

# PRG

# Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2009, Heft 5

Hauptschriftleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

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

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



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



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

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



International Society  
for Photogrammetry  
and Remote Sensing

**DAGM**

Deutsche Arbeits-  
gemeinschaft für  
Mustererkennung e.V.



Herausgeber:

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

Published by:

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

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

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

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

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

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

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 185,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im Abonnement-Preis enthalten, Mitglieder der DGPF erhalten ihn kostenlos.

Anzeigenverwaltung: Dr. E. Nägele, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 0711 351456-0; Fax: 0711 351456-99.

e-mail: [mail@schweizerbart.de](mailto:mail@schweizerbart.de), Internet: <http://www.schweizerbart.de>

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

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

# PFG – Jahrgang 2009, Heft 5

## Inhaltsverzeichnis

---

### 60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München

STILLA, U., BAMLER, R. & MENG, L.: Editorial. . . . .	381
STILLA, U.: 60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München . . . . .	385
YAO, W., HINZ, S. & STILLA, U.: Automatic Estimation of Vehicle Activity from Airborne Thermal Infrared Video of Urban Areas by Trajectory Classification. . . . .	393
BAMLER, R., EINEDER, M., ADAM, N., ZHU, X. & GERNHARDT, S.: Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR . . . . .	407
BUTENUTH, M., REINARTZ, P., LENHART, D., ROSENBAUM, D. & HINZ, S.: Analysis of Image Sequences for the Detection and Monitoring of Moving Traffic . . . . .	421
LIU, L. & MENG, L.: Algorithms of Multi-Modal Route Planning Based on the Concept of Switch Point. . . . .	431
KRISP, J.M., PETERS, S., MURPHY, C.E. & FAN, H.: Visual Bandwidth Selection for Kernel Density Maps. . . . .	445

### Originalbeitrag

RENGERS, N. & PRINZ, T.: JAVA-basierte Texturanalyse mittels Neighborhood Gray-Tone Differenz Matrix (NGTDM) zur Optimierung von Landnutzungsklassifikationen in hoch auflösenden Fernerkundungsdaten . . . . .	455
---	-----

---

### Berichte und Mitteilungen

#### Mitteilungen der DGPF

Ehrendoktorwürde für Prof. Friedrich Ackermann. . . . .	469
Neustrukturierung der Berufsausbildung in der Geoinformationstechnologie . . . . .	469

#### Berichte von Veranstaltungen

Symposium Kartographie und Geovisualisierung vom 18.–20. Mai 2009 in Königsplutter/Elm . . . . .	470
3. Hamburger Anwenderforum für Terrestrisches Laserscanning am 16. Juni 2009. . . . .	471

#### Hochschulnachrichten

ETH Zürich, Dissertation MARTIN SAUERBIER . . . . .	472
ETH Zürich, Dissertation HENRI EISENBEIß . . . . .	473
Universität Stuttgart, Dissertation FREDERIK BLUMRICH . . . . .	474

#### Buchbesprechung

ALBERTZ, J. & WIGGENHAGEN, M. (2009): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. . . . .	476
--	-----

Veranstaltungskalender . . . . .	477
----------------------------------	-----

Neuerscheinungen . . . . .	478
----------------------------	-----

Zum Titelbild . . . . .	479
-------------------------	-----

Korporative Mitglieder . . . . .	480
----------------------------------	-----

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



## Editorial: 60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München

UWE STILLA, RICHARD BAMLER & LIQIU MENG, München

Im August 1948 wurde das Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie an der Technischen Hochschule München gegründet. Das heutige Institut für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) hat das 60 jährige Jubiläum im Nachgang zum Anlass genommen, zurückzublicken und die Themenbereiche der heutigen Forschung darzustellen.

Am IPK werden umfangreiche Forschungsarbeiten zur Aufnahme, Auswertung, Analyse und Visualisierung von Daten terrestrischer, luft- und satellitengetragener bildgebender Sensoren durchgeführt.

Am Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung werden Methoden für die Auswertung optischer und thermaler Bilddaten untersucht. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von der Satellitenphotogrammetrie über die Luftbildphotogrammetrie bis hin zu photogrammetrischen Applikationen im Nahbereich und in der Industrie. Zunehmend spielen hierbei die Analyse von Bildfolgen bewegter Sensoren, die Bestimmung der Trajektorien und Orientierungen sowie die Fusion von Bilddaten oder Ergebnissen der Extraktion mit 3D-Objekten aus Geodatenbasen eine Rolle. Das Forschungsgebiet wird ergänzt um Themen aus dem Bereich des Laserscannings, die sich auf die Auswertung von Full-Waveform-Daten urbaner und natürlicher Objekte konzentrieren. In der Fernerkundung liegt der Schwerpunkt auf der Detektion, Klassifikation und Rekonstruktion urbaner Objekte. Im Bereich des Synthetik Apertur Radar (SAR) werden vornehmlich Methoden zur Analyse von sehr hoch aufgelösten Daten flugzeuggetragener Sensoren entwickelt.

Das Forschungsgebiet des Lehrstuhls für Methodik der Fernerkundung umfasst Verfahren und Modelle für die satellitengestützte

Erdbeobachtung zur Gewinnung von Geoinformation aus Fernerkundungsdaten. Der Schwerpunkt liegt auf der SAR-Technik, der SAR-Interferometrie sowie der Auswertung hoch aufgelöster optischer Bilder. Die Verfahren reichen von der sensornahen Signalverarbeitung über Schätzalgorithmen und Datenfusion bis zur automatischen Interpretation. Aktuelle Forschungsarbeiten stehen u.a. in engem Zusammenhang mit den ersten deutschen Radar-Fernerkundungssatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X. Es werden interferometrische Methoden entwickelt, die z.B. zur Erfassung kleinster Bewegungen der Erdoberfläche oder zur Detektion von Verkehrsströmen dienen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Analyse von optischen Bildsequenzen zum Monitoring von Infrastrukturobjekten nach Naturkatastrophen, der echtzeitnahen 3D-Rekonstruktion, dem Verkehrsmonitoring und der Verfolgung von Personen bzw. der Interpretation deren Trajektorien. Alle Arbeiten werden in enger Kooperation mit dem Institut für Methodik der Fernerkundung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt und sind dort in größere Raumfahrtprojekte eingebunden.

Der Lehrstuhl für Kartographie beschäftigt sich mit der Modellierung, Integration und Visualisierung von Geo-Daten. Spezielle Forschungsschwerpunkte sind das räumliche Data-Mining und die explorative Visualisierung, die automatische Generalisierung digitaler Landschaftsmodelle, kartenbasierte Geodienste, insbesondere für virtuelle kollaborative Umgebungen, sowie die multimediale Kartographie und deren Gebrauchstauglichkeit. In der jüngsten Zeit sind drei weitere Aufgabengebiete, nämlich die Integration heterogener Verkehrsdaten zum Zweck der multimodalen Navigation, die raum-zeitliche Modellierung

virtueller Städte und die nichtphotorealistische 3D-Visualisierung für den mobilen Nutzungskontext hinzugekommen.

Neben den Forschungstätigkeiten bildet das Institutsteam Studenten der Geodäsie und Geoinformation im Bachelor- und Masterstudiengang in verschiedenen Grundlagen- und Vertiefungsfächern zu den Themenbereichen Photogrammetrie, Fernerkundung und Kartographie sowie Bildverarbeitung, Computergraphik und Ausgleichsrechnung aus und hält mehrere Veranstaltungen für den TUM-Masterstudiengang ESPACE (Earth Oriented Space Science und Technology) und den Masterstudiengang Landmanagement and Land Tenure. Für andere Studiengänge, wie z.B. Umweltingenieurwesen, Geographie, Geologie, und Landschaftsarchitektur, wird Lehrexport in Form von Vorlesungen, Blockveranstaltungen und Praktika angeboten. Bei der Doktorandenausbildung ist das IPK neben der klassischen Ausbildung in die International Graduate School of Science and Engineering ([www.igsse.de](http://www.igsse.de)) an der TUM mit mehreren Doktoranden und Forschungsprojekten eingebunden.

Das vorliegende Sonderheft stellt einen Ausschnitt der aktuellen Arbeiten des IPK dar. Die aktuellen Literaturlisten, die über die Webseite [www.ipk.bv.tum.de](http://www.ipk.bv.tum.de) zu erreichen sind und teilweise, soweit rechtlich möglich, auch Veröffentlichungen digital anbieten, geben einen umfassenderen Überblick über abgeschlossene und laufende Arbeiten.

UWE STILLA geht im ersten Beitrag *60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München* auf die Historie des Instituts ein. Schon lange vor der Institutsgründung haben sich an der TUM namhafte Wissenschaftler mit Themen im Bereich der Photogrammetrie und Kartographie auseinandergesetzt. Das Institut wird jetzt von der vierten Generation von Professoren seit der Gründung geleitet und viele der ehemaligen Mitarbeiter wurden zu Professoren berufen.

Der Beitrag von WEI YAO, STEFAN HINZ und UWE STILLA mit dem Titel *Automatic Estimation of Vehicle Activity from Airborne Infrared Video of Urban Areas by Trajectory Classification* beschäftigt sich mit der Fahrzeugdetektion aus Videobildfolgen, die mit Wärmebildkameras aufgenommen werden. Hierbei

werden nicht nur bewegte, sondern auch stehende Fahrzeuge erkannt. Im Gegensatz zu auf Tracking basierenden Verfahren werden vor der Rekonstruktion der Trajektorien alle Fahrzeughypothesen in der Bildsequenz bestimmt. Unter Berücksichtigung von geometrischer und zeitlicher Konsistenz erfolgt eine schrittweise Gruppierung der Fahrzeughypothesen und Untersuchung der Topologie von Trajektorien. Die Algorithmen zeigen für Bildsequenzen in Nadirsicht und in Schrägsicht von innerstädtischen Gebieten gute Ergebnisse.

RICHARD BAMLER, MICHAEL EINEDER, NICO ADAM, XIAOXIANG ZHU und STEFAN GERNHARDT zeigen in ihrem Artikel *Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR* am Beispiel von TerraSAR-X, welche Möglichkeiten die neue Generation hoch auflösender SAR-Satelliten für die SAR-Interferometrie eröffnen. Durch die Auflösung von 1 m können Struktur und Deformation einzelner Gebäude interferometrisch aus dem Weltraum vermessen werden, wo bisher nur grobe Deformationsmuster einer Stadt erfassbar waren. Von besonderem Interesse sind Daten aus dem Spotlight-Modus, deren interferometrische Verarbeitung erläutert wird. Es werden Ergebnisse aus Interferometrie, Persistent Scatterer Interferometrie und SAR-Tomographie präsentiert und die Anwendung von Speckle und Feature Tracking zur Erfassung von Gletscherbewegungen demonstriert.

Der Artikel *Analysis of Image Sequences for the Detection and Monitoring of Moving Traffic* von MATTHIAS BUTENUTH, PETER REINHARTZ, DOMINIK LENHART, DOMINIK ROSENBAUM und STEFAN HINZ beschäftigt sich mit der Analyse und Interpretation von Bildsequenzen, beispielhaft zur Überwachung von fließendem Verkehr. Der Artikel beschreibt zwei Verfahren zur Erkennung und Verfolgung von Fahrzeugen aus luftgetragenen Bildsequenzen. Das erste ist ein echtzeitnahes Tracking-Verfahren, welches auf der normalisierten Kreuzkorrelation basiert. Das zweite Verfahren bindet Modellwissen über Fahrerverhalten, Verkehrsdynamiken und Kontext ein. Die Ergebnisse und die abgeleiteten Qualitätsmaße zeigen die Leistungsfähigkeit der Systeme. Insbesondere die Integration des Verkehrsmodellwissens erhöht die Korrektheit der Trackingergebnisse.

Der Beitrag *Algorithms of Multi-Modal Route Planning Based on the Concept of Switch Point* von LU LIU und LIQIU MENG widmet sich der Bestimmung der kürzesten Route in einem multi-modalen Netzwerk. Dessen Modellierung basiert auf dem Kernkonzept „Schaltpunkt“. Die zwei Routingalgorithmen Multi-Modal Bellman-Ford (MMBF) und Multi-Modal Dijkstra (MMD) werden dargestellt. Als Grundlage dienen zwei klassische Methoden – „Label-Korrektur“ und „Label-Einstellung“. Die Machbarkeit des Ansatzes zur multimodalen Routenplanung wird in einem Prototypensystem bestätigt. Sowohl MMBF und MMD sind in der Lage, die kürzeste Route in einem beliebigen multi-modalen Netzwerk aufzufinden. Die beiden Algorithmen unterscheiden sich allerdings hinsichtlich des Rechenaufwands voneinander.

JUKKA M. KRISP, STEFAN PETERS, CHRISTIAN E. MURPHY und HONGCHAO FAN beschäftigen sich in dem Beitrag *Visual Bandwidth Selection for Kernel Density Maps* mit den Möglichkeiten, ein Computer-Werkzeug zur visuellen Parameterbestimmung zu entwickeln. Ziel ist es, einen angemessenen Radius für Kern-Dichte Schätzungen zu erhalten. Mit dem Werkzeug lassen sich Ergebnisse für Kerne mit verschiedenen Radien graphisch darstellen und experimentell untersuchen. Anhand statistischer Parameter des verwendeten Punktdatensatzes wird eine bestimmte Anzahl von Kern-Dichte-Karten mit verschiedenen Radien vorweg berechnet. Der Benutzer selektiert diese Radien mit einem Slider-Tool, wobei die jeweiligen Kern-Dichte-Karten nacheinander abgebildet werden. Dadurch lässt sich der optimale Radius zur geeigneten Visualisierung von einem bestimmten Datensatz finden.

Den wesentlichen Teil zum vorliegenden Heft haben die Autoren beigetragen. Ihnen sei ganz herzlich für ihr Engagement während dem Semester und einer mit vielen „Deadlines“ gespickten Zeit gedankt. Nicht verges-

sen möchten wir, ein Dankeschön an die 16 Gutachter zu richten. Sie haben nicht nur unter knappen Terminvorgaben zugestimmt, die Beiträge kritisch zu begutachten, sondern auch ihre Bewertung und Kritik fristgemäß eingereicht und wesentlich zur Verbesserung der Artikel beigetragen.

Der Dank der Editoren, aller Autoren und des Teams des IPK geht schließlich an die Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, und insbesondere dem Hauptschriftleiter der PFG, unserem lieben Kollegen und ehemaligen Mitarbeiter Prof. Helmut Mayer, die uns die Möglichkeit gegeben haben, dieses Heft zu gestalten. Bemerkenswert ist besonders Helmut Mayers ständiges Bestreben die Qualität der Beiträge in der PFG weiter zu steigern und sein Einsatz im Dialog mit den Autoren, um letztendlich Manuskripte zu erhalten, die den Gestaltungsrichtlinien der PFG entsprechen.

Zum Schluss möchten wir uns bei allen derzeitigen und ehemaligen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern/-innen und unseren Sekretärinnen des IPK für den großen Einsatz, die hervorragenden Leistungen und das positive Arbeitsklima bedanken. Besonders seien an dieser Stelle Dr. MANFRED STEPHANI, KONRAD EDER und FRITZ MEIER erwähnt, die Forschung, Lehre und Organisation am Institut über viele Jahre wesentlich gestützt haben.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Prof. Dr.-Ing. habil. RICHARD BAMLER, Prof. Dr.-Ing. LIQIU MENG, Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, 80333 München, Tel.: +49-89-289-22671, +49-8153-28-2673, +49-89-289-22825, Fax: +49-89-2809573, e-mail: stilla@tum.de, richard.bamler@dlr.de, meng@bv.tum.de.





# 60 Jahre Institut für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München

UWE STILLA, München

**Keywords:** Photogrammetrie, Fernerkundung, Kartographie

**Summary:** *60 Years Institute of Photogrammetry and Cartography at Technische Universität München.* This paper is concerned with the history of the Institute of Photogrammetry and Cartography at Technische Universität München (TUM). A long time before the foundation of the institute famous researchers at TUM tackled topics in the field of photogrammetry and cartography. After Richard Finsterwalder, Ernst Gotthardt, Rüdiger Finsterwalder, and Heinrich Ebner, the institute is currently managed in the fourth generation by the professors Liqiu Meng, Richard Bamler, and Uwe Stilla. Since the foundation of the institute in 1948 25 former staff members became professors.

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Historie des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität München (TUM). Schon lange vor der Institutsgründung haben sich an der TUM namhafte Wissenschaftler mit Themen im Bereich der Photogrammetrie und Kartographie auseinandergesetzt. Nach Richard Finsterwalder, Ernst Gotthardt, Rüdiger Finsterwalder und Heinrich Ebner wird das Institut in der vierten Generation von den Professoren Liqiu Meng, Richard Bamler und Uwe Stilla geleitet. Seit der Institutsgründung 1948 wurden 25 ehemalige Mitarbeiter zu Professoren berufen.

---

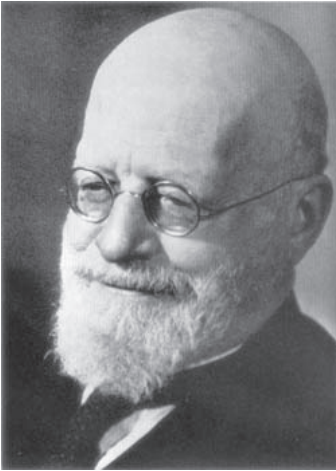
## 1 Photogrammetrie und Kartographie vor der Institutsgründung

Beschäftigt man sich mit der Entwicklung von Photogrammetrie und Kartographie und der Historie von Forschungsarbeiten in München, so stößt man mehrfach auf den Namen FINSTERWALDER. Chronologisch ist zunächst SEBASTIAN FINSTERWALDER (1862–1951) zu nennen (siehe Abb. 1). Er war vierzig Jahre von 1891 bis 1931 Ordinarius der Technischen Hochschule München (THM), zunächst auf dem Lehrstuhl für Mathematik und später auf dem Lehrstuhl für Geometrie.

Mit seinem sicheren Gespür für praktische Anwendungen nutzte Finsterwalder die Darstellende Geometrie als Grundlage der Photogrammetrie. Als einer der Ersten entwickelte er Verfahren zur Rekonstruktion räumlicher Objekte aus Photoaufnahmen. Bemerkenswert ist seine bahnbrechende Arbeit von 1899 „Die geometrischen Grundlagen der Photogram-

metrie“ (FINSTERWALDER 1899). Zugleich war er ein Pionier der geodätischen Vermessung im Gelände, insbesondere bei vom Ballon aus aufgenommenen Luftbildern im Hochgebirge. Seine Beschäftigung mit Fragen der Kartographie führte Finsterwalder – wie auch C.F. GAUSS – zur höheren Geodäsie. Sein Ansehen als Geodät war so groß, dass ihm die Leitung des Geodätischen Instituts in Potsdam angeboten wurde. Er hat dieses ehrenvolle Angebot wie auch zahlreiche andere ausgeschlagen. Er blieb München nicht nur treu, er war mit München und seiner bayrischen Heimat fest verwurzelt. Finsterwalder wirkte wissenschaftlich und organisatorisch ein halbes Jahrhundert (1899–1951) in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, leitete die Kommission für Internationale Erdmessung und war auch Mitbegründer des Deutschen Museums (GIERING 2009).

Auch theoretische Arbeiten auf dem Gebiet der Photogrammetrie und Kartographie an der THM und die Verbindungen zur Industrie reichen weit vor die Institutsgründung zurück,



**Abb. 1:** SEBASTIAN FINSTERWALDER (1862–1951).

wie die 1919 eingereichte Habilitation von OTTO VON GRUBER und die verliehenen Ehrenpromotionen, 1922 an WALTHER BAUERSFELD (Zeiss, Jena) und 1923 an CARL PULFRICH (Zeiss, Jena) für das Gebiet der Stereophotogrammetrie, zeigen.

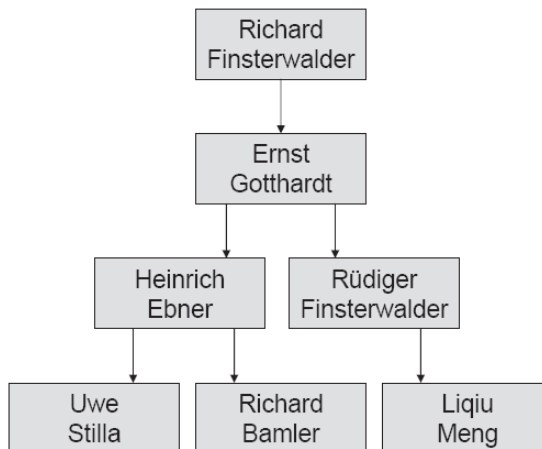
## 2 Photogrammetrie und Kartographie seit der Institutsgründung

Mit dem Aufschwung der Photogrammetrie zur Mitte der 20. Jahrhunderts wurde der zunehmende Bedarf neben der klassischen Geo-

däsie in Forschung und Lehre erkannt und 1948 an der THM das Institut für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) gegründet. Heute wird das Institut in der vierten Generation geleitet (siehe Abb. 2). Der Institutsleiter der ersten Generation war RICHARD FINSTERWALDER, der Sohn von SEBASTIAN FINSTERWALDER.

### 2.1 Erste Generation (1948–1963): Richard Finsterwalder

Durch Begabung und Erziehung war dem Sohne Richard (siehe Abb. 3) – nicht anders als seinen drei Brüdern – von dem berühmten Vater Sebastian Finsterwalder eine klare Linie mit auf den Lebensweg gegeben worden. Richard – geboren am 7. März 1899 – entschloss sich, Ingenieur zu werden. Er wandte sich zunächst dem Bauwesen zu und erhielt im Jahr 1922 sein Diplom an der THM. Doch schon während seiner darauffolgenden Referendanzzeit merkte er, dass ihm nicht so sehr der konstruktive Eingriff in die Landschaft als vielmehr deren Aufnahme und Darstellung im Kartenbild am Herzen lag. Diese Einsicht traf sich mit seiner Liebe für das Hochgebirge und seinem begeisterten Bergsteigertum – beide gleichermaßen vom Vater geerbt und gefördert. So wandte er sich der Hochgebirgskartographie zu und entwickelte jene Vermessungsmethode weiter, die mit seinem Namen verbunden bleibt: die terrestrische Photogram-



**Abb. 2:** Professuren am Institut für Photogrammetrie und Kartographie.

metrie im Hochgebirge. Schon mit seiner Dissertation 1923 hatte er den Beschluss gefasst, sich endgültig der Geodäsie zuzuwenden; er ergänzte seine geodätische Ausbildung und erwarb 1927 an der THM das Diplom als Vermessungsingenieur (HOFMANN 1963).

Schon früh beteiligte sich RICHARD FINSTERWALDER regelmäßig an den von seinem Vater eingerichteten Gletscherkursen, die alljährlich Wissenschaftler aller mit der Gletscherkunde befassten Fachrichtungen auf bekannten Alpenvereinsstütten zusammenführten; er übernahm ab 1927 deren Leitung und baute sie auf etwas breiterer Basis zu Hochgebirgskursen aus (GROSSMANN 1964).

Im Jahre 1930 habilitierte sich RICHARD FINSTERWALDER an der THM mit der Arbeit „Grenzen und Möglichkeiten der terrestrischen Photogrammetrie, besonders auf Forschungsreisen“ und trat im gleichen Jahr als Oberingenieur in das Geodätische Institut der Technischen Hochschule Hannover ein. Dort wurde er 1934 zum außerplanmäßigen Professor und 1940 zum Extraordinarius für Photogrammetrie und Vermessungswesen ernannt. Nach der Ernennung zum Ordinarius für Geodäsie im Jahre 1942 übernahm er die Leitung des Instituts. Er lehnte 1947 die Rufe auf das Ordinariat für Geodäsie in Darmstadt und die Institutsleitung des Potsdamer Geodätischen Institutes ab und folgte dann aber im nächsten Jahr dem Ruf der THM an den Lehrstuhl für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie und die Leitung des gleichnamigen Instituts zu übernehmen, die ihm beide am 21. 8. 1948 übertragen wurden (GROSSMANN 1964).

Dies war der Geburtstag des heutigen Institutes.

RICHARD FINSTERWALDER ließ die Hochgebirgskurse wieder anlaufen und gab ihnen durch die starke Betonung morphologischer Fragen einen für alle topographischen Arbeiten bemerkenswerten Akzent (GROSSMANN 1964). Ferner ging er auf die Vorschläge der Firma Zeiss-Aerotopograph, München, ein, die traditionsreichen Jenaer „Ferienkurse in Photogrammetrie“ als „Münchner Photogrammetrische Wochen“ fortsetzen zu helfen. Zusammen mit KURT SCHWIDEFSKY übernahm er die wissenschaftliche Leitung dieser Kurse, von denen seit 1951 bis zu seinem Tode insge-

samt neun in München durchgeführt wurden. Weiterhin war ihm die Neubelebung der Bildmessung in Deutschland ein ernstes Anliegen. Er gehörte zu jenen sieben Männern, die sich im Jahre 1950 in München trafen, um die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie neu zu gründen. Nach seiner Wahl durch die erste Hauptversammlung behielt er den Vorsitz der Gesellschaft und bei seinem Rücktritt vom Posten des 1. Vorsitzenden im Jahre 1955 ernannte ihn die Gesellschaft zu ihrem Ehrenpräsidenten (HOFMANN 1963).

Durch sein Engagement bei der Neubelebung der Polarforschung überschritten die anfallenden glaziologischen Auswertearbeiten bald die Möglichkeiten seines Hochschul Institutes. Auf seine Anregung wurde daher 1963 bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften eine Kommission für Glaziologie errichtet, er selbst wurde zu ihrem Ständigen Sekretär bestellt (HOFMANN 1963).

RICHARD FINSTERWALDER erlag im Oktober 1963 einem Herzanfall. Während seiner Zeit am IPK (1948–1963) entstanden elf Promotionen und eine Habilitation. EDUARD MESSTER wurde 1954 die Ehrendoktorwürde verliehen. Aus seinem Mitarbeiterkreis ging eine Reihe von Professoren hervor: GERFRIED APPELT (Landesvermessungsamt München), WALTER HOFMANN (Technische Hochschule Karlsruhe), GOTTFRIED KONECNY (Universität Hannover),



Abb. 3: RICHARD FINSTERWALDER (1899–1963).

GÜNTHER KUPFER (Universität Bonn), KLAUS LINKWITZ (Universität Stuttgart), HANS-KARSTEN MEIER (Carl Zeiss, Oberkochen), EGON MOHR (Fachhochschule Stuttgart) und ALBERT SCHÖDLBAUER (Universität der Bundeswehr München).

## 2.2 *Zweite Generation:* *ERNST GOTTHARDT*

ERNST GOTTHARDT (siehe Abb. 4) wurde 1908 in Kassel geboren und wollte nach dem bestandenen Abitur zunächst wie sein Vater Studienrat werden. Nach der Prüfung für das Lehramt an Höheren Schulen geriet er jedoch in die Zeit der großen Arbeitslosigkeit 1931/1933 und der Beruf des Studienrats erschien damals gänzlich aussichtslos. Auf der Suche nach einer Ausweichmöglichkeit kam sein Vater auf den Beruf des Landmessers (GOTTHARDT 1976). Zum Studium ging er an die Technische Hochschule Berlin-Charlottenburg, schloss 1937 mit dem Diplom ab, promovierte 1938 und habilitierte sich 1940. Nach einer Assistentenzeit an der Universität Bonn erreichte ihn 1948 der Ruf nach Stuttgart, wo er erst als außerordentlicher Professor und später als Ordinarius für Geodäsie und Photogrammetrie wirkte. Im Jahre 1965 wurde er an die Technische Universität München (TUM) auf den Lehrstuhl für Photogrammetrie und Kartographie berufen (BURKHARDT 1973).

ERNST GOTTHARDTS Aufmerksamkeit gehörte immer wieder zwei großen Problemfeldern: Der Bildorientierung einschließlich ihrer Genauigkeit und der analytischen Photogrammetrie bis hin zur rechnerischen Streifen- und Blockausgleichung. Dabei hat er mit großem Vergnügen auch selbst programmiert. Neben der Photogrammetrie galt Gotthardts besonderes Interesse stets der Fehlertheorie, Ausgleichsrechnung und überhaupt den Rechenverfahren (ACKERMANN 1977). Bereits 1952 legte er in einer der allerersten DGK-Publikationen in „Ableitung der Grundformeln der Ausgleichsrechnung mit Hilfe der Matrizenrechnung“ eine wichtige Arbeit vor, die damals den Zugang zur Matrizenrechnung eröffnete und erleichterte (GRÜN 1976). Von fundamentaler Bedeutung sind insbesondere seine Untersuchungen zur Fehler-

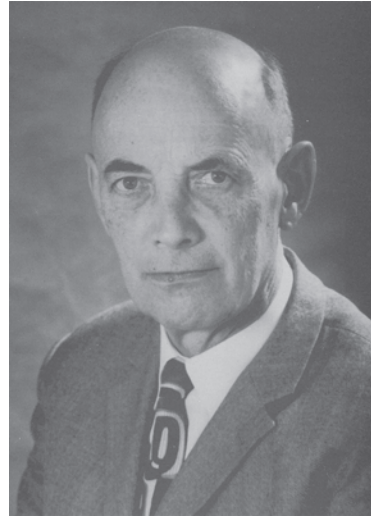


Abb. 4: ERNST GOTTHARDT (1908–1976).

lertheorie der Aerotriangulation und zur analytischen Photogrammetrie (FINSTERWALDER 1976).

ERNST GOTTHARDT wurde im Juli 1976 verabschiedet und verstarb im Oktober 1976. Während seiner Zeit am IPK (1965–1976) entstanden elf Promotionen und eine Habilitation. Aus seinem Mitarbeiterkreis ging eine Reihe von Professoren hervor: EGON DORRER (Universität der Bundeswehr München), RÜDIGER FINSTERWALDER (TUM), HANSBERT HEISTER (Universität der Bundeswehr München), JÜRGEN HOTHMER (Fachhochschule Mainz), KARL KRAUS (Technische Universität Wien), ERNST QUITT (Fachhochschule München), GÜNTER ROSSIPAL (Fachhochschule München) und FRIEDRICH WIMBAUER (Fachhochschule München).

## 2.3 *Dritte Generation: RÜDIGER FINSTERWALDER und HEINRICH EBNER*

Schon im Jahre 1967 wurde am Institut eine Abteilung Kartographie eingerichtet. Kurz vor dem Ausscheiden von ERNST GOTTHARDT wurde 1976 neben der Professur für Photogrammetrie eine zweite Professur anstelle der Abteilung eingerichtet, nämlich der Lehrstuhl für Kartographie und Reproduktionstechnik. Auf diesen Lehrstuhl wurde 1976 RÜDIGER

FINSTERWALDER und auf den Lehrstuhl für Photogrammetrie 1977 HEINRICH EBNER berufen.

### RÜDIGER FINSTERWALDER

RÜDIGER FINSTERWALDER (siehe Abb. 5), ein 1930 in Deggendorf geborener Neffe RICHARD FINSTERWALDERS, studierte von 1950 bis 1954 Vermessungswesen und schloss danach die Referendarausbildung für den höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst und den höheren Flurbereinigungsdienst in Bayern ab. Doch 1957 zog es ihn wieder an seine Alma Mater zurück und er übernahm die Stelle eines wissenschaftlichen Assistenten am Institut für Photogrammetrie, Topographie und Allgemeine Kartographie. Er promovierte 1960 mit einem photogrammetrischen Thema zur Affinauswertung und habilitierte sich 1970 für das Fach Photogrammetrie und Kartographie. Im Jahre 1972 wurde er zum Leiter der Abteilung Kartographie des Instituts und 1973 zum apl. Professor ernannt. Schließlich folgte 1976 die Berufung zum ordentlichen Professor auf den neu eingerichteten Lehrstuhl.

Das wissenschaftliche Werk von RÜDIGER FINSTERWALDER reicht von Arbeiten über geometrische Grundlagen der Photogrammetrie, den Einsatz von Orthophotos in der Topographie, die Kartographiehistorie und gletscherkundliche Arbeiten zur Erfassung bayerischer und österreichischer Gletscher bis hin zur Ge-

staltung von topographischen Karten (HOISL 1990). Er beschränkte sich keineswegs auf die Ostalpen, vielmehr beschäftigte er sich auch mit dem Himalaya, dem Karakorum sowie den südamerikanischen Kordillieren. Außer-alpine Hochgebirgskartographie betrieb er auch als Mitglied der Arbeitsgemeinschaft für Vergleichende Hochgebirgsforschung. Hier erfolgten die topographischen und kartographischen Arbeiten zur Neuherstellung und Herausgabe des Kartenwerks Kathmandu Valley 1 : 50 000 und weiterer Karten in Ostnepal. Im Bereich der Gletscherforschung sind ihm die Kartierungen einer Reihe von Ostalpengletschern und außeralpiner Gletscher zu verdanken. In Zusammenarbeit mit der Kommission für Glaziologie dokumentierte er mehrfach das Zurückgehen der Ostalpengletscher. In der Kartographiehistorie beschäftigte er sich umfangreich mit Genauigkeitsuntersuchungen historischer Karten, vor allem solcher von Bayern und Tirol (BRUNNER 2000).

### HEINRICH EBNER

HEINRICH EBNER (siehe Abb. 5) wurde 1939 in Wien geboren und studierte nach der Schule zunächst bis 1959 Tiefbau an der Ingenieurschule in Wien und dann von 1959 bis 1964 Geodäsie an der Technischen Universität Wien. Nach dem Studienabschluss ging HEINRICH EBNER zur Firma Carl Zeiss nach Oberkochen. Wie er immer wieder betont hat, war die



**Abb. 5:** HEINRICH EBNER (links) und RÜDIGER FINSTERWALDER (rechts).

Zeit bei Zeiss war für ihn prägend, denn in den gut zwei Jahren lernte er, die Fragen und Wünsche der Praxis für die wissenschaftliche Arbeit zu berücksichtigen. Anfang 1967 nahm er ein Angebot von Prof. ACKERMANN an und ging an das Institut für Photogrammetrie nach Stuttgart, wo er 1969 promovierte und im Bereich der Aerotriangulation forschte (HEIPKE 2004). Er habilitierte sich 1972, wurde 1974 apl. Professor und folgte 1977 dem Ruf der TUM auf den Lehrstuhl für Photogrammetrie.

Auf Grundlage der von ihm initiierten Lösungen zur Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen begann er in den frühen siebziger Jahren sich mit der a posteriori Varianzkomponentenschätzung zu beschäftigen, um die Dispersion der Beobachtungen möglichst realistisch in die Auswertung einzuführen. Die von ihm im Detail nachgewiesenen systematischen Einflüsse verschiedener zusätzlicher Parameter konnten als Basis für viele folgende Untersuchungen dienen. Zu Beginn der Münchner Laufbahn leitete er auf dem Gebiet der digitalen Geländemodelle (DGM) eine sehr erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit in die Wege (FRITSCH 1999).

Weiterhin richtete er seine Arbeiten konsequent auf neue, zukunftsweisende Gebiete aus, wie den Ausgleichungsansatz für die 3-Zeilen Geometrie. Diesen Ansatz entwickelte er zunächst mit der Firma MBB für einen luftgetragenen Sensor und erweiterte ihn später für Anwendungen im Weltraum. Mit seinen Mitarbeitern sorgte er für die Umsetzung im Rahmen des amerikanischen Space Shuttle Experiments MOMS-02/D2 und der planetaren Mission Mars Express. Mit Aufkommen der digitalen Photogrammetrie Mitte der 80er Jahre erschloss HEINRICH EBNER auch dieses neue Gebiet für sich und seinen Lehrstuhl. Er gab wichtige Impulse zur automatischen Bildzuordnung, zur digitalen Orthoprojektion und – vor allem in den letzten Jahren – zur automatischen Bildinterpretation. Durch seinen Arbeitsstil, gekennzeichnet durch profunde wissenschaftliche Analyse und Interdisziplinarität, prägte er zahllose Aktivitäten. Von besonderer Bedeutung waren hier die von ihm initiierten Arbeiten zur automatischen Extraktion von Straßendaten aus digitalen Luftbildern (HEIPKE 2004).

RÜDIGER FINSTERWALDER wurde 1998 und HEINRICH EBNER 2003 verabschiedet. Während ihrer Zeit am IPK (1976–2003) entstanden 28 Promotionen (davon 25 bei HEINRICH EBNER) und drei Habilitationen. Aus dem Mitarbeiterkreis des Instituts ging eine Reihe von Professoren hervor: KURT BRUNNER (Universität der Bundeswehr München), DIETER FRITSCH (Universität Stuttgart), ARMIN GRÜN (ETH Zürich), CHRISTIAN HEIPKE (Leibniz Universität Hannover), OLAF HELLWICH (Technische Universität Berlin), HELMUT MAYER (Universität der Bundeswehr München), GUSTAF NEUGEBAUER (Universität der Bundeswehr München), HANS OBERMEIER (Fachhochschule München), WOLFGANG REINHARDT (Universität der Bundeswehr München) und GÜNTER STRUNZ (DLR, Oberpfaffenhofen).

## 2.4 Vierte Generation: LIQIU MENG, RICHARD BAMLER und UWE STILLA

Als Nachfolgerin von RÜDIGER FINSTERWALDER wurde 1998 LIQIU MENG und als Nachfolger für HEINRICH EBNER wurden 2003 RICHARD BAMLER und 2004 UWE STILLA berufen.

### LIQIU MENG

LIQIU MENG (siehe Abb. 6) wurde 1963 in der Provinz Jiangsu, China, geboren und absolvierte 1978–1982 das Bachelor- und 1982–1985 das Masterstudium der Kartographie an der Military University of Information Engineering, Zhengzhou, China. Danach war sie bis 1988 an der gleichen Universität Lehr- und Forschungsassistentin am Institute of Surveying & Mapping. Als chinesische Regierungstipendiatin kam sie 1988 an die Universität Hannover und promovierte dort 1993 am Institut für Kartographie. Von 1994 bis 1998 arbeitete sie als Senior Lecturer for Cartography an der Högskolan i Gävle, Schweden, und als Technische Beraterin für GIS in Stockholm und habilitierte sich 1998 an der KTH Stockholm für Geoinformationswissenschaft. Ihre Berufung auf die Professur für Kartographie der TUM erfolgte 1998. Seit dem 1.4.2008 ist sie Vizepräsidentin der TUM.



