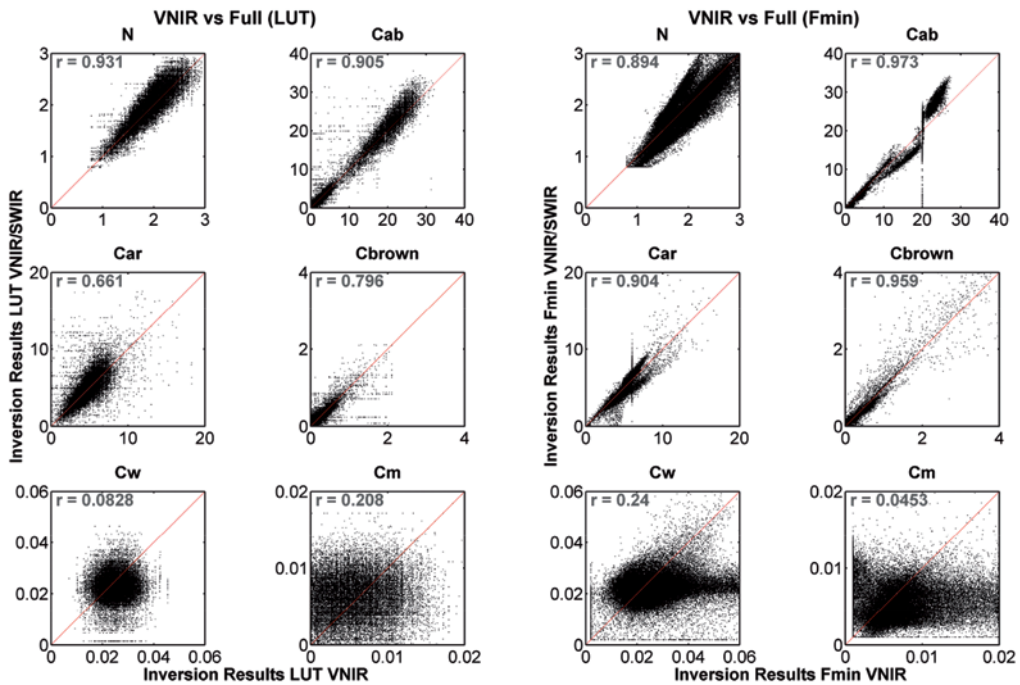


Fig. 6: Comparison of PROSPECT-5b parameter inversions, VNIR against VNIR/SWIR. Left: Lookup table, right: numeric inversion.

Figs. 3 and 4 show resulting maps of PROSPECT-5b parameters from the different inversions. In Fig. 3 the LUT inversions are depicted, with VNIR input data on the left, and full range input data on the right. Fig. 4 shows the respective numeric minimisation inversions. Some structures within the leaves are clearly discernible. E.g., the carotenoid (Car) values in the veins are very low, while the full range images show that the water content (Cw) is highest in the veins. The VNIR images of water content, on the other hand, do not show clear structures and are very noisy. The brown spots on the right leaf are clearly shown by all inversion results of Cbrown. All maps of dry matter content (Cm) are noisy and differences between the methods are large. The largest difference between the two leaves is in the chlorophyll content (Cab) which is much higher in the left leaf than in the right. The correlations of the corresponding pixels between pairs of images of the same parameter for these four inversions are depicted in Figs. 5 and 6. Fig. 5 compares the inversion techniques, i.e. LUT against numeric minimisation inversion, for VNIR and for VNIR/SWIR input data. Fig. 6 compares input datasets for both inversion techniques. The correlations

of the inverted PROSPECT parameters have values between 0.04 and 0.97.

The images were inverted on a pixel-by-pixel basis, and additionally the mean leaf spectra shown in Fig. 1 were inverted. Fig. 7 displays histograms of the resulting PROSPECT-5b parameters for the two leaves, i.e., numeric minimisation using VNIR/SWIR full range spectra, to show the intra-leaf variability, and inverted parameters for the mean spectra of the two leaves as red lines. For most parameters, the result for the mean spectrum is close to the modal value of the single pixel inversions, but there is always a considerable variance. The largest deviation between the modal value and the inverted value for the mean leaf spectrum is at the structure parameter N of leaf 2.

4 Discussion

The results were mostly in accordance with the expectations. The inversion of PROSPECT usually leads to reasonable results (LE MAIRE et al. 2004), so image-based inversion led to reasonable parameter maps partially depending on the spectral range used. It could

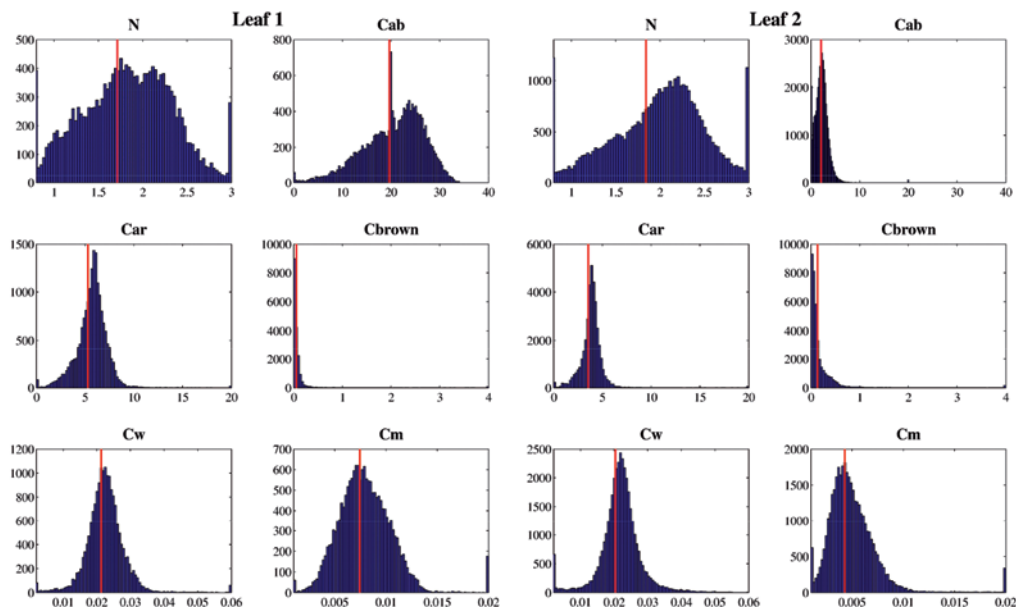


Fig. 7: Intra-leaf variation: Histograms of inverted PROSPECT parameters and inverted values for mean leaf spectrum as shown in Fig. 1 (red line) for the two leaves.

be shown that the inversion also works with laboratory hyperspectral images so that leaf parameters can be mapped in sub-millimetre resolution.

We found that the inversion technique has only minor influence on inversion results, but the spectral range of the input data is crucial for some variables: While results for the PROSPECT structure parameter *N*, chlorophyll content (*C_{ab}*), carotenoid content (*Car*) and brown pigments (*C_{brown}*) are similar for both input datasets, results for water content (*C_w*) and dry matter (*C_m*) are not correlated between VNIR inversion and full range inversion. Since the first four parameters are optically active in the VNIR range, the coherent results are unsurprising (SIMS & GAMON 2002). The finding that the inversion accuracy for *C_m* is lower than for other parameters is in accordance with other studies (e.g. ATZBERGER & RICHTER 2012, STUCKENS et al. 2009, FÉRET et al. 2008, RIAÑO et al. 2005).

For some pixels, the *F_{min}* inversion of *C_{ab}* is stuck at the initial value of 20. An analysis of the affected pixels showed that these are dark pixels at the edge of the leaf which generally are the areas with highest deviation between modelled and measured spectra. In these pixels, the algorithm stops after the maximum value of 5,000 iterations without a satisfactory solution. A buffering of leaf edges could resolve this problem.

Key findings of this study are:

- Laboratory-based imaging spectroscopy is an appropriate technique for very-high resolution mapping of reflectance.
- Laboratory-based imaging spectroscopy combined with inversion of the PROSPECT leaf reflectance model is well suited for mapping chemical and structural leaf properties.
- Results for PROSPECT structure parameter *N* are consistent regardless of inversion method and spectral range.
- Chlorophyll a+b content (*C_{ab}*) results are also highly correlated. *F_{min}* inversion sometimes favours certain values, e.g. *C_{ab}* = 20. Since *C_{ab}* absorbs in the visible domain, SWIR information is not necessary.
- The same holds for the PROSPECT-5b specific variables Carotenoid content (*Car*) and Brown Leaf Matter (*C_{brown}*): Their main

absorption features are in the visible and near infrared range, so SWIR is not needed. In the VNIR/SWIR LUT inversion of *Car*, the SWIR even seems to introduce some image noise.

- The leaf water content (*C_w*) can only be estimated well with SWIR information. There is no correlation between the two spectral ranges. Correlation between the two techniques using full range spectra is very high.
- Dry matter content (*C_m*) estimations are the least reliable with low correlations for all comparisons.

5 Conclusions

Intra-leaf variability of leaf optical properties can be measured using laboratory imaging spectroscopy. We were able to invert the leaf reflectance model PROSPECT-5b to infer leaf constituents and structure on a sub-millimetre scale. Measurements like this can be used to evaluate reference measurements on the leaf level or simply to study leaves and the spatial distribution of leaf constituents. While *N* and *C_{ab}* inversions are relatively straightforward and independent of inversion technique and input dataset, *C_w* and *C_m* inversions are more difficult so that there is much more scatter and less correlation between the different inversions. *Car* and *C_{brown}* are parameters with intermediate correlation between the different inversions.

Acknowledgements

This work was supported within the framework of the EnMAP project (contract No. 50EE1258) by the German Aerospace Center (DLR) and the Federal Ministry of Economics and Technology. The authors would like to thank three anonymous reviewers for the helpful comments.

References

- ASNER, G.P., MARTIN, R.E., KNAPP, D.E., TUPAYACHI, R., ANDERSON, C., CARRANZA, L., MARTINEZ, P., HOUCHEIME, M., SINCA, F. & WEISS, P., 2011:

- Spectroscopy of canopy chemicals in humid tropical forests. – *Remote Sensing of Environment* **115**: 3587–3598.
- ATZBERGER, C. & RICHTER, K., 2012: Spatially constrained inversion of radiative transfer models for improved LAI mapping from future Sentinel-2 imagery. – *Remote Sensing of Environment* **120**: 208–218.
- BUDDENBAUM, H., PUESCHEL, P., STELLMES, M., WERNER, W. & HILL, J., 2011: Measuring water and Chlorophyll content on the leaf and canopy scale. – *EARSeL eProceedings* **10**: 66–72.
- BUDDENBAUM, H. & STEFFENS, M., 2011: Laboratory imaging spectroscopy of soil profiles. – *Journal of Spectral Imaging* **2**: 1–5.
- BUDDENBAUM, H., STERN, O., STELLMES, M., STOFFELS, J., PUESCHEL, P., HILL, J. & WERNER, W., 2012: Field Imaging Spectroscopy of Beech Seedlings under Dryness Stress. – *Remote Sensing* **4** (12): 3721–3740.
- COMBAL, B., BARET, F., WEISS, M., TRUBUIL, A., MACÉ, D., PRAGNÈRE, A., MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y. & WANG, L., 2002: Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. – *Remote Sensing of Environment* **84**: 1–15.
- CURRAN, P.J., 1989: Remote sensing of foliar chemistry. – *Remote Sensing of Environment* **30** (3): 271–278.
- DARVISHZADEH, R., ATZBERGER, C., SKIDMORE, A. & SCHLERF, M., 2011: Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: A comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **66** (6): 894–906.
- FÉRET, J.-B., FRANÇOIS, C., ASNER, G.P., GITELSON, A.A., MARTIN, R.E., BIDL, L.P.R., USTIN, S.L., LE MAIRE, G. & JACQUEMOUD, S., 2008: PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. – *Remote Sensing of Environment* **112**: 3030–3043.
- FÉRET, J.-B., FRANÇOIS, C., GITELSON, A., ASNER, G.P., BARRY, K.M., PANIGADA, C., RICHARDSON, A.D. & JACQUEMOUD, S., 2011: Optimizing spectral indices and chemometric analysis of leaf chemical properties using radiative transfer modeling. – *Remote Sensing of Environment* **115**: 2742–2750.
- FÖRSTER, M., SPENGLER, D., BUDDENBAUM, H., HILL, J. & KLEINSCHMIT, B., 2010: Ein Überblick über die Kombination spektraler und geometrischer Modellierung zur Anwendung in der forstlichen Fernerkundung. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2010** (4): 253–265.
- FOURTY, T. & BARET, F., 1997: Vegetation water and dry matter contents estimated from top-of-the-atmosphere reflectance data: A simulation study. – *Remote Sensing of Environment* **61** (1): 34–45.
- GOEL, N.S., 1988: Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. – *Remote Sensing Reviews* **4** (1): 1–212.
- JACQUEMOUD, S., BACOUR, C., POILVÉ, H. & FRANGI, J.-P., 2000: Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. – *Remote Sensing of Environment* **74**: 471–481.
- JACQUEMOUD, S., 2011: Prospect + Sail = Prosail. – <http://teledetection.ipgp.jussieu.fr/prosail/> (26.1.2015).
- JACQUEMOUD, S. & BARET, F., 1990: PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. – *Remote Sensing of Environment* **34**: 75–91.
- KIMES, D.S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J.L., ABUELGASIM, A.A. & GAO, F., 2000: Inversion methods for physically-based models. – *Remote Sensing Reviews* **18** (2–4): 381–439.
- KOETZ, B., SCHAEPMAN, M., MORS DORF, F., BOWYER, P., ITTEN, K. & ALLGÖWER, B., 2004: Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of forest fire fuel properties. – *Remote Sensing of Environment* **92**: 332–344.
- KUUSK, A. & NILSON, T., 2000: A Directional Multi-spectral Forest Reflectance Model. – *Remote Sensing of Environment* **72** (2): 244–252.
- LE MAIRE, G., FRANÇOIS, C. & DUFRÈNE, E., 2004: Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. – *Remote Sensing of Environment* **89** (1): 1–28.
- MATHWORKS, 2014: fmincon. – <http://www.mathworks.de/de/help/optim/ug/fmincon.html> (7.10.2014).
- PEDDLE, D.R., WHITE, H.P., SOFER, R.J., MILLER, J.R. & LEDREW, E.F., 2001: Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. – *Computers & Geosciences* **27**: 203–213.
- POWELL, M.J.D., 1978: A Fast Algorithm for Non-linearly Constrained Optimization Calculations. – WATSON, G.A. (ed.): *Lecture Notes in Mathematics* **630**, Springer-Verlag.
- RIAÑO, D., VAUGHAN, P., CHUVIECO, E., ZARCO-TEJADA, P.J. & USTIN, S.L., 2005: Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content: analysis at leaf and canopy level. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **43** (4): 819–826.

- SCHAEPMAN-STRUB, G., SCHAEPMAN, M.E., PAINTER, T.H., DANGEL, S. & MARTONCHIK, J.V., 2006: Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies. – *Remote Sensing of Environment* **103** (1): 27–42.
- SCHLERF, M. & ATZBERGER, C., 2006: Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. – *Remote Sensing of Environment* **100**: 281–294.
- SIMS, D.A. & GAMON, J.A., 2002: Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. – *Remote Sensing of Environment* **81** (2–3): 337–354.
- STEFFENS, M. & BUDDENBAUM, H., 2013: Laboratory imaging spectroscopy of a stagnic luvisol profile – High resolution soil characterisation, classification and mapping of elemental concentrations. – *Geoderma* **195-196**: 122–132.
- STERN, O., PASCHMIONKA, B., STOFFELS, J., BUDDENBAUM, H. & HILL, J., 2014: Abbildende und nicht-abbildende Geländespektrometrie zur Untersuchung von Stressphänomenen an Buchenpflanzen. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2014** (1): 17–26.
- STUCKENS, J., VERSTRAETEN, W.W., DELALIEUX, S., SWENNEN, R. & COPPIN, P., 2009: A dorsiventral leaf radiative transfer model: Development, validation and improved model inversion techniques. – *Remote Sensing of Environment* **113** (12): 2560–2573.