**Abb. 6:** UWE STILLA (links), RICHARD BAMLER (mitte) und LIQIU MENG (rechts).

### RICHARD BAMLER

RICHARD BAMLER (siehe Abb. 6) wurde 1955 geboren, studierte an der TUM und erhielt 1980 das Diplom in Nachrichtentechnik. Ab 1981 arbeitete er am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik an der TUM, promovierte 1986 und habilitierte sich 1988 für das Fachgebiet „Signal- und Systemtheorie“. 1989 wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen, ab 1992 war er Gruppenleiter, ab 1996 Abteilungsleiter und 1998 übernahm er die kollegiale Leitung des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums. Seit 2000 ist er Direktor des DLR-Instituts für Methodik der Fernerkundung (IMF). 2003 wurde er auf die Professur für Methodik der Fernerkundung an der TUM berufen.

### UWE STILLA

Uwe Stilla (siehe Abb. 6) wurde 1957 in Köln geboren. 1980 erhielt er von der Gesamthochschule Paderborn, Abt. Meschede, das Diplom in Nachrichtentechnik und 1987 von der Universität Karlsruhe ein zusätzliches Diplom in Elektrotechnik, Schwerpunkt Biomedizinische Technik. Er arbeitete von 1987 bis 1990 am Institut für Biokybernetik und Biomedizinische Technik der Universität Karlsruhe und hatte von 1989 bis 2003 einen Lehrauftrag im Fach Biokybernetik an der Universität Heidelberg und der Fachhochschule Heilbronn. Ab

1990 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung (FGAN-FOM) in Ettlingen. Er promovierte 1993 an der Universität Karlsruhe im Bereich der Mustererkennung. 2004 wurde er auf die Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TUM berufen. Derzeit ist Uwe Stilla Prodekan der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen und Studiendekan der Studiengänge der Geodäsie.

Bisher entstanden in der neuen Generation fünf Promotionen und eine Habilitation. Aus dem Mitarbeiterkreis des Instituts gingen zwei Professoren hervor: Stefan Hinz (Universität Karlsruhe) und Franz Meyer (University of Alaska, Fairbanks).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in der Zeit von 1948 bis heute insgesamt 55 Promotionen und 6 Habilitationen entstanden sind und 25 Mitarbeiter zu Professoren berufen wurden.

### Literatur

- ACKERMANN, F., 1977: Professor Ernst Gotthardt †. – *Bildmessung und Luftbildwesen* **45** (1): 26–27.
- BRUNNER, K., 2000: Rüdiger Finsterwalder 70 Jahre. – Manuskript zum Geburtstag von Rüdiger Finsterwalder.
- BURKHARDT, R., 1973: Professor Dr.-Ing. Ernst Gotthardt 65 Jahre. – *Bildmessung und Luftbildwesen* **41** (4): 157.

- BRUNNER, K. & EBNER, H., (HRSG.) 1990: Festschrift für Rüdiger Finsterwalder zum 60. Geburtstag. – Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie.
- BURKHARDT, R. & RUBE, K., 1942: Otto von Gruber. – Bildmessung und Luftbildwesen **17** (3/4): 42–52.
- FINSTERWALDER, R., 1899: Die geometrischen Grundlagen der Photogrammetrie. – Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung (1897) **6** (2), Leipzig.
- FINSTERWALDER, R., 1976: o. Prof. Dr.-Ing. habil. Ernst Gotthardt †. – Mitteilungen des DVW Bayern: 228–229.
- FRITSCH, D., 1999: Von der Blockausgleichung zur automatisierten Objektdatenerfassung. – In: Heipke & Mayer, 1999: 11–17.
- GIERING, O., 2009: Sebastian Finsterwalder 1892–1951. – [www.hm.ma.tum.de/geschichte/node20.html](http://www.hm.ma.tum.de/geschichte/node20.html).
- GOTTHARDT, E., 1976: Rückblick auf ein Geodätenleben. – Manuskript zur Verabschiedung.
- GROSSMANN, W., 1964: Richard Finsterwalder zum Gedächtnis. – Zeitschrift für Vermessungswesen **89** (1): 1–7.
- GRÜN, A., 1976: Festliche Verabschiedung von Prof. E. Gotthardt. – Allgemeine Vermessungsnachrichten **11–12**: 392–395.
- HEIPKE, C., 2004: Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation **1/2004**: 76–80.
- HEIPKE, C. & MAYER, H. (HRSG.) (1999): Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag. Technische Universität München, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- HOFMANN, W., 1963: Professor Dr.-Ing. Richard Finsterwalder zum Gedenken. – Bildmessung und Luftbildwesen **31** (4): 172–177.
- HOISL, R., 1990: Karten für die örtliche Planung. – In: BRUNNER & EBNER, 1990: 77–81.

Adresse des Autors:

Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, 80333 München, Tel.: +49-89-289-22671, Fax: +49-89-2809573, e-mail: [stilla@tum.de](mailto:stilla@tum.de).

Manuskript eingereicht: Juni 2009  
Angenommen: Juli 2009



## Automatic Estimation of Vehicle Activity from Airborne Thermal Infrared Video of Urban Areas by Trajectory Classification

WEI YAO, München, STEFAN HINZ, Karlsruhe & UWE STILLA, München

**Keywords:** Airborne thermal IR video, detection, video co-registration, trajectory grouping, movement estimation.

**Summary:** Analysis of traffic data plays an important role in urban and spatial planning. Thermal Infrared (TIR) video cameras have capabilities to operate at day and night and to acquire the scene sampled with video frame rate. In this paper a strategy for the estimation of vehicle motion and the assessment of traffic activity from airborne TIR video is presented. In contrast to other approaches we handle detecting and tracking vehicles in the video separately, because moving as well as stationary vehicles are intended to be detected. Firstly, vehicles are detected in single frames of the video. Additionally, tie points are detected for co-registration and compensation the sensor movement. Afterwards, a stepwise grouping of image points considering temporal consistence and geometric relation is carried out to determine the vehicle trajectories and classify them into stationary, moving and uncertain dynamical categories. The vehicles are then integrated into the classes “moving,” “stationary” and “uncertain” categories. Additionally, in consideration of matching vehicle-related image patches for moving vehicles, the topology of the trajectories are investigated and optimized in order to eliminate disturbances and estimate velocities. The algorithms were tested with video sequence of urban areas in nadir-view and oblique-view. The correctness of the results is achieved higher than 75% for both views.

**Zusammenfassung:** *Automatische Schätzung der Vehikel Aktivität aus luftgetragenen thermalen infraroten Videos urbaner Bereiche durch Trajektorienklassifikation.* Die Analyse von Verkehrsdaten spielt eine wichtige Rolle bei der Stadt- und Raumplanung. Thermal Infrarot (TIR)-Kameras bieten die Möglichkeit Szenen bei Tag und Nacht im Videotakt zu erfassen. In diesem Beitrag werden eine automatische Strategie zur Schätzungen von Fahrzeugbewegung und die Bewertung der Verkehrsaktivität aus flugzeuggetragenen IR-Videodaten präsentiert. Bei diesem Ansatz werden im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren Detektion und Verfolgung von Fahrzeug in den Videodaten getrennt behandelt, da auch stehende Fahrzeuge gefunden werden sollen. Zunächst werden Fahrzeuge in den Einzelbildern der Videosequenz detektiert. Zusätzlich werden Verknüpfungspunkte detektiert, um eine Koregistrierung der Bilder durchzuführen und die Sensorbewegung zu kompensieren. Anschließend wird unter Berücksichtigung zeitlicher Konsistenz und geometrischer Zusammenhänge eine schrittweise Gruppierung von Bildpunkten durchgeführt, um den dynamische Status des Fahrzeuges zu detektieren. Die Fahrzeuge werden dann in die Klassen „bewegt“, „unbewegt“ und „unsicher“ eingeteilt. Zusätzlich auch mit Berücksichtigung von Matching der fahrzeugbezogenen Bildmatrizen werden für die bewegten Fahrzeuge die Topologie der Trajektorien untersucht und optimiert, um Störungen zu beseitigen und Geschwindigkeiten zu schätzen. Die Algorithmen wurden mit Bildsequenzen in Nadirsicht und in Schrägsicht von innerstädtischen Gebieten getestet. Die Korrektheit der Ergebnisse erreicht für beide Sichten Werte höher 75%.

## 1 Introduction

Traffic-monitoring systems rely on sensors to acquire traffic information. In the last decade many ground-based sensors, e. g., loop detectors, bridge sensors and stationary cameras have been widely used and extensively studied (HU et al. 2004). Airborne-video data acquisition for traffic-parameter estimation has been explored as an alternative to conventional data-collection methods (ERNST et al. 2005; ROSENBAUM et al. 2008), because it may enable covering a relatively broad area and potentially derive additional parameters such as travel time, relative velocity, vehicle trajectory, etc (SHASTRY & SCHOWENGERDT 2005; COHEN & MEDIONI 1998; REINARTZ et al. 2006). Thermal IR cameras provide the night vision capability and are able to capture the traffic situation at day and night. Generally, temperature measurement gives an important cue for the activity of cars, even though vehicles are in use but do not move due to a traffic jam or waiting in front of a red traffic light. Stationary vehicles often appear as cold spots (dark) on the warmer road surface (bright). But warm parts (e. g., exhaust) of active vehicles appear as hot spots (bright) (STILLA et al. 2004; ERNST et al. 2005).

Since the videos are taken from a moving platform, the simple optical flow estimation cannot directly be used to detect object motion, we have to distinguish the sensor movement from true object movement in the scene in order to characterize traffic activity. A number of approaches have recently been proposed. However, they are either only constrained to automatically detect vehicles or vehicle queues in the IR images of dense city areas or only focused on tracking moving vehicles and estimating their movement from airborne IR video. For example, STILLA & MICHAELSEN (2002) have developed a method of detecting single vehicle in the airborne IR images of urban areas based on spot-filtering. In (HINZ & STILLA 2006) a detector for extracting single vehicles and vehicle queues combining global and local context is introduced, we can hardly get information about time from the single image. Concerning TIR video, KIRCHHOF & STILLA (2006) have applied planar homograph as geometric tool to co-register the video data and attempted to detect and track

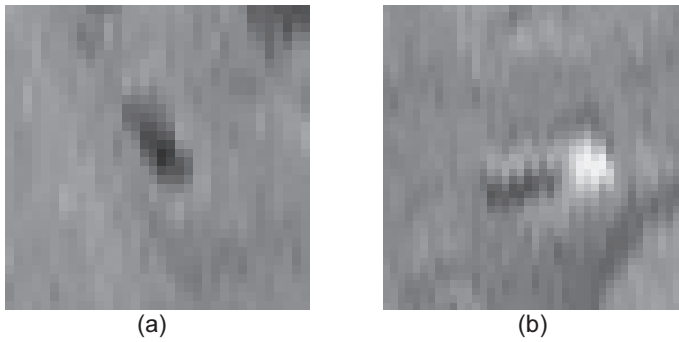
moving objects by analyzing the motion channel. Both MICHAELSEN & STILLA (2004) and YILMAZ et al. (2003) have analyzed and accessed different methods for pose estimation from oblique airborne videos in order to optimize processing chain for specific scene reconstruction and tracking moving objects. An up-to-date trial on multiple moving object detection is presented in (YAO et al. 2008a, 2008b and LEITLOFF et al. 2007), but most of them are limited to dealing with datasets acquired in nadir-view mode.

All previous works mentioned above can be regarded as the foundations or components of traffic monitoring system from airborne TIR platforms, which only addressed individual parts of the issue. In this work we will give an integrated contemplation on the vehicle detection and the determination of their dynamical status, an off-line strategy of accessing traffic scene by airborne TIR video is proposed to locate all vehicles at first and then derive their dynamical statuses based on the trajectory construction and classification. The processing chain is implemented in the context of treating detection and tracking of vehicles separately, which will be presented and discussed in following sections.

## 2 Detection of Vehicles in Every Frame

In order to detect vehicles in single images an automatic approach (STILLA & MICHAELSEN 2002) is used. Because of low contrast and noisy characteristic of TIR imagery, several parking cars along two margins of the road have failed to be detected. The detection rate was improved by fusing the map data which is usually available for urban areas. The algorithm of single vehicle detection used here is based on following two assumptions: (i) the image is searched for cold-spots (black) which represent the vehicles themselves; (ii) for a moving vehicle, a hot-spot presenting the warmed engine bonnet must exist around a cold-spot (cf. Fig. 1).

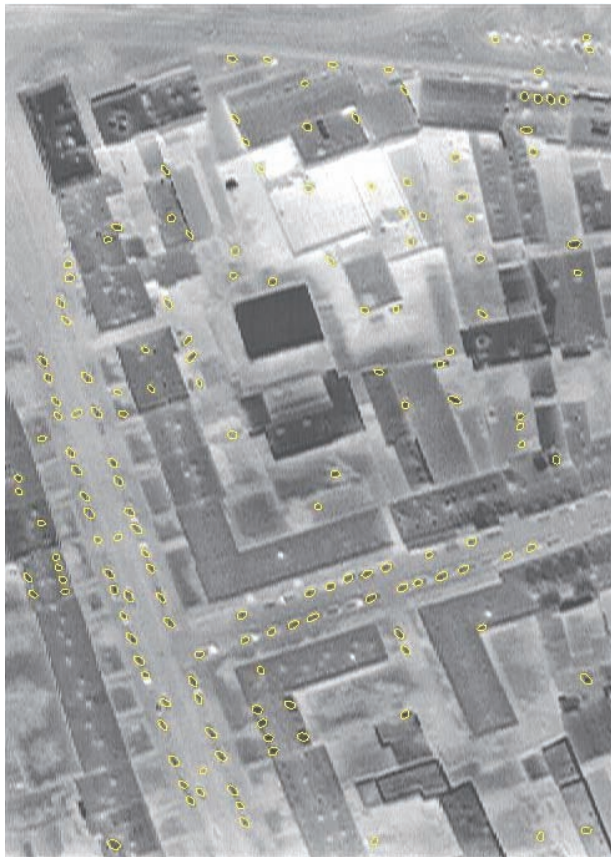
Since we want to estimate traffic parameters in this work, the detection of moving vehicles is brought into focus. While applying this algorithm for vehicle detection, some imagin-



**Fig. 1:** Cutouts of thermal IR-image related to vehicle ( $34 \times 34$  pixels), a) stationary vehicle b) moving vehicle.

able problems emerge instantly, e. g., a car had started just recently, the engine bonnet has not warmed up yet; the hot spot of vehicle is missing. Therefore it is at first not possible to dis-

tinguish stationary vehicles from moving vehicles. It is only about the detection of vehicles in this step. Vehicle detection results from one single TIR frame are shown in Fig. 2. All of



**Fig. 2:** Result of vehicle detector on single TIR image ( $494 \times 686$  pixels). Red-blue crosses mark the positions of detected vehicles.

test images have been processed successively to obtain the (*row*, *col*) coordinates of vehicles.

### 3 Processing of Image Sequence

The approach of processing airborne thermal infrared video consists of two major steps. The first step is video stabilization, comprising the co-registration of certain image pairs in the video. In the second step all detected vehicles in each frame of video will be transformed into a unified coordinate frame, e. g., the domain of the last frame of the video. The result is an image mosaic of the video sequence. The processing chain is depicted in Fig. 3. After it is initialized with necessary parameters, an operation loop is carried out to transform the vehicle points until the last frame of the TIR video data is reached. The details of the sub-steps are to be discussed as follows.

#### 3.1 Video Stabilization

For establishing the geometric relation between every two TIR video frames, image stabilization has been chosen to perform this task. Image stabilization consists of registering the two images and computing the geometric transformation  $T$  that warps the image  $I_1$  such that it aligns with the reference image  $I_0$ . The warping of images can be based on, e. g., (i) planar homography or (ii) affine transformation.

There are also two ways to implement the co-registration within the video frames – sequential and direct orders. We compared different results generated by various combinations of geometric tools and transformations and selected the best one – sequentially affine transformation. Being independent of geometric tools, the co-registration procedure can be divided into two main processes:

- (1) Initial relative orientation
  - a) Pre-processing steps namely initialize some empirical parameters for operators (e. g., offset of the search window, thresh-

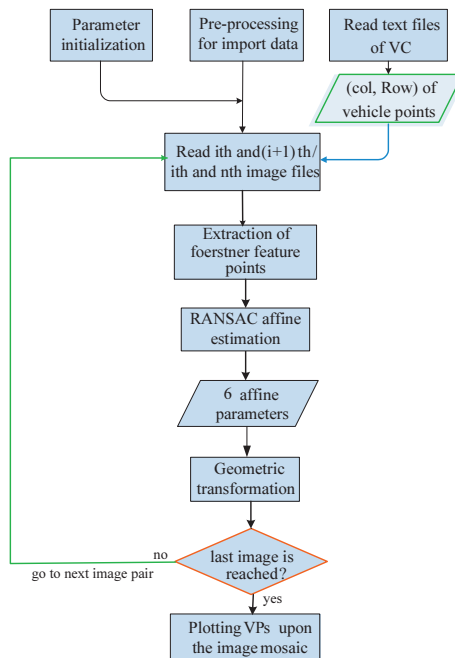
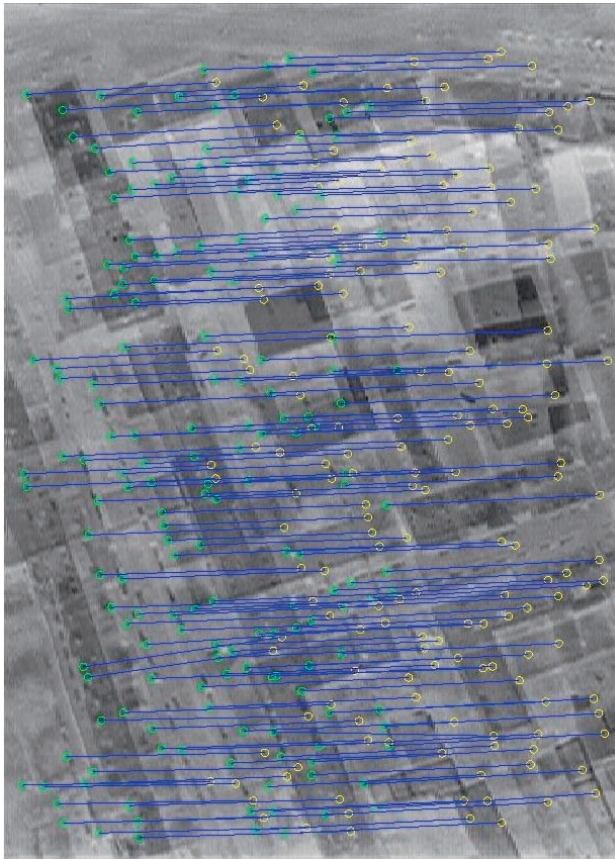


Fig. 3: Workflow of image sequences processing using affine transformation model.



**Fig. 4:** Point correspondence found by RANSAC relative orientation plotted on the two overlapping frames. Green points are from 10th frame; yellow points are from 30th frame.

old for gray value matching etc.) and read the coordinates of vehicles. Since these initial parameters have a great influence over the quality of co-registration, they should be selected carefully.

b) Feature points are extracted with the operation introduced by FÖRSTNER & GÜLCH (1987).

The image domain can be reduced upon road region, so that it can better fit the prerequisite of planar homograph, but at the expense of the quantity of robust feature points. Therefore, this restriction is ignored in the case of directly transformation order due to low overlapping rate.

c) Compute an affine transformation matrix between two images based on a randomized search algorithm (RANSAC).

Feature points of both input images are read in to serve as candidates of corresponding points based on gray-value matching. Once the initial matching is complete, RANSAC is used to determine the affine transformation matrix. Matched input points filling the condition of RANSAC are output as corresponding points for affine relation (cf. Fig. 4).

#### (2) Refinement of the orientation

After initial relative orientation, the estimated parameters should be refined. The least squares bundle adjustment is the classical method and usually delivers the best results. Depending on the scene characteristics also some simple transformations, e.g., affine transformation, yield similar results, especially when the baseline between the images is small.

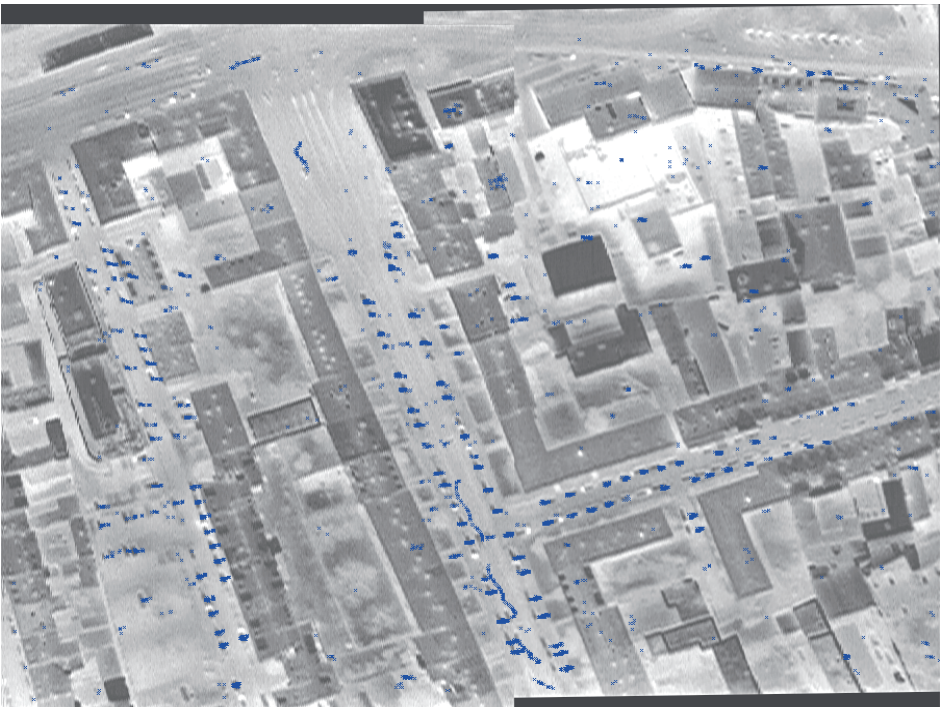
### 3.2 Transformation of Vehicle Points

After two subsequent images are co-registered, we have to sequentially project vehicle coordinates into reference image domain using affine transformation matrices derived above.

Finally, all of the vehicles points detected from different images sampled temporally have been transformed into the coordinate frame of the last image which serves as the reference frame in our experiments, and also been plotted on the mosaicked image which leads to a map. In this map, the moving vehicles are supposed to build their trajectory distributed in curvilinear form, whereas the stationary vehicles ought to accumulate nearly in the same place as compact cluster and slightly shift. Then, we can analyze and measure vehicle trajectories on the basis of this map. In this map we have plotted the position of each transformed vehicle in blue color (cf. Fig. 5).

## 4 Automatic Characterization of Vehicle Movement

In this step, the objective is to automate the analysis process of interpreting and inferring the vehicle movement by means of information acquired by airborne TIR camera. The stabilized map of vehicle detection is generated by last two steps; where the vehicles detected from single frames are projected into the coordinate system of the reference frame and depicted as blue cross. Multiple instances of one vehicle entity, corresponding to different discrete time tags of frame recording, tend to build and describe the temporal behavior of the vehicle trajectory. In order to characterize and analyze the traffic activity, it is required to reconstruct the trajectory of vehicles in this map, and to label them as moving or stationary ones. Our strategy to perform this task features a stepwise operational concept incorporating split-and-merge of trajectory based on temporal consistence and geometric rela-



**Fig. 5:** Stabilized map of detected vehicles plotted overlaid upon mosaicked TIR video by sequential affine transformation.

tion. The correspondence relation between detected single vehicles of each frame is to be re-established here. We do not use image differencing and matching to characterize the moving object just as normal methods, but rather perform detection and tracking of vehicle separately.

#### 4.1 Preliminary Classification

The first step of our strategy is to classify the vehicle region into four different classes by means of clustering analysis assisted by temporal consistence criterion. The vehicle region map is generated by labeling connected components in the stabilized map of vehicle detection, which can be viewed here as binary image when using an image of single intensity as background. Afterwards initial vehicle regions for trajectory delineation and classification are created; they can serve as trajectory candidates for single vehicle entity. These ini-

tial regions are to undergo the classification process according to density feature measure describing the physical compactness of vehicle clusters. This feature measure  $FM$  is defined as follows:

$$FM = \frac{L_{maj\_axis}}{N_{vp}} * \frac{10}{Ind_{max} - Ind_{min}} \quad (1)$$

where  $L_{maj\_axis}$  is the length of major axis of region;  $N_{vp}$  is the number of vehicle points included in a vehicle region;  $Ind_{Max}$  and  $Ind_{Min}$  are the maximum/minimum index within a region, respectively.

If  $FM \geq 1$  and  $Real\_area > 1$ , classified as candidates for moving vehicle; If  $FM < 1$  and  $Real\_area > 1$ , classified as candidates for stationary vehicle; If  $Real\_area = 1$ , classified as single vehicle class. A joint consideration with compatibility of temporal index within single vehicle regions is necessary. Because vehicle instances from two vehicles in reality may merge into one initial vehicle region (hybrid



**Fig. 6:** Vehicle region map after preliminary classification, green: stationary vehicle; blue: single vehicle; red: moving vehicle; black: hybrid vehicle.

class) displayed here, so it has to be delivered to the split process further. The resulting map after this step is showed in Fig. 6.

#### 4.2 Refinement of Classification Result

Due to unavoidable existence of co-registration and detection errors, vehicle points belonging to the stationary category usually do not accumulate in connected cluster. In this intermediate step we merge the green category of vehicle region map generated from last step, and analyze the white points to split them into independent vehicle regions. For the analysis of the stationary category, we take these regions as seed point, and then do a search in a close surrounding area, in which red, blue and green vehicles to be analyzed concerning temporal and geometric accordance with the seed region. In order to generate hypotheses for stationary vehicles, we have to verify them via image matching; then, those regions confirmed by two operations above will be accepted as stationary vehicle and aggregated with the seed region to build new green class labeled as one region.

One usually has to restrict the amount or eccentricity of green regions, after or while merging green region with another stationary class, so as to exclude some ones being lacking of temporal completeness of trajectory or ones of inordinate trajectory elongation. The advantage of this step is that the problem domain and complexity can be rather reduced that we can focus on individual vehicle categories by stepwise operation.

#### 4.3 Grouping and Extracting Vehicle Trajectory

Based on results generated by the last step, the green regions that are supposed to be the stationary vehicle class are relatively stable and then we focus on the red vehicle region, attempting to group the fragmented regions into reasonable trajectory of a moving vehicle.

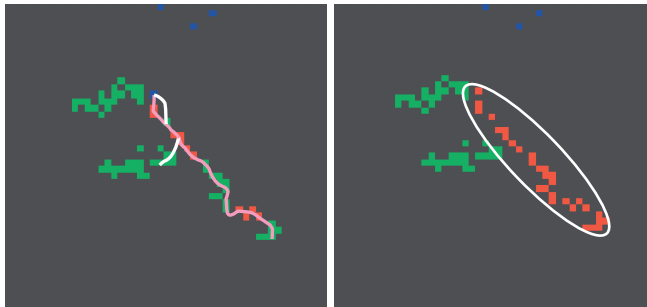
The grouping algorithm is implemented by sequential searching based on the joint analysis of the geometric relation and temporal consistency. It starts from an arbitrary red vehicle region and guides the search direction towards the major axis of vehicle region. The criterion for testing the compatibility between temporal index and geometry is formulated as below:

$T_i \cap T_j = \{O\}$  and  $\min \{T_i\} - \max \{T_j\}$  or  $\min \{T_j\} - \max \{T_i\}$  must be consistent with the distance between border points of each region:  $d_{ij} = |R_{i,min} - R_{j,max}|$  or  $|R_{j,min} - R_{i,max}|$ , i.e.,

$$ThreshV - \Delta t \leq d_{ij} / (T_{i,min} - T_{j,max}) \leq ThreshV + \Delta t \quad (2)$$

where  $T_i$  and  $T_j$  are the temporal index sets of two vehicle regions  $i$  and  $j$ ;  $R_{i,min}$ ,  $R_{j,max}$  are the border points of each region;  $d_{ij}$  is the distance between border points (usually max or min temporal index) of each region;  $ThreshV$  is the threshold related to the assumed vehicle velocity;  $\Delta t$  is the allowable deviation affected by the detection and co-registration accuracy,  $(T_{i,min} - T_{j,max})$  can be replaced by  $(T_{j,min} - T_{i,max})$ .

After examining the assumed accordance of temporal consistency with geometric dis-

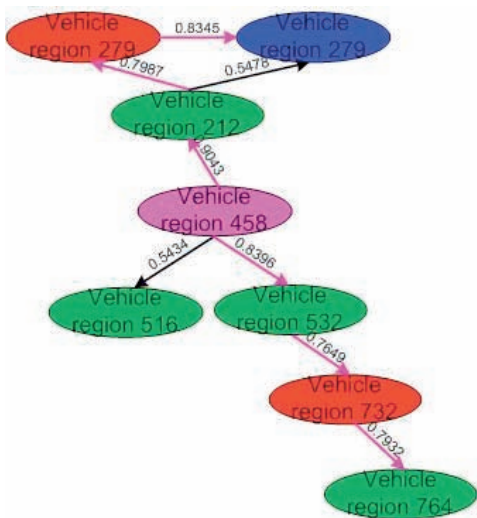


**Fig. 7:** Zoom into the local section of vehicle region map marked by dotted box in Fig. 6, before (a) and after (b) trajectory grouping.



tance, we extend and link the adjacent vehicle regions to create the complete trajectory of vehicle entities by taking into account the topological property of them. It is required to achieve an optimized distribution for the trajectory of each moving vehicle. The graph description (cf. Fig. 8) of vehicle regions (cf. Fig. 7) can be established to support this task. The edge of the graph is constructed to connect each two vehicle regions the instances from which guarantee a good image match. Then, the extraction of vehicle trajectory amounts to find an optimal path along each connected nodes in the graph. Defining a criterion to characterize an optimal path requires allocating a cost value to each edge. We also have to consider the relation between each node evaluated above, since the nodes describing the same vehicle entity are likely to demonstrate the best accordance of temporal consistency with geometric configurations. Therefore we assign for each edge connecting region  $i$  to  $j$  following cost:

$$W_{ij} = \frac{C_{ij}}{1 + (d_{ij} / (T_{i,\min} - T_{j,\max}) - ThreshV)^2 + (\theta_i - \theta_j)^2} \tag{3}$$



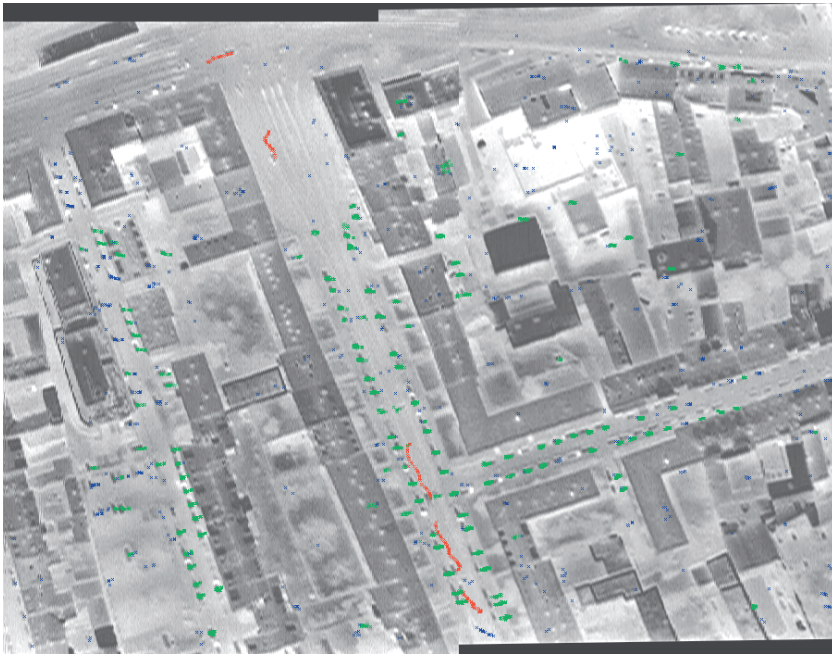
**Fig. 8:** Graph representation and analysis of vehicle regions in Fig. 7, pink lines denote the optimal path within the vehicle region graph starting from the seed node (pink).

where,  $C_{ij}$  is the cross-correlation between vehicle image regions  $i$  and  $j$ , and  $\theta_i, \theta_j$  represent the orientation angles of major axis vector of region  $i$  and connection vector from region  $i$  to  $j$ .

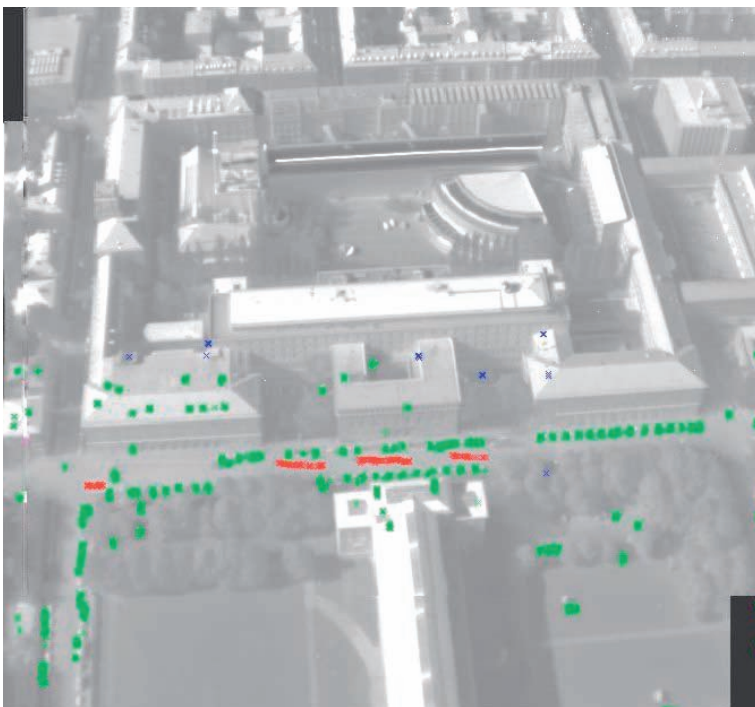
Generally, the trajectory of moving vehicles is assumed to be resolved by adequate temporal resolution, which means it should consist of enough vehicle instances detected from at least 40% of the total frames; otherwise these trajectories have to be assigned to the vehicle object of uncertain status (behavior). Finally, all of vehicle points are grouped to vehicle entities that are classified into three categories regarding the movement status.

### 5 Results

We used two datasets of TIR video captured over dense build-up areas, including two main roads with moving and parking vehicles upon them, to test our algorithm proposed above. The only difference between them lies in the view angle. The first dataset was acquired under normal nadir-view, while the other dataset was recorded in forward-looking mode. Fig. 9 illustrates the vehicle classification results concerning movement of three categories: red: moving vehicle; green: stationary vehicle; blue: uncertain. For both test data, it can be seen that most of the parking vehicles along road sides located in the centre area covered by the TIR video are detected and classified into the stationary class, and a proportion of the stationary class vehicles are represented by the parking vehicles, which is reasonable for both test scenes. Due to similar appearance to vehicle, some vehicles of green class are falsely detected among the building roofs, which correspond to chimneys or small dormers in reality. For first dataset, only five moving vehicles with distinct moving trajectory have been found, while four moving ones for second test data are extracted. Although the number of extracted moving vehicles is much fewer compared to the stationary ones, it has represented essential dynamical information for regional traffic. The uncertain class contains either vehicle anomaly generated in the detection step or vehicle entities whose trajectory cannot be resolved by available temporal



(a)



(b)

**Fig. 9:** Vehicle classification result in respect of movement: a) nadir view dataset, b) oblique-view dataset.

resolution, e. g., vehicles located near the margin of panorama creating by mosaicking. Afterwards, we tried to derive the velocity for moving vehicles based on their trajectories. Basic information about infrared video dataset used here can be acquired in advance:

- Pixel size (GSD) of the TIR image,
  1. Nadir-view dataset: 0.5 m,
  2. Oblique-view dataset: ca. 0.37 m at the main horizontal road area.
- Two test urban areas are covered by
  - (i) Nadir-view dataset: 51 images in all, FPS = 25 frames/sec, so the duration of flight  $\Delta t = 2.04$  s.
  - (ii) Oblique-view dataset: 55 images in all, FPS = 25 frames/sec, so the duration of flight  $\Delta t = 2.2$  s

The length of car's trajectories is obtained via sample pixel coordinates, which we have selected and read out from Fig. 10 empirically, here the all trajectory curves are approximated with 5 sample points.

It yields the following averaged velocities of vehicle:

Dataset I: V1 = 58 km/h; V2 = 51km/h; V3 = 42 km/h; V4 = 36km/h; V5 = 41 km/h,  
 Dataset II: V1 = 24.9 km/h; V2 = 28.6 km/h; V3 = 20.5 km/h; V4 = 12.8 km/h.

The detection and classification of stationary and moving vehicles for movement indication is evaluated in terms of completeness and correctness against reference data, respectively. Due to the lack of the simultaneously captured ground truth, the reference data used for this evaluation has been manually acquired from the same data set as used for extraction. Hence, one has to keep in mind that the above mentioned values refer to the capabilities of a human operator working with such kind of imagery.