Address of the Authors:

Dr. HENNING BUDDENBAUM & Prof. Dr. JOACHIM HILL, Universität Trier, Environmental Remote Sensing & Geoinformatics, D-54286 Trier, Germany, Tel.: +49-651-201-4729, e-mail: {buddenbaum}{hill}@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: Juli 2014
Angenommen: Januar 2015



VecTree – Konzepte zur 3D Modellierung von Laubbäumen aus terrestrischem Lidar

SEBASTIAN LAMPRECHT, JOHANNES STOFFELS & THOMAS UDELHOVEN, Trier

Keywords: Baummodell, Astwinkel, Holzvolumen, Forst, terrestrisches Lidar

Zusammenfassung: Diese Arbeit stellt einige Konzepte zur 3D-Modellierung von Laubbäumen aus terrestrischem Lidar vor, indem ein neuartiger Ansatz (VecTree) nach LAMPRECHT (2013) beschrieben wird, der sich als eine Weiterentwicklung von Slicing Ansätzen versteht. Das Modell nutzt Querschnittsradien zur Beschreibung der Oberfläche als eine Folge von Kegelstümpfen, was einer Beschreibung als hierarchischer Graph entspricht. Die Modellierung erfolgt iterativ in Wuchsrichtung, indem Suchbereiche um jeden ermittelten Querschnitt definiert werden. Die Topologie der Punkte wird durch ein Clustering abgebildet, welches die paarweise Distanz von Punkten, also den Abstand jedes einzelnen Punktes zu allen anderen Punkten, berücksichtigt. Die Identifikation eines Ast- bzw. Stammquerschnittes erfolgt jeweils durch Anpassung eines Ausgleichskreises.

In diesem Artikel wird der Modellierungsansatz Schritt für Schritt erläutert sowie auf dessen Implementierung eingegangen. Durch den Ansatz sollen vor allem alternative Möglichkeiten zur Modellierung und Beschreibung von Baumstämmen bzw. Ästen, z. B. zur Optimierung der Volumenschätzung und Bestimmung von Astdurchmessern oder -winkeln, aufgezeigt werden.

Summary: *VecTree – Concepts for 3D modelling of deciduous trees from terrestrial Lidar.* This paper presents some concepts for 3D-modeling of deciduous trees using terrestrial Lidar, by presenting a novel approach (VecTree) by LAMPRECHT (2013), which considers itself as a further developed slicing approach. The model takes advantage of cross-section radii to describe the surface as a series of truncated cones, which corresponds to a hierarchical graph. The modelling is done iteratively in the growing direction, in which search spheres are defined around each determined cross section. The topology of the points is represented by a clustering approach, which considers the pairwise spatial neighbourhood of the points. The identification of a branch or trunk section is done by fitting a circle to each slice.

In this paper the modelling approach is explained step by step and the implementation is described too. This approach shall mainly propose alternative concepts of modelling for the description of the trunks or branches, e.g. to optimize the volume estimations or the determination of branch diameters or angles.

1 Einleitung

1.1 Bedeutung

Für eine nachhaltige multifunktionale Nutzung von Wäldern, z. B. Forstwirtschaft, CO₂-Sequestrierung und energetische Nutzung, ist eine genaue Kenntnis bestimmter forstlicher Parameter, unter anderem Stammdurchmesser, Baumhöhe und Waldstruktur (vgl. BWALDINV 3 2007) notwendig, die regelmäßig in terrestrischen Inventuren (vgl. BWALDG 2010) erfasst werden. Auf Grundlage dieser Daten können so unter anderem

Holzvorratsschätzungen (vgl. BREITENBACH & ASTRUP 2012) durchgeführt aber auch wichtige Eingangsgrößen für Klimamodelle abgeleitet werden. Diese zeitaufwendigen manuellen Messungen sind im Vergleich zur Messgenauigkeit von terrestrischem Lidar teilweise mit hohen Fehlern behaftet. Zudem werden nicht alle für eine dynamische forstliche Wachstumsmodellierung relevanten Informationen der Baumarten erfasst, wie beispielsweise Aussagen zum Konkurrenzverhalten, unter anderem Astwinkel, Wuchsrichtung. Vor diesem Hintergrund können flugzeuggestützte und terrestrische Lidar-Messungen eine wertvolle

le Ergänzung darstellen, da aus diesen Daten über 3D-Modelle forstlich relevante Informationen abgeleitet werden können.

Das flugzeuggestützte Lidar hat sich erfolgreich zur Erhebung von forstlich und ökologisch relevanten Waldstrukturparametern etabliert. Beispielsweise werden in den Arbeiten von REITBERGER et al. (2009), ZHOU et al. (2010) oder DUNCANSON et al. (2014) Einzelbäume aus luftgestütztem Lidar identifiziert, so dass je nach Ansatz Parameter wie die Baumhöhe (RMSE von bis zu unter 0,5 m; vgl. KAARTINEN et al. 2012) oder der Kronendurchmesser bzw. die Kronenfläche ermittelt werden können. Ein Problem bei der Verwendung flugzeuggestützter Daten liegt jedoch in den sich überlappenden Kronenbereichen, was insbesondere in dichten Waldbeständen die Identifikation von Einzelbäumen erschwert (vgl. KAARTINEN et al. 2012). Da so die Form der Einzelbäume nicht genau bekannt ist, können Strukturparameter auf Einzelbaumebene nur mit größeren Unsicherheiten ermittelt werden. Auch können Zustandsgrößen wie das Stammvolumen oder die Kronenstruktur nur empirisch ermittelt werden.

Diese Schwierigkeiten lassen sich durch TLS-Messungen (Terrestrial Laser Scan) teilweise lösen, da insbesondere die Aststruktur detaillierter abgebildet werden kann. Die Nutzung von terrestrischen Lidar im Wald ist bisher wegen des hohen Messaufwands meist auf Einzelfallstudien beschränkt. Beispielsweise wird zur dritten Bundeswaldinventur (BWI) weiterhin auf traditionelle Verfahren wie die Winkelzählprobe zurückgegriffen (vgl. BMELV 2011). Dabei bieten TLS-Messungen aufgrund der im Vergleich zu flugzeuggestütztem Lidar höheren räumlichen Auflösung ein erhebliches Potential, um die Geometrie von Bäumen genauer zu erfassen. So können beispielsweise Erkenntnisse über das Wachstums- und Konkurrenzverhalten, die Verteilung des Holzvorrates oder die Änderung der Biomasse (vgl. KAASALAINEN et al. 2014) gewonnen werden. Solche detaillierten TLS-Messungen können über statistische Verfahren wie „small area estimation“ mit flächigen luftgestützten Messungen kombiniert werden, um genauere flächenbezogene Zustandsvariablen zu erhalten (vgl. BREITENBACH & ASTRUP 2012).

1.2 *Stand der Forschung und Motivation*

In jüngerer Vergangenheit wurden zahlreiche Ansätze zur geometrischen Modellierung von Bäumen aus terrestrischem Lidar entwickelt. Es zeigen sich Parallelen einiger Ansätze, bei denen der Stamm und die Äste eines Baumes in verschiedene Segmente unterteilt werden, die eine hierarchische Graph-Struktur bilden (vgl. DELAGRANGE et al. 2014, RAUMONEN et al. 2013). Die Oberfläche wird in der Regel durch geometrische Primitive wie Zylinder (vgl. RAUMONEN et al. 2013, EYSN et al. 2013) oder Kegelstümpfe (vgl. DELAGRANGE et al. 2014) beschrieben. Im Allgemeinen wird das Problem der Oberflächenmodellierung in mehrere Teilprobleme zerlegt, bei denen entweder Astquerschnitte identifiziert werden (vgl. HILDEBRANDT & LOST 2012, HACKENBERG et al. 2014), indem zunächst eine Form des Clusterings vorgenommen wird, oder Teilflächen schrittweise zu Segmenten zusammengesetzt werden, indem die Oberflächenstruktur analysiert wird (vgl. RAUMONEN et al. 2013, DELAGRANGE et al. 2014). Insbesondere die erstgenannten Ansätze nutzen die Wuchsrichtung der Bäume zur Modellierung aus. Beispielsweise sind etablierte circle-fitting-Verfahren bei einer hohen Anzahl an Scans in der Lage, das Holzvolumen mit Fehlern von 2% unter bis 6% über einem Referenzvolumen zu bestimmen (vgl. PUESCHEL et al. 2013). So generierte Modelle stellen unter anderem Parameter wie Baumhöhe, Holz- und Stammvolumen, nutzbares Holzvolumen, Astwinkel, Querschnittsradien, Kronenvolumen und Kronenfläche bereit (siehe HACKENBERG et al. 2014).

Bei geringer Datenqualität, beispielsweise durch eine niedrige Anzahl an Scans, treten Datenlücken durch Abschattungseffekte auf. Diese führen in der Regel dazu, dass die Verästelungsstruktur nicht vollständig rekonstruiert werden kann und somit eine Rekonstruktion notwendig wird (vgl. RAUMONEN et al. 2013) oder Teile der Krone nicht erfasst werden. In dieser Arbeit soll daher ein Verfahren vorgestellt werden, welches eine Modellierung in Wuchsrichtung (ähnlich zu HACKENBERG et al. 2014) vornimmt. Dabei werden Lösungsstrategien erarbeitet, die eine höhere Robustheit gegen Datenlücken erreichen sol-

len. Durch diese Konzepte sollen die in der Arbeit von PUESCHEL et al. (2013) genannten Unsicherheiten der Volumenschätzung (von -34% bis +44%, s.o.) bei einem Einzelscan reduziert bzw. eine allgemeine Reduktion der Unsicherheiten bei einer geringen Anzahl an Scans erreicht werden.

1.3 Ziele und Methoden

In diesem Artikel wird ein vektorieller Ansatz zur geometrischen Modellierung von Einzelbäumen und Beständen auf Basis von TLS entwickelt (VecTree). Ein besonderes Augenmerk wird auf die variable und komplexe Stamm- und Astoberflächenstruktur von Laubbäumen gelegt. Im Vergleich zu Nadelbäumen zeichnen sich Laubbäume durch ein komplexeres Wuchsverhalten aus. Unterschiedliche Asthaltungswinkel, wechselnde Wuchsrichtungen, sowie ineinandergreifende Strukturen erfordern eine dynamische geometrische Modellierung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst theoretische Überlegungen zur geometrischen Struktur von Laubbäumen und die Konzeption des Modells vorgestellt. Darauf aufbauend wird der Algorithmus schrittweise erläutert und auf dessen Parametrisierung eingegangen. Das entwickelte Modell soll wichtige forstliche und geobotanische Parameter explizit bereitstellen.

Mit diesem Beitrag soll weniger dieses konkrete Modell propagiert, sondern vor allem konzeptuelle Überlegungen zur Modellierung von Laubbäumen sowie die Verarbeitung von terrestrischen 3D-Daten vorgestellt und diskutiert werden. Daher beschränkt sich die Auswertung der Ergebnisse auf eine Validierung anhand der TLS-Punktwolke, während im Diskussionsteil aufgetretene Probleme und Vorschläge für zukünftige Modellierungsansätze thematisiert werden.

2 Datengrundlage

Als Datengrundlage dienten vom Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik der Universität Trier durchgeführte TLS-Messungen einer forstlichen *ForeStClim*-Versuchsfäche (siehe FAWF 2015) in Merzalben,

(Rheinland-Pfalz, Deutschland; GK Koordinaten: Rechtswert 2631521, Hochwert 5461217). Eine rund 0,25 ha große Teilfläche bildet einen Mischbestand (siehe LEIMBROCK 2012), der von einem ca. 30-jährigen Buchenbestand und einer ca. 25-jährigen Douglasienfläche bestanden ist. Von besonderem forstökologischem Interesse ist dabei die direkte Konkurrenzzone zwischen beiden Baumarten.

Zur Messung wurde der *Laser Scanner Photon 120* der Firma *FARO* verwendet (siehe FARO 2009), der bei einer Messdistanz von 25 m eine Positionierungsgenauigkeit von ± 2 mm erreicht. Der verwendete ungefilterte Datensatz weist bei 10 m Entfernung zum Scanner einen mittleren Punktabstand von 3,2 cm und einen Median des Punktabstandes von 0,8 cm auf. Es werden etwa zwanzig Bäume auf einer Fläche von ca. 30 m \times 30 m aus dem Konkurrenzbereich zwischen Buche und Douglasie abgebildet.

Da die Messung nur von einem Standpunkt durchgeführt wurde, weist der Datensatz Ast- und Stammquerschnitte mit sichelförmiger Geometrie mit Datenlücken durch Abschattungen von Objekten auf. In dieser Studie wurden explizit diese problematischen Daten verwendet, um die Entwicklung robuster Konzepte zu fördern. Dies wird als sinnvoll erachtet, da in der Praxis die Anzahl und Auflösung der Scans aus Zeit- und Kostengründen möglichst gering gehalten werden sollte und kürzere Messzeiten Störungen durch Windeffekte vermindern. Wind verursacht, dass sich vor allem dünne Äste während der Messung bewegen, was dazu führt, dass diese mehrfach abgebildet werden und ein wellenförmiger oder unscharfer Eindruck entsteht.

3 Methoden

3.1 Modellierungsansatz

Das Modell beschreibt einen einzelnen Baum als eine Menge von Segmenten, die an die Oberfläche des Stammes und der Äste angepasst werden. Ein Segment entspricht geometrisch einem Kegelstumpf, der durch einen in Wuchsrichtung gerichteten Vektor $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ zwischen den Mittelpunkten der Kegelstumpf-

grundflächen und die zugehörigen Radien beschrieben wird. Die Verzweigungsstruktur des Baumes wird durch die Organisation der Segmente als hierarchischer Graph abgebildet, so dass die Segmente an ihren Endpunkten verbunden werden. Daher entspricht der Vektor \vec{v} einer Kante des Graphen zwischen seinem *parent*- (Ortsvektor) und seinem *child*-Knoten. Ein Knoten K wird durch seinen Knotenpunkt $kp_K \in \mathbb{R}^3$, der Mittelpunktskoordinate seiner Kegelstumpffläche, und dem Knotenradius $r_K \in \mathbb{R}^+$, dem Radius seiner Kegelstumpffläche, definiert. Die hierarchische Struktur des Graphen ermöglicht Verzweigungen, indem sich mehrere Segmente einen gemeinsamen *parent*-Knoten teilen, während sich die *child*-Knoten paarweise unterscheiden, weil auf diese Weise neue Äste des Graphen generiert werden.

Da der *parent*-Knoten eines Segmentes dem *child*-Knoten eines vorangegangenen Segmentes entspricht, stimmen die Radien ihrer angrenzenden Kegelstumpfflächen überein. Die Oberfläche des Baumes wird so über die gemeinsame Oberfläche der Kegelstumpfe, sowie an den Knotenpunkten jeweils durch eine an den Querschnitt angepasste Kugel, beschrieben.