**Tab. 1:** Evaluation of vehicle movement indication for nadir-view dataset.

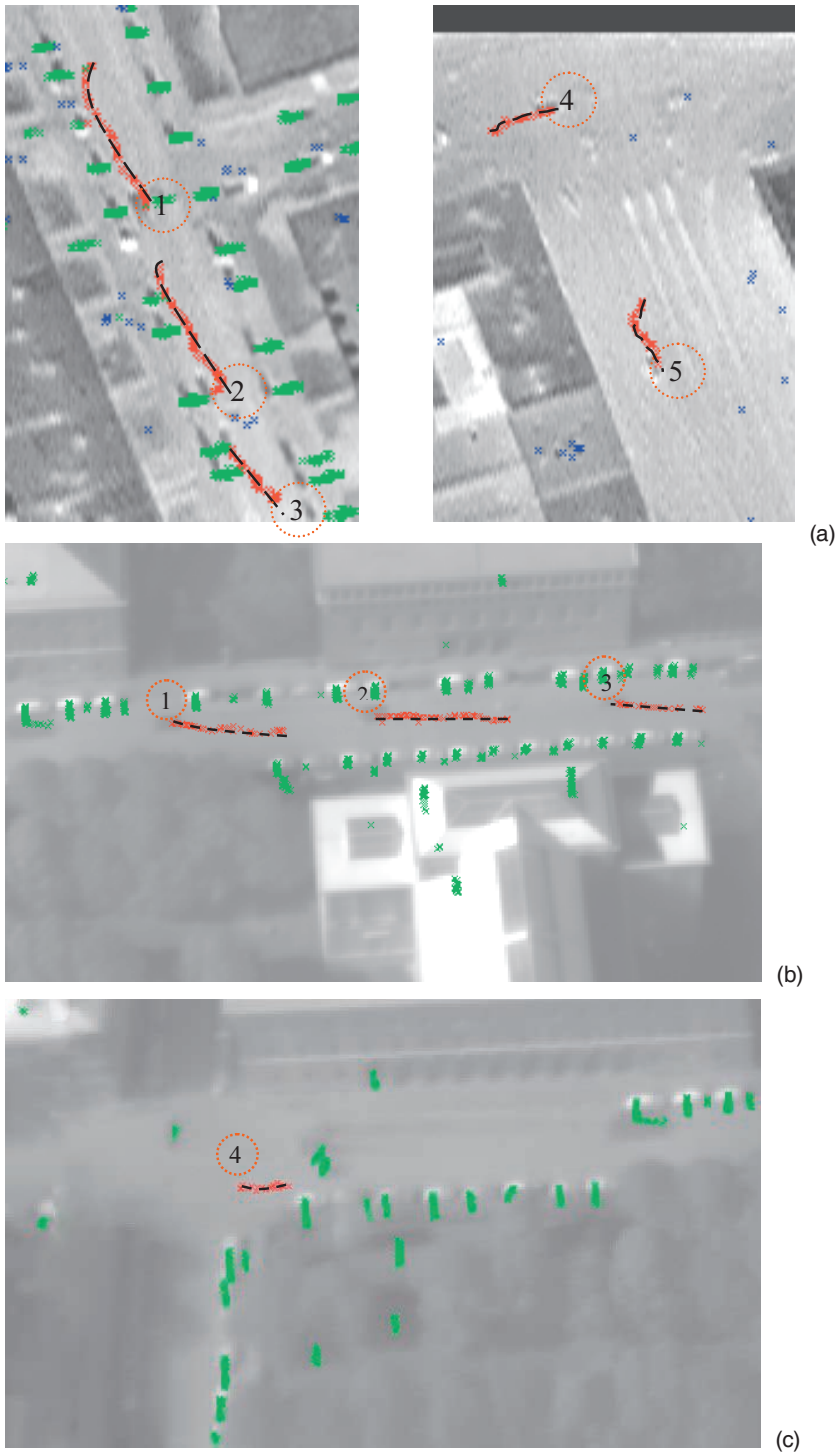
Evaluation criteria	stationary vehicle	moving vehicle
Correct decisions	112	5
False alarms	15	0
Missing decisions	26	1
Completeness [%]	81.2%	83.3%
Correctness [%]	88.2%	100%

Details of the numerical evaluation of the test video are summarized in Tab. 1 and 2. The velocity of moving vehicles derived by analyzing the trajectories is also not able to be verified strictly. However, for first TIR dataset the values lie within the velocity interval allowed in the city area, and so are plausible. For second dataset, since the oblique-view geometry of the TIR camera has further deteriorated the data quality, a lower completeness of vehicle detection particularly for moving class is shown. The detected moving vehicles travelled obviously slower than normal ones in the city, as they were approaching the road crossing when traffic light was red; second moving vehicle exhibits a bit higher velocity than first one, as the first one travelled behind a heavy truck that is not detected and had to brake early and strongly in order to avoid potential dangerous situations; the third one has a low averaged velocity due to tree occlusion even worsen by the oblique-view mode; the fourth moving vehicle became nearly stagnant, it is supposed that it was then slowing down to stop waiting for left-turn.

For the vehicle detection, certain errors could emerge: (i) Over-segmentation, which means that a mapped vehicle is detected as two or more segments. (ii) Dormer and house corners are falsely extracted due to the similar appearance and lack of exploiting context information. So we can use GIS-database information to restrict the search of vehicles only to roads and/or parking lots in order to further increase the correctness of vehicle detection. For the co-registration of video sequences, planar homography were also tested to wrap the images. However, it delivered worse results than the affine model in our cases. It can be stated that two reasons could be lead to this situation. The first one is that fewer freedom

**Tab. 2:** Evaluation of vehicle movement indication for oblique-view dataset.

Evaluation criteria	stationary vehicle	moving vehicle
Correct decisions	72	4
False alarms	19	0
Missing decisions	23	3
Completeness [%]	79.1%	57.1%
Correctness [%]	75.8%	100%



**Fig. 10:** Zoom into the trajectories of moving cars and their approximated curves: a) nadir-view dataset, b) and c) oblique-view dataset.

degrees allowed by affine transformation put stronger constraints on the scene structure; the second one is that the precondition of planarity for homography is not well fulfilled in the test scenes.

## 6 Conclusions and Future Work

In this work we have addressed issues related to the automatic analysis of airborne TIR video for vehicle movement analysis. Vehicles are automatically detected and distinguished with respect to their motion status. The vehicle velocity can be derived subsequently as an important parameter for traffic flow analysis. The proposed algorithm is driven by a step-wise operational concept. Following the compensation of sensor movement, the stabilized map of detected vehicles from different temporal tags is examined and multiple vehicle instances are grouped to construct each trajectory of vehicle entities based on temporal consistency and geometric relation. This process is realized by analyzing the distribution properties of vehicle instances under uniform temporal-spatial framework and by optimizing the trajectory topology supplemented by image matching. An implementation of the algorithm on two datasets of different view-angles has delivered us promising results, especially in terms of the detection correctness of both moving and stationary vehicles. The velocity of detected moving vehicles lies within the reasonable interval allowed in urban areas. Future works can be put on improving vehicle detector in view of the complex emissivity of objects in infrared spectrum and on exploiting physically calibrated thermal information to directly extract the object motion. Additionally, the co-registration within this strategy puts unmerited weight on the reference frame that is the last frame of the videos, it would be much better to have the reference not attached to one particular frame but to a geo-referenced system fixed to the ground.

## Acknowledgements

The authors are grateful to Fraunhofer – Institut für Optronik und Mustererkennung FOM for providing the test data.

## References

- ANGEL, A., HICKMAN, M., MIRCHANDANI, P. & CHANDNANI, D., 2002: Methods of Traffic Data Collection using Aerial Video. – 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems: 31–36.
- COHEN, I. & MEDIONI, G., 1998: Detection and Tracking of Objects in Airborne Video Imagery. – Workshop on Interpretation of Visual Motion, CVPR98.
- ERNST, I., SUJEW, S., THIESSENHUSEN, K.-U., HETSCHER, M., RASSMANN, S. & RUHÉ, M., 2003: LUMOS – Airborne Traffic Monitoring System. – 6th International Conference On Intelligent Transportation Systems.
- ERNST, I., HETSCHLER, M., LEHMANN, S., LIPPOK, A. & RUHÉ, M., 2005: Use of GIS Methodology for Online Urban Traffic Monitoring. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (8/W27).
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Point, Corners and Centres of Circular Features. – ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data: 281–305.
- HINZ, S. & STILLA, U., 2006: Car Detection in Aerial Thermal Images by Local and Global Evidence Accumulation. – Pattern Recognition Letters **27**: 308–315.
- HU, W., TAN, T., WANG, L. & MAYBANK, S., 2005: A Survey on Visual Surveillance of Object Motion and Behaviors. – IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews **35** (3): 435–441.
- LEITLOFF, L., HINZ, S. & STILLA, U., 2007: Inferring Traffic Activity from Satellite Images. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences **36** (3/W49B).
- KIRCHHOF, M. & STILLA, U., 2006: Detection of Moving Objects in Airborne Thermal Videos. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **61** (3–4): 187–196.
- MICHAELSEN, E. & STILLA, U., 2003: Estimation of Vehicle Movement in Urban Areas from Thermal Video Sequences. – 2nd GRSS/ISPRS Joint

- Workshop on Remote Sensing and data fusion on urban areas: 105–109.
- MICHAELSEN, E. & STILLA, U., 2004: Pose Estimation from Airborne Video Sequences using a Structural Approach for the Construction of Homographies and Fundamental Matrices. – Structural, syntactic, and statistical pattern recognition: S+SSPR, LNCS 3138, Springer, Berlin: 486–494.
- PASKA, E. & TOTH, C., 2004: A Performance Analysis on Vehicle Detection from Remotely Sensed Imagery. – ASPRS Annual Conference.
- REINARTZ, P., LACHAISE, M., SCHMEER, E., KRAUSS, T. & RUNGE, H., 2006: Traffic monitoring with serial images from airborne cameras. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **61** (3–4): 149–158.
- ROSENBAUM, D., KURZ, F., THOMAS, U., SURI, S. & REINARTZ, P., 2008: Towards Automatic Near Real-time Traffic Monitoring with an Airborne Wide Angle Camera System. – European Transport Research Review.
- SHASTRY, A.C. & SCHOWENGERDT, R.A., 2005: Airborne Video Registration and Traffic-Flow Parameter Estimation. – IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems **6** (4): 391–405.
- STILLA, U. & MICHAELSEN, E., 2002: Estimating Vehicle Activity using Thermal Image Sequences and Maps. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **34** (4).
- STILLA, U., MICHAELSEN, E., SOERGEL, U., HINZ, S. & ENDER, H.J., 2004: Airborne Monitoring of Vehicle Activity in Urban Areas. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **35** (B3): 973–979.
- YAO, F., SEKMEN, A. & MALKANI, M., 2008a: A Novel Method for Real-time Multiple Moving Targets Detection from Moving IR Camera. – 19th International Conference on Pattern Recognition – ICPR: 1–4.
- YAO, W., HINZ, S. & STILLA, U., 2008b: Automatic Analysis of Traffic Scenario from Airborne Thermal Infrared Video. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Geoinformation Sciences **37** (B3A): 223–228.
- YILMAZ, A., SHAFIQUE, K. & SHAH, M., 2003: Target Tracking in Airborne Forward Looking Infrared Imagery. – Image and Vision Computing **21** (7): 623–635.

#### Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. WEI YAO, Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, D-80333 München, Tel.: +49-89-289-22679, -22671, Fax: +49-89-280-9573, e-mail: yao@tum.de, stilla@tum.de.

Prof. Dr.-Ing. STEFAN HINZ, Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, D-76131 Karlsruhe, Tel.: +49-721 608-2314, Fax: +49-721 608-8450, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de.

Manuskript eingereicht: Mai 2009  
Angenommen: Juli 2009

# Interferometric Potential of High Resolution Spaceborne SAR

RICHARD BAMLER, MICHAEL EINEDER, NICO ADAM, XIAOXIANG ZHU & STEFAN GERNHARDT, München & Oberpfaffenhofen

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar (SAR), SAR interferometry, Spotlight SAR, TerraSAR-X, SAR Tomography, Persistent Scatterer Interferometry

**Summary:** The new class of high resolution spaceborne SAR systems, like TerraSAR-X and COSMO-SkyMed opens new possibilities for SAR interferometry. The 1m resolution is particularly helpful when 2D, 2.5D, 3D, or 4D (space-time) imaging of buildings and urban infrastructure is required, where the non-interferometric interpretation of SAR imagery is difficult. Structure and deformation of individual buildings can be mapped, rather than only coarse deformation patterns of areas. The paper demonstrates several new developments in high resolution SAR interferometry using TerraSAR-X as an example. Of particular interest is the very high resolution spotlight mode, which requires some care in interferometric processing. Results from interferometry, Persistent Scatterer Interferometry (PSI), and tomographic SAR in urban environment are presented. The high resolution of TerraSAR-X also supports accurate speckle and feature tracking. An example of glacier monitoring is shown and discussed.

**Zusammenfassung:** *Neue Möglichkeiten der SAR-Interferometrie durch hochauflösende Weltraumgestützte SAR-Systeme.* Die neue Generation hochauflösender SAR-Satelliten, wie TerraSAR-X und COSMO-SkyMed, eröffnen neue Möglichkeiten in der SAR-Interferometrie. Die Auflösung von ca. 1m wird vor allem benötigt, wenn Gebäude und urbane Infrastruktur 2-, 2,5-, 3- oder 4-dimensional abgebildet werden sollen. Gerade diese Objekte sind in nicht-interferometrischen SAR-Bildern schlecht zu interpretieren. So können nun Struktur und Deformation einzelner Gebäude interferometrisch aus dem Weltraum vermessen werden, wo bisher nur grobe Deformationsmuster einer Stadt erfassbar waren. In diesem Aufsatz werden mehrere neue Entwicklungen der hochauflösenden SAR-Interferometrie am Beispiel TerraSAR-X vorgestellt. Von besonderem Interesse sind dabei Daten aus dem Spotlight-Modus, deren interferometrische Verarbeitung erläutert wird. Ergebnisse aus Interferometrie, Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) und SAR-Tomographie werden präsentiert. Die Anwendung von Speckle Tracking und Feature Tracking zur Erfassung von Gletscherbewegungen wird demonstriert.

---

## 1 Introduction

In 2007 Synthetic Aperture Radar (SAR) remote sensing from space (BAMLER & HARTL 1998) made a big leap forward. With the German TerraSAR-X and the Italian COSMO-SkyMed satellites have been launched that deliver SAR data with a spatial resolution of up to 1m compared to typically 10–25m available so far. The advantage of very high resolution (VHR) imagery for cartographic

applications is obvious. The real potential of this class of SAR data, however, lies in applications, where the coherent nature of SAR data is exploited, like interferometry or tomography. The 1m resolution is particularly helpful when it comes to 2D, 2.5D, 3D, or 4D imaging of buildings and urban structures. The inherent spatial scales of buildings are dominated by the typical height between floors of 3–4m. Hence, for imaging of urban structures we can expect a tremendous improve-

ment in information content with the new VHR data.

This paper presents recent results of TerraSAR-X interferometric data exploitation. The results are representative for the potential of all of the new VHR SAR systems.

## 2 TerraSAR-X Data Characteristics

TerraSAR-X can be operated in three basic resolution modes (cf. Fig. 1; BUCKREUSS 2003):

- *Stripmap* is the standard mode. It allows imaging of long strips at a ground resolution of about 3 m. The swath width is about 40 km.
- *Spotlight* mode uses electronic antenna beam sweeping to increase the coherent integration time, and, hence, the resolution. The beam steering range is  $\pm 0.75^\circ$ . Up to 249 different azimuth patterns are sequentially activated to approximate a continuous beam sweep. 1 m resolution in azimuth can be achieved. Depending on the transmitted bandwidth slant range resolutions are 1.2 m (@ 150 MHz signal bandwidth) or 0.6 m (@ 300 MHz). The downside is that in spotlight mode only short scene lengths and narrow swaths of 5–10 km can be acquired, which are, however, sufficient for most investigations in urban environments.
- *ScanSAR* is a mode of an increased swath width of 100 km at the expense of resolution (ScanSAR product resolution: 17 m).

These resolution modes are available at different look angles ( $20^\circ$ – $55^\circ$ ) and different polariza-

tions, which makes TerraSAR-X an extremely flexible SAR instrument.

An important advantage of TerraSAR-X compared to competitors is the high absolute geometric accuracy of the final data products. Every pixel is absolutely georeferenced to within 0.5–1 m, provided that an accurate digital surface model is available. This has been achieved by a precise orbit determination and a careful calibration of all instrumental and physical timing error sources, e. g., tropospheric signal delay. Another advantage of TerraSAR-X is its short revisit time of 11 days. It allows generating interferometric data stacks three times as fast as with ENVISAT/ASAR with its 35 days revisit cycle.

For interferometric applications the short X-band wavelength of 3.1 cm is not optimum, since many objects that remain coherent at longer wavelengths will decorrelate rapidly. Even low vegetation is subject to strong temporal decorrelation at this wavelength. On the other hand, the short wavelength lets surfaces appear rough that would be smooth at longer wavelengths. E. g., roads or flat roofs, which show up as totally black in longer wavelength images, have proven to give sufficient backscatter with TerraSAR-X to be exploited as interferometrically useful objects.

## 3 Spotlight Interferometry

The focused complex TerraSAR-X spotlight images are represented in zero-Doppler coordinates. Due to the quasi-continuous beam steering during data acquisition, however, there is a systematic Doppler centroid drift in

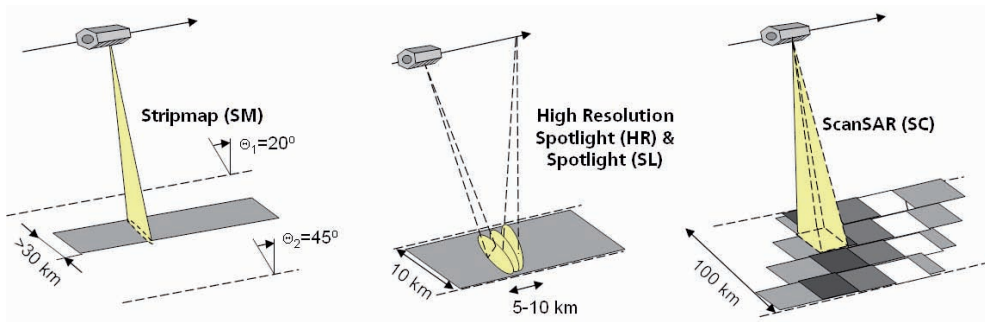
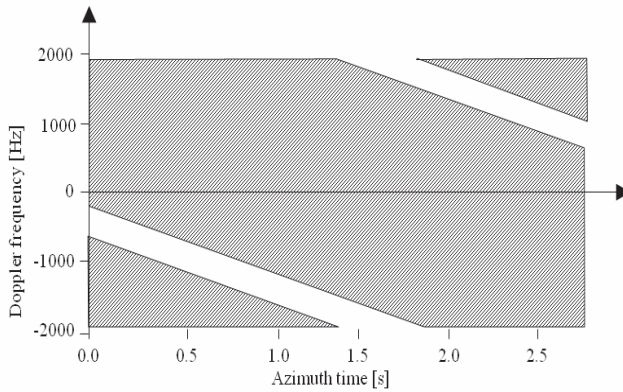


Fig. 1: Basic imaging modes of TerraSAR-X (BUCKREUSS 2003).

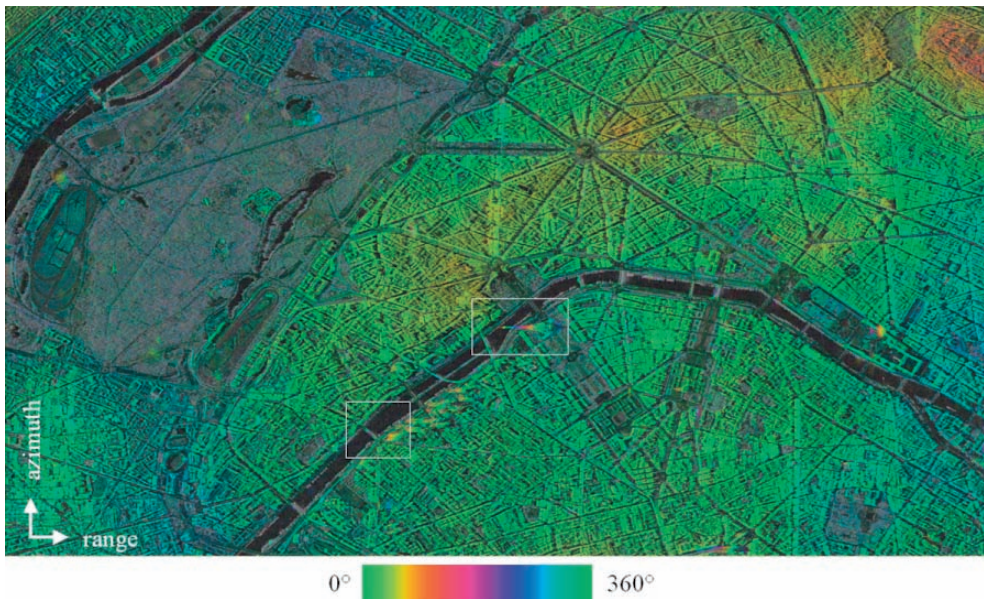


azimuth direction which must be accounted for during all subsequent InSAR processing steps (EINEDER et al. 2009). Fig. 2 shows the variation of the processed azimuth spectrum of a typical TerraSAR-X product. Although the sampling rate is sufficient to avoid aliasing, the linear drift and the wraps to the principal sampling band are significant. In consequence, the center frequency of the interpolation kernels, used for interferometric image coregistration, must be adjusted in azimuth (band-

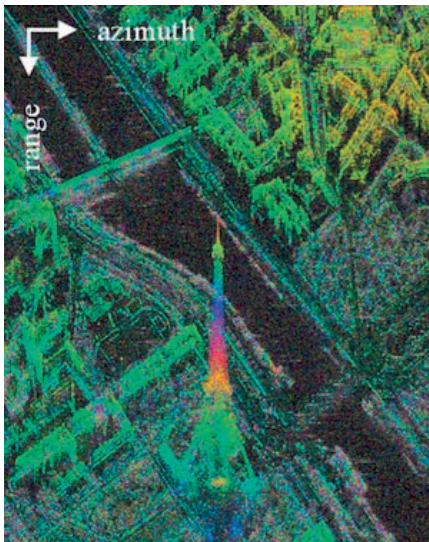
pass interpolator of varying center frequency). Also the azimuth common band spectral filtering needs to be updated accordingly. These required operations complicate processing so that standard interferometric processing systems can not be used. We have integrated spotlight capabilities into DLR's InSAR processing software GENESIS early enough to be ready for launch of TerraSAR-X. Therefore, we were able to process spotlight interferograms already during the commissioning pha-



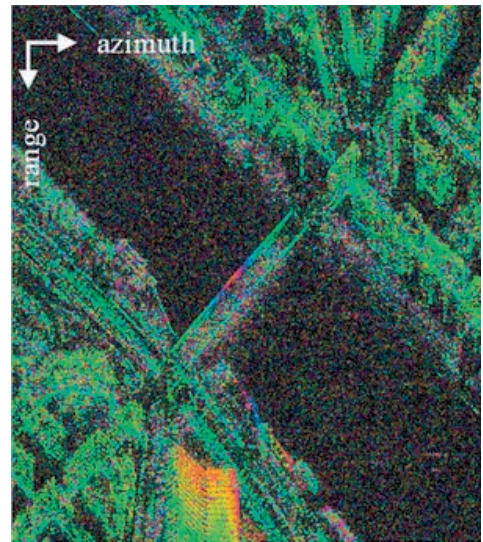
**Fig. 2:** Support (grey) of time-varying Doppler spectrum of a complex TerraSAR-X spotlight image.



**Fig. 3:** Flat earth phase corrected TerraSAR-X spotlight interferogram (city of Paris).



**Fig. 4:** Zoom of Fig. 3: TerraSAR-X spotlight interferogram of the Eiffel tower. One phase cycle corresponds to 321 m height.



**Fig. 5:** Zoom of Fig. 3: TerraSAR-X spotlight interferogram of the Mirabeau bridge in Paris. It shows phase changes of  $270^\circ$ . This can be interpreted as a bump of 240 m or (realistically) as a deformation between acquisitions of 12 mm in the radar line of sight direction.

se (ADAM et al. 2007). The interferogram of the city of Paris (cf. Fig. 3) and the detail views shown in Figs. 4 and 5 demonstrate the wealth of information in this new class of data.

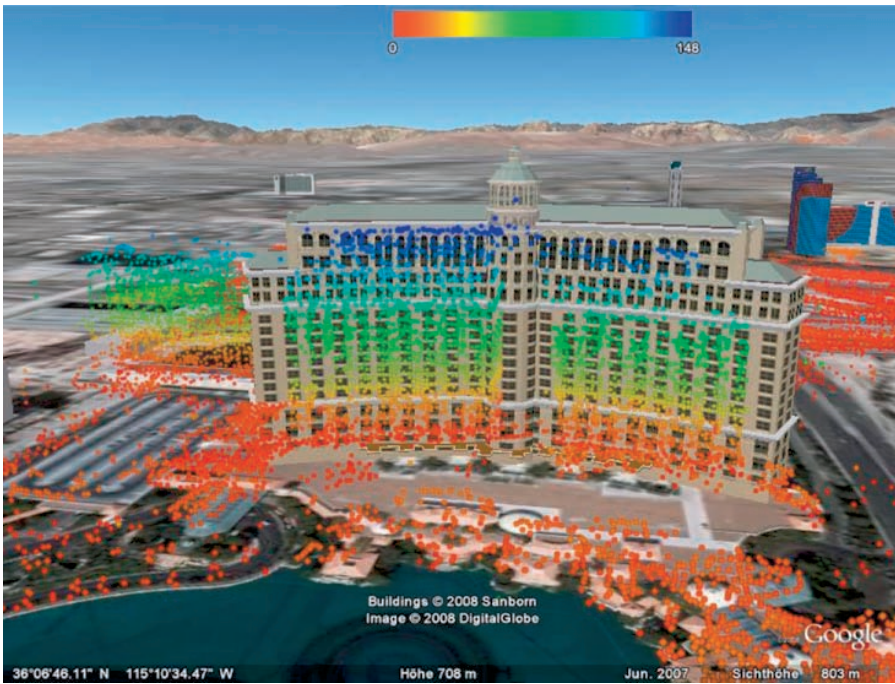
#### 4 Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) has been introduced in 1999 (FERRETTI et al. 2001) as a methodology for long-term monitoring of subsidence, preferably in urban environment. Typically 20–100 interferometric data sets of the same area taken from repeat orbit cycles are stacked for PSI analysis. Each pixel in each interferogram is characterized by its range and azimuth coordinates as well as by the temporal and the spatial baselines of the interferogram it belongs to. These four coordinates allow for a much better data analysis than possible from a single interferogram, where temporal and spatial baselines are fixed. The goal of the PSI analysis is to separate the following contributions to the interferometric phase:

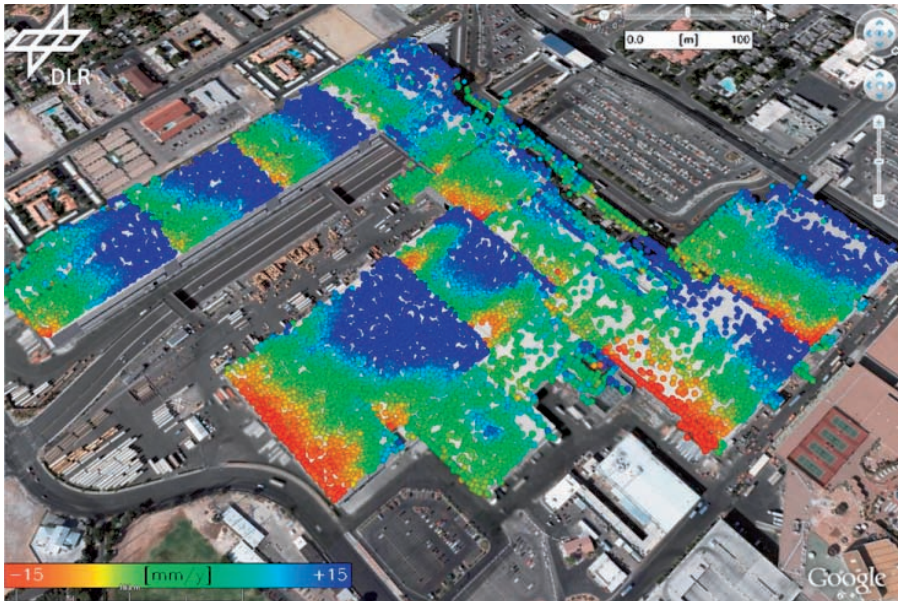
- *Elevation of the point:* Elevation is the spatial coordinate orthogonal to range and azimuth. Its phase contribution is proportional to the spatial baseline.
- *Deformation rate:* If linear deformation, e. g., subsidence, can be assumed, its phase contribution is proportional to the temporal baseline. If the deformation is non-linear often some other parameterized temporal model is assumed whose parameters are adjusted.
- *Orbit errors and tropospheric water vapor delay:* These are spatially long wavelength patterns and temporally uncorrelated.

By exploiting these proportionalities and correlation properties, elevation and deformation rate can be estimated. Fig. 6 shows the PS location in 3D on Hotel Bellagio in Las Vegas and provides an example for the DEM update and Fig. 7 illustrates an example (Las Vegas Convention Center) for the deformation estimation.

Since the data stacks cover a time span of months or years, i. e., much longer than the coherence times of distributed objects (e. g.,



**Fig. 6:** The color coded elevation estimated by the PSI processing facilitates a geocoding of the PSs [unit: m]. This example presents the 3D location precision and the PS density which perfectly provides the shape of the building's front (Hotel Bellagio, Las Vegas). Note that the Google-Earth building model is too broad.

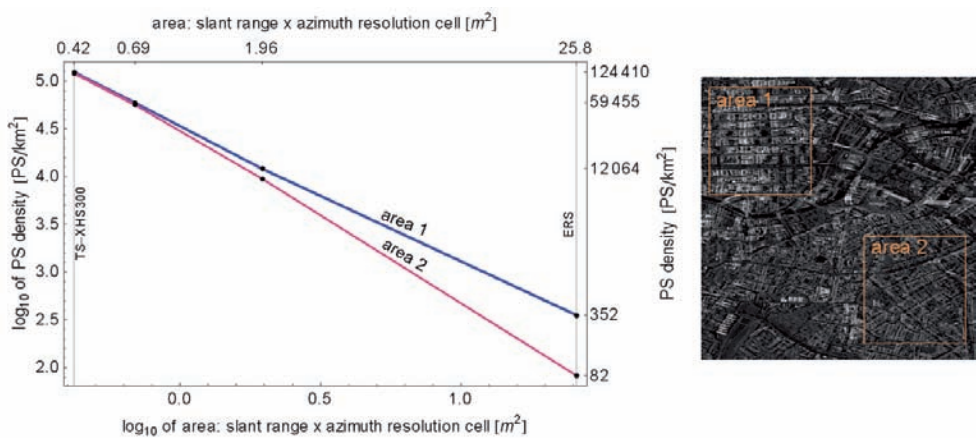


**Fig. 7:** The PS density of TerraSAR-X allows monitoring the structural stress of buildings. This example presents the deformation (red to blue:  $-15$  mm/y to  $+15$  mm/y) which results from thermal delation of the building's roof (Las Vegas Convention Center).

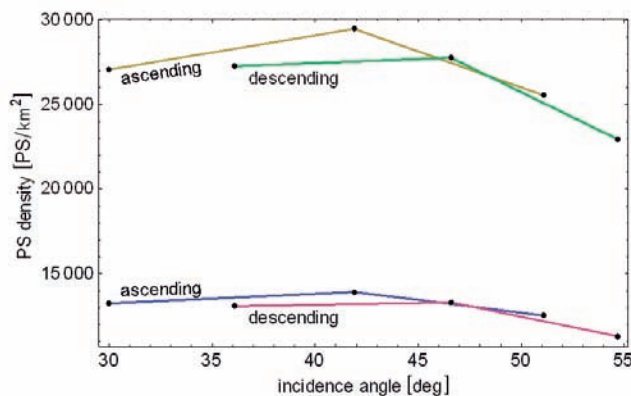
vegetation), PSI performs all the analysis steps only on bright temporarily stable points, the so-called persistent, or permanent, scatterers (PSs). They are identified in the data stacks by metrics like signal-to-clutter-ratio. In practise, the SCR allows an ensemble estimate and a prediction of the phase stability. Typical PSs are metallic structures (gratings, poles), facade or roof elements that act as dihedral or trihedral corner reflectors, etc.

PSI has been applied very successfully with medium resolution SAR data from ERS-1/2

and ENVISAT/ASAR. Subsidence rate accuracies of better than 1 mm/a have been reported (FERRETTI et al. 2007; ADAM et al. 2009) However, the physical interpretation of these estimates has proven difficult. The low resolution does not give access to details of the buildings. The PSs appear to be quite randomly distributed at a density of about 100–500 PS/km<sup>2</sup>, i. e., one PS per block of 100 m × 100 m to 50 m × 50 m. There is no guarantee that a particular building of interest is represented by a PS. It is also difficult to differentiate between



**Fig. 8:** PS density as a function of spatial resolution. The test site is the city of Berlin. Two areas with different urban development are selected. Area 1 has a high building density and area 2 is a typical urban area.



**Fig. 9:** PS density as a function of incidence angle. The PS density is measured in ascending and descending stacks and two different thresholds on the SCR for the PS detection are applied. The two upper graphs correspond to the low threshold resulting in a high PS density, while the lower ones show the distribution for the high threshold. Both thresholds are higher than the one used for Fig. 8. In principle, flat look angles result in a loss of PS density because of shadowing. However, 42–47 deg look angle result in the highest PS density.

the subsidence of the building itself or of the pavement surrounding the building.

Many PS are structures acting as dihedral or trihedral reflectors. Assuming a background clutter of  $-4$  dB and a PS detection threshold of  $6$  dB above clutter, then in ENVISAT/ASAR-type data an ideal full trihedral structure of about  $30$  cm side length is required to be detected as a PS. This estimation is based on the radar cross section (RCS) of a full trihedral  $RCS = 12 \pi a^4/\lambda^2$  a ground resolution of  $24.4 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$ . With TerraSAR-X high resolution spotlight mode and the same assumptions (i. e., a  $23^\circ$  look angle which results in a ground resolution of  $1.5 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ ) any full trihedral structure of  $8$  cm side length will be detected as a PS. These types of structures are typically plenty on modern building facades and can be well resolved due to the high resolution. Therefore, we can detect many PSs at a single building and are able to estimate deformation of the building itself. Our first experiences with TerraSAR-X high resolution spotlight date show typical PS densities of  $124,000$  PS/km<sup>2</sup>, i. e., one PS per area of  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ . The PS density depends on resolution (cf. Fig. 8), incidence angle (cf. Fig. 9), and polarization. The increase of PSs with resolution is dramatic because the very high resolution fits well with the typical spatial scales of constructive elements at buildings. The loss of PS density at shallower incidence angles is due to partial shadowing of facades from adjacent buildings. The effect depends on the height of the building, its orientation, and its distance to other buildings.

## 5 SAR Tomography

Conventional SAR maps the 3D radar reflectivity distribution on ground into the 2D range-azimuth radar coordinate system. Consequences of this geometry are imaging ambiguities like layover, which are particularly pronounced in urban areas. SAR Tomography (TomoSAR) aims at accessing the third dimension, elevation (perpendicular to the range-azimuth plane), resolving layover, and mapping any scatterer in 3D coordinates (REIGBER & MOREIRA 2000). TomoSAR uses stacks of several acquisitions from repeat orbits (and

slightly different viewing angles) to establish a synthetic aperture in the elevation direction. In contrast to the – otherwise quite similar – synthetic aperture principle employed in the azimuth direction, TomoSAR must deal with sparse (typically only a few tens of acquisitions) and irregular sampling of the elevation aperture. The reflectivity distribution in the elevation direction for each range-azimuth pixel, and therefore the full 3D reflectivity distribution, is estimated by spectral analysis with special consideration of the mentioned difficulties caused by sparse and irregular sampling. The achievable resolution  $\rho_s$  in the elevation direction depends on the extent  $B_s$  of the elevation aperture, i. e., the maximum spatial baseline spread, via  $\rho_s = \lambda r / 2B_s$  where  $\lambda$  is the wavelength and  $r$  is range (in classical InSAR with baseline  $B_s$ ,  $\rho_s$  is the elevation that causes an interferometric phase of  $2\pi$ ). Since the different acquisitions are taken at different times, possible motion of the scatterers has to be accounted for. Classical InSAR and PSI can be regarded as special cases of parametric TomoSAR.

From the reconstructed reflectivity profile in elevation, multiple layovered objects in any pixel are separated and the following information can be retrieved:

- *Number of scattering objects:* As essential prior knowledge for higher order PSI, the number of scatterers in a resolution cell can be estimated by applying model order selection schemes to the estimated reflectivity profile.
- *Reflectivity and elevation of the scattering objects:* It is obtained by implementing parameter estimation to the reflectivity profile estimates and leads to better localization and understanding of the scattering objects in three dimensions.

Like PSI, TomoSAR benefits greatly from the high resolution of TerraSAR-X data, as the density of coherent pixels and the signal-to-clutter ratio increase significantly with resolution.

In the following examples, TomoSAR is applied to TerraSAR-X high-resolution spotlight data acquired over the city of Las Vegas, USA. 16 scenes are used. The elevation resolution is about  $\rho_s = 40.5 \text{ m}$  due to the limited baseline

range of the stack of 269.5 m. This, however, does not mean that individual scatterers can only be located to within this poor elevation resolution. The Cramér-Rao Lower Bound (CRLB) on elevation estimates can be shown to be:

$$\sigma_s = \frac{\lambda r}{4\pi \sqrt{NOA} \cdot \sqrt{2SNR} \cdot \sigma_{B_s}} \quad (1)$$

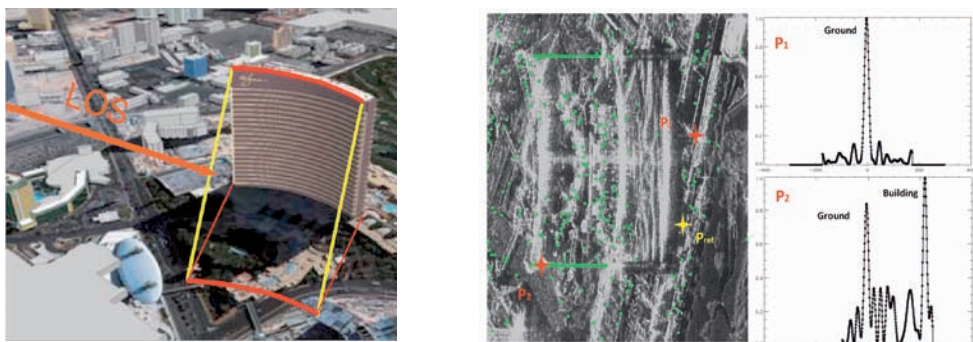
where  $NOA$  is the number of acquisitions,  $SNR$  is the signal-to-noise ratio, and  $\sigma_{B_s}$  is the standard deviation of the baseline distribution. For instance, the stack used in this example has  $\sigma_{B_s} = 78.4$  m,  $\lambda = 0.031$  m and  $r = 704$  km. Let us assume the  $SNR = 10$  dB, the CRLB on elevation estimation is 1.24 m. With regular baseline distribution samples, the location accuracy can be related to the elevation resolution by:

$$\sigma_s = \frac{0.39}{\sqrt{NOA} \cdot \sqrt{SNR}} \rho_s \quad (2)$$

As input data to our tomographic algorithm we use TerraSAR-X data stacks generated by DLR's GENESIS PSI processor mentioned before. Fig. 10, left, shows the Wynn hotel in Las Vegas with a height close to 200 m, corresponding to an elevation range of 380 m. The middle image in Fig. 10 is the corresponding TerraSAR-X intensity image where green dots refer to selected PS points. The mean intensity image indicates that pixels containing multiple scatterers are mainly located at the intersec-

tion of the bright texture of the building with structures near ground. To exemplify the potential of the TomoSAR method, two pixels marked by red stars and a reference point marked by a yellow star have been selected and will be analyzed in the following. As P1 is located outside of the region of the high-rise building, it is expected that it only contains a single scatterer situated near the ground. By contrast, as P2 is located at the intersection area, we expect two scatterers inside this pixel, among them a weaker ground reflection and a stronger reflection from the building facade. The corresponding reflectivity estimates for those two pixels are shown in the right image of Fig. 10. Ground and building contributions can be well separated, even with such a small number of acquisitions. The spectral estimation method used for this elevation profiles was a singular value decomposition (SVD)-based approach (FORNARO et al. 2003) with singular value weighting according to the Wiener criterion (ZHU et al. 2009). In this example, we can see the potential of the tomographic approach to separate multiple scatterers in one cell using TerraSAR-X data.

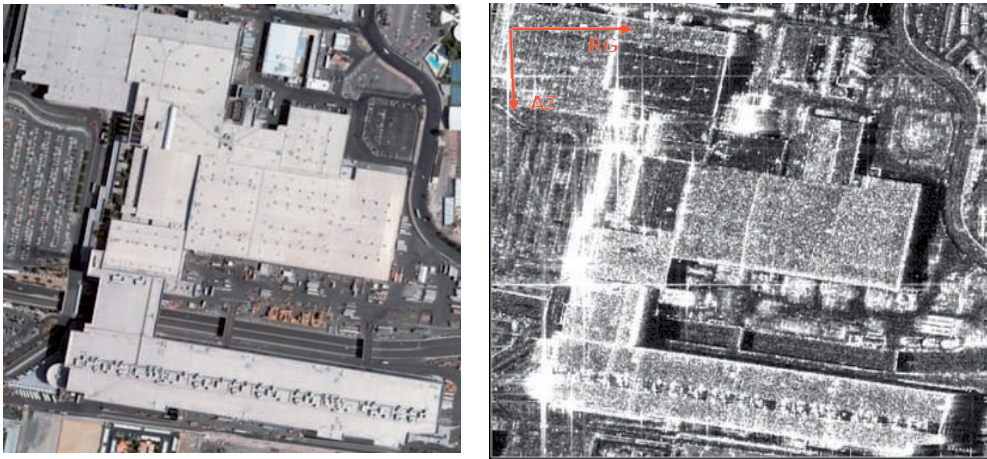
With this convincing result of PS based tomography, a pixel based 3D focusing procedure is now applied to the same data stack. The Las Vegas convention center with a height of about 20 m as shown in the left image of Fig. 11 is a very interesting test building for 3D focusing as it is very large and has a regular shape. Therefore, we expect strong and stable returns which provide a very good starting point for



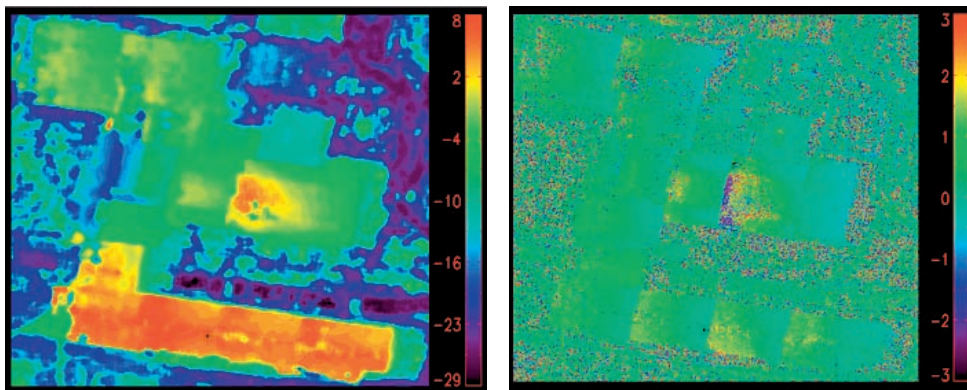
**Fig. 10:** Wynn Hotel, Las Vegas: Optical image (left) with viewing direction of SAR (LOS = line-of-sight) and two iso-elevation lines (yellow). Mean TerraSAR-X intensity image (center) with reference (yellow) and analysis points (red) P1 and P2. Reconstructed elevation profiles (right) for analysis points P1 (single scatterer) and P2 (two scatterers).

pixel-by-pixel 3D focusing. The right image of Fig. 11 shows the corresponding mean TerraSAR-X intensity image. Due to the limited extent of the investigated area phase errors caused by water vapor disturbances can be neglected. The reflectivity profile in elevation direction is reconstructed pixel by pixel. First the number of scatterers is estimated by model order selection based on the Akaike information criterion (SAKAMOTO et al. 1986), then reflectivity and elevation of each scatterer are estimated. Since the different acquisitions have been taken at different times, deformation must be considered, i. e., an additional velocity parameter is estimated in our SVD-Wiener algorithm, leading to a full 4D recon-

struction. The left image of Fig. 12 shows the DEM generated from the elevation estimates (height relative to the reference point). The black cross marks the position of the selected reference point. Compared to the InSAR DEM generation procedure, TomoSAR overcomes layover and phase unwrapping problems. The full structure of the convention center has been captured at a very detailed level. For instance, different parts of the building have different heights, which is not visible in the Google Earth building model. Besides the building, more details such as the roads surrounding the convention center and even two bridges above the roads have been captured. There are still some distortions remaining in



**Fig. 11:** Optical image of Las Vegas Convention Center (left) and corresponding mean TerraSAR-X intensity image (right).



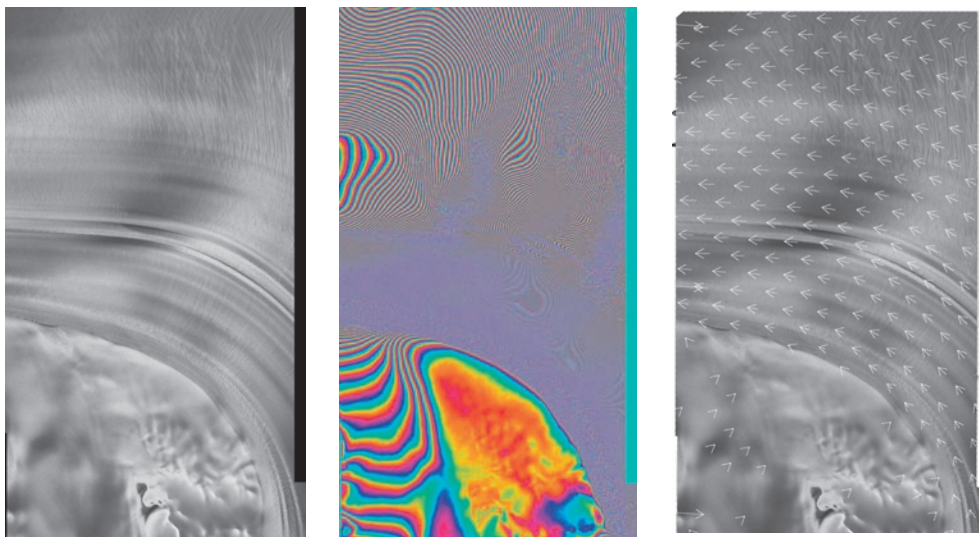
**Fig. 12:** Left: Generated DEM [unit: m]. Right: Extracted linear deformation velocity w.r.t. the reference point [unit: cm/y] (Black cross: reference point).

the middle of the image (red part) where a smooth roof is expected. It may be due to the incorrect linear deformation model assumption. The right image of Fig. 12 shows the extracted deformation velocity corresponding to the reference point. The deformation velocity map is consistent with the PSI processing result of Fig. 7. By checking the deformation of the distorted part mentioned above, unexpected significant subsidence appears which confirms again the incorrect linear deformation model assumption.

## 6 Feature and Speckle Tracking

The shrinkage or growth of glaciers and especially their flow velocity are indicators for subtle climatic changes. In the past InSAR techniques have proved to be useful tools for monitoring the remote ice sheets of Antarctica and Greenland (GRAY et al. 1998; JOUGHIN 2002), where conventional ground based measurements are not available. Today, high resolution systems such as TerraSAR-X have the potential to further improve the robustness of glacier velocity measurements and they even allow to derive accurate two dimensional motion fields.

SAR interferometry allows the measurement of glacier motion in the radar line of sight with sub-wavelength accuracy, i. e., millimeters to centimeters, depending on the radar wavelength. Typically, the interferometric phase difference between two images taken in two consecutive orbital repeat cycles is exploited, but in many practical cases this method is much too sensitive for typical glacier velocities between 0.1 and 5 meters per day. A further problem arises if spatial velocity gradients lead to more than one fringe per sample which can not be resolved anymore. Assuming an interferometric phase determination accuracy of  $\lambda/10$ , velocity sensitivities of 0.8 mm/day are achieved with ENVISAT or 1.4 mm/day for TerraSAR-X. Using multiple repeat cycles further increases the sensitivity. Furthermore the InSAR method requires the surface to stay coherent between the times of the repeated observations. This assumption usually holds if the time between acquisitions is short, like the one day during the ERS-1/ERS-2 tandem campaign 1996–2000, or the 3-day repeat orbital period during the ERS-1 ice orbit phase 1993/1994. However, it is seldom the case in the normal repeat cycles of SARs such as the 24-day repeat orbit of RADARSAT-1 and 2 or the 35 days of ERS



**Fig. 13:** Left: TerraSAR-X intensity image of the Antarctic Recovery glacier (30.10.2008). Center: 11 day interferogram (29 meter baseline). Right: Motion field derived from Speckle Tracking. Average coherence: 0.3. Horizontal direction (right): range. Vertical direction (up): azimuth.



and ENVISAT/ASAR. The TerraSAR-X orbital cycle of 11 days and the high resolution seem to be a good combination for coherent (speckle) and incoherent (feature) tracking.

Fig. 13 shows the TerraSAR-X intensity image of the Antarctic Recovery glacier and the interferogram generated from two images separated by 11 days. The great advantage of the method is evident: even in homogenous areas where the human eye can not identify any texture, the interferometric phase signal reveals surface motion. But a number of constraints impede the InSAR method: First, due to the  $2\pi$ -phase ambiguity in each SAR image only relative measurements are available between two points in the interferogram. Therefore, phase unwrapping and a reference point with known (e.g., zero) motion is required. Second, only the line-of-sight component of the surface motion is sensed by the radar, and the three-dimensional surface velocity vector must be derived by either using a DEM and downhill flow assumptions or, by combining satellite passes with different aspect angles. Third, InSAR suffers from decorrelation caused by all surface changes in the size of the wavelength. Such changes occur frequently on glaciers due to melting, rain, snowfall or structural deformation.

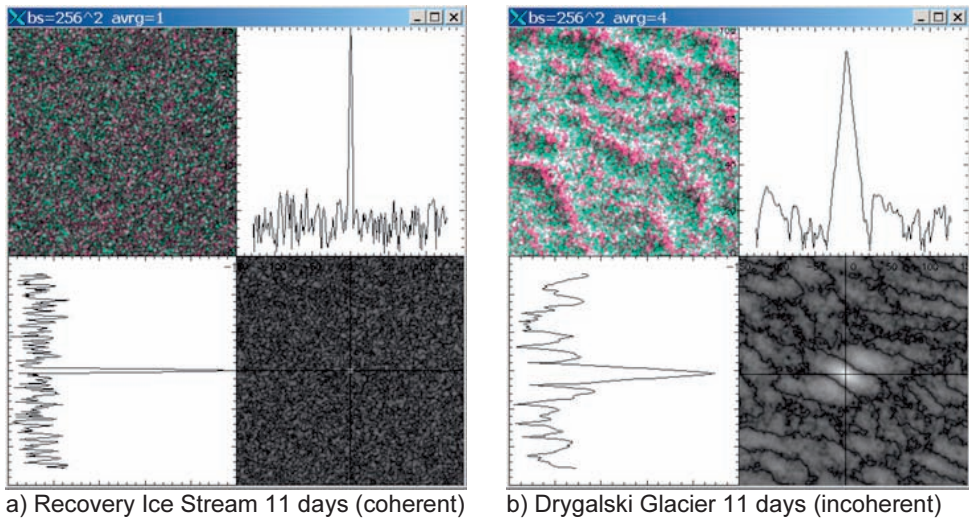
High resolution SAR sensors can overcome the above obstacles. Firstly, if image correlation techniques are applied (ignoring the interferometric phase information), ambiguity problems are obsolete. Both, coherent speckle (GRAY et al. 2001) or incoherent features can be tracked with similar correlation methods. Especially coherent speckle tracking requires both images taken from the same position in space, i. e., from orbital repeat cycles. The major error sources for correlation techniques are: 1) atmospheric water vapor of max. 50 cm (range) depending on the humidity, 2) orbital errors on the order of 10 cm (range & azimuth), and 3) the accuracy of the correlation approach. The latter can be brought down to 10 centimeters and below by increasing the correlation chip size accordingly. The overall absolute accuracy of e.g., 50 cm/11 days = 4.5 cm/day is sufficient for many applications and can be increased easily by using local zero-motion-tie-points, increasing the correlation window or the time lag (increasing the

time lag generally leads to decorrelation errors that overcompensates the gain in accuracy). Secondly, image correlation can be performed in both range and azimuth directions and therefore provides a two-dimensional motion vector. Thirdly, geometric phase decorrelation will impede the InSAR phase derivation but not image correlation as long as some object contrast is present, e. g., from crevasses or other surface structures.

Fig. 14 shows the correlation function between pairs of TerraSAR-X images with different coherence and surface characteristics. For convenience, TerraSAR-X EEC-SE products (EINER 2005; FRITZ & EINER 2009) were used, i. e., spatially enhanced geocoded detected images with 1.25 m pixel spacing. In these products only about 1.3 looks are averaged to keep the highest quadratic spatial resolution. The small number of looks leaves a good part of the coherent speckle – wide band pseudo-noise that allows accurate correlation. Using these products all correlation can be easily performed in geocoded ground range pixels since co-registration and terrain compensation has been done in the TerraSAR-X SAR processor before.

The left image shows a patch of an Antarctic glacier (Recovery) with high coherence. In consequence the speckle signal delivers a well defined peak even on ice surfaces without object contrast. The correlation peak width is 4 pixels (6 meters). With the used correlation block size of about 2562 independent resolution cells ( $64 \times 64$  pixels) and the coherence of about 0.3 an accuracy of 0.029 pixels (0.037 meter) is estimated according to (BAMLER & EINER 2005).

The right image shows a patch of a glacier with significant surface changes within 11 days which lead to strong phase decorrelation. In consequence, coherent speckle tracking is no more possible and features have to be used to derive the motion field. The object contrast in Fig. 14 right is caused by crevasses. The achievable resolution now depends on the spatial structure of the features. High contrast and sharp features allow higher accuracy than slowly undulating patterns. In our experiments it turned out that about  $4 \times 4 = 16$  looks may be averaged to sufficiently reduce the amplitude of incoherent speckle maintaining



**Fig. 14:** Correlation functions of TerraSAR-X images with 11 day interval. Upper left: multi-temporal color composite. Lower right: 2D-correlation function. Upper right: range cut through correlation maximum. Lower left: azimuth cut through maximum. a) Homogeneous coherent glacier surface. Correlation peak width: 6 m. b) Decorrelated surface with crevasses. Resolution: 85 m and 72 m in range and azimuth, respectively. Window size: 256 × 256 pixels. Right image was averaged and decimated by a factor of 4 before correlation.

the signal of the lower resolution features. The width of the correlation peak is much wider than that of the speckle tracking result: 17 pixels in range and 12 in azimuth (85 m × 72 m). Correlation coefficient of the object features is much lower, in the order of 0.08. With the used correlation block size of 2562 resolution cells this transforms (BAMLER & EINEDER 2005) to an accuracy of 0.47 (East) and 0.33 (North) pixels corresponding to 2.3 m and 1.6 m.

In conclusion, relative accuracies of 0.3 cm/day and, depending on orbit errors and atmospheric conditions, absolute accuracies of 5 cm/day can be achieved by speckle correlation. 20 cm/day are achievable by feature correlation with rather simple methods. More details of the work performed by the authors can be found in (ROTT et al. 2008) and (FLORICIOIU et al. 2008).

## 7 Outlook

Using different interferometric techniques a number of encouraging results were achieved within short time after the launch of TerraSAR-X. Some of them, such as glacier moni-

toring may be transferred to applications soon while more novel techniques such as TomoSAR will need more experiments to prove their applicability. In 2009 the launch of the co-operative sister satellite TanDEM-X will open even more opportunities for interferometric imaging by adding simultaneously acquired image pairs with high coherence.

## Acknowledgements

The authors appreciate the contributions of Dana Floricioiu for providing images from the TerraSAR-X Antarctic campaign.

## References

- ADAM, N., EINEDER, M., SCHÄTTLER, B. & YAGUE-MARTINEZ, N., 2007: First TerraSAR-X Interferometry Evaluation. – ESA FRINGE Workshop, Frascati.
- ADAM, N., EINEDER, M., YAGUE-MARTINEZ, N. & BAMLER, R., 2008: High Resolution Interferometric Stacking with TerraSAR-X. – IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

- ADAM, N., PARIZZI, A., EINEDER, M. & CROSETTO, M., 2008: Practical Persistent Scatterer Processing Validation in the Course of the TERRAFIRMA Project. – *Journal of Applied Geophysics*, in print 2009.
- BAMLER, R. & HARTL, P., 1998: Synthetic Aperture Radar Interferometry. – *Inverse Problems* **14**: R1–R54.
- BAMLER, R. & EINEDER, M., 2005: Accuracy of Differential Shift Estimation by Correlation and Split Bandwidth Interferometry for Wideband and Delta-k SAR Systems. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **2** (2): 151–155.
- BUCKREUSS, S., BALZER, W., MÜHLBAUER, P., WERNINGHAUS, R. & PITZ, W., 2003: The TerraSAR-X Satellite Project. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- EINEDER, M., ADAM, N., BAMLER, R., YAGUE-MARTINEZ, N. & BREIT, H., 2009: Spaceborne Spotlight SAR Interferometry with TerraSAR-X. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **47** (5): 1524–1535.
- EINEDER, M., SCHÄTTLER, B., BREIT, H., FRITZ, T. & ROTH, A., 2005: TerraSAR-X SAR Products and Processing Algorithms. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 2001: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39** (1): 8–20.
- FERRETTI, A., SAVIO, G., BARZAGHI, R., BORCHI, A., MUSAZZI, S., NOVALI, F., PRATI, C. & ROCCA, F., 2007: Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **45** (5): 1142–1153.
- FLORICIOIU, D., EINEDER, M., ROTT, H. & NAGLER, T., 2008: Velocities of Major Outlet Glaciers of the Patagonia Icefield Observed by TerraSAR-X. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- FORNARO, G., SERAFINO, F. & SOLDVIERI, F., 2003: Three-dimensional focusing with multipass SAR data. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **41** (3): 507–517.
- FRITZ, T. & EINEDER, M., 2009: TerraSAR-X Ground Segment – Basic Product Specification Document. – TX-GS-DD-3302, Revision 1.6, available online.
- GRAY, A.L., MATTAR, K.E. & VACHON, P.W., 1998: InSAR results from the RADARSAT Antarctic Mapping Mission Data: Estimation of Glacier Motion using a Simple Registration Procedure. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*: 1638–1640.
- GRAY, A.L., SHORT, N., MATTAR, K.E. & JEZEK, K.C., 2001: Velocities and flux of the Filchner ice shelf and its tributaries determined from speckle tracking interferometry. – *Canadian Journal of Remote Sensing* **27** (3): 193–206.
- JOUGHIN, I., 2002: Ice-sheet velocity mapping: a combined interferometric and speckle-tracking approach. – *Annals of Glaciology* **34**.
- REIGBER, A. & MOREIRA, A., 2000: First demonstration of airborne SAR tomography using multi-baseline L-band data. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **38** (5): 2142–2152.
- ROTT, H., EINEDER, M., NAGLER, T. & FLORICIOIU, D., 2008: New results on dynamic instability of Antarctic Peninsula glaciers detected by TerraSAR-X ice motion analysis. – *European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*.
- SAKAMOTO, Y., ISHIGURO, M. & KITAGAWA, G., 1986: Akaike information criterion statistics. – Reidel, Dordrecht, The Netherlands.
- ZHU, X., ADAM, N., BRIC, R. & BAMLER, R., 2009: Space-borne High Resolution SAR Tomography: Experiments in Urban Environment Using TerraSAR-X Data. – *Joint Urban Remote Sensing Event 2009, Shanghai, China*.

#### Addresses of the Authors:

Prof. Dr.-Ing. habil. RICHARD BAMLER, Dr. rer. nat. MICHAEL EINEDER, NICO ADAM, Remote Sensing Technology Institute (IMF), German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling, Germany, Tel.: +49-8153-28-2673, -1396, -1326, Fax: -1420, e-mail: richard.bamler@dlr.de, michael.einder@dlr.de, nico.adam@dlr.de

Prof. Dr.-Ing. habil. RICHARD BAMLER, XIAOXIANG ZHU, STEFAN GERNHARDT, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel.: +49-8153-28-2673, Fax: -1420, e-mail: richard.bamler@dlr.de, xiaoxiang.zhu@bv.tum.de, Stefan.Gernhardt@bv.tum.de.

Manuskript eingereicht: Mai 2009  
Angenommen: Juli 2009



# Analysis of Image Sequences for the Detection and Monitoring of Moving Traffic

MATTHIAS BUTENUTH, PETER REINARTZ, DOMINIK LENHART & DOMINIK ROSENBAUM, München; STEFAN HINZ, Karlsruhe

**Keywords:** Image Sequences, Self-calibration, Detection, Tracking, Moving Traffic

**Summary:** This paper focuses on the detection and tracking of vehicles from airborne image sequences to monitor moving traffic. Two different systems are described: the first one is a near real-time tracking algorithm based on normalized cross correlation. The second approach includes model knowledge about driver behavior, traffic dynamics and context to exploit svelocity and trajectory evaluation. The shown results and derived quality measures demonstrate the performance of the proposed systems, in particular the contribution of the traffic model knowledge enhances the correctness of the tracking results. Finally, concluding remarks are given to point out further research.

**Zusammenfassung:** *Analyse von Bildsequenzen zur Detektion und Überwachung von fließendem Verkehr.* Dieser Artikel zielt auf das Erkennen und Verfolgen von Fahrzeugen aus luftgetragenen Bildsequenzen zur Überwachung von fließendem Verkehr. Zwei unterschiedliche Systeme werden beschrieben: Das Erste ist ein echtzeitnahes Tracking-Verfahren, welches auf der normalisierten Kreuzkorrelation basiert. Das zweite Verfahren bindet Modellwissen über Fahrerverhalten, Verkehrsdynamiken und Kontext ein, um Geschwindigkeits- und Trajektorienbewertungen auszunutzen. Die Ergebnisse und die abgeleiteten Qualitätsmaße zeigen die Leistungsfähigkeit der Systeme, insbesondere der Beitrag des Verkehrsmodellwissens erhöht die Korrektheit der Trackingergebnisse. Abschließend wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungen gegeben.

---

## 1 Introduction

The analysis and interpretation of image sequences for the detection of moving objects is an important research topic. An early overview is given, for instance, in (CEDRAS & SHAH 1995) and more recent advances with focus on air- and spaceborne traffic data collection can be viewed in the compendium in (HINZ et al. 2006). In general, traffic monitoring is mainly based on data from conventional stationary ground measurement systems such as induction loops, radar sensors or terrestrial cameras. All ground measurement systems embedded in road infrastructure deliver precise traffic data with high temporal resolution, but their spatial distribution is still limited to selected positions along motorways and main roads. The sparse spatial sampling of these

systems makes area-wide traffic monitoring difficult, since detailed traffic models are necessary to interpolate between the measurement positions. An alternative approach is to collect traffic data by means of vehicles equipped with mobile measurement units, which flow with the traffic. These so called floating car data, FCD (SCHAEFER et al. 2002, BUSCH et al. 2004), is often obtained from taxicabs and delivers very useful traffic information along specific routes within cities. Yet such systems are currently only available for a few big cities. Furthermore, the traffic information available from this source depends inherently on the routes taxicabs are taking. Taxi drivers tend to avoid busy roads during rush hours, leading to only few or even no data being available for roads burdened with commuter traffic.

The big advantage of the remote sensing techniques presented in this paper is that they complement the aforementioned techniques. The measurements can be acquired nearly everywhere except of tunnels and roads occluded by trees. The entire traffic dynamics for a given area can be recorded and analyzed, e. g., vehicle density, velocities, overtaking maneuvers, merge and exit behavior, and traffic congestions for a certain time span. Such results are highly relevant input data for traffic modeling and simulation programs, for testing the efficacy of traffic control measures and for the input into GIS systems for traffic monitoring. In addition, there are no dependencies on any third party infrastructure.

The usefulness of airborne video data from both the visible and thermal spectrum has been studied using many different approaches (ERNST et al. 2003, STILLA et al. 2004, TOTH & GREIJNER-BRZEZINSKA 2004, YAO et al. 2008a), and also first attempts with airborne LIDAR data have been published (TOTH & GREIJNER-BRZEZINSKA 2006, YAO et al. 2008b). Tests with several camera systems and various airborne platforms as well as the prototype development of an airborne traffic monitoring system and thematic image processing software for traffic parameters were done in the projects "LUMOS" and "Eye in the Sky" (ERNST et al. 2003, BÖRNER et al. 2004). Both systems are based on video cameras mounted on aerial platforms. They meet the requirements of rapid airborne traffic data acquisition, however, the field of view is limited.

To overcome this limitation of video cameras, we develop a system for automatic derivation of traffic flow data which is based on using for commercial medium format frame cameras. These cameras enable the coverage of large areas at a reasonable ground sampling distance. Yet the frame rate is quite low (and occasionally variable) as more time is necessary for reading-out the data. These peculiarities need to be considered in the design of an airborne traffic monitoring system. There are not many investigations on optical airborne image sequences with a large field of view (TOTH et al. 2004). The general suitability of image sequences taken with airborne cameras for traffic monitoring was shown in (REINARTZ et al. 2006, ROSENBAUM et al. 2009). An ap-

proach that can deal with these characteristics is presented in (LENHART & HINZ 2006, LENHART et al. 2008). Further advances of this work are introduced in this paper.

Most of the mentioned approaches utilize data from a road database as a priori information for the automatic detection of road area and vehicles. For less complex roads a geometrical refinement is possible as a preceding step, e. g., using network snakes (BUTENUTH 2007, BUTENUTH 2008). From the database, numerous attributes can be assigned to each road polygon, including the driving direction on motorways, which reduces the search space during automated tracking.

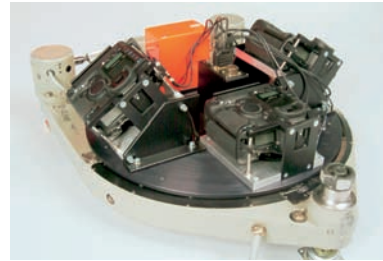
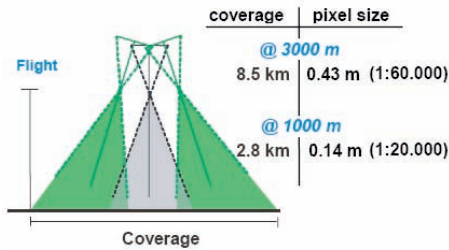
In the following, we present our research activities on airborne traffic monitoring with special emphasis on vehicle tracking. The system is designed in such a way that it fulfills following requirements:

- The camera system must support a large coverage comparable to photogrammetric aerial photographs, it must deliver a spatial resolution sufficient for vehicle detection and tracking ( $< 25$  cm), and its frame rate must enable image acquisition in such intervals that also fast cars traveling anti-parallel to the aircraft are imaged at least twice.
- The algorithms for traffic analysis must provide the results in near real-time so that traffic management can immediately react on the current situation.

The paper thus focuses on the characteristics of the camera system first (cf. Section 2), and then outlines two approaches for the detection and tracking of vehicles to monitor moving traffic. The goal is to point out the usability of image sequences analysis with different approaches (cf. Section 3) and to compare the derived results with each other (cf. Section 4). Finally, concluding remarks are given to highlight further investigations and research opportunities.

## 2 3K Camera System

In this section the newly developed 3K camera system of DLR is presented to provide the image sequences for the aimed analysis. The



**Fig. 1:** Left: Illustration of the image acquisition geometry. The tilt angle of the sideward looking cameras is approx. 35°; right: DLR 3K camera system, integrated in a ZEISS aerial camera mount including the IMU of the IGI georeferencing system (orange) for attitude measurements.

camera system consists of three non-metric off-the-shelf cameras (Canon EOS 1Ds Mark II, 16 megapixels each). The cameras are aligned in an array with one camera looking in nadir direction and two in oblique direction, which leads to an increased FOV of max 110°/31° in across track/flight direction (cf. Fig. 1). The ground pixel size and swath width are depending on the flight altitude and range between 15 cm to 50 cm and 2.5 km to 8 km respectively. This camera system is operated on board the DLR research planes Dornier 228 and Cessna 208B, but an extension to other platforms may be possible in future.

The 3K camera can be used in different mapping or traffic acquisition modes and, thus, a high resolution and wide-area monitoring task even at low flight altitudes, e. g., below the clouds, is feasible. Within two minutes an area of approximately 10 km × 8 km can be monitored. The frame sensor system is coupled with a real-time GPS/IMU navigation system (IGI), which enables the direct georeferencing. The ability to acquire image sequences with up to 3 Hz allows the application to monitor moving traffic. Prerequisite is a high precision orthorectification of the data using an underlying SRTM DEM. The sequential images have to match each other (for ground pixels) with sub-pixel accuracy, which can be reached by direct georeferencing including calibration and boresight values.

Two calibrations of the 3K camera system were performed: one on a ground test field in 2006 (KURZ et al. 2007) and one in-flight in 2008. For the latter, tie points were matched

and all control points were measured in 281 images from all three cameras. These tie points, control points and GPS positions were introduced into a self calibrating bundle adjustment. Altogether, a redundancy of about  $10^5$  was reached and five interior parameters were estimated for each camera.

### 3 Detection and Monitoring of Moving Traffic

In this section, the methodical aspects of traffic monitoring are described. In order to detect also non-moving vehicles, we conceptually separate the tasks of vehicle detection and vehicle tracking, thereby focusing on tracking in the following. Detection of vehicles in single images can for instance be done with the approach of (HINZ 2004) for high resolution images and (LEITLOFF et al. 2009) for moderately sampled images.

In the following sub-sections two different systems for vehicle tracking are outlined. The first one is simpler from a methodological point of view but works in near real-time. The second includes more knowledge about driver behavior, traffic dynamics and context, but needs more parameters to initialize and a longer execution time. Both approaches are independently from each other, but an integration in terms of an adaptive system is a possible future advancement. The first tracking algorithm may be used in distinct scenarios like motorways providing traffic data with a high actuality, whereas the second one can be ap-

plied in difficult environments like urban main and side roads.

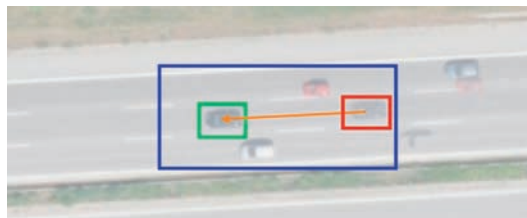
### 3.1 *Near Real-Time Vehicle Tracking with Normalized Cross Correlation*

An easy to use and robust technique for vehicle tracking is based on matching image patches by normalized cross correlation (LEWIS 1995). For traffic data acquisition the camera system operates in a so-called burst mode with four or five consecutive images at a high repetition rate of up to 3 fps followed by a break of several seconds. During this break the plane moves significantly over ground until the next image sequence is started. Thereby a configurable overlap of 10% to 20% between two consecutive image sequences (bursts) is obtained. This reduced the data amount produced by the camera system significantly compared to a mode where images are taken continuously with a frame rate of 3 fps. The vehicle detection is done on the first image of the burst, vehicle tracking starts with the image pair consisting of the first and second image of a sequence. For each vehicle detected in the first image, a template image is generated at the position of the vehicle detection in the first image. In the second image, a rectangular search window is opened at the vehicle position obtained from the detection in the first window. Thereby, the rectangle is aligned to the driving direction, which is obtained from the road database. The length of the search window depends on the maximum expected velocity for the road and the time difference between the two images. The normalized cross correlation is calculated between the template image and second image. The obtained values give the probability of finding the vehicle from the first image at a certain position within the search window in the second

image; Fig. 2 shows an example for a correctly tracked car.

The derived score [0.0 ... 1.0] needs to exceed a certain value for keeping it as a match. A maximum correctness is reached with an acceptable completeness in tracking by setting this score threshold to a value of 0.9. The tracking is restarted within the second and third image (and with further consecutive pairs of the exposure burst in succession) in order to track the vehicles through a whole image sequence. For vehicles that disappear at image borders or below bridges during an exposure of the sequence (but have been detected or tracked in the image before) the tracking algorithm does not find a match. This means that disappeared vehicles are normally not confused with other vehicles or objects, because of the high matching threshold of 0.9. Vehicles occluded by bridges or other objects may be detected again after reappearance by a new vehicle detection performed on a further exposure sequence. However, they appear as new detections and loose their identification relation. In order to increase correctness, cross correlation is performed as matching band by band in RGB color space to exploit the varicolored object information.

For vehicle tracking on motorways, rotations of the template vehicle image are neglected, because the lane change angles at typical velocities obtained on motorway is quite low. However, for city regions, rotation of the template during correlation can be turned on, but this will result in increased computing time linearly with the number of rotation steps during correlation. In order to save computation time, matching is not performed with sub pixel accuracy. Integral images are not calculated since it is not cost efficient on small templates. We further accelerate normalized cross correlation by an estima-



**Fig. 2:** Matching with normalized cross-correlation (two sequential images are superimposed).



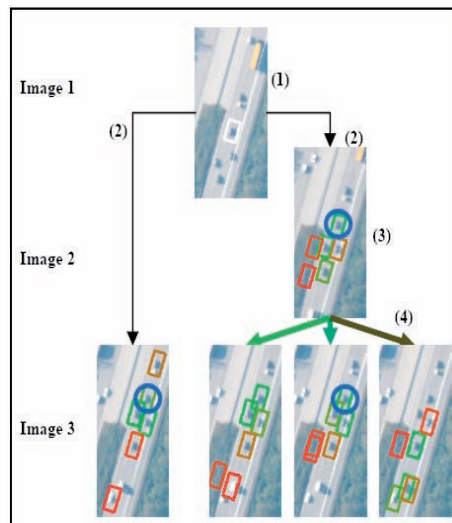
tion of the normalization since calculating the full norm at each position in the search window takes quite a lot of calculation time. Assuming that the illumination situation does not change a lot between two images, an upper limit of the correlation score is estimated for each correlation position in the search window. Only if this upper limit exceeds the score threshold the exact normalized cross correlation is calculated at that position. For the estimation of the score only the first (blue) channel of the color image is used. We choose the first channel for the estimate, since it provides faster memory access than the second or third channels due to the definition of the program internal image data structure. These arrangements decrease computation time by a factor of at least four. These arrangements lead to computation times of less than 10 s per image burst tested on a scene containing about 100 cars using standard hardware based on Quad-Core CPU.