Die Modelloberfläche wird in Abb. 1 illustriert. Hier werden die Knoten und Vektoren über den Index $i \in \mathbb{N}$ unterschieden, so dass

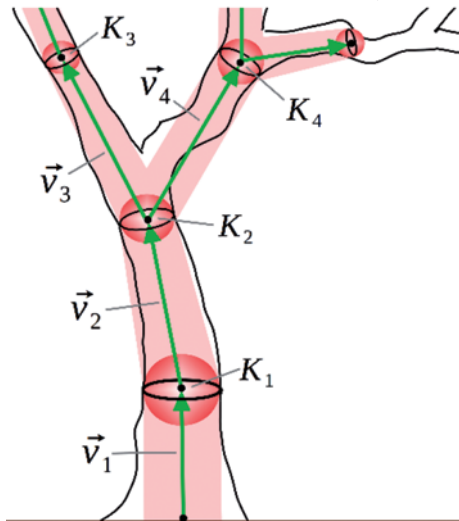


Abb. 1: Konzeptionelle geometrische Modellierung der Oberfläche eines Stammes mit Ästen durch Anpassung von Kegelstumpfen.

ein Vektor \vec{v}_i eine Kante zwischen seinem *parent*-Knoten K_{i-1} und *child*-Knoten K_i bildet. Für den Stammansatz wird eine vertikale Wuchsrichtung angenommen, so dass er einem vertikalen Zylinder entspricht.

Die Approximation des Modells an stark verzweigte Bäume soll durch eine dynamische Wahl der Kegelstumpflänge anhand der Ast- bzw. Stammdurchmesser erreicht werden. Durch dieses Vorgehen wird gleichzeitig eine gewisse Skalunenabhängigkeit sichergestellt, so dass im Folgenden keine konzeptionelle Unterscheidung zwischen Stamm und Ästen vorgesehen wird.

Um das Vektormodell herzuleiten, wurde ein iterativer Ansatz mit den Teilschritten 1. *Layerselektion* (Auswahl möglicher Querschnitte aus der Punktwolke), 2. *Knotenbestimmung* (Auffinden von Clustern und Mittelpunktbestimmung über Anpassen eines Kreises) und 3. *Plausibilitätsprüfung* (Fehleranalyse) entwickelt. Das Flussdiagramm (Abb. 2) stellt den Ablauf des Ansatzes detailliert dar und verdeutlicht den Einsatz der Modellparameter. Im Folgenden wird auf das Flussdiagramm über die Abkürzung „(F-x)“ verwiesen, wobei x auf den entsprechenden Teilschritt verweist.

3.2 Layerselektion

Die Suche nach möglichen Stammquerschnitten erfolgt angelehnt an bestehende Slice-Ansätze (siehe PUESCHEL et al. 2013) in Layern einer Dicke $h \in \mathbb{R}$. Zum Auffinden dieser Querschnitte wird zunächst ein erster horizontaler Layer L_{First} in einer bestimmten Höhe $s \in \mathbb{R}$ über Grund, beispielsweise an der für forstwirtschaftliche Messungen genutzten „Brusthöhe“, in der Regel 1,30 m, gewählt (siehe F-1). Alle weiteren Layer L_j werden ausgehend von den bereits ermittelten Knotenpunkten, ähnlich wie in der Arbeit von HACKENBERG et al. (2014) bestimmt (siehe F-11). Dabei werden zu einem bestimmten Knoten K alle Punkte innerhalb einer in Wuchsrichtung aufgespannten Teilsphäre – eines bestimmten Winkels α und der Mächtigkeit h – zu einem Layer zusammengefasst (siehe Abb. 3).

Der Sphärenradius R_j , welcher in etwa der Länge des anzupassenden Kegelstumpfes ent-

spricht, wird dynamisch nach (1), anhand des zuvor ermittelten Knotenradius $r_K \in \mathbb{R}^+$ und des Längenfaktor-Parameters $l \in \mathbb{R}^+$, bestimmt.

$$R_l := \frac{h}{2} + l \cdot r_K \quad (1)$$

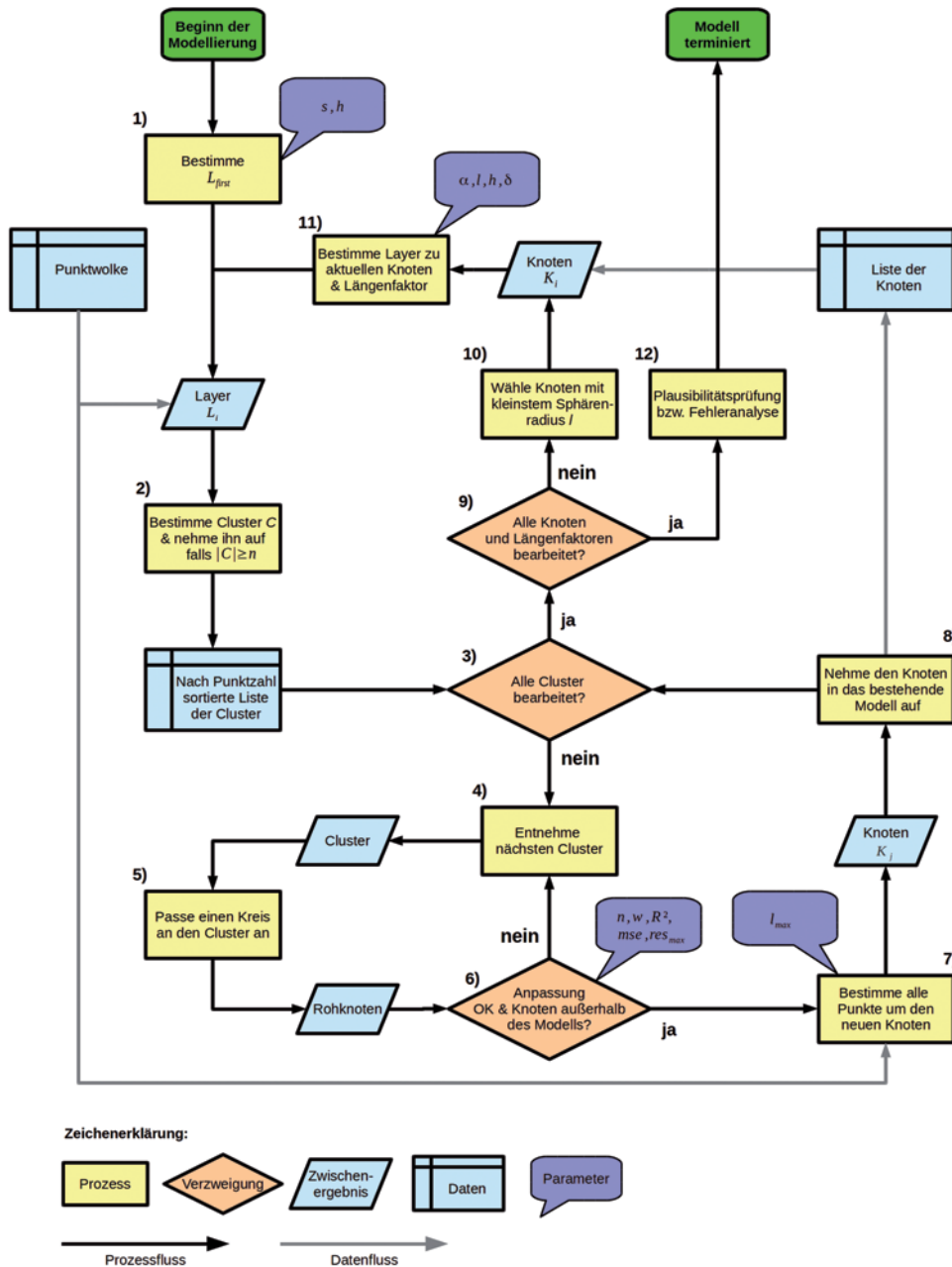


Abb. 2: Flussdiagramm des vorgestellten Modellierungsansatzes.

Auf diese Weise richtet sich die Länge der modellierten Segmente nach dem Durchmesser des Astes bzw. Stamms. Um die Modellierung auch in Bereichen geringer Punktdichte oder Datenlücken fortführen zu können, sollen auch unterschiedliche Längenfaktoren und Sphärenwinkel aus einer Liste gewählt werden können, die nacheinander ausgewertet werden.

Die Definition einer Teilsphäre zum Knotenpunkt kp_K mit Richtungsvektor \vec{v} wird in Abb. 3 illustriert. Zur Konstruktion wird der Schnitt einer zum Hilfspunkt q (2) aufgespannten Kugel mit Radius c (3) zur Sphäre mit Radius R_l und Dicke h verwendet. Demnach definiert sich ein Layer L_j zu einem Knoten K durch alle Punkte aus der Punktwolke P , die in innerhalb der aufgespannten Teilsphäre liegen.

$$q := kp_K + \left(R_l + \frac{h}{2} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \quad (2)$$

$$c := \left(R_l + \frac{h}{2} \right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \quad (3)$$

Die Selektion von Teilsphären stellt, im Unterschied zum Ansatz von HACKENBERG et al.

(2014), sicher, dass eine Verzweigung nur in einem vordefinierten plausiblen Winkelbereich in Wuchsrichtung erfolgen kann. Durch die Wahl unterschiedlicher Längenfaktoren wird es möglich, Bereiche geringerer Punktdichte oder Datenlücken, z. B. durch Abschätzung, zu überbrücken. Bedingung ist hierfür, dass sich eine solche Lücke zwischen dem Knotenpunkt kp_K und dem Layer L_j befindet. Daher richtet sich die maximal überbrückbare Ausdehnung einer Datenlücke nach dem Sphärenradius R_l so, dass sie unterhalb des Wertes $l_{max} \cdot r_K$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max}) liegt.

3.3 Identifikation potentieller Querschnitte

Um potentielle Querschnitte innerhalb eines Layers L_j zum Knoten K zu identifizieren, soll die räumliche Nähe der Punkte zueinander berücksichtigt werden. Hierzu werden zunächst Cluster über die δ -Umgebung der Punkte bestimmt (siehe F-2). Dabei definiert sich ein Cluster $C_{L_j, p_0, \delta}$ (in der laufenden Arbeit nur noch als C bezeichnet) zu einem Layer L_j und seinem Ausgangspunkt $p_0 \in L_j$ nach (4). Diese Cluster entsprechen daher den Ergebnissen des DBSCAN-Ansatzes (vgl. ESTER et al.

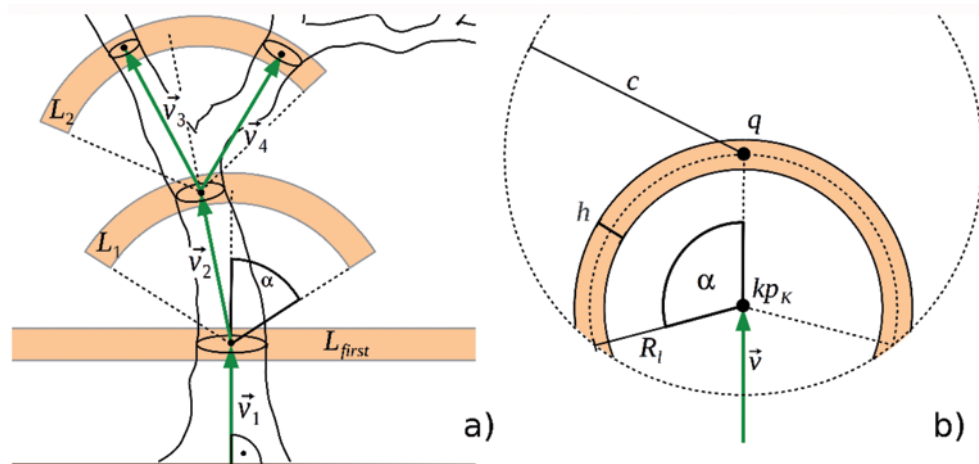


Abb. 3: a) Vektorieller Ansatz mit aufgespannten Teilsphären (orange Flächen) zur Selektion von Querschnitten. b) Definition einer Teilsphären zum Knotenpunkt kp_K und Richtungsvektor \vec{v} über den Schnitt einer Kugel mit zugehöriger Sphäre der Dicke h , Sphärenwinkel α und Längenfaktor l . Der 3D-Layer L_j wird über den Sphärenradius R_l (1), den Hilfspunkt q (2), sowie den Radius c (3) konstruiert.

1996) mit einer Mindestzahl an Punkten von $MinPts = 0$.

$$C_{L_j, p_0, \delta} = \left\{ p \in L_j : \left(\|p - p_0\| \leq \delta \right) \vee \left(\exists p_c \in C_{L_j, p_0, \delta} : \|p - p_c\| \leq \delta \right) \right\} \quad (4)$$

Der Radius δ richtet sich vornehmlich nach der geometrischen Auflösung des Datensatzes, so dass er so gewählt werden sollte, dass Querschnitte nicht zerfallen. Durch diese Art des Clusterings wird eine Identifikation der Oberfläche ermöglicht, bei der der Anteil an potentiellen Ausreißern gering ist.

Die so geclusterten Punkte werden im Folgenden zur Kreisanpassung verwendet, da angenommen wird, dass sie einen potentiellen Querschnitt bilden. Daher muss die Anzahl der Punkte eines Clusters mindestens $n \in \mathbb{N}_{\geq 3}$ betragen, wobei zur Überbestimmung des Gleichungssystems n deutlich größer drei gewählt werden sollte.

Zur Vereinfachung der ersten Implementierung wurde die Definition eines Clusters über den Bufferradius δ durch eine kubische *Bounding Box* mit Kantenlängen δ ersetzt. Zudem werden die Cluster des ersten Layers durch eine zweidimensionale δ -Umgebung bestimmt, da zunächst von einer vertikalen Wuchsrichtung ausgegangen wird.

3.4 Knotenbestimmung

Für jeden Cluster wird zunächst ein potenzieller Knoten bestimmt, indem ein dreidimensionaler Ausgleichskreis an die Punkte des Clusters durch Minimierung der Residuen angepasst wird. Durch Betrachtung der Modellgüte wird im Nachhinein entschieden, ob eine Kreisform wahrscheinlich ist und so der Knoten in das bestehende Modell aufgenommen werden kann.

Hierfür wird in einem ersten Schritt angelehnt an die Idee von UMBACH & JONES (2003) über die Methode der kleinsten Quadrate eine Kugel mit dem Mittelpunkt $b_m = (x_m, y_m, z_m) \in \mathbb{R}^3$ und dem Radius $r \in \mathbb{R}$ angepasst. Dies entspricht einer Minimierung der Residuen zu allen Punkten p aus dem aktuellen Cluster C :

$$\min_{b_m, r} \sum_{p \in C} \left(r - \|p - b_m\|_3 \right)^2 \quad (5)$$

Falls keine angemessene Kugelanpassung besteht, wird der Punkt verworfen und der nächste Cluster gewählt. Als Qualitätsmaß dient der RMSE bezüglich des Abstandes der Punkte aus C zu b_m in Relation zu r . Hierzu gibt der Nutzer einen gewissen Schwellwert vor.