At high resolutions (GSD  $\sim 15$  cm) on motorway scenarios this tracking algorithm reaches a correctness of better than 95% at a completeness of more than 90%. This high sufficiency might be due to the fact, that at such resolutions car details like car body types, the presence or absence of sunroofs and similar features can be resolved. While vehicle tracking based on normalized cross correlation in RGB color space itself works fine at high resolutions, it is sensitive to false alarms obtained in vehicle detection. As mentioned before vehicle tracking is based on vehicle detection performed in the first image of each burst. Although the vehicle detection algorithms used for this may be highly sufficient they deliver a certain percentage of false detections. Although several false vehicle detections can be eliminated during tracking as outliers in direction or velocity space, other false alarms still remain in tracking. Especially objects from the dashed lane markings that were detected as vehicles erroneously may still remain in tracking. This is due to the fact, that the object shape of the dashed markings reappears periodically within a search window and the fact that all of these markings have almost exactly the same shape and intensity.

### 3.2 Advanced Vehicle Tracking Using Velocity and Trajectory Evaluation

In this section, the approach complementing the aforementioned system uses image triplets and track evaluation is presented. Again, vehicles are assumed to be detected beforehand. The tracking of the cars is accomplished in the consecutive two images. Since time gaps between frames may get large tracking is done by matching the cars of the first image (i. e., car patches as reference patches) over the next two images. To this end, an adaptive shape-based matching algorithm is employed including internal evaluation and consistency checks (STEGER 2001, ULRICH 2003). The similarity measure is invariant against noise and illumination changes but not against rotations and scale. Thus, for each image the reference patch is updated to adapt illumination and aspect variations. Fig. 3 illustrates the multiple hypotheses matching over image triplets.

The matching process delivers a number of matched positions for each vehicle where the best match is not always the correct one. In our algorithm, we use a maximum number of the six best matches for each run. Thus, we may receive up to six match positions in Image 2 (3) and 36 match positions in Image 3 (4)



**Fig. 3:** Matching concept with image triplets using sequential matching between image pairs and direct matching between 1st and 3rd image.

for each vehicle detection. Also having six match positions for direct matching from Image 1 to Image 3 (2, left branch), we need to evaluate 216 possible tracking combinations for one car. At a first glance, this seems quite cost intensive. Yet, many incorrect matches can be rejected through simple thresholds and consistency criteria controlling the computational load easily.

For the evaluation of the tracks, a Bayesian maximum a posteriori probability decision rule based on a simple motion model is applied (LENHART & HINZ 2006). The model focuses on smooth tracks and smooth velocity profiles, yet with braking and standing cars allowed. During the evaluation, a variety of intermediate weights are employed which include matching score, motion consistency and spatial identity of the results from direct and indirect matching. Finally, these weights are aggregated to an overall tracking score and the best match combination is chosen as the correct vehicle track.

In order to refine the detection and tracking results, a velocity and trajectory analysis is carried out which is independent of the preceding detection and tracking algorithms. The goal of this analysis is to eliminate false alarms from the set of detections. This allows a more precise velocity estimation for road segments since false alarms significantly influence velocity accuracy. There are mainly two ways how false alarms may be tracked:

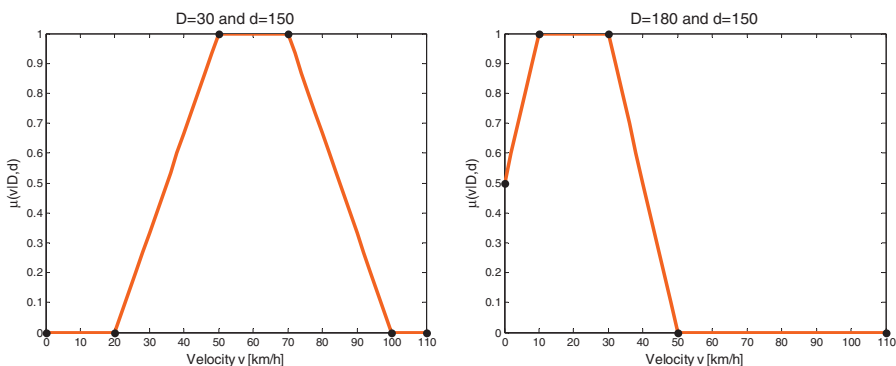
- Collinear motion for redundant objects/features belonging to vehicles (e. g., trailer, car shadow).

- With zero velocity if objects belong to the background (e. g., road bank, shadows of trees).

A first step to eliminate false detections is to remove redundant objects from the set of detections. These are the kind of objects that belong to vehicles, such as shadows or trailers. For each pair of detections, the spatial distance is calculated. A search for very small distances delivers candidates for redundant objects, which are analyzed in terms of their trajectories. The analysis includes the speed and direction of the determined trajectories and the relative direction between the candidates. Identical trajectories and constant relative direction indicates redundant candidates while passing vehicles will have at least a slight difference in their speed or relative orientation.

For velocity analysis, we use fuzzy sets for knowledge representation (ZADEH 1965) which allows an intuitive way of describing vehicle behavior as a function of the state of traffic and the location with respect to intersections or traffic lights. For each road segment, the density is determined. In dependence of the density  $D$  and the distance  $d$  to road node points, possibilities for the range of velocities are defined (cf. Fig. 4). By linear interpolation along the axes of density  $D$  and distance  $d$ , a cubic membership function can be derived (cf. Fig. 5).

According to the fuzzy membership function, a weight  $\mu_A$  is assigned to each of the detections. The weight contributes to the calculation of a weighted mean velocity  $\bar{v}$  per road section:



**Fig. 4:** 1D membership functions given a traffic density  $D = 0$  and  $D = 180$ , respectively, and distance  $d = 150$  with support points (black dots).

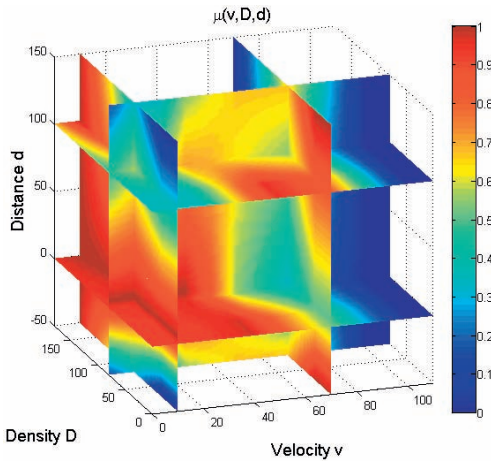


Fig. 5: 3D membership function with slices at  $v = 10$ ,  $v = 70$ ,  $D = 80$ ,  $d = 0$  and  $d = 100$ .

$$\bar{v} = \frac{\sum_i v_i \cdot \mu_A(v_i, D_i, d_i)}{\sum_i \mu_A(v_i, D_i, d_i)} \tag{1}$$

with its standard deviation  $\sigma_v$ ,

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{\sum_i (\bar{v} - v_i)^2 \cdot \mu_A^2(v_i, D_i, d_i)}}{\sum_i \mu_A(v_i, D_i, d_i)} \tag{2}$$

Applying a minimum threshold on the summed up weights of a section, we meet the circumstance that there are only false alarms in a free flow section. If the sum of the weights of a section is below the threshold, all detections of this section are removed. Finally, objects with a velocity  $v_i < \bar{v} - 2 \cdot \sigma_v$  are regarded as outliers and eliminated. A refined and unweighted average velocity is determined from the remaining detections. The resulting distribution is unbiased under the assumption that all false alarms have been eliminated.

## 4 Results and Analysis

### 4.1 Results of Vehicle Tracking with Normalized Cross Correlation

Vehicle tracking was tested on data obtained at a flight height of 1000 m (15 cm GSD) and at a flight height of 2000 m (30 cm GSD). Fig. 6 shows a typical result on tracking vehicles from the first image of an image sequence to the next image. On images with a resolution of 15 cm GSD, vehicle tracking on motorways performs pretty well with a correctness of better than 90% and a completeness of almost 90% on each image pair. On images obtained



Fig. 6: Car tracking by normalized cross correlation of a group of cars detected in the first image of a sequence (left) to the second image (right).



Fig. 7: Resulting velocities of vehicles measured by car tracking.

from higher flight levels (30 cm GSD) tracking still works fine with a completeness of 90% while having a correctness of 75%. We attribute the good tracking performance on low flight heights to the fact that with a resolution of 15 cm GSD vehicle details like sunroof, windscreen and backlight, and body type go into the correlation which simplifies finding the correct match. However, these details are not anymore seen at higher flight levels. In Fig. 7 the resulting velocities of the tracked cars are shown.

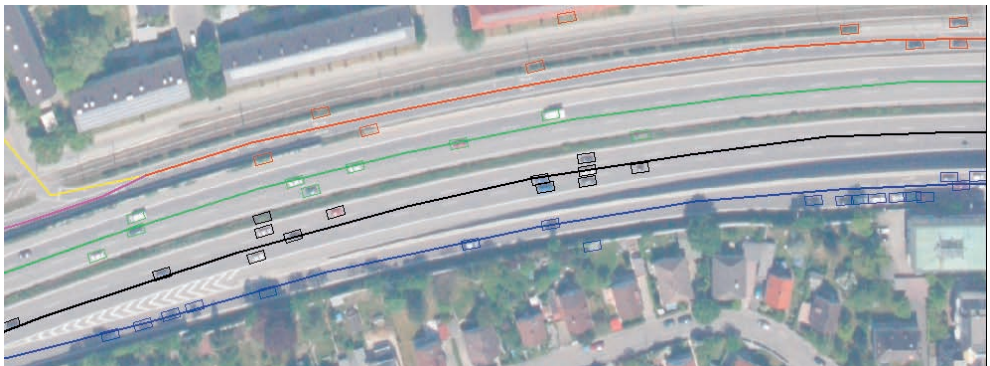
#### 4.2 Results of Vehicle Tracking Using Velocity and Trajectory Evaluation

The tracking with image triplets has been tested on an image sequence consisting of four images with a GSD of 30 cm. In this example, the detection has been carried out manually with consid-

ering a reasonable detection characteristic and quality. Overall, 50 objects have been selected containing of 33 vehicles and 17 false alarms (see Fig. 8). Therefore, a detection completeness of 100% and a correctness of 66% is given.

The results of the tracking are depicted in Fig. 9. Only one object has been tracked incorrectly, however, the tracking failed for seven objects including three vehicles. This results in a tracking completeness of 86% and a correctness of 98%. Tests on other data delivered similar tracking quality measures. Note that we do not distinguish between false alarms and correct detections but only consider the mere outcome of the tracking procedure.

Using the analysis of velocities, eleven false alarms could be eliminated (cf. Fig. 10) while two false alarms could not be found. In addition, no vehicle has been falsely removed from the tracking results. This leads to a final complete-



**Fig. 8:** Detected vehicles with color coded assignments to road polygons of the database.



**Fig. 9:** Results of tracking using image triplets with trajectories of tracked objects. Red crosses indicate detections where the tracking failed.



**Fig. 10:** Refined track results. Green: Detected and tracked vehicles. Red: Eliminated false alarms after velocity evaluation. Blue circle: False alarm which has not been eliminated.

ness of 90% and a correctness of 93%. Since we started with 100% detection completeness, it is obvious that the initial detection quality will directly influence the final completeness. However, a poor initial detection correctness can be improved significantly.

One of the remaining false alarms has been tracked incorrectly and, thus, has been assigned with a wrong velocity. The other one was located in the vicinity of a cue of standing vehicles and was assumed to belong to this group of cars. Consequently, these false alarms do not influence the traffic data in a critical manner since they do not significantly increase the traffic density or falsify the average velocity.

## 5 Conclusions

In this paper, two approaches for the detection and monitoring of moving traffic using airborne image sequences are presented. The shown results and quality measures demonstrate the contribution of the proposed approaches, in particular the introduction of traffic model knowledge enhances the correctness of the tracking results. Both tracking systems run currently independent from each other, but an integration of both approaches in terms of a consecutive system is a possible future enhancement. In particular, the second system, the advanced vehicle tracking exploiting model knowledge of velocity and trajectory evaluation, can be regarded as a subsequent

step to the tracking algorithm presented at first.

An interesting point of further investigations could be the utilization of the traffic model in an enhanced way. Up to now, the extracted and tracked vehicles are used to enrich the traffic models and traffic simulations. Here, the focus is on reliable and robust results to guarantee for stable numeric models concerning the traffic monitoring. A further step could be an iteration in terms of introducing the updated traffic model again in the extraction and tracking process. For example, the enriched traffic model could allow for input information enabling less strong extraction parameters for the detection and tracking of the vehicles. Obviously, the enhanced tracking results will improve the traffic model once again.

## References

- BÖRNER, A., ERNST, I., RUHÉ, M., SUJEW, S. & HETSCHER, M., 2004: Airborne Camera Experiments for Traffic Monitoring. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **35** (B1): 243–248.
- BUSCH, F., GLAS, F. & BERMANN, E., 2004: Dispositionssysteme als FCD-Quellen für eine verbesserte Verkehrslagerekonstruktion in Städten – ein Überblick – *Straßenverkehrstechnik* **09/04**.
- BUTENUTH, M., 2007: Segmentation of Imagery Using Network Snakes. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1/07**: 7–16.

- BUTENUTH, M., 2008: Topology-Preserving Network Snakes. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B3a): 229–234.
- CEDRAS, C. & SHAH, M., 1995: Motion-based Recognition: A Survey. – *Image and Vision Computing* **13** (2): 129–155.
- ERNST, I., SUJEW, S., THIESSENHUSEN, K.-U., HETSCHER, M., RASSMANN, S. & RUHÉ, M., 2003: LUMOS – Airborne Traffic Monitoring System. – *Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, on CD.
- HINZ, S., 2004: Detection of Vehicles and Vehicle Queues in High Resolution Aerial Images. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **3/04**: 201–213.
- HINZ, S., BAMLER, R. & STILLA, U., 2006: Theme issue “Airborne and Spaceborne Traffic Monitoring”. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (3/4).
- KURZ, F., MÜLLER, R., STEPHANI, M., REINARTZ, P. & SCHROEDER, M., 2007: Calibration of a Wide-angle Digital Camera System for Near Real-time Scenarios. – *Proceedings High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, on CD.
- LEITLOFF, J., HINZ, S. & STILLA, U., 2009: Automatic Vehicle Extraction from High Resolution Satellite Images of City Areas. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (in press).
- LENHART, D. & HINZ, S., 2006: Automatic Vehicle Tracking in Low Frame Rate Aerial Image Sequences. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences* **36** (3): 203–208.
- LENHART, D., HINZ, S., LEITLOFF, J. & STILLA, U., 2008: Automatic Traffic Monitoring based on Aerial Image Sequences. – *Pattern Recognition and Image Analysis* **18** (3): 400–405.
- LEWIS, J.P., 1995: Fast Normalized Cross Correlation. – *Vision Interface, Canadian Image Processing and Pattern Recognition*: 120–123.
- REINARTZ, P., LACHAISE, M., SCHMEER, E., KRAUSS, T. & RUNGE, H., 2006: Traffic Monitoring with Serial Images from Airborne Cameras. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (3–4): 149–158.
- ROSENBAUM, D., KURZ, F., THOMAS, U., SURI, S. & REINARTZ, P., 2009: Towards Automatic Near Real-time Traffic Monitoring with an Airborne Wide Angle Camera System. – *European Transport Research Review* **1** (1): 11–21.
- SCHAEFER, R.-P., THIESSENHUSEN, K.-U. & WAGNER, P., 2002: A Traffic Information System by means of Real-time Floating-car Data. – *Proceedings of ITS World Congress*, on CD.
- STEGER, C., 2001: Similarity Measures for Occlusion, Clutter, and Illumination Invariant Object Recognition. – *Pattern Recognition*, Springer Verlag, Berlin, Germany: 148–154.
- STILLA, U., MICHAELSEN, E., SOERGEL, U., HINZ, S. & ENDER, J., 2004: Airborne Monitoring of Vehicle Activity in Urban Areas. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **35** (3): 973–979.
- TOTH, C.K. & GREJNER-BRZEZINSKA, D., 2004: Traffic Management with State-of-the-art Airborne Imaging Sensors. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **35** (2): 848–853.
- TOTH, C.K. & GREJNER-BRZEZINSKA, D., 2006: Extracting Dynamic Spatial Data from Airborne Imaging Sensors to Support Traffic Flow Estimation. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61** (3–4): 137–148.
- ULRICH, M., 2003: Hierarchical Real-Time Recognition of Compound Objects in Images. – *Dissertation, German Geodetic Commission (DGK) C 568*.
- YAO, W., HINZ, S. & STILLA, U., 2008a: Automatic Analysis of Traffic Scenario from Airborne Thermal Infrared Video. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Geoinformation Sciences* **37** (B3a): 223–229.
- YAO, W., HINZ, S. & STILLA, U., 2008b: Automatic Vehicle Extraction from Airborne LiDAR Data of Urban Areas Using Morphological Reconstruction. – *5th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing*, Florida, USA.
- ZADEH, L., 1965: Fuzzy Sets. – *Information and Control* **8** (3): 338–353.

#### Addresses of the Authors:

Dr.-Ing. MATTHIAS BUTENUTH, Dipl.-Ing. DOMINIK LENHART, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, D-80333 München, Tel.: +49-(0)89-28922671, Fax: +49-(0)89-2809573, e-mail: matthias.butenuth@bv.tum.de, dominik.lenhart@bv.tum.de.

Dr.-Ing. PETER REINARTZ, Dr. rer. nat. DOMINIK ROSENBAUM, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung, D-82234 Wessling, Tel.: +49-(0)8153-282757, Fax: +49-(0)8153-281444, e-mail: peter.reinartz@dlr.de, dominik.rosenbaum@dlr.de.

Prof. Dr.-Ing. STEFAN HINZ, Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, D-76128 Karlsruhe, Tel.: +49-(0)721-6082314, Fax: +49-(0)721-6088450, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de.

Manuskript eingereicht: Mai 2009  
Angenommen: Juli 2009

# Algorithms of Multi-Modal Route Planning Based on the Concept of Switch Point

LU LIU & LIQIU MENG, München

**Keywords:** Multi-Modal Navigation, Shortest Path Algorithm, Network Analysis

**Summary:** The paper addresses the task of generically finding the shortest path in multi-modal networks with the multi-modal route planning problem in transportation field as a special case. The multi-modal networks can be modelled by a data structure based on the core concept of Switch Point which abstracts the places where it is allowed for changing from one mode to another. Two routing algorithms Multi-Modal Bellman-Ford (MMBF) and Multi-Modal Dijkstra (MMD) were elicited which are respectively rooted in the classical label-correcting and label-setting methods. Both MMBF and MMD are capable of finding in multi-modal networks the shortest paths in spite of different computing complexity. The feasibility of the approach was verified in our prototype system. The results of our experiments conducted on real transportation networks showed the differences between the proposed algorithms in terms of computing performance.

**Zusammenfassung:** Algorithmen zur multi-modalen Routenplanung auf Grundlage des Schaltpunktes. Der Beitrag befasst sich mit der Aufgabe zum Auffinden der kürzesten Route in einem multi-modalen Netzwerk, wobei die multi-modale Routenplanung aus dem Bereich der Verkehrstechnik als eine spezielle Anwendung betrachtet wird. Die Modellierung eines multi-modalen Netzwerks basiert auf dem Kernkonzept Schaltpunkt. Bei einem Schaltpunkt handelt es sich um eine Stelle, wo eine Modalität auf eine andere umgeschaltet werden darf. Zwei Routenalgorithmen Multi-Modal Bellman-Ford (MMBF) und Multi-Modal Dijkstra (MMD) wurden dargestellt. Als Grundlage dazu dienen zwei klassische Methoden – „Label-Korrektur“ und „Label-Einstellung“. Beide MMBF und MMD sind in der Lage, die kürzeste Route in einem beliebigen multi-modalen Netzwerk aufzufinden. Die Machbarkeit des Ansatzes zur multimodalen Routenplanung wurde in einem Prototypensystem bestätigt. Ergebnisse aus unseren Untersuchungen der realen Verkehrsnetzwerke zeigen jedoch, dass sich die beiden Algorithmen hinsichtlich des Rechenaufwands voneinander unterscheiden.

---

## 1 Introduction

The purpose of multi-modal route planning is to provide the user with an optimal route between the source and the target of a trip. The route may utilize several transportation modes including car driving, public transportation, cycling, walking, etc. (HOCHMAIR 2008). Taking several accessible transportation modes into account for the travel plan is a very common practice in everyday life.

A typical application scenario of multi-modal route planning, for example, is to identify the best route from *the garage exit of Technische Universität München* in *Hess*

*street to the Chinese Tower of English Garden* for a tour with a car. In this case, it does not make sense to give the result of directly driving the car from the origin to the entrance of Chinese Tower even if some of the streets in the garden are allowed for cars. Since the user is not allowed to park his car at the door of the tower, he has to find an appropriate place along the route where parking is possible. As a result, the route is divided by the parking place into two segments with different transportation modes – by car and by foot. This is a simple case of multi-modal route planning problem with two involved travel modes.

Another typical scenario which is a little bit more complicated would be to find an optimal route in Munich from a suburban place such as *Seefeld to the Chinese Tower of English Garden* for a tour with a car after work. In this case, directly driving to a parking place and then walking to the destination may not be a best choice because there would be traffic jams in the downtown area of Munich. To stop the car at a suburban train station, and then travel to the destination by inner-city public transportation system may be a better solution. The task is not trivial because only an experienced inhabitant who is familiar with the traffic context in Munich would tend to make such a decision. This is a routing problem involving multiple networks with multiple objectives, constraints and some dynamic and fuzzy information.

A number of mature mono-modal navigation services such as car navigation, pedestrian navigation, public transportation information systems which can do route planning for a specific network are already available on the market. Some public transportation information systems can be envisaged as an embryonic form of multi-modal route planning systems as they can serve the user with an estimated travel time and an overview map that sketches the walking routes from the original locations to various stations. COUCKUYT et al. (2006) from Microsoft have patented the basic concepts of multi-modal navigation and some basic functions of such a system. And REHRL et al. (2007) described the requirements of a multimodal transportation routing system in more detail. HOEL et al. (2005) from ESRI proposed their approach for efficient modeling of the multi-modal network, which was implemented as a tool in ArcGIS Network Analysis toolbox. The modeling issue of a multi-modal freight transportation network was discussed in (SOUTHWORTH & PETERSON 2000). Their proposed data models can be regarded as multi-layer graphs connected by transfer nodes or arcs, while some other researchers (MODESTI & SCIOMACHEN 1998, BOUSSEDJRA et al. 2004) built a single graph containing all the information of different transportation modes. The problem of finding the optimal path in a multi-modal network was also being investigated in the past two decades (BOARDMAN et al. 1997,

MODESTI & SCIOMACHEN 1998, ZILIASKOPOULOS & WARDELL 2000, LOZANO & STORCHI 2001, LOZANO & STORCHI 2002, BOUSSEDJRA et al. 2004, BIELLI et al. 2006, HOCHMAIR 2008, ZOGRAFOS & ANDROUTSOPOULOS 2008). They proposed effective approaches for finding the best route in static or even dynamic multi-modal transportation networks. Nevertheless, most of the proposed routing algorithms are coupled with the specific transportation mode combinations, which may limit their acceptance in a variety of applications, although it is true that the path should respect a set of constraints on the sequence of the used modes, i. e., the path must be viable (LOZANO & STORCHI 2001). The method proposed by FRANK (2008) is a novel approach. His idea is to combine the navigation graph and business graph together, and then apply the traditional shortest path algorithms in the product graph. In addition, the researchers from Universität Karlsruhe have also made substantial contribution to this topic. They proposed a multi-modal path finding method based on (regular-) language-constrained shortest path algorithm (BARRETT et al. 2008, PAJOR 2009) generalized from (formal-) language-constrained algorithm applied in transportation field by BARRETT et al. (1998). Unfortunately, as they remarked in (DELLING et al. 2009), using a fast routing algorithm in such a label-constrained scenario is very complicated and hence, another challenging task. In our previous work (LIU & MENG 2008), we gave a preliminary investigation of the multi-modal extension of Bellman-Ford algorithm, but lacked any theoretical analysis of the proposed algorithm. At that time, we didn't realize that our method for generalizing mono-modal Bellman-Ford into multi-modal situation is generic enough that it can also be applied in the label-correcting algorithms (e. g., Dijkstra's algorithm).

Our concern with the multi-modal route planning is more general. The main purpose of our work is to propose a solution which can find the optimal route in a static  $N$ -modal network for an arbitrary mode combination, where  $N$  indicates the number of modes. More precisely, we treat the mode combination as a part of the input. To approach such a routing problem, we have scrutinized the input of the multi-modal route planning and developed a



corresponding mathematic model. Based on this model, two algorithms which can solve a general problem of finding the multi-modal shortest path are implemented. The main contributions of this paper consist of: 1) a data model based on the concept of Switch Point for modeling the multi-modal networks; 2) two multi-modal shortest path algorithms generalized from the classical mono-modal shortest path algorithms, and the generalizations are based on the same basic principle; 3) a prototype system in which the proposed data model and algorithms are implemented.

The paper is organized as follows. In Section 2 we present the definition of Switch Point which is the core concept of our data model and its matrix expression, propose the multi-modal graph set containing the Switch Points, describe the multi-modal shortest path problem and present its mathematical formulation. A general multi-modal shortest path problem can be solved by *Multi-Modal Bellman-Ford* (MMBF) and *Multi-Modal Dijkstra* (MMD). The two proposed algorithms are described, demonstrated and analyzed in detail in Section 3. The experiment results related to the city of Munich in our prototype system are shown in Section 4. Finally, Section 5 gives the conclusions and an outlook.

## 2 Data Model

### 2.1 Switch Point

In modern urban transportation systems, many inter-modal facilities such as parking places, park and ride lots, transit hubs, trail-heads, etc. are provided besides the basic transportation networks. These facilities make it easy to transfer between different transportation modes. With the collection and digitalization of inter-modal facilities from the real world and the integration of their information with navigational databases, it becomes possible to conduct automatic multi-modal route planning.

In our multi-modal data model, the inter-modal facilities are abstracted as points where a travel mode can switch from one to another. Therefore, we call them Switch Points. Generally speaking, given a set  $M$  containing  $N$  dif-

ferent modes,  $m_i$  and  $m_j$  as two distinctive elements of  $M$ , only the points satisfying some special conditions are eligible to be the Switch Points from  $m_i$  to  $m_j$ . All the special conditions can be expressed by a  $N \times N$  Switch Point Matrix SPM (see Fig. 1). The matrix elements are denoted by  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j}$ ,  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j} = \text{NIL}$  when  $m_i = m_j$ . That means all the values on the diagonal of SPM are NIL because it is meaningless to switch from a mode to itself.  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j}$ ,  $m_i \neq m_j$  indicates the condition that should be satisfied for the switching from  $m_i$  to  $m_j$ . A practical example of  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j}$  is that if  $m_i$  and  $m_j$  indicate the modes of car driving and walking respectively, then  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j}$  should be ‘‘the place is allowed to park a car’’.

$$\begin{matrix}
 & m_1 & m_2 & \cdots & m_N \\
 m_1 & \left[ \begin{array}{cccc}
 \text{NIL} & \lambda_{SP}^{m_1, m_2} & \cdots & \lambda_{SP}^{m_1, m_N} \\
 \lambda_{SP}^{m_2, m_1} & \text{NIL} & \cdots & \lambda_{SP}^{m_2, m_N} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \lambda_{SP}^{m_N, m_1} & \lambda_{SP}^{m_N, m_2} & \cdots & \text{NIL}
 \end{array} \right]_{N \times N}
 \end{matrix}$$

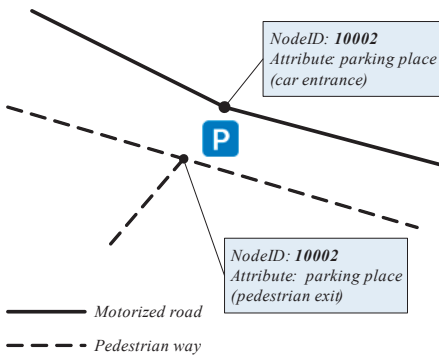
Fig. 1: Switch Point Matrix (SPM).

According to the graph theory, a graph is composed of a vertex set  $V$  and an edge set  $E$ , which is denoted by  $G = \{V, E\}$ .  $\lambda_{SP}^{m_i, m_j}$  can be expressed by some special attributes of vertices in  $G$ . Therefore, a vertex  $v$  is the Switch Point between two different modes  $m_i$  and  $m_j$ , if and only if

- 1)  $v$  is accessible by both  $G_{m_i}$  and  $G_{m_j}$ ;
- 2)  $\lambda(v) = \lambda_{SP}^{m_i, m_j}$ .

where  $G_{m_i}$  and  $G_{m_j}$  denote the graphs of mode  $m_i$  and mode  $m_j$  respectively,  $\lambda$  is a function and can return the attribute of a vertex.

The  $v_{SP}^{m_i, m_j}$  between mode  $m_i$  and mode  $m_j$  is not unique. All the  $v_{SP}^{m_i, m_j}$  constitute a set of Switch Points. The fact that  $|V_{SP}^{m_i, m_j}| > 1$  in most cases indicates the main difficulty of multi-modal route planning. If the Switch Points between any two modes can be uniquely determined, i. e.,  $|V_{SP}^{m_i, m_j}| \equiv 1, \forall m_i, m_j \in M, i \neq j$ , the problem can be reduced to finding the shortest paths that visit specified intermediate nodes in a multi-modal network. This is a typical kind



**Fig. 2:** Example of a Switch Point expressed by two geographically different nodes in two networks.

of constrained shortest path problem, which is considered by (BAJAJ 1971) according to the taxonomy of shortest path algorithms (DEO & PANG 1984).

For the purpose of route planning in multi-modal networks and their various combinations, we have to pay special attention to the Switch Point. Conceptually, Switch Points are similar to point features which can reside in one or more connectivity groups of the multi-modal network model in ArcGIS Network Analysis toolbox (HOEL et al. 2005). However, in our Switch Point-based data model, the validity of a vertex as a Switch Point depends on the aforementioned two conditions. A  $v_{Sp}^{m_i, m_j}$  connecting two different modes may not be geometrically identical in the two corresponding networks. Taking urban transportation network for example, two nodes with distinct geographic coordinates are eligible to be the Switch Point connecting the two networks if they share some attribute values (e.g., node ID). Fig. 2 demonstrates a Switch Point which is a car entrance and a pedestrian exit of a

parking place connecting the motorized network and the pedestrian network.

Switch Point is significant to the multi-modal route planning problem. A network dataset can not support multi-modal routing application without the information of Switch Point. The definition of a multi-modal shortest path problem and its solutions are all based on the concept of Switch Point.

From the transportation point of view, Switch Point is an abstraction of the place in the real world where people can change from one transportation mode to another. We can enumerate different Switch Points of different traffic mode-pairs in a table such as Tab. 1 which we call SPM-T (SPM in Transportation). Given an ordered transportation mode tuple  $(m_i, m_j)$ , we can get the values of SPM-T  $(m_i, m_j)$  by looking up the matrix.

With Tab. 1 we do not attempt to enumerate all possible traffic modes which may for example include airplane, ship, inter-city train, bicycle, roller skating, etc. Instead, we focus on the most usual ones in our everyday life. The SPM-T has two properties:

**SPM-T is asymmetrical.**

Taking the car driving and walking modes for example, SPM-T  $(D, W)$  is not equal to SPM-T  $(W, D)$ . The reason is obvious: a driver can park his car at any available parking place and transfer to pedestrian mode, however in the reverse situation, the driver must walk to a place (e.g., the parking place where his/her car is parked, or a car rental company) where there is a car he/she can use.

**SPM-T is scale-dependent.**

Tab. 1 just shows the case of inner-city map scale. At a more detailed level, we may find that there are no switch points between car

**Tab. 1:** An example of SPM-T. D, P and W denote car driving, public transportation and walking respectively.

	D	P	W
D	NIL	P+R lots	parking lots for cars
P	P+R lots where a car is available	NIL	public transportation stations
W	some place where a car is available or can be rented	public transportation stations	NIL

driving and public transportation because it is impossible to drive a car directly into a bus just like taking a bicycle into a suburban train. In other words, no Switch Point can exist that connects car driving mode and public transportation mode. There must be a pedestrian mode in between. On the other hand, when zooming out to a much smaller map scale, some traffic modes such as pedestrian, bicycle, inner-city public transportation, etc. may become meaningless and therefore should be ignored.

In our real life, a route planning problem with multiple travel modes can be very complicated. Still, it can be reduced to a shortest path problem or some of its variations. In our approach, we describe the original routing problem as a multi-modal shortest path problem.

### 2.2 Formalized Description

The input of a multi-modal shortest path problem contains five parts: 1) *Multi-Modal Graph Set* (MMGS); 2) attributes of vertices in the MMGS; 3) *Switch Point Matrix* (SPM); 4) a sequential list of modes which will be contained in the final route; 5) a source node and a target node.

The notational conventions used in this paper are identical with the second edition of the textbook *Introduction to Algorithms* (CORMEN et al. 2001). Consequently, we are given a sequential list  $M = \langle m_1, m_2, \dots, m_N \rangle$ ,  $N \geq 2$ ,  $m_i \neq m_{i+1}$ ,  $i \in [1, N-1]$  composed by  $N$  modes, a set of vertices attributes  $\Lambda$  and a vertex-labeled, non-negative weighted, acyclic, directed multi-graph  $G_M = \{G_k = \{V_k, E_k\} | k \in M\}$

denoting MMGS.  $\lambda: V \rightarrow \Lambda$ ,  $V = \bigcup_{k \in M} V_k$  is the vertex label function, and  $C_M = \{c_k: E_k \rightarrow R^+, k \in M\}$  is the set of cost functions that map the edges of different modes to positive real-valued costs. The source node and target node are denoted by  $S, S \in V_{m_1}$  and  $T, T \in V_{m_N}$  respectively. With the list  $M$  as input, we can get the switch point value  $\lambda_{SP}^{m_i, m_{i+1}} = \text{SPM}(m_i, m_{i+1})$ ,  $i \in [1, N-1]$  by looking up in the SPM.

At first, we give the formalized description of double-modal shortest path problem as a simplified multi-modal shortest path problem. With the inputs listed above, in a double-modal shortest path problem, we are given a sequential modes list  $M = \langle m_1, m_2 \rangle$ ,  $m_1 \neq m_2$  composed by two different modes, a set of vertices attributes  $\Lambda$  and a double-graph  $G_M = \{G_{m_1} = \{V_{m_1}, E_{m_1}\}, G_{m_2} = \{V_{m_2}, E_{m_2}\}$ , with vertex label function  $\lambda: V \rightarrow \Lambda$ ,  $V = V_{m_1} \cup V_{m_2}$ , and cost functions  $c_{m_1}: E_{m_1} \rightarrow R^+$  and  $c_{m_2}: E_{m_2} \rightarrow R^+$ .  $C_M = \{c_{m_1}, c_{m_2}\}$  is the cost function set composed of the two functions. With the  $M = \langle m_1, m_2 \rangle$  as a part of the input, we can get the  $\lambda_{SP}^{m_1, m_2}$ . The path cost of mode  $k$   $p_k = \langle v_0, v_1, \dots, v_t \rangle$  is the sum of the costs of its constituent edges (cf. (1)).

We define the double-modal shortest path cost from  $S$  to  $T$  with tow modes  $\langle m_1, m_2 \rangle$  (2).

A double-modal shortest path from vertex  $S$  to vertex  $T$  with two modes  $\langle m_1, m_2 \rangle$  involved in is then defined as any path  $p_{\langle m_1, m_2 \rangle}$  with cost  $c(p_{\langle m_1, m_2 \rangle}) = \delta(S, T, \langle m_1, m_2 \rangle)$ .

Based on the formalized description of double-modal shortest path problem, we can generalize it to the multi-modal situation. The path cost of mode  $m$   $p_k = \langle v_0, v_1, \dots, v_t \rangle$  is the same as defined in double-modal shortest path problem by Eq. (1).

$$c(p_k) = \sum_{i=1}^t c_k(v_{i-1}, v_i); \tag{1}$$

$$\delta(S, T, \langle m_1, m_2 \rangle) = \begin{cases} \min\{c_{m_1}(p_{m_1}) + c_{m_2}(p_{m_2}): S \stackrel{p_{m_1}}{\rightsquigarrow} v_{SP}^{m_1, m_2} \stackrel{p_{m_2}}{\rightsquigarrow} T \\ | v_{SP}^{m_1, m_2} \in V_{SP}^{m_1, m_2}\} \\ \infty \end{cases} \begin{matrix} \text{if there is a path} \\ \text{with the two modes} \\ m_1, m_2 \text{ from } S \text{ to } T \\ \text{otherwise} \end{matrix} \tag{2}$$

$$\delta(S, T, M) = \begin{cases} \min\{\sum_{k=1}^{m_N} c_k(p_k): \\ S \stackrel{p_{m_1}}{\rightsquigarrow} v_{SP}^{m_1, m_2} \stackrel{p_{m_2}}{\rightsquigarrow} v_{SP}^{m_2, m_3} \dots v_{SP}^{m_{N-2}, m_{N-1}} \stackrel{p_{m_{N-1}}}{\rightsquigarrow} v_{SP}^{m_{N-1}, m_N} \stackrel{p_{m_N}}{\rightsquigarrow} T \\ | v_{SP}^{m_i, m_{i+1}} \in V_{SP}^{m_i, m_{i+1}}\} \\ \infty \end{cases} \tag{3}$$

We define the multi-modal shortest path cost from  $S$  to  $T$  with the mode list  $M$  by (3).

An  $N$ -modal shortest path from vertex  $S$  to vertex  $T$  is then defined as any path  $p_M$  with cost  $c(p_M) = \delta(S, T, M)$ .

If we restrict the discussion in urban transportation field, the shortest path with  $N$  travel modes reveals some other interesting properties besides the lowest cost.

***The number of switch points in the multi-modal shortest path is limited.***

There is a set of alternative transportation modes available for users to make their travel plan. Although people may travel using more than one mode, they are not disposed to undertake too many modal switches. This property can be seen as a constraint on the number of modal transfers on a multi-modal shortest path.

***The sequence of switch points in the multi-modal shortest path has some regularity.***

The regularity of the switch points sequence can be set equal to the transportation mode sequence. A multi-modal path may become less logical if the involved transportation mode combination seldom or never appears in a travel plan. This property can be seen as a constraint on the mode list.

By taking the constraints into account the path will become “viable” as defined in (LOZANO & STORCHI 2001). However, finding the multi-modal shortest path and determining the relative logic of mode combination should be treated as two separate problems. The attempt to couple the algorithms with the concrete mode constraints may limit the acceptance level of routing algorithms themselves in applications other than transportation route planning, e. g., computer network routing, circuit designing, etc.

Our concern with the multi-modal route planning is more general in the sense that there are  $N$  modes involved and the mode combination can be arbitrarily set. The solution is provided by two multi-modal shortest path algorithms described in the next section.

### 3 Multi-modal Shortest Path Algorithms

Our investigation starts with the double-modal shortest path problem which can be then generalized to cope with the multi-modal situation. We implemented two double-modal shortest path algorithms based on the classical label-correcting and label-setting algorithms, i. e., Bellman-Ford algorithm (BELLMAN 1958, CORMEN et al. 2001) and Dijkstra’s algorithm (DIJKSTRA 1959, CORMEN et al. 2001) respectively, and extended them to *Multi-Modal Bellman-Ford* (MMBF) and *Multi-Modal Dijkstra* (MMD). A key step was to make a few modifications with respect to Switch Point during the initialization process.

#### 3.1 Multi-modal Bellman-Ford

Bellman-Ford search is a well-tested label-correcting algorithm used to find the shortest path from a single source in a graph without negative-weighted cycles. Generally speaking, Bellman-Ford search procedure consists of two main steps: the initialization and the traversal on the whole graph (i. e., iteratively relaxation of all the edges). After the traversal step, the distance value on each vertex indicates the shortest distance value from the source to this vertex.

To solve the double-modal shortest path problem, we execute Bellman-Ford search twice, the first time in the  $G_{m_1}$  with the source  $S$  and the second time in the  $G_{m_2}$ . The initialization step in the second time is different from the first time. Instead of setting all the distance values on the vertices to infinity, we kept the values calculated on the Switch Points in  $G_{m_1}$ . After this modified initialization, we did Bellman-Ford traversal in  $G_{m_2}$  and got the final shortest paths from  $S \in V_{m_1}$  to any vertex  $v \in V_{m_1}$  with mode  $m_1$  and any vertex  $v \in V_{m_2}$  with modes  $m_1$  and  $m_2$  via Switch Points.

Fig. 3 demonstrates the work flow of the double-modal Bellman-Ford algorithm on two graphs with a single source-target pair. The first graph is  $G_{m_1} = \{V_{m_1}, E_{m_1}\}$  with 6 vertices and 9 edges of mode  $m_1$ , and the second one is  $G_{m_2} = \{V_{m_2}, E_{m_2}\}$  with 7 vertices and 18 edges of mode  $m_2$ . The source is vertex  $S$  in  $G_{m_1}$ . The

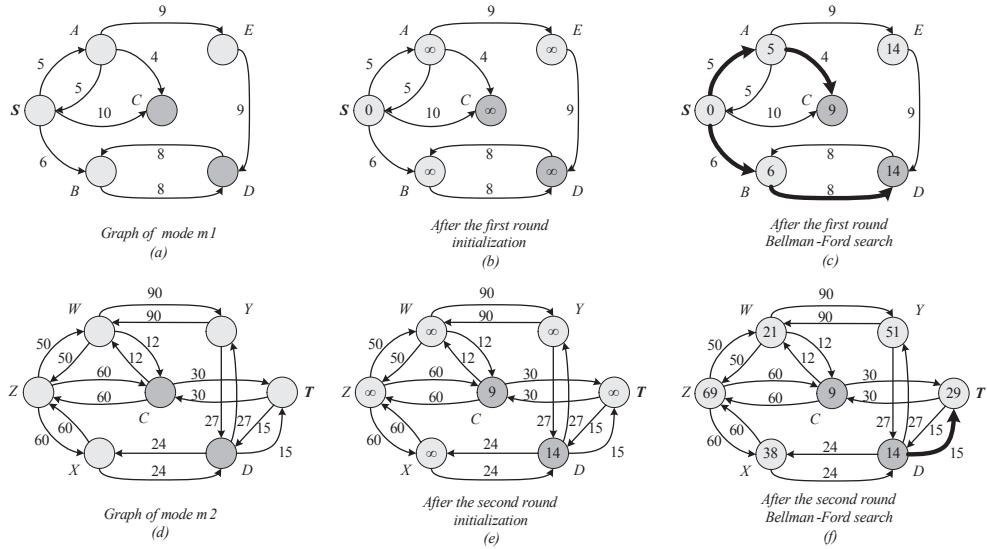


Fig. 3: Work flow of the double-modal Bellman-Ford algorithm.

target is vertex  $T$  in  $G_{m_2}$ . Fig. 3 (a) and (d) are the original graphs. The vertices in dark grey  $C$  and  $D$  indicate Switch Points from mode  $m_1$  to  $m_2$ . The distance values after initialization and searching processes are shown within the vertices. The thick edges in Fig. 3 (c) indicate the shortest paths from  $S$  to the Switch Points. The second initialization is illustrated in Fig. 3 (e). The thick edge in Fig. 3 (f) indicates the shortest path from Switch Point to the target. In this example, the double-modal shortest path from  $S$  to  $T$  is  $S \rightarrow B \rightarrow D$  (Switch Point)  $\rightarrow T$  with the final distance value of 29.

In a multi-modal situation with an ordered mode list  $M$ , we can also get the shortest paths by applying the modified initialization in the graphs from  $G_{m_2}$  and traverse graphs of further modes. Thus, the double-modal Bellman-Ford algorithm is generalized into MULTIMODALBELLMANFORD (MMBF). The whole process can be described as follows:

```

MULTIMODALBELLMANFORD( $M, G_M, C_M, S$ )
1 For  $i = 1$  to  $N$ 
2   do if  $i = 1$ 
3     then MULTIMODALINITIALIZE( $G_{m_1}, \infty, S$ )
4     else MULTIMODALINITIALIZE( $G_{m_i}, \lambda_{SP}^{m_{i-1}}, S$ )
5     BELLMANFORDSEARCH( $G_{m_i}, m_i, C_M$ )
    
```

where the routines MULTIMODALINITIALIZE and BELLMANFORDSEARCH work as follows:

```

MULTIMODALINITIALIZE( $G_M, m, \lambda_{SP}, S$ )
1 if  $\lambda_{SP} = \text{NIL}$ 
2   then for each vertex  $v \in V[G_M]$ 
3     do  $distance[m][v] \leftarrow \infty$ 
4     predecessor[m][v]  $\leftarrow \text{NIL}$ 
5      $distance[m][S] \leftarrow 0$ 
6   else for each vertex  $v \in V[G_M]$ 
7     do if  $\lambda(v) \neq \lambda_{SP}$ 
8       then  $distance[m][v] \leftarrow \infty$ 
9       predecessor[m][v]  $\leftarrow \text{NIL}$ 
    
```

The computing complexity is  $O(\sum_{k \in M} |V_k| |E_k|)$  for the MMGS  $G_M$  and the mode list  $M$ , since the MULTIMODALINITIALIZE takes  $\Theta(|V_k|)$  time and the BELLMANFORDSEARCH takes  $\Theta((|V_k| - 1) |E_k|)$  time in each of the  $N$  passes.

**Theorem 3-1 (Effectiveness of the MMBF)**

Let MMBF be run on a vertex-labeled, non-negative weighted, acyclic, directed MMGS  $G_M = \{G_k = \{V_k, E_k\} | k \in M\}$  where  $M = \langle m_1, m_2, \dots, m_N \rangle$ ,  $N \geq 2$ ,  $m_i \neq m_{i+1}$ ,  $i \in [1, N-1]$  with source  $S$  and cost function set  $C_M = \{c_k : E_k \rightarrow R^+, k \in M\}$ . We can have  $distance[m_i][v] = \delta(S, v, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$  for all vertices  $v \in V_{m_i}$ .

**Proof**

After the first round BELLMANFORDSEARCH on  $G_{m_1}$ ,  $distance[m_1][V_{SP}^{m_1, m_2}] = \delta(S, V_{SP}^{m_1, m_2}, m_1)$ . After the second round MULTIMODALINITIALIZE on  $G_{m_2}$ , all the  $\delta(S, V_{SP}^{m_1, m_2}, m_1)$  are kept as the initial values of the vertices  $v_{SP}^{m_1, m_2} \in V_{SP}^{m_1, m_2}, m_1$ , i. e.,  $distance[m_2][V_{SP}^{m_1, m_2}] = \delta(S, V_{SP}^{m_1, m_2}, m_1)$ . To prove  $distance[m_2][v] = \delta(S, v, \langle m_1, m_2 \rangle)$  after the second round BELLMANFORDSEARCH, we add a virtual source vertex  $S_{m_2}$  directly connecting to the vertices  $v_{SP}^{m_1, m_2} \in V_{SP}^{m_1, m_2}$  in  $G_{m_2}$  which becomes  $G'_{m_2}$  (Fig. 4(a)). The costs of the edges from  $S_{m_2}$  to  $V_{SP}^{m_1, m_2}$  are exactly  $\delta(S, V_{SP}^{m_1, m_2}, m_1)$ . As a result, there are  $|V_{m_2}| + 1$  vertices in  $G'_{m_2}$ , and a normal Bellman-Ford's algorithm should take  $|V_{m_2}|$  iterations of the relaxes of all  $|E_{m_2}| + |V_{SP}^{m_1, m_2}|$  edges. In fact, the status of  $G'_{m_2}$  after MULTIMODALINITIALIZE is exactly the same as that after the initialization and the first iteration of relaxes all the edges in  $G'_{m_2}$ . That means the algorithm just needs to do the remaining  $|V_{m_2}| - 1$  iterations in  $G'_{m_2}$ , which is exactly the work of BELLMANFORDSEARCH in  $G_{m_2}$ . After that, we can get the shortest distance values on all the vertices in  $G_{m_2}$ , i. e.,  $distance[m_2][v] = \delta(S, v, \langle m_1, m_2 \rangle)$ . In general, we can add virtual source vertex  $S_{m_i}$  in the graph of the  $i$ th mode  $i \in [2, N]$ , and the edges whose costs are  $\delta(S, V_{SP}^{m_1, m_i}, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$  from  $S_{m_i}$  to the Switch Points from the last graph to  $G_{m_i}$ . After the MULTIMODALINITIALIZE and BELLMANFORDSEARCH in  $G_{m_i}$ , which is equivalent to the normal Bellman-Ford search in  $G'_{m_i} = \{V_{m_i} \cup \{S_{m_i}\}, E_{m_i} \cup \{S_{m_i} \rightarrow V_{SP}^{m_1, m_i}\}\}$ , we can have  $distance[m_i][v] = \delta(S, v, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$ . ■

**3.2 Multi-modal Dijkstra**

In MMBF algorithm, the key action is the reservation of the distance values on Switch Points during the initialization step in each round of Bellman-Ford searching from the mode  $m_2$  to  $m_n$  through which the multi-modal shortest path can be finally found. This idea can also be applied in Dijkstra search which is a well-tested label-setting algorithm. Against the assumption made in our early study (LIU & MENG 2008) that only double-modal Bellman-Ford has the potential to be generalized to a multi-modal situation while the double-modal Dijkstra search can only find a good but not necessarily the optimal path. With our most recent experiments we have proved the possibility of finding the shortest path using double-modal Dijkstra or its further extension MULTIMODALDIJKSTRA (MMD). The MMD algorithm can be described as follows.

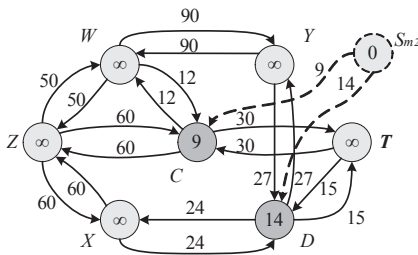
```

MULTIMODALDIJKSTRA( $G_M, C_M, S$ )
1 For  $i = 1$  to  $N$ 
2   do if  $i = 1$ 
3     then MULTIMODALINITIALIZE( $G_M, m_i, NL, S$ )
4     else MULTIMODALINITIALIZE( $G_M, m_i, \lambda_{SP}^{m_1, \dots, m_i}, S$ )
5     DIJKSTRASEARCH( $G_M, m_i, C_M$ )
    
```

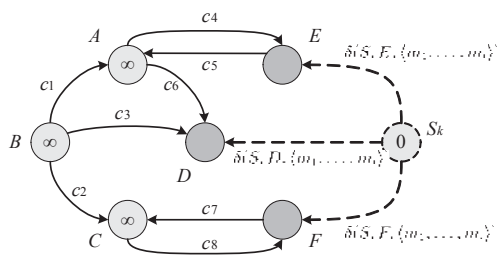
where the MULTIMODALINITIALIZE is the same as in MMBF and DIJKSTRASEARCH works in the following way:

```

DIJKSTRASEARCH( $G_M, m_i, C_M$ )
1  $Q = V(G_{m_i})$ 
2 while  $Q \neq \emptyset$ 
3   do  $u = \text{vertex in } Q \text{ with the minimal } distance[m_i][u]$ 
4   for each vertex  $v \in C_M \setminus \{u\}$ 
5     do if  $distance[m_i][v] > distance[m_i][u] + c_{uv}$ 
6       then  $distance[m_i][v] = distance[m_i][u] + c_{uv}$ 
7       push  $v$  into  $Q$ 
    
```



Graph of mode  $m_2$  (in Fig. 3) added by the virtual source and edges (a)



Graph of mode  $m_i$  added by the virtual source and edges (b)

**Fig. 4:** The effectiveness proof of MMBF by adding virtual sources and the corresponding edges.

When the min-priority queue  $Q$  is implemented as an ordinary array, its computing time complexity is  $O(\sum_{k \in M} |V_k|^2)$  for the MMGS  $G_M$  and the mode list  $M$ , since the MULTIMODALINITIALIZE takes  $\Theta(|V_k|)$  time and the DIJKSTRASEARCH with an ordinary array as its min-priority queue takes  $O(|V_k|^2)$  time in each of the  $N$  passes.

The demonstration of MMD in a double-modal situation with a single source-target pair can also be expressed by Fig. 3. The statuses of the graphs after the two rounds MULTIMODALINITIALIZE are exactly the same as that in MMBF. This means, the statuses of the graphs after DIJKSTRASEARCH are the same as that shown in Fig. 3 (c) and (f).

**Theorem 3-2 (Effectiveness of the MMD)**

MMD, run on a vertex-labeled, non-negative weighted, acyclic, directed MMGS  $G_M = \{G_k = \{V_k, E_k\} | k \in M\}$  where  $M = \langle m_1, m_2, \dots, m_N \rangle$ ,  $N \geq 2$ ,  $m_i \neq m_{i+1}$ ,  $i \in [1, N-1]$  with source  $S$  and cost function set  $C_M = \{c_k: E_k \rightarrow R^+, k \in M\}$ , terminates with  $distance[m_i][v] = \delta(S, v, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$  for all vertices  $v \in V_{m_i}$ .

**Proof**

The basic method used in the effectiveness proof of MMBF can also be used here. In general, we can add a virtual source vertex  $S_{m_i}$  in the graph of the  $i$ th mode  $i \in [2, N]$  and the edges whose costs are  $\delta(S, V_{SP}^{m_{i-1}m_i}, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$  from  $S_{m_i}$  to the switch points from  $G_{m_{i-1}}$  to  $G_{m_i}$ .  $G_{m_i}$  becomes  $G'_{m_i} = \{V_{m_i} \cup \{S_{m_i}\}, E_{m_i} \cup \{S_{m_i} \rightarrow V_{SP}^{m_{i-1}m_i}\}$ . The MULTIMODALINITIALIZE in  $G_{m_i}$  is equivalent to the normal Dijkstra's initialization together with the first round relaxes on the virtual edges emitted from  $S_{m_i}$  in  $G'_{m_i}$ . As a result, each time the execution of MULTIMODALINITIALIZE and DIJKSTRASEARCH in  $G_{m_i}$  is equivalent to the normal Dijkstra's algorithm in  $G'_{m_i}$ . Therefore, when the MMD terminates, we have  $distance[m_i][v] = \delta(S, v, \langle m_1, \dots, m_i \rangle)$ . ■

For any vertex in any  $G_{m_i}$ , the distance value on it indicates the shortest distance from the source in  $G_{m_i}$  to this vertex via the mode sequence  $(m_1, \dots, m_i)$  after MMD. For the classical Dijkstra's algorithm with a single source-target pair input, the performance can be considerably improved by terminating the search

when the target is reached. This improvement can also be used in MMD with a single source-target pair. If we are only interested in the shortest path between source and target via mode sequence  $M$ , the search process can be terminated and continued into the next graph when it has reached all the  $v_{SP}^{m_i m_{i+1}} \in V_{SP}^{m_i m_{i+1}}$  from  $G_{m_i}$  to  $G_{m_{i+1}}$  and be finally terminated when it has reached the target in  $G_{m_N}$ . In this case, the original MULTIMODALDIJKSTRA becomes MULTIMODALDIJKSTRA-TARGET depicted as follows.

```

MULTIMODALDIJKSTRA-TARGET(G_M, G_M, C_M, S, T)
1 for i ← 1 to N
2   do if i = 1
3     then MULTIMODALINITIALIZE(G_M, m_1, S, S)
4     else MULTIMODALINITIALIZE(G_M, m_i, v_{SP}^{m_{i-1}m_i}, S)
5   if i = N
6     then DIJKSTRASEARCH-TARGET(G_M, m_N, S, C_M, T)
7     else DIJKSTRASEARCH-TARGET(G_M, m_i, v_{SP}^{m_{i-1}m_i}, C_M, T)
    
```

where the DIJKSTRASEARCH should be changed into DIJKSTRASEARCH-TARGET:

```

DIJKSTRASEARCH-TARGET(G_M, m_i, v_{SP}^{m_{i-1}m_i}, T)
1 Q ← V_{G_{m_i}}
2 while Q ≠ ∅
3   do a ← vertex in Q with the minimal distance[m_i][a]
4   remove a from Q
5   if a = m_N
6     then if a = T
7           then return
8     else if a ∈ V_{SP}
9           then remove a from V_{SP}
10          if v_{SP} = ∅
11            then return
12   for each vertex u ∈ Adj(a)
13     do if distance[m_i][a] + c_{a,u} < distance[m_i][u]
14         then distance[m_i][u] ← distance[m_i][a] + c_{a,u}
15         predecessor[m_i][u] ← a
    
```

This improvement by terminating the searching process ahead of time can not be applied in MMBF because it is based on label-correcting method which can get the shortest distance value on all the vertices only after the very last iteration.

According to our complexity analysis, MMD with an ordinary array as its min-priority queue is faster than MMBF. MMD-T should be faster than MMD practically although in the worst case they have the same running time. The performance differences between MMBF and MMD were verified in our experiments described in section 4. The average improvement of MMD-T can also be seen from the results.

**4 Experiments**

We implemented the two proposed algorithms in C# and developed a prototype system by

Visual Studio 2005 Professional. The programs run on a PC with a 2.2 GHz Intel Core2 Duo CPU and 2 GB physical memory under Windows XP Professional SP3. Our tests were conducted on the spatial datasets of a portion

of Munich from two different sources. One is OpenStreetMap (OSM) which has been enriched with Switch Point information, the other is a navigation dataset provided by United Maps Co., Ltd. (UM) which integrates the

**Tab. 2:** The size of test networks.

Data source	Area of coverage (width, length)*	Mode	V	E	E / V
UM	(20.34, 26.18)	<i>D</i>	19471	44979	2.31
		<i>W</i>	20516	57694	2.81
	(9.829, 11.00)	<i>U</i>	64	132	2.06
OSM	(4.970, 4.663)	<i>D</i>	4807	9125	1.90
		<i>W</i>	9077	22482	2.48

\* The unit of width and length is km.

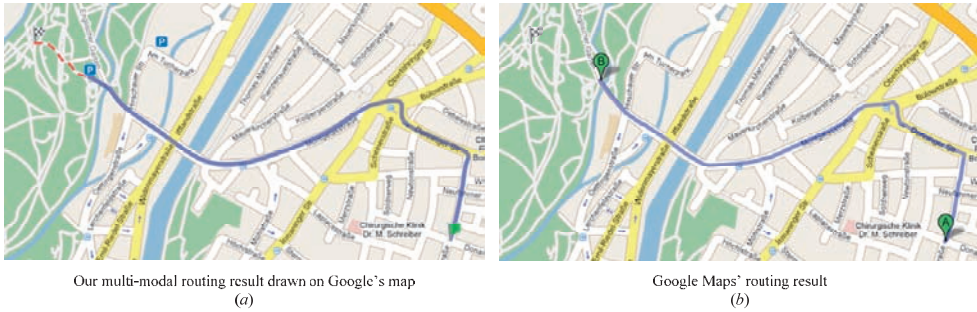
**Tab. 3:** Computing speed of MMBF and MMD.

Data source	Mode list	MMBF(s)	MMD(s)	
UM	1-modal	<i>D</i>	354.9	
		<i>W</i>	536.7	
		<i>U</i>	0.003125	
	2-modal	$\langle D, W \rangle$	862.7	24.81
		$\langle W, U \rangle$	467.3	12.21
		$\langle U, W \rangle$	467.7	13.13
	3-modal	$\langle D, W, U \rangle$	817.1	25.11
		$\langle W, U, W \rangle$	936.5	25.57
	4-modal	$\langle D, W, U, W \rangle$	1287	37.98
	OSM	1-modal	<i>D</i>	15.99
<i>W</i>			76.42	
2-modal		$\langle D, W \rangle$	90.78	3.013

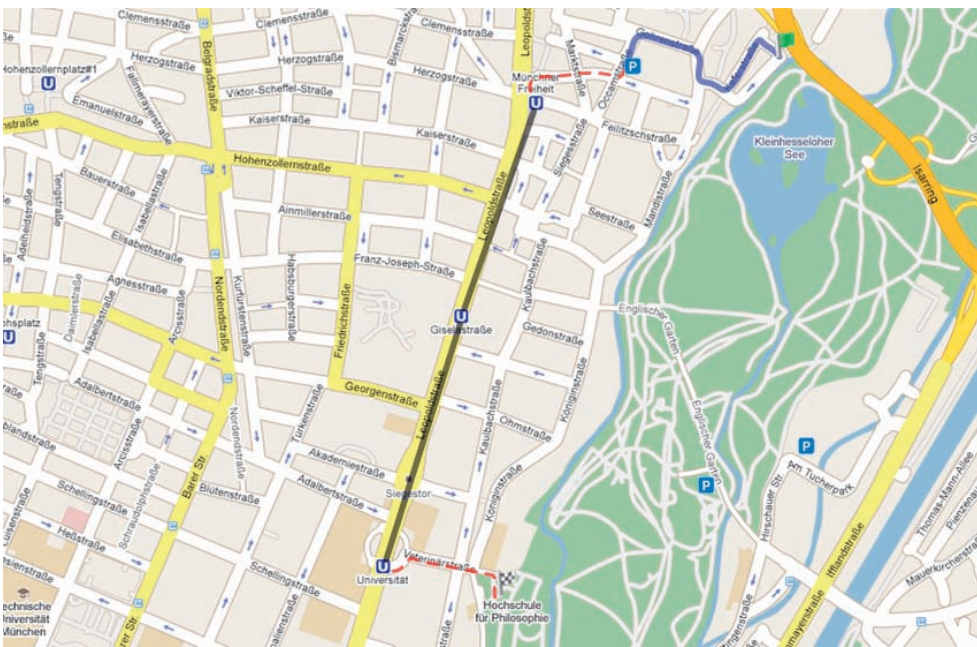
**Tab. 4:** Computing speed of MMD and MMD-T on UM dataset.

Mode list	MMD (s)	MMD-T (s)	Improvement. ratio (%)	
2-modal	$\langle D, W \rangle$	23.70	16.93	40.0
	$\langle W, U \rangle$	14.96	12.02	24.5
	$\langle U, W \rangle$	12.70	9.066	40.1
3-modal	$\langle D, W, U \rangle$	23.75	19.27	23.2
	$\langle W, U, W \rangle$	23.83	19.91	19.7
4-modal	$\langle D, W, U, W \rangle$	35.99	27.65	30.2
Avg: 29.6				





**Fig. 5:** Comparison between the routing results of our prototype system and Google Maps.



**Fig. 6:** A multi-modal routing result with three modes.

information from Navteq and ATKIS (the official topographic cartographic information system in Germany). The two datasets differ in the areas they cover as well as the size of their corresponding networks.

The basic information of the two datasets is listed in Tab. 2. There are three transportation modes of network in UM dataset: motorized ways denoted by  $D$ , pedestrian ways denoted by  $W$  and underground lines denoted by  $U$ . In OSM dataset, there are  $D$  and  $W$ .

The experiments consist of two groups: one is the test of single-source multi-modal shortest path algorithms for the purpose of compar-

ing the performances between MMBF and MMD on the two datasets; the other is the test of single source-target-pair MMD to investigate how much performance improvement can be made by MMD-T. For a given combination of dataset, mode list and multi-modal shortest path algorithm, an average running time of 100 s execution of MMD with randomly selected source (and target for MMD-T) and 10 s for MMBF was recorded. The reported running times do not include data input or log output. The SPM (or, more precisely, SPM-T) used for the experiment is shown in Tab. 1 in Section 2. It should be noticed that the Dijk-

stra search can reveal considerably different computing performance if it is applied in a different data structure. For this reason, we used an ordinary array as the min-priority queue without using any built-in data structures or methods provided by .net framework class library. In this way, our test results are independent of the internal optimization made by Microsoft.

The experimental results of the first group are listed in Tab.3 which shows that the MMBF is much slower than MMD, which has confirmed our analysis of theoretical complexities.

The experimental results of the second group are listed in Tab. 4 which shows that the average improvement made by MMD-T over MMD amounts to 29.6%.

Fig. 5 shows the routing result of our algorithm in comparison with Google's route from a crossing of motorized roads to a pedestrian junction in the *English Garden*. The destination is shown by a checkered flag. We can see that the car segments (blue solid line) of the two routes are exactly the same. However, the pedestrian segment (red dashed line) in our route is missing in Google's route. The reason for that is in Google Maps (and almost all the currently available routing systems) only one travel mode can be selected, e. g., either by car or by foot, but not both. Our routing algorithm allows the car-pedestrian combination with an appropriate parking place as the Switch Point.

Fig. 6 shows another multi-modal routing result calculated by our algorithms. Three modes are involved in the route: car driving (blue solid line), walking (red dashed line), underground train (black solid line) and walking again.

## 5 Conclusions and Outlook

The multi-modal route planning problem addressed in this paper originates from the transportation field. However, we developed a multi-modal routing strategy in a general sense, thus opened up its applicability for the fields beyond transportation. We proposed a data model with Switch Point as the core concept and gave the formal description of the multi-modal shortest path based on Switch Point.

Two algorithms MMBF and MMD were developed on the basis of label-correcting and label-setting algorithms respectively. They reveal the complexities of  $O(\sum_{k \in M} |V_k| |E_k|)$  and  $O(\sum_{k \in M} |V_k|^2)$  respectively. The effectiveness of the algorithms has been proved, which can ensure that the found paths are the shortest in terms of distances or weights. Our experiments were conducted on real transportation networks from two different data sources. MMBF is much slower than MMD, and MMD-T runs 29.6% faster than MMD on average in case of the single source-target pair. From the practical point of view, the MMBF is inefficient for real-time applications although it is able to find the multi-modal shortest path.

The conducted experiments have shown the convincing process of solving a multi-modal route planning problem. However, multi-modal routing in our real life can take various far more complicated forms which will challenge the computing power of routing algorithms. Therefore, our work for the next steps will focus on two points:

1) *To explore the further potential of computing performance of the routing algorithms*

The multi-modal routing planning algorithms introduced in this paper are based on the two earliest and well-tested shortest path algorithms. In fact, some researchers have proposed improved versions of mono-modal shortest path algorithms (GALLO & PALLOTTINO 1988, CHERKASSKY et al. 1996). According to the evaluation done by (ZHAN & NOON 1998) using real road networks and the comparison work between label-setting and label-correcting algorithms for computing single source-target pair shortest paths by (ZHAN & NOON 2000), TWO-Q is the most efficient routing algorithm for shortest path finding in road networks (PALLOTTINO 1984). We attempt to implement a new multi-modal shortest path algorithm based on TWO-Q and test its performance in the near future.

2) *To take the knowledge from specific field into consideration.*

There is a lot of context knowledge from the transportation field which should be embedded in the route planning. For example, the

path should be “viable” which we mentioned in Section 2, the traffic rules in the transportation networks, the cost when changing the mode, the dynamic traffic information, etc. We will verify and specify our approach on multi-modal transportation networks enhanced with knowledge.

## Acknowledgements

The research work is sponsored by United Maps Co., Ltd. The high-quality and multi-modal navigation dataset is jointly created by United Maps Co., Ltd. and Department of Cartography at Technische Universität München in the frame of a project on data integration. The authors would like to thank Mr. Hongchao Fan who gave useful suggestions about improving this paper.

## References

- BAJAJ, C.P., 1971: Some Constrained Shortest-Route Problems. – *Mathematical Methods of Operations Research* **15** (1): 287–301.
- BARRETT, C., BISSET, K., HOLZER, M., KONJEVOD, G., MARATHE, M. & WAGNER, D., 2008: Engineering Label-Constrained Shortest-Path Algorithms. – *Algorithmic Aspects in Information and Management*: 27–37.
- BARRETT, C., JACOB, R. & MARATHE, M., 1998: Formal Language Constrained Path Problems. – *Algorithm Theory — Swat’98*: 234–245.
- BELLMAN, R., 1958: On a Routing Problem. – *Quarterly of Applied Mathematics* **16** (1): 87–90.
- BIELLI, M., BOULMAKOU, A. & MOUNCIF, H., 2006: Object Modeling and Path Computation for Multimodal Travel Systems. – *European Journal of Operational Research* **175** (3): 1705–1730.
- BOARDMAN, B.S., MALSTROM, E.M., BUTLER, D.P. & COLE, M.H., 1997: Computer Assisted Routing of Intermodal Shipments. – 21st International Conference on Computers and Industrial Engineering: 311–314.
- BOUSEDJRA, M., BLOCH, C. & EL MOUDNI, A., 2004: An Exact Method to Find the Intermodal Shortest Path (Isp). – *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*: 1075–1080.
- CHERKASSKY, B., GOLDBERG, A. & RADZIK, T., 1996: Shortest Paths Algorithms: Theory and Experimental Evaluation. – *Mathematical Programming* **73** (2): 129–174.
- COAST, S., 2004: Openstreetmap Project. – [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)
- CORMEN, T.H., LEISERSON, C.E., RIVEST, R.L. & STEIN, C., 2001: *Introduction to Algorithms*. – The MIT Press and McGraw-Hill.
- COUCKUYT, J.D., MCGRATH, T.S. & SUTANTO, H., 2006: Multi-Modal Navigation System and Method. – United States Patent, Application 11/058,057.
- DELLING, D., SANDERS, P., SCHULTES, D. & WAGNER, D., 2009: *Engineering Route Planning Algorithms*. – *Algorithmics of Large and Complex Networks*. Springer.
- DEO, N. & PANG, C.-Y., 1984: Shortest-Path Algorithms: Taxonomy and Annotation. – *Networks* **14** (2): 275–323.
- DIJKSTRA, E.W., 1959: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. – *Numerische Mathematik* **1** (1): 269–271.
- FRANK, A.U., 2008: Shortest Path in a Multi-Modal Transportation Network: Agent Simulation in a Product of Two State-Transition Networks. – *KI – Künstliche Intelligenz* **3**: 14–18.
- GALLO, G. & PALLOTTINO, S., 1988: Shortest Path Algorithms. – *Annals of Operations Research* **13** (1): 1–79.
- HOCHMAIR, H.H., 2008: Grouping of Optimized Pedestrian Routes for Multi-Modal Route Planning: A Comparison of Two Cities. – *The European Information Society*, Springer, Berlin: 339–358.
- HOEL, E.G., HENG, W.-L. & HONEYCUTT, D., 2005: High Performance Multimodal Networks. – *Advances in Spatial and Temporal Databases*, Springer, Berlin: 308–327.
- LIU, L. & MENG, L., 2008: Algorithmic Concerns of Multi-Modal Route Planning. – 5th International Symposium on LBS & TeleCartography, 26–28 November, Salzburg, Austria.
- LOZANO, A. & STORCHI, G., 2001: Shortest Viable Path Algorithm in Multimodal Networks. – *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **35** (3): 225–241.
- LOZANO, A. & STORCHI, G., 2002: Shortest Viable Hyperpath in Multimodal Networks. – *Transportation Research Part B: Methodological* **36** (10): 853–874.
- MODESTI, P. & SCIOMACHEN, A., 1998: A Utility Measure for Finding Multiobjective Shortest Paths in Urban Multimodal Transportation Networks. – *European Journal of Operational Research* **111** (3): 495–508.
- PAJOR, T., 2009: *Multi-Modal Route Planning*. Diplomarbeit, Karlsruhe, Universität Karlsruhe.
- PALLOTTINO, S., 1984: Shortest-Path Methods: Complexity, Interrelations and New Propositions. – *Networks* **14** (2): 257–267.

- REHRL, K., BRUNTSCH, S. & MENTZ, H.-J., 2007: Assisting Multimodal Travelers: Design and Prototypical Implementation of a Personal Travel Companion. – *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **8** (1): 31–42.
- SOUTHWORTH, F. & PETERSON, B.E., 2000: Intermodal and International Freight Network Modeling. – *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **8** (1-6): 147–166.
- ZHAN, F.B. & NOON, C.E., 1998: Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks. – *Transportation Science* **32** (1): 65–73.
- ZHAN, F.B. & NOON, C.E., 2000: A Comparison between Label-Setting and Label-Correcting Algorithms for Computing One-to-One Shortest Paths. – *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* **4** (2): 1–11.
- ZILIASKOPOULOS, A. & WARDELL, W., 2000: An Intermodal Optimum Path Algorithm for Multimodal Networks with Dynamic Arc Travel Times and Switching Delays. – *European Journal of Operational Research* **125** (3): 486–502.
- ZOGRAFOS, K.G. & ANDROUTSOPOULOS, K.N., 2008: Algorithms for Itinerary Planning in Multimodal Transportation Networks. – *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **9** (1): 175–184.

Address of the Authors:

M.Eng. LU LIU, Prof. Dr.-Ing. LIQUU MENG, Technische Universität München, Department of Cartography, D-80333 Munich, Germany, Tel.: +49-89-2892-2586, -2825, Fax: +49-89-2809573, e-mail: liu.lu@bv.tum.de, meng@bv.tum.de

Manuskript eingereicht: Mai 2009  
Angenommen: Juli 2009

# Visual Bandwidth Selection for Kernel Density Maps

JUKKA M. KRISP, STEFAN PETERS, CHRISTIAN E. MURPHY & HONGCHAO FAN, München

**Keywords:** Kernel Density, Visualization, Visual Analytics, Geostatistics, Kernel Bandwidth, Cartography

**Summary:** Within this paper we investigate the challenge to find an appropriate bandwidth in kernel density estimation. Kernel density estimation methods can be used in visualizing and analyzing spatial data, with the objective of understanding and potentially predicting event patterns. Our aim is to provide a computational tool to visually select the bandwidth parameter and to visually investigate the effect of different parameters within the kernel density calculations. With this tool the user is able to visually find the most appropriate bandwidth for the particular dataset and scale. The slider-tool includes a graphical user interface and can read point datasets. A specific number of kernel density maps are generated by using a range of bandwidths. In the graphical interface these kernel density maps can be drawn near real-time while the user changes the respective bandwidth using a slider tool. This helps to determine which bandwidth setting fits the needs and provide an appropriate visualization of a particular point dataset.

**Zusammenfassung:** *Visuelle Radius Festlegung für Kernel Dichte Abschätzungen.* In dieser Arbeit untersuchen wir die Möglichkeiten, um einen angemessenen Radius in der Kernel-Dichte Schätzung zu erhalten. Kernel-Dichte Schätzung Methoden können in der Visualisierung und Analyse räumlicher Daten zum Verständnis und zur Vorhersage von räumlichen Mustern dienen. Unser Ziel ist es, ein Computer-Werkzeug zur visuellen Parameter Bestimmung zu entwickeln. Die Radien verschiedener Kernel werden visuell geprüft und können experimentell untersucht werden. Mit diesem Werkzeug kann der Anwender den am besten geeigneten Radius für den jeweiligen Datensatz bestimmen. Das Schieberegler-Werkzeug beinhaltet eine grafische Benutzeroberfläche und kann Punktdatensätze einladen. Anhand statistischer Parameter des verwendeten Punktdatensatzes wird eine bestimmte Anzahl der Kernel Dichte Karten mit verschiedenen Radien vorbereitet. In der grafischen Benutzeroberfläche lassen sich diese Kernel-Dichte-Karten „in real-time“ darstellen. Der Benutzer selektiert verschiedene Radien mit einem Slider-Tool, wobei die jeweiligen Kernel Dichte Karten nacheinander abgebildet werden. Dadurch lässt sich der optimale Radius zur zweckdienlichen Visualisierung von einem bestimmten Datensatz finden.

---

## 1 Introduction

Geographic information systems use different methods to display spatial information, and within this paper we investigate new tools to enhance the visual clustering of data. On a general level the aim is to detect spatial patterns in data and formulate hypotheses based on the clusters of point data. Therefore we need to link numerical and graphical procedures with a map. We try to identify where

specific clusters are located on the map and visualize alternatives to visually cluster spatial data.