Für eine genauere Anpassung des Querschnitts wird daraufhin der entsprechende Cluster gegen den Vertikalwinkel β des Vektors zwischen dem Kugelmittelpunkt b_m und dem *parent*-Knotenpunkt kp_K rotiert (vgl. Abb. 4), was eine Projektion des Querschnitts in die Ebene ermöglicht. Daher kann anschließend analog zu (5) eine Kreisanpassung im verebneten Clusters C' vorgenommen werden (6). Die L2-Norm wird hierzu über die x- und y-Komponenten gebildet.

$$\min_{b'_m, r} \sum_{p' \in C'} \left(r - \|p' - b'_m\|_2 \right)^2 \quad (6)$$

Zur Rücktransformation werden die transformierten unverebneten z-Koordinaten gemittelt und der resultierende z-Wert dem Mittelpunkt b'_m zugeschrieben. Der Drehwinkel ergibt sich aus der Summe des Winkels β und dem Vertikalwinkel zwischen kp_K und b'_m . Dieser Mittelpunkt zusammen mit dem ermittelten Kreisradius stellt einen potentiellen *child*-Knoten zu seinem *parent*-Knoten K dar. Die Plausibilität des neu bestimmten Knotens wird in der gegebenen Implementierung durch folgende Tests geprüft (F-6). Falls eine

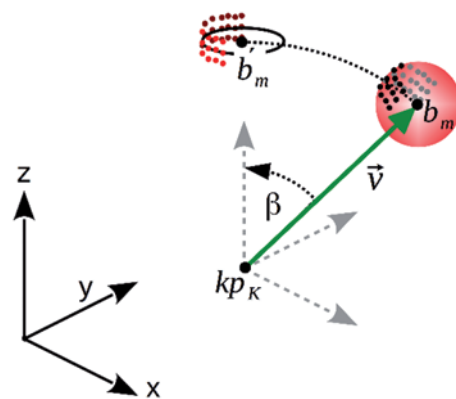


Abb. 4: Rotation des Kugelmittelpunktes b_m um den parent-Knoten kp_K über den Vertikalwinkel β .

der Bedingungen verletzt wird, wird der Knoten verworfen.

1. Der ermittelte Radius muss geringer als der maximal zu erwartende Radius r_{max} eines Stamms sein.
2. Die Güte der Kreisanpassung wird über die quadrierten Residuen anhand des Parameters mse geprüft.
3. Um eine fehlerhafte Anpassung durch Ausreißer zu vermeiden, wird ein maximales Residuum von höchstens $maxres$ erwartet.
4. Um sicherzustellen, dass die Punkte nicht auf einer Geraden liegen und so keine Kreisform zu erwarten ist, wird eine lineare Regression durchgeführt, deren Bestimmtheitsmaß den Schwellwert $maxlinear$ nicht überschreiten darf.
5. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass sich Äste zur Krone hin verzweigen. Daher wird durch den Schwellwert $maxincrease$ eine unerwartete Zunahme des Querschnittsradius von einem Segment zum nächsten unterbunden.

Da für einen neu bestimmten Knoten nicht ausgeschlossen werden kann, dass er sich mit der bestehenden Modelloberfläche schneidet, wird zusätzlich seine räumliche Lage evaluiert. Eine solche Überlappung ist theoretisch möglich, da mehrere Längenfaktoren l gewählt werden können und ein „Überspringen“ (siehe Abschnitt 3.5) auftreten kann. Da die Modelloberfläche an einem Knotenpunkt

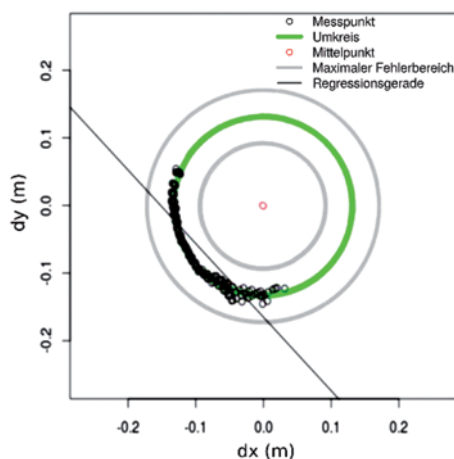


Abb. 5: Modellausgabe eines Querschnittes zur Prüfung der Plausibilität.

kp_k durch eine Kugel mit Radius r_k definiert wird, wird getestet, ob der Abstand des Knotenpunktes zur Modelloberfläche mindestens r_k beträgt (siehe hierzu Abschnitt 3.6).

3.5 Modellierungsreihenfolge

Die Modellierung beginnt mit dem Aufsuchen der Stammansätze über die Selektion des ersten Layers (siehe Abschnitt 3.2 und F-1) aus der Punktwolke und der anschließenden Clusteranalyse (F-2). Die anschließende Knotenbestimmung erfolgt nacheinander für die nach ihrer Punktzahl absteigend sortierten Cluster mit mindestens n Punkten, da angenommen wird, dass größere Cluster mit höherer Wahrscheinlichkeit einem Querschnitt angehören. Zudem kann im Allgemeinen erwartet werden, dass bei einem in mehrere Cluster zerfallenen Querschnitt, der Cluster mit der höchsten Anzahl an Punkten die beste Kreisanpassung erzielt (siehe Abb. 6).

Nach der Analyse des ersten Layers L_{First} ist für die weitere Modellierung die Wahl des als nächstes zu analysierenden Knotens von besonderer Bedeutung. Um auch dünnere Äste (Astdurchmesser kleiner 5 cm) modellieren zu können, wird jeweils versucht, einen möglichst kleinen Bereich um die Knoten zu analysieren. Daher wird immer die Teilssphäre mit dem kleinsten Sphärenradius R_i zur weiteren

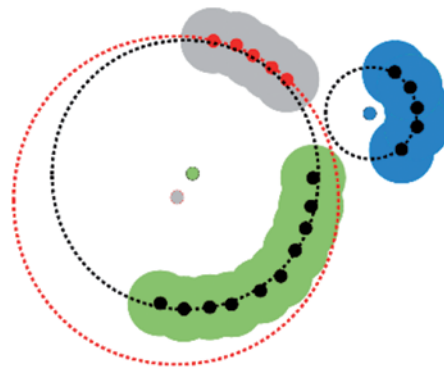


Abb. 6: Überlegungen zur Kreisanpassung an Cluster mit unterschiedlicher Anzahl an Punkten. Eigenständiger Querschnitt (blauer Cluster) und „zerfallener“ Querschnitt aus Teilclustern (grün und grau). Die Kreisanpassung des größeren (grünen) Clusters approximiert den kleineren (grauen) Cluster.

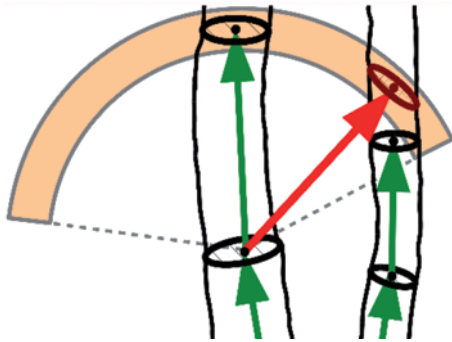


Abb. 7: Problem des „Überspringens“ bei der Modellierung benachbarter Äste (schwarze Linien). Grüne Pfeile stehen für optimal erkannte Vektoren, rote Pfeile für „übergesprungene“ Vektoren. Die gestrichelten Linien illustrieren die aufgespannten Teilsphären.

Analyse gewählt (F-10). Durch die Ausrichtung der Teilsphäre in Wuchsrichtung werden mit erhöhter Wahrscheinlichkeit nur Astquerschnitte identifiziert, die von diesem Segment abzweigen. Knoten mit größerem Knotenradius spannen hingegen größere Teilsphären auf, die dazu führen können, dass auch Querschnitte von benachbarten Ästen modelliert werden. Dieses „Überspringen“ (vgl. Abb. 7) stellt ein konzeptionelles Problem dar, welches auch in der Arbeit HACKENBERG (2014) beschrieben wird. Durch die geordnete Modellierung von kleinen zu großen Durchmessern kann dieses Problem gemindert werden.

Nach der Auswahl eines Knotens und Selektion des für den Längenfaktor und Sphärenwinkel aufgespannten Layers L_j werden die Cluster bestimmt (F-2). Die Cluster werden wieder nach der Punktzahl absteigend sortiert, der jeweilige Knotenpunkt ermittelt (F-4 bis F-8), dessen Plausibilität geprüft (F-6) und gegebenenfalls der Knoten ins bestehende Modell integriert (F-8). Das Modell terminiert, wenn zu jedem bereits ermittelten Knoten alle Längenfaktoren abgearbeitet wurden (F-9).

3.6 Plausibilitätsprüfung

Nach abgeschlossener Initialisierung des Modells erfolgt a posteriori eine Plausibilitätsprüfung (F-12) anhand der Punktwolke. Um

den Analyseaufwand zu reduzieren, wird diese Prüfung nur für die Punkte durchgeführt, deren Abstand zu einem Knoten geringer als der maximal zu diesem Knoten angenommene Sphärenradius ist. Die Prüfung eines Punktes erfolgt anhand seines Normalabstandes ε zur Modelloberfläche. Zur Berechnung dieses Abstandes wird der Normalabstand h zum Richtungsvektor \vec{v} bestimmt, sowie der Radius R_{mod} des Kegelstumpfes auf selber Höhe q ermittelt, so dass gilt: $\varepsilon = h - R_{mod}$. Als Residuum eines Punktes wird das Minimum des Normalabstandes zu allen Segmenten angenommen.

Diese Residuen werden für eine visuelle Plausibilitätsprüfung sowie für eine Sichtung statistischer Kennwerte wie mittlerer Fehler, Standardabweichung oder RMSE genutzt. Diese Form der Plausibilitätsprüfung eignet sich jedoch nur zu einer Abschätzung der Modellgüte, da keine Klassifizierung der Punkte *hölzern* oder *nicht hölzern* vorgenommen werden kann.

4 Implementierung

Die Implementierung des Modells erfolgte mit der Statistik-Software R (R FOUNDATION 2014). Zum performanten Datenzugriff wird die Punktwolke in einer *PostGIS*-Datenbank (OS-GEO 2014) vorgehalten. Daher erfolgt die Organisation und Analyse in R, während räumliche Selektionen über SQL-Anfragen erfolgen.

Da die Oberflächengeometrie stark von der Baumart abhängt, ist für ein optimales Modellierungsergebnis die Parametrisierung entsprechend an die zu erwartenden Wertebereiche anzupassen (Abschnitt 5.1). Alle für die Modellierung relevanten Parameter, sowie die in dieser Studie gewählten Werte werden in Tab. 1 zusammengefasst sowie deren Wertebereich und Bedeutung erläutert.

5 Modellierungsergebnisse

5.1 Parametrisierung

Während der Implementierung des Ansatzes wurden nachfolgende Erkenntnisse zur Sensitivität der Modellparameter aufgrund von

Tab.1: Übersicht der Modellparameter.

Parameterbezeichnung	Wertebereich	Beschreibung	Verwendete Werte
<i>Parameter zur Layerselektion</i>			
FIRSTLAYERHEIGHT S	\mathbb{R}^+ (m)	Höhe des ersten Layers L_{First}	1,3
LAYERTHICKNESS h	\mathbb{R}^+ (m)	Dicke eines Layers	0,05
VECTORLENGTH l	\mathbb{R}^+	Liste von Längenfaktoren	4;3;2;5
BRANCHANGLE α	(0,180) (°)	Liste der Sphärenwinkel	40;60;80;30
<i>Parameter zur Clusteranalyse</i>			
DELTA δ	\mathbb{R}^+ (m)	Radius der δ -Umgebung	0,03
MINAREA	\mathbb{R}^+ (m ²)	Mindestfläche der Cluster von L_{First}	0,005
MINPOINTS n	$\mathbf{N}_{\geq 3}$	Mindestpunktzahl eines Querschnitts	10
<i>Parameter zur Knotenbestimmung</i>			
ERROR mse	(0,1)	Maximaler MSE der Kreisanpassung	0,05
MAXRES res_{max}	(0,1)	Maximaler Fehler der Kreisanpassung	0,35
MAXLINEAR R^2	(0,1)	Maximale lineare Anpassung	0,95
MAXRAD r_{max}	\mathbb{R}^+ (m)	Maximaler Radius eines Querschnitts	0,35
MAXINCREASE w	\mathbb{R}^+	Maximale Zunahme des Radius	2

theoretischen Überlegungen zur iterativen Modellierung und Testläufen erzielt.

Die Sensitivität der Parameterkombinationen von Längenfaktor l und Sphärenwinkel α , sowie deren Anzahl wirken sich im Besonderen auf die Modellstruktur und -qualität aus. Daher ist eine besonders sorgsame Anpassung dieser Parameter notwendig. Um das beschriebene Problem des „Überspringens“ zu vermeiden, werden möglichst kleine Sphären angestrebt, was geringe Werte für l und α erfordert. Kleine Längenfaktoren führen zudem tendenziell zu einer genaueren Modellierung der Oberfläche, da so die Segmente relativ kurz sind und die maximalen Residuen gering ausfallen. Zu kleine Suchbereiche führen hingegen zu einer nur teilweisen Erfassung des Kronenraumes, da so Querschnitte nicht vollständig identifiziert werden können. Zudem besteht durch zu geringe Sphärenwinkel die Möglichkeit, dass Astgabelungen nicht erfasst werden können.

Die Schwellwerte zur Knotenbestimmung werden entsprechend des Qualitätsanspruches angepasst. Zu hohe Anforderungen führen dazu, dass reale Querschnitte nicht in das Modell aufgenommen werden, so dass hier wieder nur Teile des Kronenraumes erfasst werden können. Allgemein sollte die Auswahl dieser Modellparameter auf Grundlage von Expertenwissen erfolgen.

Zur Clusteranalyse sollte der Nutzer anhand der Punktdichte entscheiden, welcher Radius δ und welche Layerdicke h für eine adäquate Detektion von Querschnitten sinnvoll erscheint. Hierbei kann angenommen werden, dass im Falle des Abstandes zwischen zwei Punkten in der Größenordnung der geometrischen Auflösung eines Einzelscans benachbarte Punkte eine Oberfläche bilden. Da die Auflösung innerhalb des Scans variiert, sollte δ in etwa der zu erwartenden geometrischen Auflösung in Baumhöhe entsprechen. Die Layerdicke h sollte analog zu Slicing-Ansät-

zen wenige Zentimeter (ca. 5 bis 10) betragen. Da auch dieser Parameter von der Punktdichte abhängt, sollte er groß genug gewählt sein, damit ein Querschnitt auch bei größerer Entfernung zum Scanner hinreichend viele Messpunkte enthält. Ein zu groß gewähltes h reduziert hingegen die Möglichkeit, dass die projizierten Punkte einen runden Querschnitt bilden.

5.2 Validierung

Zur Validierung des Modellansatzes wurde zunächst manuell eine für den Testdatensatz geeignete Parametrisierung ermittelt, die sich in Tab. 1 findet. Da das Modellierungskonzept primär zur Beschreibung von Laubbäumen entwickelt wurde, werden nur die Ergebnisse der modellierten Buchen vorgestellt. Die Validierung erfolgt hier ausschließlich anhand der TLS-Punktwolke, da diese Arbeit vor allem die Modellierungskonzepte vorstellen soll, die zur Optimierung bestehender Ansätze verwendet werden könnten. Eine weiterführende Validierung anhand generierter Punktwolken (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, HACKENBERG et al. 2014) wurde daher nicht vorgenommen.

Da die Modellierung eines Baumes in Wuchsrichtung erfolgt, erfasst das Modell in der Regel die Krone nicht vollständig. Falls beispielsweise die Annahme runder Quer-

schnitte nicht erfüllt ist oder Datenlücken, z. B. durch Abschattung, auftreten, kann die Modellierung für diese Bereiche nicht fortgesetzt werden. Um dennoch eine Vorstellung der Verteilung der Residuen zu erhalten, werden zur Validierung nur die TLS-Punkte betrachtet, die sich in unmittelbarer Nähe zum Modell befinden, so dass ihr Abstand mindestens einem Knoten kleiner $R_1 + 0.5 h$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max}) sein soll. Des Weiteren werden zur Darstellung der Histogramme (Abb. 8) und zur Berechnung der Tendenzmaße hier nur Punkte aus P_c betrachtet, die ein Residuum kleiner 10 cm aufweisen. Der Wert von 10 cm wurde so gewählt, dass das Rauschen und Fehler durch nur teilweise erfasste Äste reduziert werden. Immerhin bleiben bei diesem Wert in beiden Datensätzen mehr als 90% der Punkte trotz der etwas verrauschten Datengrundlage in der Betrachtung erhalten. Das Residuum von 10 cm ist somit ein für die Datensätze empirisch ermittelter Wert.