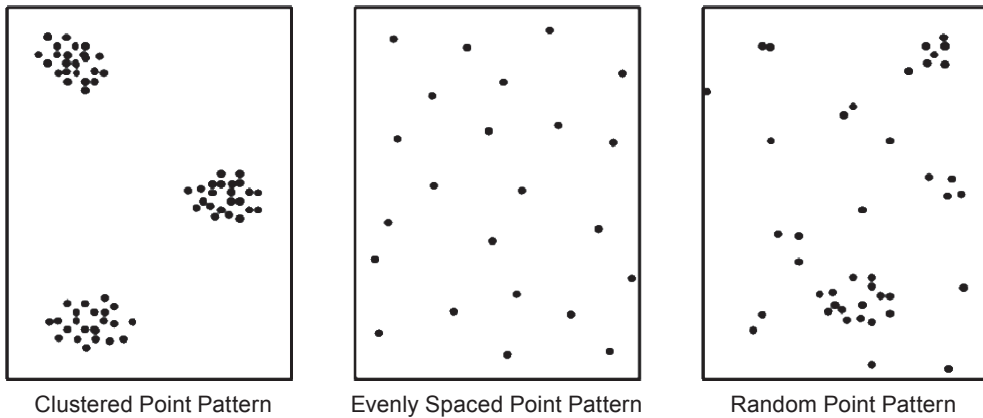
From a theoretical perspective, this relates to the concept of Geovisualization, which provides theory, additionally methods and tools for the visual exploration, analysis, synthesis and presentation of data that contain geographic information (MACÉACHREN & KRAAK 2001). From a broader perspective it includes the concept of exploratory spatial data analysis to detect spatial

properties of data. There are different types of users who use geovisualization systems differently and bring different knowledge to the decision-making process. The use of these tools should support the interaction between different actors, e. g., decision-makers, the public and experts. The communication between these actors supports the development of models and the creation of task-specific maps. Visualization is a key point in the mediation of content and decisions. Therefore, the choice of visualization methods, the orientation of the visualization on the geographic area, as well as the selection of the geographic area is of high importance. The overall goal is an adequate communication for example to gain political support for a certain decision and enhance communication between experts from various fields. It is essential to provide visualization techniques as a means of exploring spatial data in order to detect features of interest contained in them as suggested by HEARNshaw & UNWIN (1994). As VIRRANTaus et al. (2009) state, the impact of the visualization on knowledge acquisition (does the map present unknown information, or is it used to display and confirm previously known information?), its role as an investigative tool (is the map for private study, or is it part of a more public decision making process?), and its didactic capabilities (is the map being used interactively or is being read passively?) can be researched through models of visualization. In this paper the density map is regarded as a tool to confirm and depict previously known information.

Point densities can be displayed as isarithmic maps. An isarithmic map is created by interpolating a set of isolines between sample points of known values (SLOCUM et al. 2001, SLOCUM et al. 2005). In the special case of handling the locations of events as true point data the term isometric map is used. *Kernel density estimation* (KDE) can supply point densities from a set of point locations. For that reason we choose to display point densities as isometric maps using *kernel density estimation* (KDE) method. In these isometric maps the isolines show a curve in which the point density value is constant. Within this paper we investigate kernel density estimation methods which are included in a variety of applications: point data smoothing; creation of continuous surfaces from point data in order to combine these with other data-

sets that are continuous/in raster form; probability distribution estimation; interpolation or hot spot detection. It is important to understand visualization techniques as a means to explore geographic data and to detect correlations in spatial data. Methods for kernel density estimates have a wide variety of applications. These include the estimation of probability distributions and the interpolation of point data for hot spot detection. Kernel density estimation can also be used in the visualization and analysis of temporal patterns, such as crime events at different times of day and / or over different time periods. The goal is an understanding and prediction of potential patterns in the available data point. Previous research includes work done by LEVINE (2004), who provides an excellent discussion of the various techniques and options, including alternative methods for bandwidth selection (CHIU 1991), together with examples from crime analysis, health research, urban development and ecology (LEVINE 2004, SMITH et al. 2008). Research by KRISP & ŠPATENKOVÁ (2009) investigated the possibility to visually review the significance of a bandwidth selection for the fire & rescue services resource planning. Bandwidth selection, as explained in the following, is often more of an art than a science as suggested by SMITH et al. (2008).

Historically, Point Pattern Analysis was introduced for scientific applications in the early 1920s. GLEASON (1920) and SVEDBERG (1922) used Point Pattern Analysis (PPA) to statistically describe their botanical and ecological work. Since then many different science fields such as epidemiology, criminology, archaeology or seismology use PPA. For instance, one can conduct a "Hot spot" analysis to have a better understanding of locations of crime. A Hot Spot is a concentration of point events within a limited area. This can help the police, for example, to make decisions where to intensify daily patrols. Point Pattern Analysis involves the ability to compare and describe point patterns and test whether there is a significant difference to a random spatial point pattern. A point pattern is a set of locations of point events (O'SULLIVAN & UNWIN 2003). There are three main types of point patterns which can be analyzed, clustered, evenly spaced and random spatial point patterns. In a clustered



**Fig. 1:** Types of Point Patterns in practice.

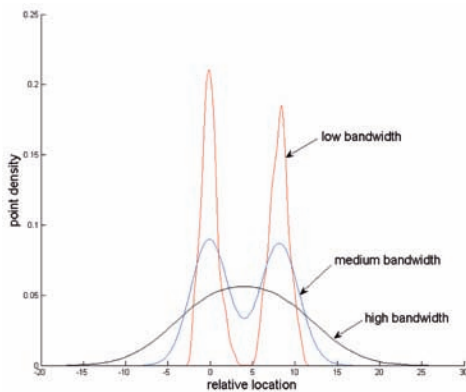
point pattern the events are grouped in regions of the study area. Because of the spatial dependency in a clustered pattern one can speak of a positive auto-correlation. An evenly spaced point pattern is a point pattern with approximately equal distances between neighboring points. A point's neighbor is the nearest other point located to itself. Approximately equal distances of all neighboring points imply that the pattern is negatively correlated. The random spatial point pattern is used as a theoretical point pattern to be compared with an empirical point pattern. The events in a random spatial point pattern are normally distributed. There is no interaction between the points and they are therefore not auto-correlated. One way to define an independently and uniformly set of points is using a homogeneous *Poisson* distribution.

Many different analyzing methods have been developed in the past. A popular PPA method is kernel density estimation. For kernel density estimation a series of estimations are made over a grid which is placed on the entire point pattern. Every estimation shows the intensity at a certain location. Therefore kernel density estimation detects the highs and lows of point densities of the pattern and is useful for detecting hot spots. To make a kernel density estimation the user has to select the kernel function and a bandwidth for the estimation. Of a number of different kernel functions the normal distribution function is the most commonly used (DIGGLE 2003). Quite logically, the function weighs closer points more than distant points. The normal distribu-

tion function extends then in all directions to infinity. This gives the advantage of a throughout covered study area that shows the intensity at all locations. Generally it is difficult to compare point density values in different datasets, because the number of points and the size of the study area may differ greatly. This influences the results of the calculations. The definition of “high” and “low” point densities needs to be considered because those values differ greatly depending on the dataset, the scale of the map and the object to be studied.

## 2 Problem Statement and Aim

We suggest that looking at a point dataset as a continuous surface by using kernel density enhances the identification of clusters is of particular importance. The choice of the bandwidth affects the kernel density estimation strongly. When the kernel density estimation is carried out with a small bandwidth, the estimation interacts with individual events. For this reason a user has to experiment with different bandwidths to visually find out which results make most sense. A smaller bandwidth will produce a finer density estimate with all little peaks and valleys. A larger bandwidth will result into a smoother distribution of point densities (cf. Fig. 2). There are only few rules considered how to choose a bandwidth by other methods than by visual rating (VENABLES & RIPLEY 1997).

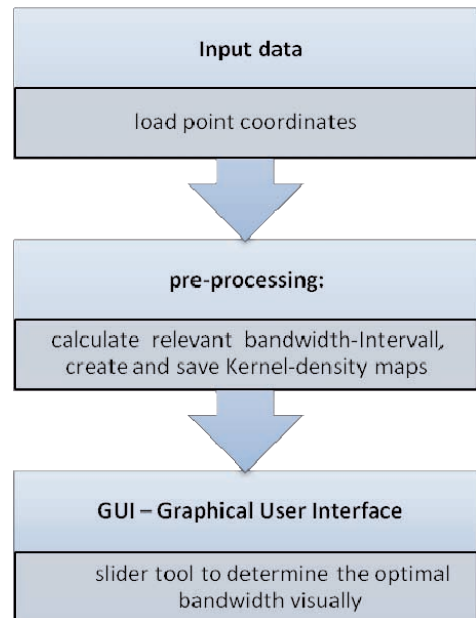


**Fig. 2:** Kernel Density with different bandwidths.

In many cases a domain-expert has specific knowledge about the issue at hand. The expert has a certain idea of a density surface in mind and intends to depict this surface in a density map. The expert's knowledge can be utilized to determine the optimal parameters for a density calculation. The challenge is to find an appropriate bandwidth in KDE. For every KDE and its resulting kernel density map two parameters are fundamental and have to be specified: cell size and bandwidth. In existing research publications the choice of bandwidth is taken predominantly as the result of experimental studies by visually comparing different bandwidth setting, e. g., in WOLFF & ASCHE (2009). However, the lack of rules and standards concerning bandwidth parameterisation prompts SMITH et al. (2006). Our aim is to provide a computational tool to visually select the bandwidth parameter and to visually investigate different parameters within the kernel density calculations. This will help to determine which bandwidth settings would fit the needs and provide an appropriate visualization of a particular point dataset. Therefore a computational tool is needed to display the density map based on a dynamically changing bandwidth and output grid size.

### 3 Applied Method and Test Data

The flowchart in Fig. 3 shows the methodological steps to visually determine the kernel



**Fig. 3:** Flowchart to visually determine the kernel density bandwidth.

density bandwidth for density estimation for an exemplary point dataset.

#### Input Data

As a study area we have selected an area in the centre of Munich, Germany, containing 1412 points in an area roughly 1 km × 1.5 km. The exemplary dataset includes points representing vegetation locations, for example for trees and bushes. This is a partly artificial point dataset for a showcase purpose. It does serve the purpose of studying the process to find an optimal bandwidth and acquire the most favorable density map for this study area. The entire data set is used for input. O'SULLIVAN & UNWIN (2003) stated that it is required to include a complete data set and not a sample data set to analyze point patterns.

#### Pre-Processing & Determining the Relevant Bandwidth Interval

To provide a reasonable performance while using the slider-tool, a pre-processing of the kernel density maps is required. On the one hand a range of relevant bandwidth recording to the input data set has to be calculated. From each determined bandwidth then different



kernel density maps with different resolutions were processed and saved as .png image files. This pre-processing is required, because the calculation of kernel density is very time-consuming in case of large dataset, especially on demand of a large bandwidth and high resolution for the output map. For example, a resolution of  $400 \times 400$  pixel the processing of a kernel density-map containing circa 2000 points requires around 15 minutes computing time (Standard Windows PC: 16 GB RAM, CPU  $2 \times 1.87$  GHz). In contrast to this, the pre-processed maps can be loaded and drawn on the screen near real time. Eventually technological improvements may make this aspect of the application work obsolete in the near future as the maps may be computed on-the-fly.

Which bandwidths are relevant for varying point datasets? Which are the minimal and maximal bandwidths to determine the optimal one by visual observation of the kernel density maps? These questions were discussed in this work. In existing research literature of kernel density estimation, SILVERMAN worked on the issue of determining the optimal bandwidth for a certain case, before making the actual density computation. He suggested the calculation formulated in the following equation 1 (SILVERMAN 1986).

**Formula based on (SILVERMAN 1986):**

$$bw\_optimal = 1.06 \cdot \min\left(\sqrt{\text{var}(P)}, \frac{\text{IQR}(P)}{1.34}\right) \cdot n^{\frac{1}{5}} \quad (1)$$

With:

- $bw\_optimal$  = optimal bandwidth
- $P$  = dataset: point coordinates
- $\text{IQR}(P)$  = interquartile range (the distance between the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> quartile) of  $P$
- $\text{var}(P)$  = variance of  $P$
- $n$  = number of points (length of  $P$ )

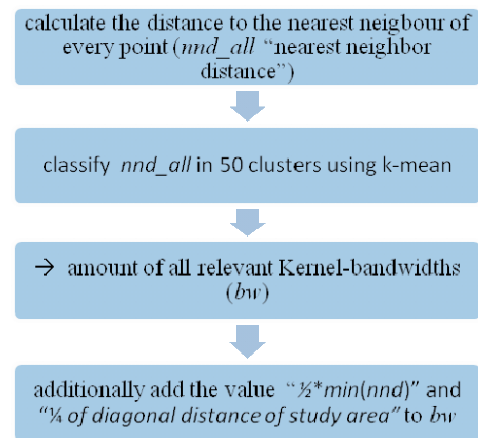
SILVERMAN’S formula for calculating an optimal bandwidth has two outcomes, one optimal radius for the x-coordinates and another one for the y-coordinates. Thereby it takes either the variance (var) or the interquartile range (IQR) of the coordinates to the basis, depending on which one is smaller.

For a visual determination of the kernel bandwidth SILVERMAN’S calculation could be used as a starting point for defining a relevant bandwidth interval. But this idea does not consider the point distribution or their distance to the closest neighbor.

In some cases the majority of the points are located densely in one or only some small sectors of the area of investigation. The remaining points are sparsely distributed. The calculation based on SILVERMAN (1986) gives a good solution for areas with densely distributed points. Alternatively an adaptive kernel can be applied. The following Fig. 4 outlines the main steps of determining the relevant bandwidth-interval:

The nearest neighbor distance turned out to be an adequate parameter to determine the bandwidth. First the nearest neighbor distance (spherical) of each point was calculated ( $nnd$ ).

In the next step the amount of all these calculated distances was classified in 50 clusters using the k-means-algorithm. K-mean-clustering was used, because it takes the value-differences into account. The resulting 50 values represent the range of the relevant kernel bandwidths. Additionally the value half of the minimal bandwidth was added to consider a smaller bandwidth than the minimal nearest neighbor distance, for the case of evenly spaced points. Furthermore the value quarter of the maximum nearest neighbor distance was added, to consider a bandwidth larger



**Fig. 4:** Flowchart showing the calculation of relevant bandwidth-interval.

than the maximum nearest neighbor distance, for the case of clustered points in only one section of the study area. This gives the possibility of a wider range for the relevant kernel bandwidth shown in equation 2.

Formula to calculate the amount of the relevant kernel bandwidth:

$$[bw] = \left[ \frac{1}{2} \min(nnd), \left[ k\_mean(nnd) \right], \max(nnd), \frac{1}{4} dist \right] \quad (2)$$

With:

bw = bandwidth

nnd = nearest neighbor distance

k\_mean = 50 values resulting from a k-mean clustering of all nnd-values

dist = diagonal distance of study area

### Kernel Density Map Output and Classification

The calculation of the pixel kernel density values is based on a bimodal Gaussian distribution. The density value for every pixel results from the addition of all kernels laying over this particular pixel. The estimation is shown in equation 3 based on SCOTT (1992):

#### Formula based on (SCOTT 1992):

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{N \cdot h} \sum_{i=1}^N K(u) \quad \text{with} \quad u = \frac{x - x_i}{h},$$

$$\text{Gaussian-Kernel: } K_G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) \quad (3)$$

With:

$\hat{f}_h(x)$  = general Kernel density function

KG = standard Gaussian function

h = smoothing parameter (bandwidth)

$x_1, x_2, \dots, x_N$  = points, placed within the kernel radius h

Input values of this function are the point coordinates resolution and the kernel bandwidth. The function performs a bivariate Gaussian kernel estimation. The result is a kernel density map stored in a raster image which can be classified differently according to the values in each raster cell. Image classifications (clustering) are based on feature characteristics, for

example color or shape. Image classifications basically differ depending on parametric or non-parametric, hard or soft, pixel by pixel, section by section; monitored or unsupervised classification. Parametric classification methods assume a parameterized data distribution, for example a Gaussian-distribution. In case of unsupervised classification methods the user merely determines the number of the classes in which the data have to be divided. There is no need for samples. The cluster algorithms lead to the separation of classes based on statistical parameters. The assignment of spectral classes to information classes results after the classification. The conditional intervention often leads to undesirable overlap between the information classes. In case of unsupervised classification methods the user determines the number of the classes as well as their spectral occurrence in the multispectral feature space. Thereby an analysis of samples leads to pre-determined features. The separation of these spectral classes is done on the basis of spectral-geometric or statistical classifiers. Based on the definition of the spectral classes before the classification, an automated assignment by the classification algorithm is done (KÖHN 1996).

There are numerous methods and algorithms for image classifications. One simple method to separate a raster image into regions is the use of a grey-tone histogram for determining the regions (ALBERTZ & WIGGENHAGEN 2008). For the assignment of the different grey-scales different algorithms are used, among others the natural-breaks algorithm (also referred to as Jenks classification), the Quantile- algorithm or the separation into equal intervals.

An approved algorithm for image classification is the k-means clustering. But there is a number of other classification methods like Maximum-Likelihood classification, the Group-average clustering or the classification method based on the minimum distance. More detailed information is given by JÄHNE (2002). Which classification method is finally chosen depends on the purpose to be achieved and on the characteristics of the data. There is no "right" or "correct" decision for choosing a certain method. With every of the 52 pre-defined kernel bandwidths in each case 5 kernel

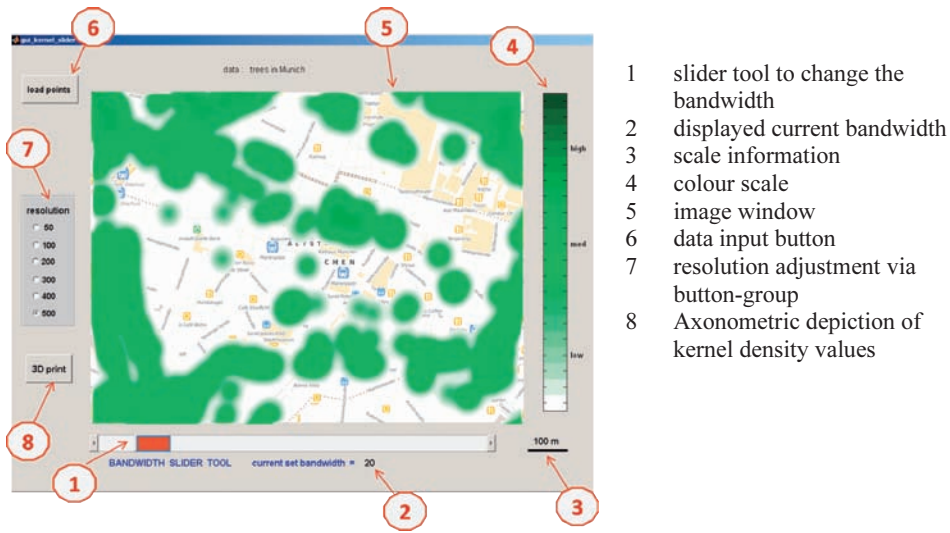


Fig. 5: Graphical User-Interface: kernel-slider-tool.

density maps with different resolutions were processed and saved, altogether 260 maps. The lowest resolution is  $50 \times 50$  pixel, whereby 1 pixel refers to 22 m. The following contains  $100 \times 100$  pixel, then  $200 \times 200$  pixel,  $300 \times 300$  pixel up to the maximum of  $400 \times 400$  pixel, whereby 1 pixel refers to 2.75 m. 20 colour-classes were used for the colour-classification of the created kernel density maps. A green colour scale was applied. Dark green pixels refer to very high density values and light-green coloured pixel stand for low density values.

#### 4 Resulting Tool for Visual Determination of an Adequate Kernel Bandwidth

A visual determination of an adequate kernel bandwidth for kernel density estimations can be done best using a Slider-tool. In this work a slider-tool was developed using Matlab GUI (graphical user interface) as shown in Fig. 5. By changing the bandwidth slider interactively the related pre-processed kernel density map will be drawn on the image-window. Likewise the resolution can be changed using the resolution-button-group, while the kernel density map will be actualized. This way the influence of the kernel bandwidth to the kernel

density estimation can be demonstrated clearly and an appropriate bandwidth can be determined visually. In the case of our test data in the background of the kernel density map an Open-Street-map of the associated area was drawn. The kernel density map was shown in the same screen-frame for each resolution. Furthermore the color range and the scale information are shown in the interactive user interface.

Additionally in Fig. 5 a “3D-print” button is to see on the top-left corner. It activates an axonometric depiction of kernel density values using the current settings of bandwidth and

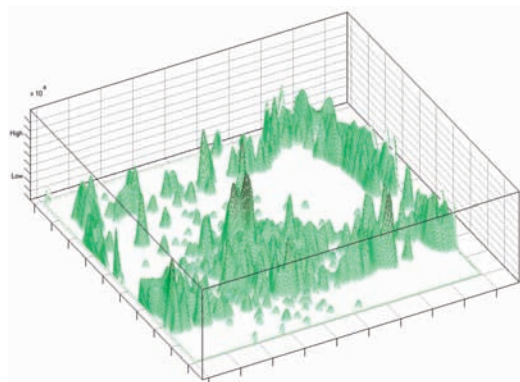
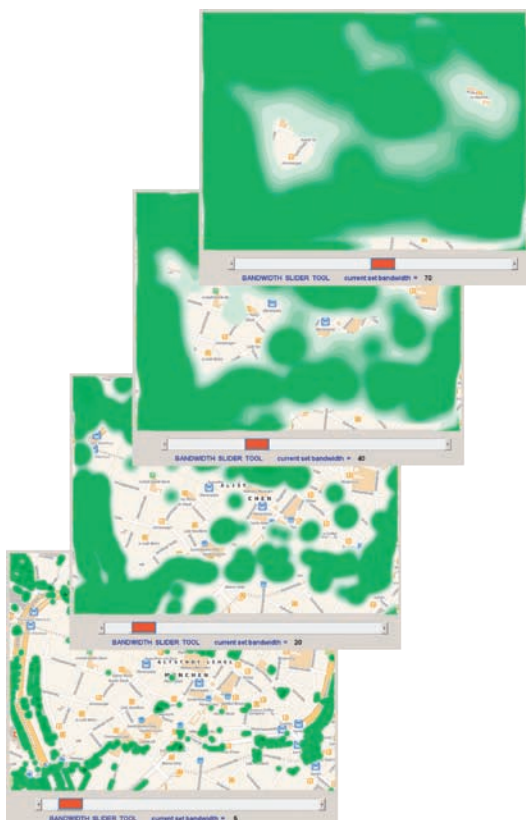


Fig. 6: Axonometric depiction of kernel density values.



**Fig. 7:** Screenshots-series with different bandwidth-settings in the slider-tool.

resolution for the slider-tool. The plot is shown in Fig. 6.

An interactive zoom and navigation tool allows the user to study the three dimensional kernel density map from different perspectives. Hence the 2D- and the 3D-visualisation of the kernel density map can be drawn side by side and compared directly with each other. Fig. 7 illustrates the advantage of the direct interactively print output by changing the bandwidth using a slider. So the different resulting maps can be compared easily and the appropriate bandwidth can be chosen visually better.

An advantage for using resolutions under  $100 \times 100$  pixel is the short image processing time. But for an adequate kernel density a map resolution higher than  $300 \times 300$  pixel is necessary. For values over  $500 \times 500$  pixel no visible differences can be recognized in the resulting map. It is to add on that the kernel density map was shown in the same screen-frame

for each resolution. For very small bandwidths a rough structure results in the kernel density map. On the other side a quite strong smoothing can be seen in the kernel density maps by using a large bandwidth.

## 5 Discussion and Conclusions

Kernel Density Estimations are well established in the visual analysis of point densities. To find an appropriate bandwidth does take experience with the point data at hand or experimentation is required to achieve a satisfactory output. Therefore the bandwidth slider tool lets the user select and browse through a large number of pre-processed density computations, significantly eases the process of finding an appropriate bandwidth setting.

The choice of the size of the bandwidth plays a decisive role for the kernel density es-

timation. In some references the bandwidth is also called smoothing-parameter, meaning when the bandwidth is set too large, important information may be lost. In case of a small bandwidth local data information has a more significant impact on the kernel density estimation map. The kernel slider tool supports the interactive process to select the optimal bandwidth.

Modifications on the bandwidth slider tool may include an adapted zoom tool to change the scale of the map window and a pan tool to move the map in the display area. However, the idea is to keep the tool as simple as possible and to let the user focus on the bandwidth finding process.

## 6 Further Research

The bandwidth slider tool will be evaluated further and further research will include test on users from specific domains. In many cases the bandwidth setting for a specific point dataset is not clear. By visually identifying the optimal bandwidth setting for a more specific dataset and scale, for example mobile phone base stations in the centre of Munich, we may draw more general conclusions on a most advantageous KDE bandwidth setting. An alternative method to modify the visual output of the estimation is to use an adaptive rather than a fixed bandwidth, meaning a dynamic search radius with a fixed amount of points included.

The current tool uses a rather time consuming pre-processing stage. This pre-processing may be computed faster by an alternative KDE algorithm or by advanced hardware. We suggest that future developments in more powerful hardware technology will make the pre-processing time for the bandwidth selection tools significantly faster or obsolete.

In this work the colors from light green to dark green were used to represent the corresponding densities of trees. These selected colors are quite appropriate for our specified case, as the representation can reflect the natural phenomenon quite well. However, this set of colors is not suitable for representing other densities, e. g., the density of street lamps. In the nearest future, the matching between different color sets, transparencies and different

kinds of densities will be investigated, so that the representation can give users a good visual impression. Additionally further research will explore the possibility to use an asynchrony kernel to calculate densities for dynamic point data. The visual analysis of these moving points, for example individual mobile phone locations, will require research into advanced dynamic visual clustering methods.

## References

- ALBERTZ, J. & WIGGENHAGEN, M., 2008: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung: Guide for Photogrammetry and Remote Sensing. – Herbert Wichmann Verlag.
- CHIU, S. 1991: Bandwidth Selection for Kernel Density Estimation. – *The Annals of Statistics* **19** (4): 1883–1905.
- DIGGLE, P.J., 2003: *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*. – Academic Press, London, UK, Second Edition.
- GLEASON, A.C., 1920: Some applications of the quadrat method. – *Bulletin of the Torrey Botanical Club*: 21–33.
- HEARNSHAW, H.M., WOOD, M., & BRODLIE, K., 1994: VISC and GIS: Some Fundamental Considerations. – *Visualization in Geographic Information Systems*, Wiley, New York, USA: 3–8.
- JÄHNE, B., 2002: *Digitale Bildverarbeitung*. – Springer.
- KÖHN, C., 1996: *Bildanalyse und Bilddatenkompression*. – Hanser Verlag.
- KRISP, J.M. & ŠPATENKOVÁ, O., 2009: Kernel density estimations and their application in visualizing mission density for fire & rescue services. – *Cartography and Geoinformatics for Early Warning and Emergency Management: Towards Better Solutions*.
- LEVINE, N., 2004: *CrimeStat: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations* (v 3.0). – Ned Levine & Associates, National Institute of Justice, Washington, DC. [www.icpsr.umich.edu/NACJD/crimestat.html/](http://www.icpsr.umich.edu/NACJD/crimestat.html/), Houston, USA.
- MAC EACHREN, A. & KRAAK, M.J., 2001: *Research Challenges in Geovisualization*. – *Cartography and Geoinformation Science*: 3–12.
- O’SULLIVAN, D. & UNWIN, D.J., 2003: *Geographic Information Analysis*. – Wiley, New Jersey, USA.
- SCOTT, D.W., 1992: *Multivariate Density Estimation*. – Wiley.

- SILVERMAN, B.W., 1986: Density estimation for statistics and data analysis. – Chapman and Hall, London, UK.
- SLOCUM, T.A., BLOK, C., JIANG, B., KOUSSOULAKOU, A., MONTELLO, D.R., FUHRMANN, S. & HEADLEY, N., 2001: Cognitive and usability issues in geovisualization. – *Cartography and Geographic Information Science*: 61–75.
- SLOCUM, T.A., 2005: Thematic cartography and geographic visualization. – Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA: 575.
- SMITH, M.J., GOODCHILD, M.F. & LONGLEY, P.A., 2006: Geospatial Analysis - a comprehensive guide. – Matador, [www.spatialanalysisonline.com](http://www.spatialanalysisonline.com)
- SVEDBERG, T., 1922: Ett bidrag till de statistiska metodernas användning inom vaxtbiologien. – *Svensk Botanisk Tidskrift*: 1–8.
- VENABLES, W.N., & RIPLEY, B.D., 1997: *Modern Applied Statistics with S-PLUS*. – Second Edition. Springer, Berlin.
- VIRRANTAU, K., FAIRBAIN, D. & KRAAK, M.J., 2009: ICA Research Agenda on Cartography and GI Science. – *The Cartographic Journal* **46** (2): 63–75.
- WOLFF, M. & ASCHE, H., 2009: Exploring Crime Hotspots: Geospatial Analysis and 3D Mapping. – Proceedings in REAL CORP.

Address of the Authors:

JUKKA KRISP, STEFAN PETERS, CHRISTIAN MURPHY, HONGCHAO FAN, Technische Universität München, Lehrstuhl für Kartographie, Arcisstraße 21, 80333 München, Tel.: +49-89-2892- 2829 / 3959 / 2836 / 2586, Fax: +49-89-2809573, e-mail: [jukka.krisp](mailto:jukka.krisp@bv.tu-muenchen.de), [stefan.peters](mailto:stefan.peters@bv.tu-muenchen.de), [christian.murphy](mailto:christian.murphy@bv.tu-muenchen.de), [fan@bv.tu-muenchen.de](mailto:fan@bv.tu-muenchen.de).

Manuskript eingereicht: Mai 2009  
Angenommen: Juli 2009

## JAVA-basierte Texturanalyse mittels Neighborhood Gray-Tone Differenz Matrix (NGTDM) zur Optimierung von Landnutzungsklassifikationen in hoch auflösenden Fernerkundungsdaten

NORMAN RENGERS & TORSTEN PRINZ, MÜNSTER

**Keywords:** Texture Analysis, Remote Sensing, Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix, Classification, Land Use

**Summary:** *JAVA-based Texture Analysis Employing Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix (NGTDM) for Optimization of Land Use Classifications in High Resolution Remote Sensing Data.* Due to the increasing demand for current and consistent datasets concerning land use and land cover, especially regarding silvicultural and agricultural areas, the analysis and classification of high resolution remote sensing data represents an important component of today's remote sensing methodology. In this process the rapid and distinct assignment of its type of use plays a major role, apart from the size, location or geometry of the used areas. At the present time most analysis and classification methods are pixel-based on colour or brightness differences of respective land use. Further classification methods try to consider additional features and to describe them mathematically. In this context the attribute texture lies in the focus of high resolution land use feature extraction, in particular regarding object-orientated classification methods but also in terms of web-based, interoperable remote sensing applications. In order to examine the value of the yet theoretical conceived Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix- (NGTDM) texture analysis for practical land use classification methods, the NGTDM has been JAVA-based implemented for the first time and is therefore applicable for many platforms as a prototype. The evaluation followed on basis of high resolution remote sensing data. The study exhibits a great practical potential for the NGTDM-method, since it is capable by all means to identify silvicultural and agricultural areas automatically purely based on texture.

**Zusammenfassung:** Aufgrund der wachsenden Nachfrage nach aktuellen und konsistenten Datensätzen im Bereich der Landnutzung und Landbedeckung, insbesondere im Hinblick auf forst- und landwirtschaftliche Nutzflächen, stellt die Analyse und Klassifikation hochauflösender Fernerkundungsdaten einen wichtigen Bestandteil der heutigen Fernerkundungsmethodik dar. Dabei spielt neben den Informationen über die Größe, Lage oder Geometrie der jeweiligen Nutzungsflächen insbesondere ihr genauer Typus und seine rasche Erfassung eine große Rolle. Die hierzu derzeit verwendeten pixelbasierten Analyse- und Klassifikationsverfahren basieren zum größten Teil auf den Farb- und Helligkeitseigenschaften der jeweiligen Landnutzungsfläche. Weiterführende Klassifikationsverfahren versuchen darüber hinaus zusätzliche Merkmalseigenschaften zu berücksichtigen und mathematisch zu beschreiben. In diesem Kontext steht das Merkmal Textur insbesondere bei objekt-orientierten Klassifikationsmethoden aber auch hinsichtlich interoperabler, web-basierter Fernerkundungsanwendungen im Focus der hochauflösenden Merkmalsextraktion von Landnutzungstypen. Um den Nutzen des bisher nur theoretisch konzipierten Neighborhood Gray-Tone Differenz Matrix- (NGTDM) Texturanalyseverfahrens für die praktische Landnutzungsklassifikation zu testen wurde das Verfahren erstmalig JAVA-basiert, und damit für viele Plattformen zugänglich prototypisch umgesetzt. Die Evaluation erfolgte auf der Basis hochauflösender Fernerkundungsdaten. Die Studie zeigte das große praktische Potential der NGTDM-Methodik, da sie durchaus in der Lage ist rein texturbasiert forst- und landwirtschaftliche Nutzflächen automatisiert zu identifizieren.

## 1 Hintergrund

Die Entwicklung der Bildanalyse hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass man heute auf einige leistungsstarke Algorithmen und Methoden in der theoretischen Texturanalyse zurückgreifen kann. Trotzdem muss festgestellt werden, dass speziell im Bereich der Klassifikation von Landnutzungsflächen zusätzliches Optimierungs- und Entwicklungspotential besteht. Hierfür ist es notwendig, die gängigen Algorithmen und Methoden aus der Texturanalyse mit dem Fachwissen aus dem Bereich der Landnutzung zu verknüpfen.

## 2 Grundlagen der Texturanalyse

Es gibt keine einheitliche formale Definition für Texturen, obwohl in der Literatur Ansätze zur Formalisierung existieren (HERMES 1999, DUDA et al. 2001, BISHOP 2005). Dennoch ist der Begriff der Textur für die Unterscheidung von Objekten enorm wichtig, da der Mensch bestimmte Bildbereiche anhand der Textur gegeneinander abgrenzt und als objektspezifisch betrachtet.

### 2.1 Texturen

Der Ursprung des Wortes „Textur“ lässt sich auf das lateinische Wort „texere“ bzw. „textura“ zurückführen, was soviel bedeutet wie „flechten“ oder „weben“ bzw. „Gewebe“. Bei der intensiven Betrachtung unserer Umwelt lässt sich erkennen, dass sich nahezu alle Gegenstände, die uns umgeben, durch bestimmte Oberflächen mit strukturellen Mustern auszeichnen und dadurch unterscheiden. Diese Muster sind häufig charakteristisch für das jeweilige Objekt. Dabei spielen insbesondere die Objektprimitive, Farbwerte und deren spe-

zifische Verteilungen und Wiederholungen eine wichtige Rolle. Der Begriff der Objektprimitive umfasst dabei geordnete Elemente wie Punkte, Linien oder einfachste geometrische Formen, die zusammengesetzt eine Struktur oder ein Muster bilden (GOOL et al. 1995). So weisen z. B. die Rinde eines Baumes, die Oberfläche einer Mauer oder einer Marmorplatte typische und leicht erkennbare Strukturen auf. Aber auch Objekte wie Wasser- oder Grasflächen besitzen eine Oberflächenstruktur, die allerdings nicht auf den ersten Blick vom menschlichen Auge visuell wahrnehmbar sind (vgl. Abb. 1).

Obwohl der Begriff „Textur“ intuitiv klar zu sein scheint, lässt sich aufgrund der vielfältigen Ausprägungen und der von verschiedenen Personen unterschiedlich wahrgenommenen und interpretierten Erscheinungsformen der Textur keine formale Aussage und genaue Definition des Begriffs Textur festlegen. Der Begriff Textur beschreibt in der digitalen Bildverarbeitung eine Bildregion, die sich durch die spezielle Anordnung von Bildpunkten und deren Grauwerte zueinander auszeichnet. Dabei wird die Anordnung der Grauwerte als Variation sich wiederholender Muster von Grauwerten innerhalb lokaler Nachbarschaften angesehen. Eine Textur wird demnach wahrgenommen, wenn sich diese Muster in einer größeren Bildregion wiederholen. Die visuelle Wahrnehmung hängt darüber hinaus von der jeweiligen Perspektive und Entfernung und somit von dem jeweiligen Maßstab der Textur ab.

An dieser Stelle sei noch auf einen weiteren wichtigen Aspekt der digitalen Bildverarbeitung hingewiesen: die 2D- und 3D- Eigenschaften bei Texturen. Bei realen Objekten handelt es sich in der Regel um Texturen mit 3D- Eigenschaften. Da in Anbetracht der Untersuchung von Texturanalyseverfahren bisher ausschließlich die Methoden und Verfahren



Abb. 1: Beispiele für Texturen: Rinde, Marmor, Mauer, Wasser, Gras (nach FOHT 2007).



für zweidimensionale Fernerkundungsdaten betrachtet werden können, wird der Ansatz der dreidimensionalen Eigenschaften ausklammert.

## 2.2 Texturmerkmale und -modelle

Im Hinblick auf die Analyse und Klassifikation von Texturen ist es notwendig die speziellen Eigenschaften und Merkmale von Texturen genauer zu betrachten und zu beschreiben. Dabei stehen die vom Menschen visuell wahrgenommenen Eigenschaften von Texturen und die verbalen Beschreibungen und verwendeten Begriffe des Gesehenen im Vordergrund. Der Begriff der Visuellen Eigenschaften (HERMES 1999) beruht auf den vom Menschen wahrgenommenen Eigenschaften und Merkmalen von Texturen. Es ist möglich, die visuell wahrgenommenen Textureigenschaften mit individuellen, verbalen Begriffen zu beschreiben, zu charakterisieren und weiter zu klassifizieren (HERMES 1999). Die in dem Werk von Asendorf und Hermes (ASENDORF & HERMES 1996) vorgeschlagenen Begriffe und Beschreibungen, wie Form der Primitiva, Grobheit, Gerichtetheit, Regelmäßigkeit, Kontrast, Linienhaftigkeit und Geschmeidigkeit dienen als Grundlage für die verbale Beschreibung

der visuellen Eigenschaften von Texturen. Um die Eigenschaften und Merkmale von Texturen auch in der digitalen Bildverarbeitung nutzen zu können, ist es erforderlich, die jeweilige Beschaffenheit der Textur mit Hilfe von mathematischen Modellen zu beschreiben (Texturmodelle). In der Literatur findet man unterschiedliche theoretische Ansätze, die sich zur mathematischen Beschreibung eignen (HERMES 1999). Die verschiedenen Texturmodelle wurden in der Vergangenheit meist singular betrachtet und lassen sich dabei wie folgt grob unterscheiden (vgl. Abb. 2).