Für diese Bäume (Buchen) ergibt sich ein Mittelwert der Residuen von 0,3 cm bzw. 0,4 cm, eine Standardabweichung von 1,5 cm bzw. 1,6 cm und ein RMSE von 1,5 cm bzw. 1,7 cm. Durch die Einschränkung der Punktauswahl durch einen Maximalabstand von 10 cm könnten jedoch die Fehlermaße etwas kleiner als tatsächlich vorhanden ausfallen. Die Form der Histogramme legt eine annä-

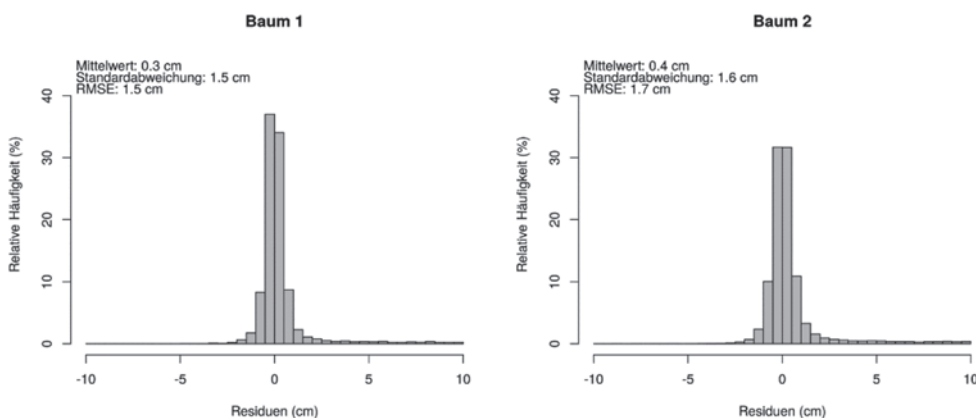


Abb. 8: Histogramme der Normabstände (Residuen) der betrachteten TLS-Punktwolke P_c bezüglich der modellierten Oberfläche. Hier werden ausschließlich Punkte betrachtet, die einen Abstand kleiner 10 cm aufweisen.

hernde Normalverteilung nahe. Es wird deutlich, dass für beide Modelle mehr als 60% der Punkte innerhalb eines Fehlerbereiches von $\pm 0,5$ cm und mehr als 80% der Punkte innerhalb eines Bereiches von ± 1 cm liegen. Eine höhere Modellgüte ist bei einer günstigeren Datengrundlage, z. B. mit mehreren Scanrichtungen, zu erwarten.

Die dreidimensionale Struktur der betrachteten Buchen als Vektormodell und die räumliche Verteilung der Residuen werden in Abb. 9 und Abb. 10 illustriert. Es wird deutlich, dass durch die Modellierung als eine Folge von Kegelstümpfen eine kontinuierliche Oberfläche ohne sprunghaften Anstieg zwischen zwei Segmenten entsteht. Die Modellierung des Stammbereiches erfolgt fast vollständig mit Residuen unterhalb 2 mm. Die hier rot erscheinenden Punkte mit Residuen deutlich über 10 cm werden überwiegend durch Noise oder vereinzelt auch durch kleine Äste oder Blätter verursacht. Im unteren Stammbereich zeigt sich jedoch, dass die zur Vereinfachung angenommene vertikale Wuchsrichtung nicht eingehalten wird. Insbesondere Abb. 10 zeigt, dass grundsätzlich Astgabeln erfasst werden können, dass aber nicht jeder Ast identifiziert werden kann. Für Baum 1 sieht man, dass eine Überschätzung des Querschnittsradius an Astgabeln möglich ist, falls wie hier die Annahme eines runden Querschnittes verletzt wird.

Es konnte neben den hier abgebildeten Ergebnissen auch beobachtet werden, dass bei ungünstiger Parametrisierung Astgabeln erst um ein Segment versetzt erfasst werden oder das Problem des „Überspringens“ auftritt.

6 Diskussion

In der Detailansicht der Astgabelungen in Abb. 10 wird deutlich, dass die dynamische Wahl der Vektorlängen anhand des Querschnittsradius eine unmittelbare Reaktion an geänderte Querschnitte beispielsweise nach einer Astgabel ermöglicht. Dadurch wird die gewünschte Skalunenabhängigkeit des Ansatzes erreicht, welche diesen insbesondere zur Modellierung von Laubbäumen geeignet macht.

Die geordnete Abarbeitung der Knoten von kleinen zu großen Durchmessern (siehe Abschnitt 3.5) stellt eine alternative Lösung des „Überspringen“-Problems gegenüber dem starren „Order“-Konzept von DELAGRANGE et al. (2014) dar. Gegenüber DELAGRANGE et al. (2014) ist für den VecTree-Ansatz eine Wahl unterschiedlicher Längenfaktoren l möglich, so dass eine Überbrückung von Datenlücken einer maximalen Ausdehnung in Wuchsrichtung von $l_{max} \cdot r_K$ (mit maximalem Längenfaktor l_{max} und Knotenradius r_K) erreicht wird (siehe Abschnitt 3.2). Die Einschränkung der Sphären über die Sphärenwinkel α garantiert zusätzlich eine Einschränkung der Astwinkel auf plausible Werte. Die Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die Konzepte dieses Ansatzes auch bei minderer Datenqualität dazu geeignet sind, komplexe Baumoberflächen zu beschreiben. Dadurch könnte es möglich sein, die Robustheit ähnlicher Ansätze (wie HACKENBERG et al. 2014) durch Integration unterschiedlicher Längenfaktoren zu optimieren und damit die Anforderungen an die Datengrundlage zu reduzieren.

Eine Beschreibung der Oberfläche als ein Graph von Kegelstümpfen erwies sich bereits bei der Arbeit von DELAGRANGE et al. (2014) als besonders geeignet, um Ast- oder Stammoberflächen zu beschreiben. Durch dieses Vorgehen werden Artefakte der Residuen benachbarter Punkte an den Segmentübergängen wie beispielsweise durch eine Modellierung als Zylinder (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, EYSN et al. 2013) vermieden.

Die Modellierung in Wuchsrichtung kann dazu führen, dass einzelne Äste nicht erfasst werden. In diesem Fall können ganze Teilbereiche eines Baumes nicht modelliert werden. Alternative Ansätze wie RAMOUNEN (2013) rekonstruieren die Teiloberflächen schrittweise, so dass potenziell alle Astsegmente erfasst werden können. Als ein Nachteil gegenüber dem VecTree-Ansatz ist jedoch die nicht unbedingt eindeutige Rekonstruktion des Graphen zu nennen.

Das vorgestellte Clustering-Verfahren, welches dem DBSCAN-Verfahren (vgl. ESTER et al. 1996) mit $MinPts = 0$ entspricht, kann sich für TLS-Punktwolken gegenüber einem DBSCAN mit einer höheren Anzahl an Nachbarn als vorteilhaft erweisen. Dies

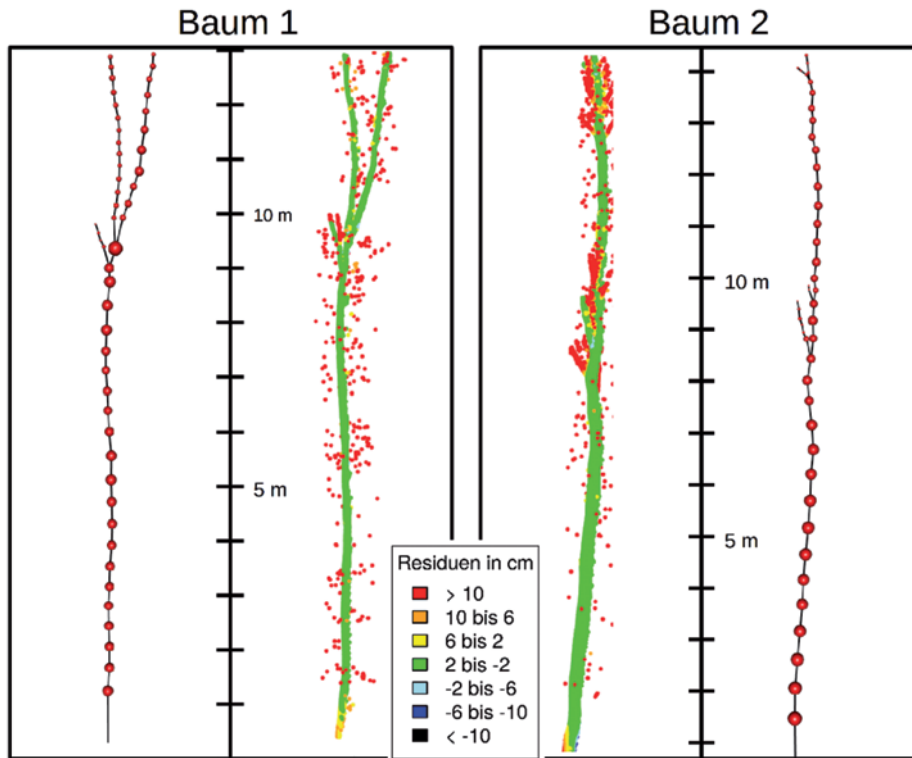


Abb. 9: Zwei modellierte Buchen. Äußere Grafiken: Vektormodell, dessen Knoten als rote Kreise mit entsprechenden Querschnittsradien dargestellt werden. Innere Grafiken: Farbkodierte Darstellung der Normalabstände aller betrachteten TLS-Punkte zur Modelloberfläche.

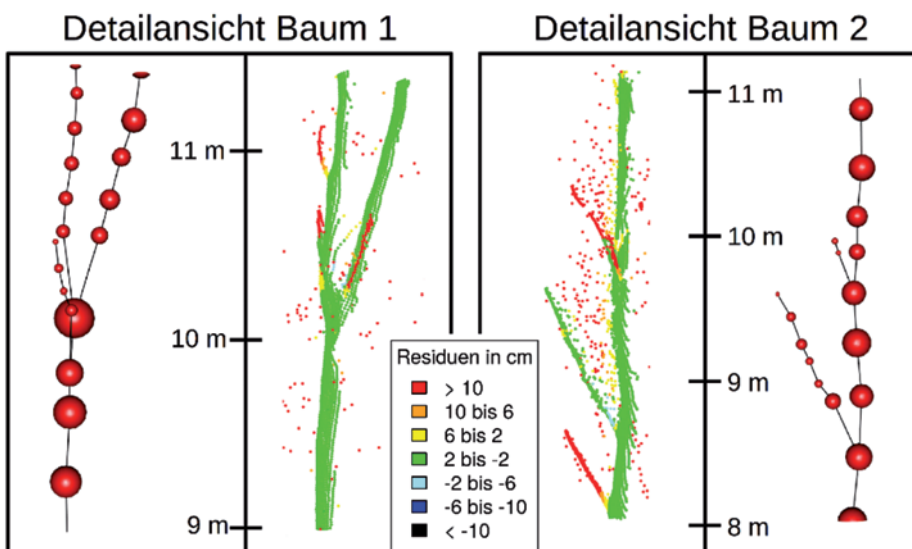


Abb. 10: Detailansicht ausgewählter Verzweigungen aus Abb. 9.

liegt darin begründet, dass nur der Distanzparameter δ definiert werden muss, der sich stark nach der erwarteten geometrischen Auflösung in Kronenhöhe richtet. Auf diese Weise kann δ deutlich kleiner gewählt werden. Außerdem ist das Clustering weniger abhängig von der Dichte s .

Die Effekte unterschiedlicher Scan-Modi auf die Genauigkeit einer Kreisanpassung an Stammquerschnitte wurden bereits in PUESCHEL et al. (2013) beschrieben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch die Genauigkeit der Kreisanpassungen mit der Anzahl an Scans aus unterschiedlichen Richtungen deutlich ansteigt.

Der Algorithmus kann Störungen der Daten durch Windeffekte nicht kompensieren. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass durch die erhöhte Robustheit gegenüber Datenlücken die Anzahl und Auflösung der Scans gering gehalten werden kann, so dass sich insgesamt eine geringere Messdauer ergibt. Durch die geringere Aufnahmezeit reduzieren sich tendenziell die Störungen durch Wind.

7 Ausblick

Zur Optimierung der Kegelstumpfradien und -positionen könnten entweder iterativ oder simultan alle Kegelstümpfe an die umliegenden Punkte angepasst werden. Ein ähnliches Verfahren wird für Zylinder bereits in dem Ansatz von RAMOUNEN et al. (2013) angewandt, indem die Start- und Endpositionen sowie die Radien der Zylinder aufeinander abgestimmt werden. Zusätzlich könnte die Kreisanpassung durch geeignete alternative Verfahren optimiert werden, die weniger von Ausreißern beeinträchtigt sind.

Für eine ausführliche Validierung des entwickelten Modells sollte das Modell zusätzlich auf künstlich generierte Punktwolken (vgl. RAMOUNEN et al. 2013, HACKENBERG et al. 2014) mit bekannter Oberfläche und Volumen oder an reale exakt vermessene Referenzobjekte angewendet werden.

Literatur

- BMELV (2011): Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur 2011 – 2012. – 2. Geänderte Auflage, Mai 2011, BMELV (Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz), Bonn.
- BREITENBACH, J. & ASTRUP, A., 2012: Small area estimation of forest attributes in the Norwegian National Forest Inventory. – *European Journal of Forest Research* **12** (131): 1255–1267.
- BUNDESWALDGESETZ (BWALDG), 2010: Bundeswaldgesetz vom 2.5.1975 i. d. F. vom 31.7.2010 (BGBl. I S. 1037), §41a Walderhebungen.
- BWALDINVV 3, 2007: Bundeswaldinventurverordnung auf Grundlage §41a Abs. 4 Bundeswaldgesetz vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037).
- DELAGRANGE, S., JAUVIN, C. & ROCHON, P., 2014: PypeTree: A Tool for Reconstructing Tree Perennial Tissues from Point Clouds. – *Sensors* **14** (3): 4271–4289; doi: 10.3390/s140304271.
- DUNCANSON, L.I., COOK, B.D., HURTT, G.C. & DUBAYAH, R.O., 2014: An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems. – *Remote Sensing of Environment* **14** (154): 378–386; doi: 10.1016/j.rse.2013.07.044.
- ESTER, M., KRIEGEL, H., SANDER, J. & XU, X., 1996: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. – *KDD Proceedings* **96**: 226–231.
- EYSN, L., PFEIFER, N., RESSL, C., HOLLAUS, M., GRAFL, A. & MORSDORF, F., 2013: PypeTree: A Practical Approach for Extracting Tree Models in Forest Environments Based on Equirectangular Projections of Terrestrial Laser Scans. – *Remote Sensing* **13** (5): 5424–5448; doi: 10.3390/rs5115424.
- FARO 2009: FARO Laser Scanner Photon 120/20. – http://www.dirdim.com/pdfs/DDI_FARO_Laser_Scanner_Photon.pdf (17.12.2014).
- FAWF (FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT), 2015: Rheinland-Pfalz, ForeStClim. – <http://www.forestclim.eu/> (19.1.2015).
- HACKENBERG, J., MORHART, C., SHEPPARD, J., SPIECKER, H. & DISNEY, M., 2014: Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. – *Forests* **14** (5): 1069–1105.
- HILDEBRANDT, R. & LOST, A., 2012: From points to numbers: a database-driven approach to convert terrestrial LiDAR point clouds to tree volumes. – *European Journal of Forest Research* **12** (131): 1857–1867; doi: 10.1007/s10342-012-0638-1.
- KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., YU, X., VASTARANTA, M., HYYPPÄ, H., KUKKO, A., HOLOPAINEN, M., HEIPKE,

- C., HIRSCHMUGL, M., MORS DORF, F., NÆSSET, E., PITKÄNEN, J., POPESCU, S., SOLBERG, S., WOLF, B.M. & WU, J., 2012: An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. – *Remote Sensing* **12** (4): 950–974; doi: 0.3390/rs4040950.
- KAASALAINEN, S., KROOKS, A., LISKI, J., RAUMONEN, P., KAARTINEN, H., KAASALAINEN, M., PUTTONEN, E., ANTTILA, K. & MÄKIPÄÄ, R., 2014: Change Detection of Tree Biomass with Terrestrial Laser Scanning and Quantitative Structure Modelling. – *Remote Sensing* **14** (6): 950–974; doi: 10.3390/rs6053906.
- LAMPRECHT, S., 2013: Vektorielle Modellierung von Forstbeständen aus terrestrischen Laserscanner-Daten. – Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science an der Universität Trier, https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb6/prof/FER/Publikationen/Lamprecht_bachelorarbeitVektorielleModellierung_2013 (12.1.2015).
- LEIMBROCK, L.A., 2012: Zuwachs und Konkurrenzverhalten von Buchen und Douglasien auf der Versuchsfläche Merzalben (Pfälzerwald). – Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science an der Universität Trier.
- OSGeo, 2014: PostGIS. – <http://www.postgis.net> (17.12.2014).
- PUESCHEL, P., NEWNHAM, G., ROCK, G., UDELHOVEN, T., WERNER, W. & HILL, J. 2013: The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **13** (77): 44–56; doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.12.001.
- R FOUNDATION, 2014: The R Project for Statistical Computing. – <http://www.r-project.org> (17.12.2014).
- RAUMONEN, P., KAASALAINEN, M., ÅKERBLOM, M., KAASALAINEN, S., KAARTINEN, H., VASTARANTA, M., HOLOPAINEN, M., DISNEY, M. & LEWIS, P., 2013: Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. – *Remote Sensing* **13** (5): 491–520; doi: 10.3390/rs5020491.
- REITBERGER, J., SCHNÖRR, C., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2009: 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **9** (64): 561–574; doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.4.002.
- UMBACH, D. & JONES, K.N., 2003: A Few Methods for Fitting Circles to Data. – *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **3** (20): 1881–1885.
- ZHOU, J., PROISY, C., DESCOMBES, X., HEDHLI, I., BARBIER, N., ZERUBIA, J., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. & COUTERON, P., 2010: Tree crown detection in high resolution optical and LiDAR images of tropical forest. – *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology* **10** (12); doi: 10.1117/12.865068.

Anschrift der Autoren:

B.Sc. SEBASTIAN LAMPRECHT, Dr. JOHANNES STOFFELS & Prof. Dr. THOMAS UDELHOVEN, Universität Trier, Fachbereich VI – Raum- und Umweltwissenschaften, D-54286 Trier, Tel: +49-651201-4612, -4698, -4513, e-mail: {lamprecht} {stoffels} {udelhoven}@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: September 2014

Angenommen: Februar 2015



Berichte von Veranstaltungen

Bericht 14. Oldenburger 3D-Tage, 4. und 5. Februar 2015

Wie bereits im Vorjahr konnte Prof. THOMAS LUHMANN als Leiter des Symposiums über 260 Teilnehmer zu den 14. Oldenburger 3D-Tagen begrüßen. Er wertete dies als Zeichen, dass sich die 3D-Tage als wissenschaftliches Markenzeichen weit über die Grenzen Oldenburgs etabliert haben. Ähnlich wie in den vergangenen Jahren gehörten die meisten der Teilnehmer (43%) Hochschulen an, die restlichen rund 60% kamen zu gleichen Teilen von Herstellern, Dienstleistern und Anwendern. Aus fachlicher Sicht stellte LUHMANN fest, dass angesichts der rasanten Entwicklungen der räumlichen Datenerfassung in verschiedensten Fachgebieten die geodätische und photogrammetrische optische Messtechnik als Alleinstellungsmerkmal einen klaren Schwerpunkt auf Qualität und Zuverlässigkeit aufweist.

In ihren anschließenden Grußworten unterstrich die niedersächsische Wissenschaftsministerin HEINEN-KLJAJIĆ die Wichtigkeit der 3D-Tage sowohl für die Hochschule als auch Oldenburg und hob die anerkannte Kompetenz von THOMAS LUHMANN hervor. Sie stellte aus hochschulpolitischer Sicht sowohl eine Erhöhung der Studienkapazitäten an den niedersächsischen Fachhochschulen um 30% bis 2020 und einen Ausbau der Fachhochschulforschungsförderung um 100 Mio. Euro in Aussicht.

Der Präsident der Jade Hochschule, Dr. ELMAR SCHREIBER, stellte die 3D-Tage als gelungene Auftaktveranstaltung des Internationalen Jahres des Lichtes der UNESCO dar. Er würdigte insbesondere die Einbindung der Studierenden in die Forschung des Instituts für angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik. Der Veranstaltung sagte er auch weiterhin einen guten Erfolg voraus, da er die Potenziale der optischen Messtechnik insbesondere im nicht sichtbaren Wellenspektrum bei Weitem noch nicht ausgeschöpft sieht.

Den Eröffnungsvortrag hielt in diesem Jahr Prof. FRANK NEITZEL, TU Berlin. Er zeigte un-

ter dem Titel „Kinematisches Laserscanning – bewegte Sensoren – bewegte Objekte“ die vielschichten Aspekten kinematischer Messungen mit Laserscannern (k-TLS) auf. Dabei gab er einen Überblick zu den verschiedenen Modi des k-TLS und stellte die jeweiligen Prozessketten vor. Ebenso ging er auf die Methoden der Georeferenzierung beim k-TLS ein. Abschließend stellte er die Kombination von Lasertrackern und Laserscannern vor, welche für industrielle kinematische Datenerfassung mit Millimetergenauigkeit genutzt werden soll. Anschließend teilte sich das Auditorium in zwei parallele Sessions mit den Themenschwerpunkten Laserscanning und photogrammetrische optische Messtechniken auf. Dass beide Themenblöcke auf das Interesse der Teilnehmer stießen, zeigte sich an der temporären Überschreitung der Kapazitätsgrenzen der Vortragsräume.

Im Vortragsblock TLS im Ingenieurbau wurde das breite Anwendungsspektrum des Terrestrischen Laserscannings demonstriert. MICHAEL GEIST stellte unter dem Titel „Lokale Modellierung zur Bestimmung von Flächenformabweichungen mittels terrestrischer Laserscanner“ Anwendungen des TLS in der Fertigungsmesstechnik vor. Dabei strich er die Potenziale des TLS bei großformatigen Objekten wie z.B. Schiffspropellern heraus, die sich mit gitterfreien Methoden der Auswertung erzielen lassen. SVEN THOMSEN zeigte anschließend Anwendungen und Auswertemethoden für das TLS im Maschinen- und Anlagenlagenbau. Dabei ging er sowohl auf die Anforderungen und den Workflow von TLS-Aufnahmen im Anlagenbau am Beispiel einer Rohrbrücke eines chemischen Betriebs als auch auf die Rückführung von TLS-Punktwolken auf standardisierte Objekttypen ein. Ferner gab er einen Überblick zu Fehlerinflüssen und Genauigkeitsanforderungen in diesem Aufgabengebiet. CHRISTIAN JEPING von der Jade Hochschule stellte anschließend ein Konzept zur Erfassung kinematischer Rotorblattverformungen von Windkraftanlagen vor. Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist die Erfassung des Verformungsverhaltens

der Rotorblätter im Betrieb. Dabei soll eine Kombination aus TLS und photogrammetrischen Aufnahme- und Auswertetechniken genutzt werden, wobei auf eine Signalisierung einzelner Objektpunkte gänzlich verzichtet werden soll. Zum Abschluss der Session stellte OLIVER BRINKMANN von der KUBIT GmbH in Dresden Auswertetechniken für die untertägige Grubendokumentation im Kalibergbau vor. Dabei werden TLS-Punktwolken mittels spezieller Reduktionsalgorithmen im Datenumfang verkleinert und über Zylindervermischung Oberflächen abgeleitet, aus denen anschließend das bergmännische Risswerk gewonnen werden kann.

Der erste Vortrag im Block „Optische 3D-Messtechniken“ wurde von ANJA KRAFT von der TU Dresden gehalten. In dem Beitrag „Untersuchungen zur Eignung photogrammetrischer Methoden zur Bestimmung von Schädelvolumen Frühgeborener“ wurden dem in Krankenhäusern zum Einsatz kommenden Laserprofil-System rein photogrammetrische Verfahren zur Schädelvermessung gegenübergestellt. Im Anschluss hat THORSTEN BLOEM von der 3D-Shape GmbH einen Überblick

über die auf physikalischen Grundlagen beruhende theoretische Ableitung von 3D-Messgenauigkeiten gegeben. Den Abschluss des ersten Blocks bildete der Vortrag von NIKLAS CONEN von der Jade-Hochschule, der über die photogrammetrische Kalibrierung von medizinischen Stereoskopen referierte.

Im zweiten Block des Tages hatten dann nach der Mittagspause fünf Hersteller die Möglichkeit, ihre Produkte einem größeren Publikum vorzustellen. Dabei wurden sowohl optische Messsysteme für industrielle Aufgabenstellungen als auch neuere Entwicklungen auf dem Gebiet des TLS präsentiert.

Der Block zur luftgestützten Vermessung widmete sich größtenteils dem Laserscanning, sowohl auf UAV als auch herkömmlichen Plattformen. In dem Beitrag „Entwicklung eines UAV Scanners“ von CARLOS ACEVEBO (HCU Hamburg) wurde eine Entwicklungsstudie zu einem aus Standardkomponenten zusammengestellten UAV-Laserscanner vorgestellt. Ein fertiges Produkt wurde von der Firma Riegl präsentiert. THOMAS GAISECKER stellte die einzelnen Komponenten des Ricopter vor, der vornehmlich für kommerzi-



Abb. 1: Präsident der Jade Hochschule, ELMAR SCHREIBER mit Wissenschaftsministerin GABRIELE HEINEN-KLJAJIĆ und THOMAS LUHMANN in der Firmenausstellung.

elle Einsätze konzipiert ist. FRANK STEINBACHER von der AirborneHydroMapping GmbH ging auf eine bathymetrische Anwendung des Laserscanning ein, bei der die ufernahe Topologie des Isar-Flussbetts vermessen wurde. Eine gänzliche andere Plattform – ein Gyrocopter – war Gegenstand des Vortrags von LUTZ BANNEHR, HS Anhalt. Gegenüber einem UAV weist ein Gyrocopter den Vorteil auf, dass eine höhere Tragkraft genutzt werden kann. Auf dem System der HS Anhalt sind somit mehrere optische Sensoren und hochwertige Positionierungskomponenten verbaut. Der Aufwand und die Kosten, um ein solches Fluggerät zu betreiben und zu unterhalten, sind natürlich ungleich höher als bei einem UAV. BANNEHR hat die Anwesenden eingeladen, an gemeinsamen Forschungsanträgen zu arbeiten.

Im dritten Block wurden in einer offenen Diskussionsrunde zum Thema „Metrische Kameras für UAV-Anwendungen“ Aspekte zur Qualitätssicherung der Ergebnisse von geometrischen Modellen aus Aufnahmen von unbemannten Kleinflugobjekten diskutiert. Aufgrund der gesetzlichen Gewichtsbeschränkung von 5 kg Gesamtgewicht werden häufig nur einfache Consumer-Kameras für die fotografischen Aufnahmen eingesetzt, was unter anderem zu Qualitätsverlusten der abgeleiteten 3D-Modelle führen kann. Ebenso werden durch Laien oft photogrammetrische Grundsätze bei der Wahl der Aufnahmekonstellation missachtet, so dass zwar einigermaßen anschauliche Modelle entstehen, die jedoch große geometrische Abweichungen aufweisen können. Die weit verbreiteten Softwareprodukte zur Erzeugung von Punktwolken aus Bildern haben in aller Regel ihren Ursprung im Computer-Vision-Bereich, wo weniger die geometrische Qualität als die Objekterkennung und Visualisierung im Vordergrund des Interesses stehen. Deshalb ist es unabwendbar, dass für qualitativ hochwertige Ergebnisse aus UAV-Aufnahmen zukünftig das photogrammetrische Knowhow stärker als bisher genutzt wird.

Der erste Vortrag zur Oberflächenerfassung wurde von FOLKMAR BETHMANN (Jade Hochschule) zum Thema „Semi-Global Matching im Objektraum“ gehalten. Im nächsten Vortrag hat sich MARCUS GROSSE von der En-

shape GmbH mit schwarzen Löchern („Anwendung schnellster 3D-Messtechnik zur Untersuchung der Energieabgabe schwarzer Löcher“) beschäftigt, bevor es dann unter Wasser ging: CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT vom Fraunhofer IOF in Jena hat über „3D-Oberflächenerfassung unter Wasser mit einem streifenprojektionsbasierten Handscanner“ referiert. Der Block wurde von MALTE LENOCH (TU Dortmund) mit der Präsentation „Photometric surface reconstruction of surfaces with non-uniform reflectance properties“ abgeschlossen.

Zum Abschluss des Tages kamen die meisten Besucher zum traditionellen Grünkohlesen in der Weser-Ems-Halle zusammen. Neben dem kulinarischen Höhepunkt wurde den Teilnehmern auch wieder ein kulturelles Highlight geboten. RENÉ SCHACK, ein Schüler von MARCEL MARCEAU, zog mit seinem Programm „Von Busch über Ringelnetz zu witziger Pantomime“ die Zuschauer in seinen Bann.

Der erste Vortragsblock des zweiten Tages begann mit einem weiteren Ausstellerforum. Dabei lag der Schwerpunkt in Wesentlichen auf der Vorstellung von Neuentwicklungen zur Auswertung von TLS-Messungen. Auch wurden handgeführte Scanner vorgeführt, welche vornehmlich für die Objekterfassung bis ca. 3 m³ Erfassungsvolumen eingesetzt werden.

Im ersten Vortrag der parallelen Sitzung „Mobile Systeme und Anwendungen“ hat JAN ELSEBERG aus Würzburg von Measurement in Motion einen Ansatz aus dem Bereich des „SLAM“ (simultaneous location and mapping) vorgestellt. Ein Problem bei mobilen Systemen ist, dass bei schlechter absoluter Positionierung, z. B. durch GPS-Abschattung, die Drift der inertialen Messeinheit die Genauigkeit der von einem mobilen System erfassten Punktwolke signifikant verschlechtern kann. Durch Ausnutzen von Schleifenschlüssen wird in dem vorgestellten Verfahren die Relativgenauigkeit verbessert. Im Anschluss hat THOMAS WILLEMSSEN von der HCU Hamburg über ein Smartphone-basiertes Indoor-Positionierungsverfahren berichtet, bevor MARKUS STRICKER von der Ingenieurgesellschaft Nordwest ein mit Bodenradar ausgerüstetes mobiles Mappingsystem und dessen

Anwendungsspektrum vorgestellt hat. Zum Schluss dieses Blocks ist SVEN KURZ auf einen Profiler von Z+F eingegangen.

Nach der Mittagspause wurden im Vortragsblock TLS: Anwendung & Kalibrierung der Schwerpunkt auf Anwendungen des TLS gelegt. PHILIPPE KLUGE stellte in seiner Präsentation „TLS und Dense Image Matching als Grundlage für wissenschaftliche archäologische Untersuchungen“ am Beispiel der Nekropole von Al-Ayn im Sultanat Oman den parallelen Einsatz sowie den Vergleich beider Verfahren vor. Dabei hob er unter anderem hervor, dass die geometrische Qualität beider Verfahren im Regelfall Abweichungen im Subzentimeterbereich erwarten lassen und somit sich idealer Weise gegenseitig ergänzen können. JOST BRÖSER, ein langjähriger Teilnehmer an den 3D-Tagen, zeigte dem Publikum am Beispiel des Amphitheaters in Albano Laziale, wie TLS-Aufnahmen als Grundlage für die geometrische Rekonstruktion historischer Bauwerke genutzt werden können. Insbesondere in der Archäologie und Denkmalpflege ist die Kenntnis geometrischer Konstruktion für die Ableitung historischer

Bautechniken und statischer Grundelementen der Bauwerke wichtig. MATTHIAS NAUMANN präsentierte anschließend die Symbiose von UAS-Photogrammetrie und TLS zur Vermessung und 3D-Modellierung von Kirchenbauwerken. Am Beispiel des Greifswalder Doms zeigte er die Grenzen des TLS, welches unter anderem durch stabile Standpunkte am Boden große Abschattungen bei hochgelegenen Bauwerksteilen aufweist. Diese lassen sich durch Luftaufnahmen von UAS innerhalb üblicher Toleranzen für Bauwerksdokumentationen lückenlos ergänzen. Vorausgesetzt wird dabei jedoch eine Aufnahmeplanung und Durchführung nach photogrammetrischen Gesichtspunkten.

Der Block „Kamerakalibrierung“ wurde von WALDEMAR MORDWINZEW (Hochschule Mainz) mit dem Vortrag „Korrektur der Ellipsen-Exzentrizität im Kontext von Kamerakalibrierungen“ eröffnet. ANTON FELDMANN von der Daimler AG hat ein experimentelles Verfahren zur Kalibrierung eines in einem Automobil verbauten Stereokamerasystems vorgestellt. Anschließend hat HEIDI HASTEDT von der Jade Hochschule Ergebnisse von systema-



Abb. 2: Schauspieler und Pantomime RENÉ SCHACK bei der Abendveranstaltung der Oldenburger 3D-Tage.

tischen Untersuchungen der in OpenCV implementierten Kamerakalibrierung präsentiert. Genau wie im letzten Vortrag von MATTHIAS SOOT (TU Dresden), der die Kamerakalibrierung von Structure-from-Motion-Werkzeugen untersuchte, besteht ein Fazit darin, dass die Zuverlässigkeit und geometrische Genauigkeit der genannten Implementierungen nicht auf dem gleichen Niveau wie von entsprechenden photogrammetrischen Systemen ist.

Der letzte Vortragsblock zum Thema TLS stand unter dem Motto „Planung & Validierung“. DANIEL WUJANZ stellte in seiner Präsentation „Modellbasierte Standpunktplanung für terrestrische Laserscanner unter ökonomischen und ingenieurgeodätischen Gesichtspunkten“ ein auf Kombinationsalgorithmen basierendes Verfahren zur Optimierung von TLS-Standpunkten für die vollständige Objekterfassung vor. Ziel dieses Verfahrens ist bereits im Vorfeld der TLS-Aufnahme aus geometrischen Gesichtspunkten sinnvolle Standpunkte festzulegen und aus ökonomischer Sicht die Anzahl der Aufstellungen zu minimieren, um möglichst vollständige Objektmodelle aus den Aufnahmen ableiten zu können. Mit einer ähnlichen Thematik setzte sich NILS NIEMANN in seinem Vortrag „Planung von optimalen Scanposen zur Nacherfassung verschatteter Bereiche in 3D-Szenen“ auseinander. Dabei lag jedoch der Schwerpunkt auf der Schließung von Punktwolkenlücken kinematischer TLS-Aufnahmen. In seinem Vortrag „Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems“ stellte JENS HARTMANN die Kombination eines mobilen Laserscanners mit einem Lasertracker vor, der insbesondere bei hochgenauer Objekterfassung im Maschinen- und Anlagenbau eingesetzt werden soll. Dabei werden Position und Orientierung des Laserscanners mittel Six-Degree-Of-Freedom-Messungen eines Lasertrackers und die Objektgeometrie durch Profilmessungen mit dem Laserscanner bestimmt. Aus ersten Tests des Systems lassen sich Messunsicherheiten im Millimeterbe-

reich ableiten, wobei das derzeitige Auflösungsvermögen des Scanners die Erfassung sehr kleiner Objektstrukturen noch nicht ermöglicht. Die weiteren Entwicklungen lassen ein neues interessantes Anwendungsgebiet des kinematischen Laserscannings erwarten.

Im letzten Block zu Sensoren und Plattformen ging es im Beitrag von JAN KUSCHEN vom Bremer Institut für Produktion und Logistik zunächst um die Leistungsfähigkeit von aktuellen Einplatinenrechnern im Industrieumfeld. Am Beispiel eines Logistiksystems wurden die Anwendungs- und Kostenaspekte erläutert. THOMAS KERSTEN von der HCU hat im Anschluss ein neues Low-Cost-System zur Innenraumaufmessung vorgestellt. SVEN WANNER vom Heidelberg Collaboratory for Image Processing referierte dann über erweiterte Ansätze aus der Lichtfeldphotogrammetrie. Durch Mehrkammersysteme, die in Matrixform angeordnet sind, kann das Lichtfeld ausgemessen und die Parallaxen direkt abgeleitet werden. Den Abschluss dieses Blocks bildete WOLFGANG MEHRINGER von der PCO AG, der wissenschaftliche Kamerasysteme und Bildsensoren vorstellte.

Insgesamt muss den Veranstaltern der Oldenburger 3D-Tage ein großes Lob ausgesprochen werden. Auch die 14. Veranstaltung dieser Seminarreihe bot ein interessantes und ausgewogenes Programm, welches tiefe Einblicke in die aktuellen Entwicklungen der optischen 3D-Messtechnik, der Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings ermöglichte. Insbesondere sei stellvertretend für alle fleißigen Helferlein CHRISTINA MÜLLER und THOMAS LUHMANN für die ausgezeichnete Organisation gedankt. Das GIM-International Magazin hat kürzlich in einem Bericht über die Tagung diese als „Geheimtipp“ bezeichnet – eine sehr treffende Bezeichnung, die auch das Interesse für die 15. Oldenburger 3D-Tage weckt!

HEINZ RUNNE, Hochschule Anhalt, Dessau
MARKUS GERKE, Universiteit Twente/ITC,
NL-Enschede

Hochschulnachrichten

Karlsruher Institut für Technologie

Dissertation von Tobias Strauß

Herr Dipl.-Ing. TOBIAS STRAUSS wurde am 30.1.2015 an der Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit der Arbeit „*Kalibrierung von Multi-Kamera-Systemen*“ zum Dr.-Ing. promoviert.

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. CHRISTOPH STILLER, KIT

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. STEFAN HINZ, KIT

Kurzfassung:

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Kalibrierung von Multi-Kamera-Systemen vorgestellt. Die Kalibrierung umfasst hierbei die Beschreibung des geometrischen Abbildungsverhaltens der einzelnen Kameras sowie deren relativer Lage zueinander. Als Messung wird die Beobachtung eines zeitlich bewegten Kalibrierobjekts verwendet, welches aus einer starren Anordnung mehrerer Schachbrettmuster besteht. Die Kamera-Kalibrierung wird als vollständige Bündelausgleichung formuliert, so dass sowohl die zeitliche Konsistenz der für die Kalibrierung verwendeten Struktur als auch die des Multi-Kamera-Systems berücksichtigt werden kann.

Eine Besonderheit des Kalibrierverfahrens ist die vollautomatische Extraktion der für die Kalibrierung erforderlichen Beobachtungen von Schachbrettmustern und deren globale Assoziation anhand eines die Schachbrettmuster umgebenden Binärcodes. Hierbei werden auch nur teilweise sichtbare Schachbrettmuster an den Bildrändern erkannt. Dies ist wichtig, um eine gute Abdeckung des gesamten Kamerabildbereichs mit Beobachtungen gewährleisten zu können. Eine weitere wichtige Neuerung stellt die Implementierung eines universellen Kameramodells dar, welches neben unterschiedlichen Abbildungsfunktionen eine blickwinkelabhängige Verschiebung des Projektionszentrums berücksichtigt. Damit können neben konventionellen Objektiven auch bislang nur schwer zu kalibrierende

Weitwinkel-Objektive zuverlässig beschrieben werden.

Dank der globalen Assoziation der Kalibrierbeobachtungen und der Verwendung einer Kalibriersequenz mit zeitlicher Relativbewegung zwischen Kamera-System und Kalibrierobjekt, ermöglicht das vorgestellte Verfahren auch die Kalibrierung von Multi-Kamera-Systemen mit sich nicht überlappenden Sichtbereichen. Für die Bündelausgleichung werden verschiedene Kostenmaße vorgestellt, mit denen Abweichungen zwischen Modellprädiktion und Beobachtung beschrieben werden können. Die Kostenmaße unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich Berechnungs-Effizienz und Konvergenzverhalten. Insgesamt entspricht die Formulierung des Bündelausgleichungsproblems einem nichtlinearen, dünn besetzten Least-Squares-Problem, für dessen effiziente Lösung die C++ Bibliothek CERES verwendet wird. Des Weiteren wird ein Maß für die Beobachtbarkeit des Optimums als Beurteilung der Robustheit von Kalibrierungen vorgeschlagen. Ergebnisse einzelner Kalibrierungen und Anwendungen runden die Arbeit ab.

Dissertation von Stephan Hilgert

Mr. Dipl.-Geoök. STEPHAN HILGERT completed his doctorate (Dr. rer. nat.) at the faculty of Civil Engineering, Geo- and Environmental Sciences of the Karlsruhe Institute of Technology on February 6, 2015, with the work "*Analysis of Spatial and Temporal Heterogeneities of Methane Emissions of Reservoirs by Correlating Hydro-acoustic with Sediment Parameters*".

1. Reviewer: Prof. Dr.-Ing. habil. STEFAN HINZ, KIT

2. Reviewer: Prof. Dr. CRISTOVÃO FERNANDES, University of Curitiba, Brazil

Summary:

The worldwide phenomenon of disrupting riverine ecosystems by dams leads to severe changes of biogeochemical cycles. Impoundments act as a sink for all transported materi-

als sie einen Fluss in einen See verwandeln. Jedes einzelne Stausee stellt einen individuellen und komplexen Reaktor dar. Alle Stauseen haben gemeinsam, dass sie Teile des zurückgehaltenen organischen Materials in Treibhausgasen und insbesondere in Methan umwandeln. Da die Anzahl und die Fläche von künstlich geschaffenen Seeökosystemen in den letzten Jahrzehnten signifikant zugenommen haben, sind die klimarelevanten Emissionen zu einem Forschungsschwerpunkt geworden. Allerdings ist die Quantifizierung von Methanemissionen aus Stauseen noch ungenau. Obwohl es effiziente Messverfahren gibt, führen räumliche und zeitliche Heterogenität zu Problemen. Daher sind die Berechnungen der globalen Methanbudgets von hohen Ungenauigkeiten betroffen.

Diese Arbeit zielt auf die Verbesserung der Methoden sowie auf die Vertiefung des Verständnisses der wichtigsten Prozesse ein, die die angesprochenen Heterogenitäten beeinflussen. Das übergeordnete Ziel ist die Identifizierung von Methanproduktionshotspots in Stauseen, was zu innovativen Sampling-Strategien führt, die es ermöglichen, den statistischen Fehler der gesamten Emissionsbudgets zu minimieren.

Unter der Annahme, dass tropische Stauseen einen signifikanten Anteil an Methan produzieren und unter Berücksichtigung der Bedeutung der Hydroelektrizität in Brasilien, wurden zwei brasilianische Stauseen für die Felduntersuchungen ausgewählt. Die Messungen wurden während vier Feldkampagnen zwischen 2010 und 2013 durchgeführt. Die Kombination von drei verschiedenen Ansätzen zur Methanbildung ermöglichte es, zeitliche und räumliche Heterogenitäten zu untersuchen, obwohl die Prozessverständnis auf lokaler Ebene noch unklar ist. Durch die Durchführung von hydroakustischen Untersuchungen mit einem 38/200 kHz Single-Beam-Echo-Sounder wurden grundlegende morphometrische Informationen erhalten. Zusätzlich wurde eine Seebodenklassifizierung durchgeführt, die eine umfassende Geländevalidierung ermöglichte, was die räumliche Interpolation der gefundenen Ergebnisse erleichterte. Sedimentkerninformationen bieten den Vorteil einer zeitlich integrierenden Momentaufnahme, da die Bildung von Sedimentvolumen ein langfristiger Prozess ist. Darüber hinaus wurde das Porenwasser der Sedimente an den entsprechenden Sampling-Stellen untersucht, um die Methanproduktion und relevante Redox-Indikatoren zu untersuchen.

Daher war es möglich, die Sedimentverteilung im Stausee mit qual-

itativen Parametern zu korrelieren und diese mit den charakteristischen Merkmalen der Methanproduktion zu verknüpfen. Abgeleitete Sedimentdickeninformationen und organische Kohlenstoffgehalte wurden zur Berechnung des Kohlenstoffbestands und seiner Verteilung genutzt. Das gesamte Capivari-Reservoir enthält eine Masse von 205,129 Mg (± 60.8 Mg) an organischem Kohlenstoff. Basierend auf der Kohlenstoffverteilung lässt sich dem Reservoir ein spezifisches Methanbildungsverhalten zuschreiben. Daher ist es möglich, die Ergebnisse von Methanemissionsmessungen zu verbessern, indem die statistische Fehler durch systematische Reduzierung der statistischen Fehler von Messungen her verringert werden.

Universität der Bundeswehr München

Dissertation von Andreas Kuhn

Herr Dipl.-Inf. ANDREAS KUHN promovierte am 28.7.2014 an der Fakultät für Informatik (Fachgebiet Visual Computing) der Universität der Bundeswehr München mit der Arbeit „*Scalable 3D Surface Reconstruction by Local Stochastic Fusion of Disparity Maps*“ zum Dr. rer. nat.

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. HELMUT MAYER, Universität der Bundeswehr München
2. Gutachter: Prof. Dr. DANIEL SCHARSTEIN, Middlebury College, VT, USA

Prüfer: Prof. Dr. PETER HERTLING, Prof. Dr.-Ing. MARK MINAS, Prof. Dr. OLIVER ROSE

Kurzfassung:

Digitale dreidimensionale (3D) Modelle sind in vielen Anwendungsfeldern wie Medizin, Ingenieurwesen, Simulation und Unterhaltung von großem Interesse. Eine manuelle Erstellung von 3D-Modellen ist äußerst zeitaufwendig und die Erfassung der Daten, z. B. durch Lasersensoren, teuer. Kamerabilder ermöglichen hingegen preiswerte Aufnahmen und sind gut verfügbar. Der rasante Fortschritt im Forschungsfeld Computer Vision ermöglicht bereits eine automatische 3D-Rekonstruktion aus Bilddaten. Dennoch besteht weiterhin eine Vielzahl von Problemen, insbesondere bei der Verarbeitung von großen Mengen hochauflösender Bilder. Zusätzlich zur komplexen Formulierung, die zur Lösung

eines schlecht gestellten Problems notwendig ist, besteht die Herausforderung darin, äußerst große Datenmengen zu verwalten.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem der 3D-Oberflächenrekonstruktion aus Bild-daten, insbesondere für sehr große Modelle, aber auch Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen. Zu diesem Zweck wird eine Prozesskette zur dichten skalierbaren 3D-Oberflächenrekonstruktion für große Bildmengen definiert, bestehend aus Bildregistrierung, Disparitätsschätzung, Fusion von Disparitätskarten und Triangulation von Punktwolken. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Fusion und Filterung von durch „Semi-Global Matching“ generierten Disparitätskarten zur Bestimmung von genauen 3D-Punktwolken.

Für eine unbegrenzte Skalierbarkeit wird eine so genannte divide-and-conquer Methode vorgestellt, welche eine parallele Verarbeitung von Teilräumen des 3D-Rekonstruktionsraums ermöglicht. Die Methode zur Fusion von Disparitätskarten basiert auf lokaler Optimierung von 3D Daten. Damit kann eine komplizierte Fusionsstrategie für die Unter-räume vermieden werden. Obwohl der Fokus auf der skalierbaren Rekonstruktion liegt, wird eine hohe Oberflächenqualität durch mehrere Erweiterungen von lokalen Optimierungsmodellen erzielt, die dem Stand der Forschung entsprechen.

Dazu wird eine bekannte lokale volumetrische Optimierungsmethode (von CURLESS und LEVOY) aus einer probabilistischen Perspektive interpretiert. Aus dieser Perspektive wird

die Methode durch eine Bayes Fusion von räumlichen Messungen mit Gaußscher Unsicherheit erweitert. Zusätzlich zur Bestimmung einer optimalen Oberfläche ermöglicht diese probabilistische Fusion die Extraktion von Oberflächenwahrscheinlichkeiten. Diese werden wiederum zur Filterung von Ausreißern mittels geometrischer Konsistenzprüfungen im 3D-Raum verwendet. Eine weitere Verbesserung der Qualität wird basierend auf der Analyse der Disparitätsunsicherheit erzielt. Dazu werden Gesamtvariation-basierte Merkmalsklassen definiert, welche stark mit der Disparitätsunsicherheit korrelieren. Die Korrelationsfunktion wird aus ground-truth Daten mittels eines Expectation Maximization (EM) Ansatzes gelernt. Außerdem wird der Einfluss der Bildregistrierung und Polygonisierung auf die volumetrische Fusion analysiert und verwendet, um die Methode zu erweitern. Schließlich wird eine Multi-Resolution Strategie präsentiert, welche die Generierung von Oberflächen aus räumlichen Daten mit unterschiedlichster Qualität ermöglicht. So betrachtet erweitert das entwickelte Gesamtverfahren andere state-of-the-art Methoden durch die Berücksichtigung der räumlichen Unsicherheit von 3D-Punkten aus Stereo Daten.

Die Evaluierung von mehreren bekannten und neuen Datensätzen zeigt das Potential der skalierbaren stochastischen Fusionsmethode auf. Stärken und Schwächen der Methode werden diskutiert. Eine Empfehlung für zukünftige Forschungsarbeiten wird gegeben.

Wechsel in der Schriftleitung für Fernerkundung

Mit großem Dank verabschieden wir den bisherigen Schriftleiter für die Fernerkundung innerhalb der PFG, Prof. Dr. ULRICH MICHEL, Heidelberg. Während seiner Schriftleitung lag die Verantwortung für mehr als die Hälfte der PFG-Artikel in seinen Händen, da sich die Fernerkundung zu einem Schwerpunkt unserer Zeitschrift entwickelt hat. In MICHELs Zeit sind einige herausragende Ausgaben entstanden. Erinnert sei an die Hefte der EFTAS

Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, im Herbst 2013 und an die Arbeiten der Universität für Bodenkultur in Wien im Herbst 2014. Wir wünschen ULRICH MICHEL auch bei seinen künftigen Herausforderungen ein gutes Gelingen.

Heute habe ich auch die Freude, Ihnen CHRISTOPHER CONRAD, als Nachfolger vorstellen zu können. CONRAD ist Professor an der Universität Würzburg. Aus Aschaffenburg

stammend studierte er an der Universität Mainz Geographie und Mathematik und promovierte später in Würzburg über hydrologischen Fragen bei Bewässerungsflächen in Usbekistan. Seine Forschungsarbeiten führten ihn nach Osteuropa, Mittelasien und Afrika.

Schon in der Vergangenheit hat CONRAD die PFG als Gutachter sehr unterstützt – neben acht weiteren Fachzeitschriften. Zu diesen zählen das International Journal of Remote Sensing, die Zeitschrift Remote Sensing und das IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.

Mathematisch geprägt geht CONRAD bei fernerkundlichen Untersuchungen über die rein statistische Analyse der Messdaten hinaus und fordert immer die Qualitätskontrolle der Ergebnisse mit unabhängigen Beobachtungen und den Nachweis der Verwendbarkeit neuer Methoden auch im größeren Rahmen, das heißt, nicht nur unter Laborbedingungen.

Wir begrüßen CHRISTOPHER CONRAD ganz herzlich und wünschen ihm eine glückliche Hand bei der Gestaltung der Fernerkundung innerhalb der PFG.

WOLFGANG KRESSE



Prof. Dr. ULRICH MICHEL



Prof. Dr. CHRISTOPHER CONRAD

Veranstaltungskalender

2015

11. – 15. Mai: **ISRSE36 – International Symposium on Remote Sensing of the Earth** in Berlin. isrse36.org

7. – 12. Juni: **CVPR 2015 – Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015** in Boston, USA. pamitc.org/cvpr15/

11. Juni: **ISPRS-CVPR joint workshops: Looking from above: when Earth observation meets vision (EarthVision) und Multi-Sensor Fusion for Outdoor Dynamic Scene Understanding** in Boston, USA. pamitc.org/cvpr15/

18. – 19. Juni: **ISPRS Workshop: Advances in Web-based Education Services** in Potsdam. misc.gis.tu-berlin.de/ISPRS/

1. – 3. Juli: **WebMGS 2015: ISPRS International Workshop on Web Mapping and Geoprocessing Services** in Cagliari, Italien. convegna.unica.it/webmgs2015/
5. – 11. Juli: **Innsbruck Summer School on Alpine Research 2015: Close Range Sensing Techniques in Alpine Terrain** in Obergurgl, Österreich. uibk.ac.at/geographie/summerschool
26. – 31. Juli: **IGARSS 2015 – International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015** in Mailand, Italien. igarss2015.org
23. – 28. August: **ICC – International Cartographic Conference** in Rio de Janeiro, Brasilien. icc2015.org
30. August – 2. September: **UAV-g: Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics in Toronto**, Kanada. uav-g2015.org
31. August – 5. September: **CIPA 2015: 25th CIPA Heritage Documentation Symposium** in Taipeh, Taiwan. cipa2015.org
6. – 11. September: **Photogrammetrische Woche 2015** in Stuttgart. ifp.uni-stuttgart.de/phowo
15. – 17. September: **INTERGEO** in Stuttgart. intergeo.de
21. – 24. September: **SPIE Remote Sensing 2015** in Toulouse, Frankreich. spie.org/remote-sensing-europe.xml
28. September – 3. Oktober: **ISPRS Geospatial Week 2015** in La Grande Motte, Frankreich. isprs-geospatialweek2015.org
6. – 9. Oktober: **GCPR (DAGM): German Conference on Pattern Recognition** in Aachen. gcpr2015.rwth-aachen.de/
28. – 30. Oktober: **Joint International Geoinformation Conference 2015: 3DGeoInfo – GeoAdvances – ISPRS WGII/2 Workshop – Geomatic & Geospatial Technology** in Kuala Lumpur, Malaysia. www.geoinfo.utm.my/jointgeoinfo2015/
7. – 13. Dezember: **ICCV 2015 – International Conference for Computer Vision 2015** in Santiago, Chile. pamitc.org/iccv15/
9. – 11. Dezember: **MMT 2015: 9th International Symposium on Mobile Mapping Technology** in Sydney, Australien. mmt2015.org

2016

3. – 4. Februar: **Oldenburger 3D Tage in Oldenburg**. jade-hs.de/fachbereiche/bauwesen-und-geoinformation/geoinformation/oldenburger-3d-tage
12. – 19. Juli: **ISPRS Congress 2016** in Prag, Tschechien. www.isprs2016-prague.com
10. – 16. Oktober: **ECCV 2016 – European Conference on Computer Vision 2016** in Amsterdam, Niederlande. eccv2016.org
8. – 11. November: **ICPR 2016 – International Conference on Pattern Recognition 2016** in Cancun, Mexiko.

Weitere Konferenzen und Workshops finden sich beispielsweise unter:
isprs.org/calendar/Default.aspx
conferences.visionbib.com

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
 AICON 3D Systems GmbH
 aphos Leipzig AG
 ASTEC GEODATA GmbH
 Bernhard Harzer Verlag GmbH
 Black Bridge AG
 Blom Deutschland GmbH
 Brockmann Consult GmbH
 bsf swissphoto GmbH
 Büro Immekus
 DB Netz AG
 DELPHI IMM GmbH
 Deutsches Bergbau-Museum
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
 Esri Deutschland GmbH
 EUROPEAN SPACE IMAGING
 Eurosense GmbH
 Exelis Visual Information Solutions GmbH
 fokus GmbH
 GAF GmbH
 GeoCart Herten GmbH
 Geoinform. & Photogr. Engin. Dr. Kruck & Co. GbR
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
 GEOSYSTEMS GmbH
 GGS – Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
 Hansa Luftbild AG
 Herbert Wichmann, VDE Verlag GmbH
 IAGB mbH
 IGI – Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
 ILV – Fernerkundungs GmbH
 Infoterra GmbH
 INVERS – Industrievermessung & Systeme
 Leica Geosystems GmbH
 Linsinger ZT GmbH
 Luftbilddatenbank Dr. Carls GmbH
 map/x/tek
 Messbildstelle GmbH
 Microsoft Photogrammetry
 MILAN Geoservice GmbH
 M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH
 PHOENICS GmbH
 PMS – Photo Mess Systeme AG
 RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Markscheidewesen
 technet GmbH
 Terra–Messflug GmbH
 topometric GmbH

TRIGIS GmbH
 Trimble Germany GmbH
 trimetric 3D Service GmbH
 Z/I Imaging Ltd.

Behörden

Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
 Hessisches LA für Bodenmanagement und Geoinformation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Institut für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Geoinformation und Landentwicklung, BW
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 LA für Vermessung und Geoinformation, Schleswig-Holstein
 LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
 LB für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, SH
 Landeshauptstadt Düsseldorf, Vermessungs- und Liegenschaftsamt
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungspräsident Tübingen, Abteilung 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst
 Stadt Köln, Amt für Liegenschaften, Vermessung und Kataster
 Stadt Wuppertal, Vermessung, Katasteramt und Geodaten
 Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde
 FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation
 FH Mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
 HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik
 HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
 HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik
 HS Karlsruhe, Fakultät für Geomatik
 HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie

- Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
LUH Hannover, Institut für Kartographie und Geoinformatik
LUH Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation
MLU Halle, FG Geofernerkundung
Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut
RWTH Aachen, Geodätisches Institut
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie
TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
TU Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik
TU Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
TU Darmstadt, Institut für Geodäsie, FG Fernerkundung und Bildanalyse
TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
TU München, FG Photogrammetrie und Fernerkundung
TU Wien, FG Photogrammetrie und Fernerkundung
Uni Bonn, Institut für Photogrammetrie
Uni Göttingen, Abteilung Waldinventur und Fernerkundung
Uni Heidelberg, IWR Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen
Uni Kassel, FG Grünlandwissenschaften und Rohstoffe
Uni Kiel, Geographisches Institut
Uni Stuttgart, Institut für Photogrammetrie
Uni Trier, Institut für Umweltfernerkundung und Geoinformatik
Uni Würzburg, Geographisches Institut
Uni zu Köln, Geographisches Institut



Hochschule Karlsruhe
Technik und Wirtschaft
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Näher dran.

Die Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft ist mit rund 8.500 Studierenden eine der größten Hochschulen für angewandte Wissenschaften Baden-Württembergs und hat neben der Lehre einen deutlichen Schwerpunkt in der angewandten Forschung.

Die Hochschule verfügt über die Fakultäten Architektur und Bauwesen, Elektro- und Informationstechnik, Informatik und Wirtschaftsinformatik, Informationsmanagement und Medien, Maschinenbau und Mechatronik sowie Wirtschaftswissenschaften. Die Studienangebote zeichnen sich durch hohe praxisorientierte Lehrinhalte und herausragende Studienbedingungen aus. Die Hochschule weist sehr gute Rankingergebnisse auf und arbeitet eng mit der regionalen und überregionalen Wirtschaft zusammen.

An der Fakultät für Informationsmanagement und Medien ist zum nächstmöglichen Zeitpunkt eine

**W2 – Professur für das Fachgebiet
„Photogrammetrie und Ingenieurgeodäsie“
- Kennzahl 1364 -**

zu besetzen.

Die Tätigkeit umfasst Aktivitäten in Lehre und Forschung in den Fachgebieten „Photogrammetrie und Ingenieurgeodäsie“. Darüber hinaus sind Kenntnisse in den Bereichen der Statistischen Analyse von Sensordaten, der Fernerkundung und der Geoinformatik wünschenswert. Mit der Stelle ist die Durchführung von Lehrveranstaltungen und die aktive Mitgestaltung der Bachelorstudiengänge Geodäsie und Navigation und Geoinformationsmanagement sowie des Internationalen Masterstudiengangs Geomatics verbunden. Für Lehre und Forschung steht ein Photogrammetrielabor zur Verfügung, dessen Leitung dem/der Stelleninhaber/in obliegt. Für Lehr- und Forschungsaktivitäten können u.a. mehrere UVA's, verschiedene terrestrische Laserscanner und eine Reihe von Softwaresystemen genutzt werden.

Es wird Kompetenz und Engagement beim Aufbau von eigenen Schwerpunkten im Bereich der Forschung und Entwicklung vorausgesetzt, um das Profil der Fakultät für die Studierenden noch attraktiver zu gestalten.

Gesucht wird eine Persönlichkeit, die ihre in der Forschung und in der beruflichen Praxis erworbene Kompetenz für unsere Studierenden nutzbar machen kann.

Die Hochschule Karlsruhe ist eine der drittmittelstärksten Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Baden-Württemberg. Der weitere Ausbau der angewandten Forschung ist deshalb anerkanntes Ziel der Hochschule. Sie geht davon aus, dass der/die Stelleninhaber/-in sich aktiv an der angewandten Forschung beteiligt und Drittmittel einwirbt.

Darüber hinaus besteht die Pflicht zur Beteiligung an der Grundlagenausbildung. Der/Die Stelleninhaber/-in muss bereit sein, auch Vorlesungen in fachlich benachbarten Gebieten zu übernehmen. Die Fähigkeit, Lehrveranstaltungen in englischer Sprache durchzuführen, wird vorausgesetzt.

Die Einstellungs Voraussetzungen für Professorinnen und Professoren sind geregelt in §§ 47, 49, 50 des Gesetzes über die Hochschulen in Baden-Württemberg (Landeshochschulgesetz – LHG) vom 9. April 2014. Einzelheiten finden Sie in der ausführlichen Stellenausschreibung unter www.hs-karlsruhe.de »Hochschule»Stellenangebote.

Die Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft strebt eine Erhöhung des Anteils von Frauen in Forschung und Lehre an. Sie bittet daher qualifizierte Interessentinnen nachdrücklich um ihre Bewerbung.

Schwerbehinderte Bewerberinnen und Bewerber werden bei entsprechender Eignung, Befähigung und fachlicher Leistung bevorzugt berücksichtigt.

Bewerbungen werden erbeten – **unter Angabe der Kennzahl – bis zum 15.07.2015** in Papierform oder auch gern elektronisch (im PDF-Format, alle Unterlagen in einer Datei) an die

**Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Personalabteilung
Postfach 2440, 76012 Karlsruhe, Telefon (0721) 925 – 1030,
personal@hs-karlsruhe.de**