Strukturelle Texturmodelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie durch sog. Texturprimitive und deren Aufbauregeln beschrieben werden. Dabei geben diese Aufbauregeln den genauen geometrischen Aufbau der Textur wieder und erlauben so eine fehlerfreie Rekonstruktion der Textur. Strukturelle Texturmodelle eignen sich demnach insbesondere gut zur Analyse von Texturen, die die geometrischen Beziehungen der strukturierenden Elemente zueinander nutzen. Da diese Texturen aber einen hohen Grad an Regelmäßigkeiten aufweisen und fast nur in künstlich erzeugten Bilddaten vorkommen, sind die rein strukturellen Texturmodelle zur Analyse realer Texturen weniger geeignet (HERMES 1999, DUDA et al. 2001).

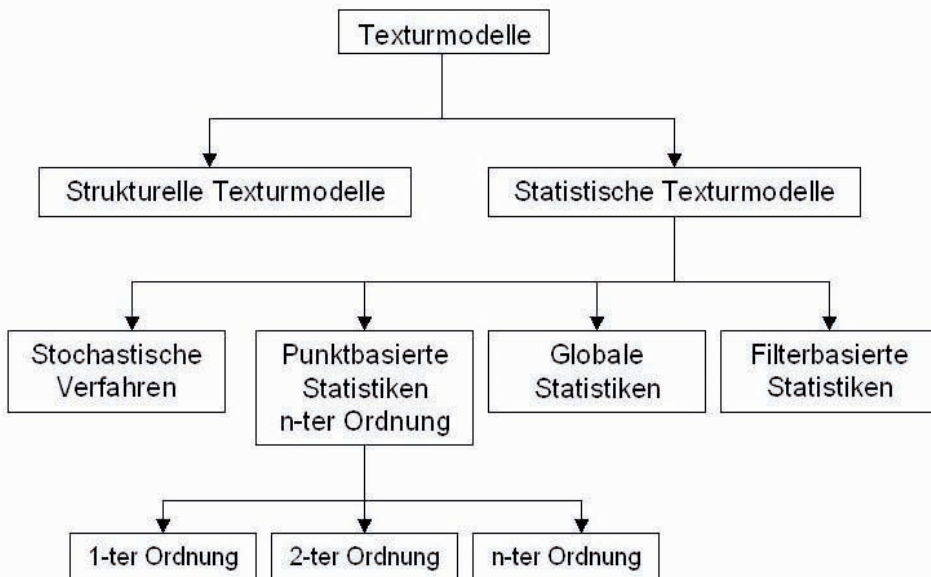


Abb. 2: Überblick Texturmodelle.

Die statistischen Texturmodelle lassen sich im Gegensatz zu den strukturellen Texturmodellen auf ein breites Feld von Texturen anwenden und in rein stochastische Verfahren, in punktbasierte Statistiken n-ter Ordnung und in filterbasierte Statistiken unterteilen (HERMES 1999, BISHOP 2005).

### 2.3 *Texturanalyse zur Landnutzungsbestimmung*

Die Texturanalyse ist ein Bereich der Bildverarbeitung, die sich mit dem Erkennen und Beschreiben von Texturmerkmalen beschäftigt. Hierzu verwendet die Texturanalyse die oben genannten mathematischen Texturmodelle, die es ermöglichen, visuell wahrnehmbare Eigenschaften von Texturen zu modellieren und so in weiteren digitalen Bildverarbeitungsprozessen nutzbar zu machen. Die wichtigste Aufgabe der Texturanalyse ist es, Texturen mit Hilfe von bestimmten Detektionsverfahren zu erkennen und genau zu lokalisieren. So spielen u. a. die durch die Texturanalyseverfahren ermittelten Merkmalsinformationen eine wichtige Rolle für weiterführende Segmentierungs- und Klassifikationsaufgaben in der digitalen Bildverarbeitung.

In Bezug auf die angeführten allgemeinen Grundlagen lässt sich der Begriff Textur auf die hochauflösenden Fernerkundungsbilder von Landnutzungsflächen übertragen. Auch hier lassen sich die jeweiligen Anordnungen der Grauwerte und die jeweiligen Wiederholungen von Mustern lokalisieren und detektieren. Die unterschiedlichen Variationen der Muster hängen dabei von den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Landnutzung ab. Die zur prototypischen Untersuchung ausgewählten typischen Landnutzungsarten entsprechen der von der CORINE Land Cover

vorgeschlagenen Nomenklatur der Bodenbedeckungen für Europa (siehe CORINE LAND COVER 2000). Dabei besteht die Nomenklatur der CORINE Land Cover Klassen aus 3 Ebenen, wobei die oberste Ebene durch die fünf Hauptklassen „Bebaute Flächen“, „Landwirtschaftliche Flächen“, „Wälder und naturnahe Flächen“, „Feuchtsflächen“ und „Wasserflächen“ gebildet wird. Demnach werden die Landnutzungsarten Acker, Wald, Wasser, Grünland und urbane Flächen auf ihre speziellen Texturmerkmale und -eigenschaften hin untersucht (vgl. Abb .3).

### 3 Neighborhood Gray-Tone Difference Matrix (NGTDM)

Bei der Auswahl eines geeigneten Texturanalyseverfahrens im Hinblick auf Landnutzungsklassen gilt es zu überprüfen, inwieweit die visuell wahrgenommenen Eigenschaften und Merkmale von Texturen auch in der digitalen Bildverarbeitung angewendet werden können. Hierzu ist es erforderlich, die zur mathematischen Modellierung verwendeten Texturanalyseverfahren auf ihre Eignung im Bereich der Landwirtschaft, insbesondere bei der Landnutzungsbestimmung zu überprüfen und auf eine mögliche Optimierung hinsichtlich der Analyse und Klassifikation von hochauflösenden landwirtschaftlichen Fernerkundungsdaten zu untersuchen. Darüber hinaus steht die prototypische JAVA-basierte Umsetzung im Vordergrund, um erstmalig plattformunabhängige Texturanalysen zugänglich zu machen. Unter den in der Literatur bekannten theoretischen Analyseverfahren (z. B. Statistical Feature Matrix nach WU & CHEN (1992), Gray Level Run Length Matrix nach JULESZ (1973), filterbasierte Verfahren nach LAWS (1979)) zeichnet sich das Neighborhood Gray-



**Abb. 3:** Beispiele für Texturen: Acker, Wald, Wasser, Grünland, urbane Fläche (IKONOS Satellitendaten, 1,0 M/Pixel).

Tone Difference Matrix (NGTDM)- Verfahren von AMADASUN & KING (1989) besonders dadurch aus, dass es neben den relevanten Texturmerkmalen Grobheit (coarseness) und Kontrast (contrast) zusätzlich in der Lage ist, essentielle Informationen über die Lebendigkeit (busyness), Komplexität (complexity) und Stärke (strength) einer Textur zu berechnen.

Bei der NGTDM spielen die Differenzen der Grauwerte der jeweiligen Bildpunkte und die Grauwerte der jeweiligen lokalen Nachbarschaft eine wichtige Rolle. Auf Basis der NGTDM werden bestimmte Texturmerkmale berechnet. Dabei entsprechen sie den visuell wahrnehmbaren Eigenschaften von Texturen.

Die NGTDM ist definiert als eine eindimensionale Matrix, wobei der  $i$ -te Eintrag als die Summe der Grauwertdifferenzen zwischen allen Bildpunkten bezüglich des  $i$ -ten Grauwertes und dessen jeweiligen lokalen Nachbarschaften bestimmt wird. Die NGTDM hat demnach so viele Einträge, wie Grauwerte im Bild vorkommen. Zunächst wird für den Bildpunkt mit den Koordinaten  $(k, l)$  der Durchschnittswert der Grauwerte der Nachbarschaftsbildpunkte  $A_i$  berechnet, wobei  $i$  als der Grauwert des jeweiligen Bildpunktes und  $d$  die Größe der Nachbarschaft definiert ist (alle Formeln, tw. modifiziert nach AMADASUN & KING 1989):

$$A_i = A(k, l) = \frac{1}{(2d + 1)^2 - 1} \left[ \sum_{m=-d}^d \sum_{n=-d}^d f(k + m, l + n) \right], \quad (m, n) \neq (0, 0) \tag{1}$$

Der  $i$ -te Eintrag der NGTDM wird wie folgt berechnet:

$$s(i) = \sum |i - A_i|, \quad \text{für } i \in N_i, \text{ wenn } N_i \neq 0 \tag{2}$$

$$= 0, \text{ sonst}$$

wobei  $N_i$  die Menge aller Bildpunkte mit dem Grauwert  $i$  ist und sich aus der Summe aller Bildpunkte mit dem jeweiligen Grauwert  $i$  berechnet. Aufbauend auf der NGTDM wurden folgende visuell wahrnehmbaren Eigenschaften von AMADASUN & KING (1989) definiert:

**Grobheit (coarseness)**

Für AMADASUN & KING (1989) wird die Textureigenschaft Grobheit durch die Größe der je-

weiligen Primitiva beschrieben. Dabei besitzen die Primitiva von groben Texturen ein großes Maß an lokaler Gleichmäßigkeit in ihren Grauwertintensitäten. Demnach ist der Grauwert eines Bildpunktes dem mittleren Grauwert der lokalen Nachbarschaft ähnlich. Daher entspricht das Merkmal Grobheit der Summe der Einträge  $s(i)$  der NGTDM mit Berücksichtigung der relativen Häufigkeit des jeweiligen Grauwertes  $p_i$  und wird wie folgt berechnet:

$$f_{cos} = \left[ \epsilon + \sum_{i=0}^{G_h} p_i s(i) \right]^{-1} \tag{3}$$

wobei  $G_h$  dem größten Grauwert im Bild entspricht,  $\epsilon$  als Konstante definiert ist, um Divisionen durch Null (z. B. bei homogenen Bildern) zu verhindern und  $p_i$  wie folgt definiert ist:

$$p_i = \frac{N - i}{n \cdot m}, \quad \text{wobei } n = N - 2d \quad \text{und } m = M - 2d \tag{4}$$

**Kontrast (contrast)**

Der Kontrast einer Textur kann durch die Häufigkeit der räumlichen Veränderung von Grauwertintensitäten beschrieben werden. Hierbei bedeutet ein hoher Kontrastumfang einen relativ großen Unterschied der Grauwertintensität zwischen benachbarten Bereichen einer Textur. Dieses kommt vor, wenn das Intervall der vorkommenden Grauwerte einen großen Teil des Intervalls der möglichen Grauwerte abdeckt oder wenn das Intervall gestreckt ist. Aufgrund dessen wird von AMADASUN & KING (1989) folgende Berechnung des Merkmals Kontrast vorgeschlagen:

$$f_{con} = \left[ \frac{1}{N_g (N_g - 1)} \sum_{i=0}^{G_h} \sum_{j=0}^{G_h} p_i p_j (i - j)^2 \right] \cdot \left[ \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=0}^{G_h} s(i) \right] \tag{5}$$

wobei  $N_g$  die Anzahl der tatsächlich vorkommenden Grauwerte beschreibt und wie folgt definiert ist:

$$N_g = \sum_{i=0}^{G_h} Q_i, \quad \text{für } Q_i = 1, \text{ wenn } p_i \neq 0 \tag{6}$$

$$= 0, \text{ sonst}$$

**Lebendigkeit** (busyness)

Das Texturmerkmal Lebendigkeit wird als eine starke Veränderung der Grauwertintensitäten eines Bildpunktes einer Textur zu seiner lokalen Nachbarschaft angesehen. Demnach definiert sich das Maß der Lebendigkeit durch die Häufigkeit der räumlichen Grauwertintensitätsveränderungen. Dabei hängt die jeweilige Veränderung der Grauwertintensitäten vom Intervall der vorkommenden Grauwerte bzw. vom Merkmal Kontrast ab. AMADASUN & KING (1989) definieren die Lebendigkeit wie folgt:

$$f_{bus} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^{G_h} p_i s(i) \right]}{\left[ \sum_{i=0}^{G_h} \sum_{j=0}^{G_h} i p_i - j p_j \right]}, \quad p_i \neq 0, p_j \neq 0 \quad (7)$$

wobei Zähler und Nenner der Formel jeweils mit den relativen Häufigkeiten gewichtet werden.

**Komplexität** (complexity)

Das Merkmal Komplexität beschreibt den visuellen Informationsgehalt einer Textur. Dabei hängt der Grad der Komplexität von der Anzahl unterschiedlicher Grauwerte ab, die mit einer geringeren relativen Häufigkeit in den Texturprimitiven vorkommen. Texturen mit einer großen lokalen Gleichmäßigkeit von Grauwertintensitäten besitzen demnach eine geringere Komplexität als Texturen, die sich aus einer größeren Anzahl unterschiedlicher Grauwerte zusammensetzen. So lässt sich die Komplexität über die Größe der Primitive und die relative Häufigkeit des Vorkommens der einzelnen Grauwerte beschreiben und wird wie folgt definiert (AMADASUN & KING 1989):

$$f_{con} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^{G_h} \sum_{j=0}^{G_h} (p_i + p_j)(i - j)^2 \right]}{\left[ \epsilon + \sum_{i=0}^{G_h} s(i) \right]}, \quad p_i \neq 0, p_j \neq 0 \quad (8)$$

Die Differenz der Grauwertpaare wird durch die Summe der zu den Grauwerten gehörenden Einträgen der NGTDM gewichtet und der Normierungsfaktor  $n * m(p_i + p_j)$  nimmt große Werte für grobe und kleine Werte für feine Texturen an. Je größer der Wert  $f_{con}$ , desto höher ist der Informationsgehalt und damit die Komplexität der Textur.

**Texturstärke** (texture strength)

Nach AMADASUN & KING (1989) besitzt eine Textur eine große Stärke, wenn die Primitive der Textur deutlich erkennbar und eindeutig definierbar sind. Dieses Erkennen hängt zum größten Teil von der jeweiligen Abgrenzung der Grauwerte bzw. der Differenzen der Grauwertintensitäten ab. Demnach spielen sowohl die Grobheit als auch der Kontrast einer Textur bei der Bestimmung der Texturstärke eine wichtige Rolle. Die Texturstärke wird wie folgt definiert:

$$f_{str} = \frac{\left[ \sum_{i=0}^{G_h} \sum_{j=0}^{G_h} (p_i + p_j)(i - j)^2 \right]}{\left[ \epsilon + \sum_{i=0}^{G_h} s(i) \right]}, \quad p_i \neq 0, p_j \neq 0 \quad (9)$$

wobei ein hoher Wert  $f_{str}$  für eine starke Textur steht.

**4 Prototypische Umsetzung**

Die prototypische Umsetzung des NGTDM-Verfahrens erfolgte in der von Sun Microsystems entwickelten, objektorientierten und plattformunabhängigen Programmiersprache Java. Für die Implementierung wurde die Java 2 Plattform Standard Edition (J2SE) 5.0 eingesetzt. Neben den Vorteilen der Programmiersprache Java, wie Portierbarkeit, Robustheit, Sicherheit, Dynamik, stand das breite Einsatzspektrum in Form von lokalen, als auch webbasierten Anwendungen für die prototypische Umsetzung des Algorithmus im Vordergrund (z. B. als add-on zu Google Earth oder Open Aerial Map bzw. anderen verfügbaren webbasierten Geodatenservern und Services).

Das NGTDM-Verfahren wird durch die Klasse NGTDM umgesetzt und durch die Variablen (vgl. Abb. 4, mittlerer Kasten) und Methoden (vgl. Abb. 4, unterer Kasten) definiert:

Als Variablen werden die Merkmale Texturstärke, Grobheit, Komplexität, Kontrast und Lebendigkeit verwendet. Als weitere zur Berechnung notwendige Variablen wird das Eingabebild, die Höhe und Breite des Eingabebildes, der maximale Grauwert des Eingabebildes, die Anzahl der im Bild vorkommen-

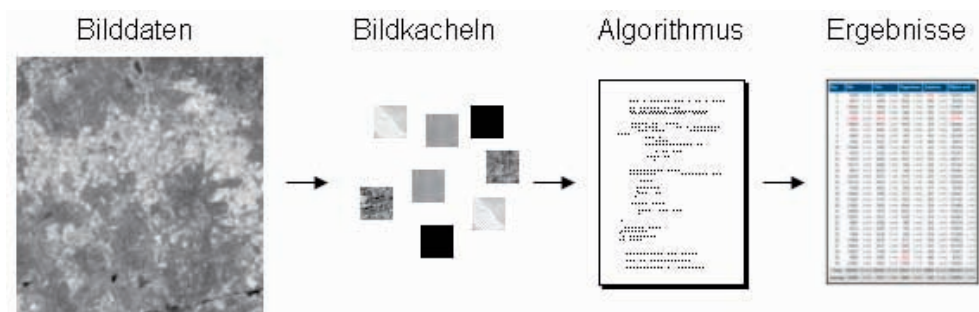
definiert. Die Methoden der Klasse sind „NGTDM()“ für das Einlesen des Eingabebildes, die Berechnung der Höhe und Breite des Eingabebildes, die Umwandlung des Eingabebildes in ein Grauwertbild und die Übergabe der Grauwerte des Eingabebildes an das Grauwertarray. Weitere für die Berechnung der Texturmerkmale erforderliche Methoden sind die Berechnungen des maximalen Grauwertes, die Berechnungen der relativen Häufigkeiten und die Berechnung der NGTDM. Die NGTDM dient dabei als Basis zur Berechnung der Texturmerkmale Grobheit, Kontrast, Lebendigkeit, Komplexität und Texturstärke. Das in JAVA umgesetzte NGTDM-Verfahren ist unter der URL [ivvgeo.uni-muenster.de/images/NGTDM.html](http://ivvgeo.uni-muenster.de/images/NGTDM.html) (html-Seitenquellcode anzeigen lassen!) einseh- bzw. nutzbar. Um das Verfahren auf seine Eignung und praktische Anwendbarkeit zu überprüfen, wurden aus den hochauflösenden Fernerkundungsdaten, Stichproben der verschiedenen Landnutzungsarten Ackerfläche, Waldfläche, Wasserfläche, Grünlandfläche und urbane Fläche festgelegt. Im Anschluss daran wurde das in Java prototypisch umgesetzte NGTDM-Verfahren auf die Stichproben angewendet um die Berechnungsergebnisse für die speziellen Texturmerkmale zu bestimmen (vgl. Abb. 5).

### 5 Ergebnisse

**Abb. 4:** Klassendiagramm des NGTDM-Verfahrens.

den unterschiedlichen Grauwerte, das Grauwertarray des Eingabebildes, die NGTDM und die relativen Häufigkeiten der Grauwerte

Die ermittelten Berechnungsergebnisse zeigten, dass das NGTDM-Verfahren von AMADASUN & KING (1989) aufgrund der Kombination aus den berechneten Merkmalen Grobheit, Kontrast, Lebendigkeit, Komplexität sowie Texturstärke in der Lage ist, die ausgewählten

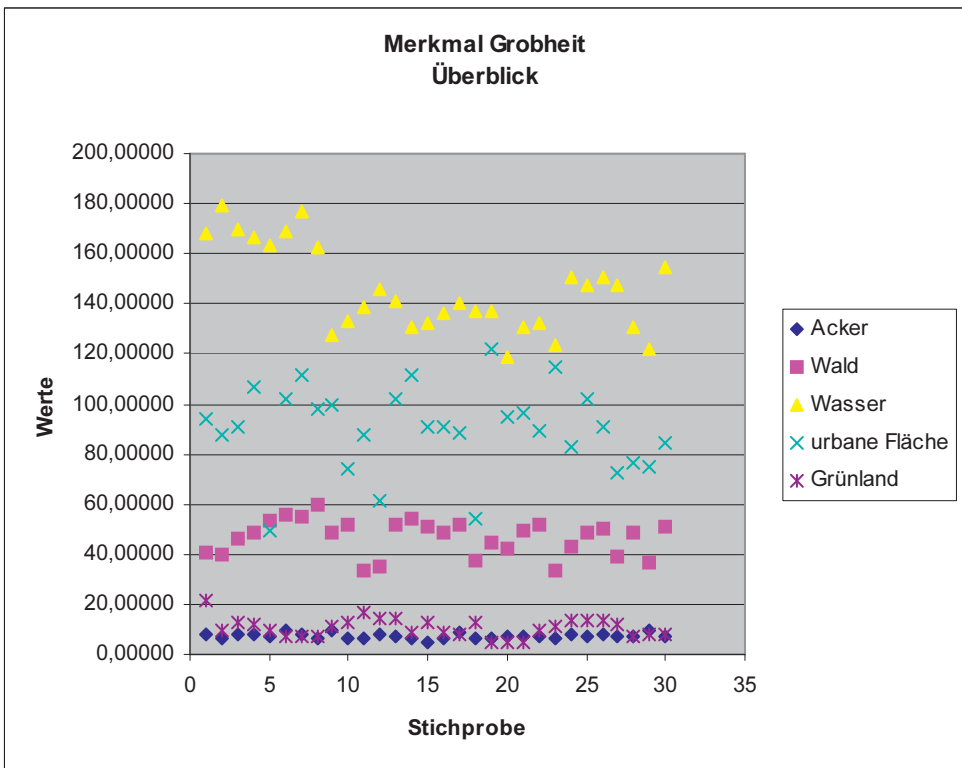


**Abb. 5:** Klassendiagramm des NGTDM-Verfahrens.

Landnutzungsarten Wald-, Wasserflächen und urbanen Flächen eindeutig zu bestimmen und daraus eigenständige Merkmalsklassen zu definieren. Allerdings zeigte sich auch, dass unter Umständen Texturen mit sehr ähnlichen Merkmalsstrukturen, wie sie bei Acker- und Grünlandflächen durchaus während der phänologischen Vitalitätsphase auftreten können, vom NGTDM-Verfahren mit Hilfe der zur Verfügung gestellten modellierten Parameter nur schwer bzw. nicht eindeutig zu bestimmen sind (vgl. Abb. 6). Im Gegensatz zu einer reinen Spektralanalyse tritt dieses Manko jedoch erst ab einem relativ hohem Analyseniveau auf, da sich Texturen wesentlich stabiler als Differenzierungsmerkmal (auch während wechselnder Vitalitätszustände von Pflanzen) verhalten. So weisen z. B. entlaubte Baumgruppen immer noch spezifische Texturen auf, während ihre Spektralcharakteristika deutlich zurücktreten. Insofern ist das NGTDM-Verfahren im Hinblick auf Fehlklassifikationen stabiler als eine rein spektralbasierte Analyse

und bietet sich somit als Ergänzung herkömmlicher Klassifikationsmethoden an.

Die Berechnungsergebnisse der Grobheit zeigen beispielsweise, dass sich die Stichproben der Acker- und Grünlandfläche in einem geringen Wertebereich bewegen. Dieses ist auf das relativ große Maß an lokaler Gleichmäßigkeit in den Grauwertintensitäten der Objektprimitive zurückzuführen. Dementsprechend handelt es sich bei Acker- und Grünlandflächen im Vergleich zu den anderen untersuchten Landnutzungsflächen um gröbere Texturen. Die geringen Grauwertveränderungen lassen sich dabei auf die typischen Grauwertintensitätsverteilungen von Acker- und Grünlandflächen zurückführen, welche in der regelmäßigen Bearbeitung und natürlichen Ausprägung begründet liegen. Die Berechnungsergebnisse der Waldflächen und urbanen Flächen zeichnen sich durch einen mittleren Wertebereich aus. Dabei kann auf das durchschnittliche Maß an lokaler Gleichmäßigkeit in den Grauwertintensitäten der Ob-



**Abb. 6:** Grobheit für Acker, Wald, Wasser, Grünland, urbane Flächen.

jektprimitive verwiesen werden, wobei der Wertebereich der Waldflächen geringer ist, als jener urbaner Flächen, was sich mit der biologischen Ausprägung von Wäldern begründen lässt. Die Waldflächen und urbanen Flächen können als Landnutzungen mit einer mittleren Grobheit beschrieben werden. Im Gegensatz dazu liegen die Berechnungsergebnisse der Wasserfläche in einem sehr hohen Wertebereich. Aufgrund dessen lassen sich Wasserflächen als feinere Textur beschreiben, wobei einzelne Objektprimitive schwer bzw. gar nicht zu identifizieren sind. Das Merkmal Grobheit ist in der Lage, die untersuchten Landnutzungsflächen über seine Wertebereiche zu identifizieren und eingeschränkt voneinander abzugrenzen. So kann zum Beispiel die Landnutzungsfläche Wasser aufgrund der berechneten Wertebereiche eindeutig von den Landnutzungsflächen Wald, Acker und Grünland abgegrenzt werden. Darüber hinaus lassen sich die urbanen Flächen von den Acker- und Grünlandflächen eindeutig abgrenzen.

Betrachtet man die Berechnungsergebnisse für die Komplexität wird deutlich, dass sich die Stichproben der Acker-, Grünland- und Wasserflächen in einem geringen Wertebereich bewegen, was auf die geringe Anzahl an unterschiedlichen Grauwerten zurückzuführen ist. Demnach handelt es sich im Vergleich zu den anderen untersuchten Landnutzungen um weniger komplexe Flächen, die einen geringeren Informationsgehalt besitzen. Im Gegensatz dazu bewegen sich die Berechnungsergebnisse der Waldflächen in einem mittleren Wertebereich. Dementsprechend handelt es sich bei der Landnutzung Wald um eine komplexere Textur, die einen höheren Informationsgehalt besitzt. Dieses liegt in der größeren Anzahl unterschiedlicher Grauwerte begründet, die jeweils mit einer geringeren relativen Häufigkeit vorkommen. Bei den urbanen Flächen handelt es sich um eine Textur, die sich durch eine große Anzahl unterschiedlicher Grauwerte mit geringer relativer Häufigkeit auszeichnet. Dabei liegen die Berechnungs-

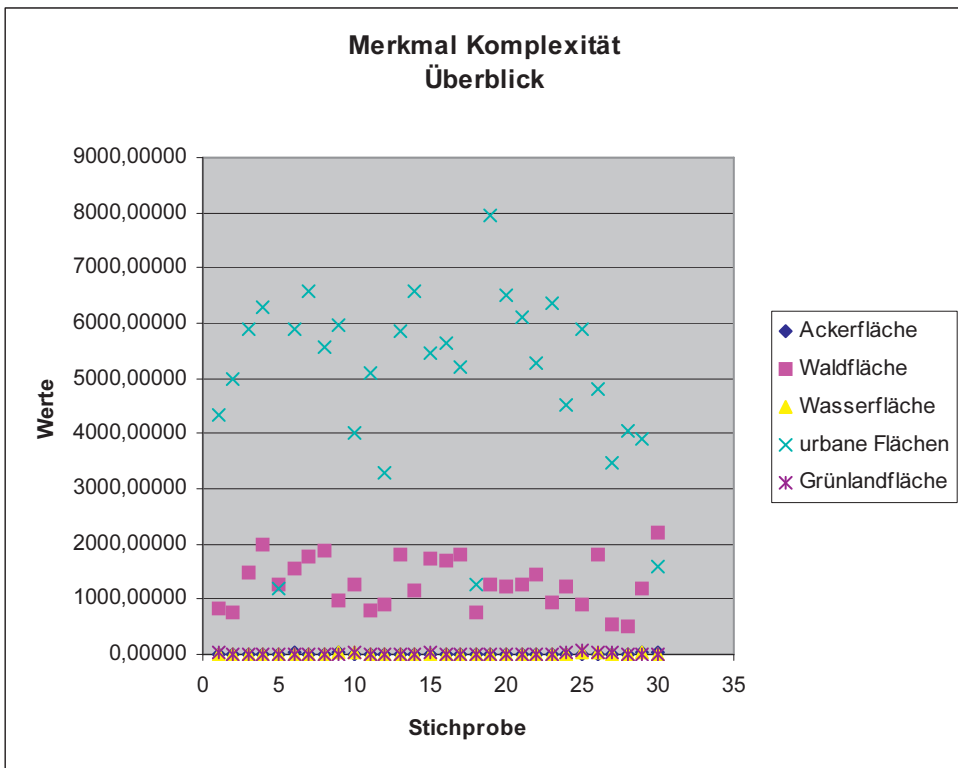
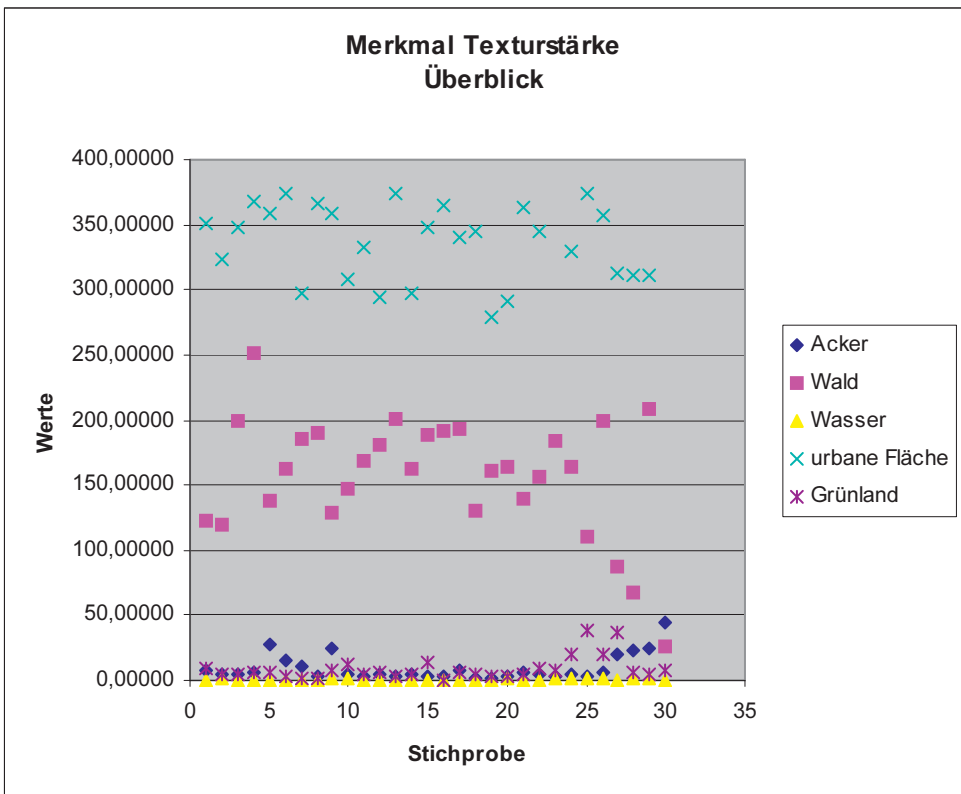


Abb. 7: Komplexität für Acker, Wald, Wasser, Grünland, urbane Flächen.

werte in einem sehr hohen Wertebereich. Dieses ist in der Vielfalt und unterschiedlichen Ausprägung, Größe und Wiederholung der Objektprimitive begründet, was für einen höheren Informationsgehalt und eine komplexere Textur spricht. Das Merkmal Komplexität ist in der Lage, die untersuchten Landnutzungsflächen über seine Wertebereiche zu identifizieren und so voneinander abzugrenzen. So kann zum Beispiel die Landnutzung urbane Fläche aufgrund der berechneten Wertebereiche eindeutig von den Landnutzungs-klassen Grünland-, Wasser- und Ackerflächen abgegrenzt werden. Die urbanen Flächen besitzen dabei eine geringere Anzahl unterschiedlicher Grauwerte und haben demnach eine weniger komplexere Textur. Darüber hinaus lassen sich die Waldflächen von den Grünland-, Wasser- und Ackerflächen eindeutig abgrenzen.

Die Berechnungsergebnisse der Texturstärke zeigen, dass sich die Stichproben der

Acker-, Grünland- und Wasserflächen in einem geringen Wertebereich bewegen. Demnach handelt es sich bei der Landnutzung Acker, Wasser und Grünland um Texturen, die eine geringere Texturstärke besitzen. Im Gegensatz dazu, bewegen sich die Berechnungsergebnisse der Waldflächen in einem mittleren Wertebereich. Dementsprechend handelt es sich bei der Landnutzung Wald um eine stärkere Textur. Dieses liegt in der jeweiligen Größe der Objektprimitive bzw. den Differenzen der Grauwertintensitäten begründet. Bei den urbanen Flächen handelt es sich um eine Textur, die sich durch die hohen Differenzen der durchschnittlichen Grauwertintensitäten auszeichnet. Dabei liegen die Berechnungswerte in einem sehr hohen Wertebereich. Dementsprechend handelt es sich bei den urbanen Flächen um eine starke Textur. Das Merkmal Texturstärke ist in der Lage, die untersuchten Landnutzungsflächen über seine Wertebereiche zu identifizieren und so vonein-



**Abb. 8:** Texturstärke für Acker, Wald, Wasser, Grünland, urbane Flächen.





**Abb. 9:** Klassifikationsbeispiele auf Basis zweier panchromatischer Luftbildausschnitte nach dem NGTDM-Verfahren. Merkmalsklassen hier Gelb: Acker/ Grünland, Grün: Wald, Blau: Wasser, Rot: urbane Flächen.

ander abzugrenzen. So kann zum Beispiel die Landnutzung urbane Flächen aufgrund der berechneten Wertebereiche eindeutig von den Landnutzungsklassen Wald, Grünland-, Wasser- und Ackerflächen abgegrenzt werden. Die urbanen Flächen besitzen dabei eine hohe Differenz der durchschnittlichen Grauwertintensitäten und haben demnach starke Texturen. Darüber hinaus lassen sich die Waldflächen von den Wasserflächen eindeutig abgrenzen.

Zusammenfassend ist das NGTDM-Verfahren aufgrund der Berechnungsergebnisse in der Lage, die Merkmalsklassen Acker/ Grünland-, Wald-, Wasserflächen und urbane Flächen in panchromatischen Luftbildern zu trennen (vgl. Abb. 6–9).

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Hinblick auf eine möglichst fehlerfreie teilautomatisierte Fernerkundungsinterpretation und dem Bestreben, die vom Menschen visuell wahrgenommenen spezifischen Eigenschaften von Fernerkundungsdaten mathematisch auszudrücken, zu modellieren sowie

umzusetzen, bietet das Merkmal Textur, die damit in Verbindung stehende Texturanalyse unter Nutzung des vorgestellten NGTDM-Verfahrens nach AMADASUN & KING (1989) einen praktisch umsetzbaren, viel versprechenden methodischen Ansatz. Es ist zukünftig notwendig, die bereits implementierten Anwendungen im Bereich der Texturanalyse standardisiert um das NGTDM-Verfahren zu erweitern, um so eine Optimierung der Landnutzungsbestimmung herbeizuführen. Bei sehr ähnlichen Landnutzungstypen ist es weiterhin vorstellbar, die in dieser Arbeit vorgestellten Texturmerkmale des NGTDM-Verfahrens mit zusätzlichen Parametern zu kombinieren. So wäre z. B. die Erweiterung des NGTDM-Verfahrens um die von HERMES (1999) vorgeschlagenen Texturmerkmale Linienhaftigkeit oder Gerichtetheit denkbar und sinnvoll (z. B. im Hinblick auf Schlaggrenzen, landwirtschaftliche Nutzflächen oder Forstareale). Inwieweit diese möglichen Erweiterungen für Anwendungen eine Rolle spielen, kann an dieser Stelle jedoch noch nicht beantwortet werden, sondern muss Inhalt weiterführender untersuchender Arbeiten in den Bereichen Texturanalyse und Fernerkundungsinterpretation sein.

Ausblickend auf weitere mögliche Nutzungspotentiale, Entwicklungs- oder Anwendungsmöglichkeiten zeigt sich, dass ein stärkerer Focus auf Texturanalyseverfahren für den Bereich der Interpretation von Fernerkundungsdaten im Bezug auf die teilautomatisierte Landnutzungsbestimmung zu einer weiteren Optimierung der Analyse und Klassifikation führt. Darüber hinaus werden durch das Merkmal Textur zusätzliche potentiell sehr aufschlussreiche räumliche Zusammenhänge benachbarter Bildpunkte für die Analyse und Klassifikation bereitgestellt. Das in der objektorientierten und plattformunabhängigen Programmiersprache Java umgesetzte und hier prototypisch vorgestellte NGTDM-Texturanalyseverfahren bietet darüber hinaus die Möglichkeit lokale als auch webbasierte Entwicklungen- und Anwendungen für die Texturanalyse öffentlich zugänglicher Fernerkundungsdaten zu erschließen. Gerade webbasierte GDI-Strukturen und Dienste, welche Rasterdaten anbieten, könnten von einer der Visualisierung vorgeschalteten thematischen Analysefunktion mit Texturbezug deutlich profitieren (z. B. IMS-Systeme). Die demnach erforderlichen und ausstehenden notwendigen Untersuchungen können als Motivation für weitere interessante Arbeiten in diesem Bereich angesehen werden.

So wäre zu prüfen, inwieweit eine Kombination von anderen bekannten Texturanalyseverfahren, wie der Ansatz von WU & CHEN (1992), die Statistical Feature Matrix mit Texturmerkmalen Grobheit, Kontrast, Regelmäßigkeit, Periodizität und Rauheit oder die von HARALICK et al. (1973) definierte Co-occurrence-Matrix und dessen Merkmale Homogenität, Kontrast, Korrelation, Varianz, Entropie zu einer Verbesserung der (möglicherweise webbasierten) Klassifikationsergebnisse führen kann.

## Literatur

- ABMAYR, W., 1994: Einführung in die digitale Bildverarbeitung. – Teubner, Stuttgart.
- AMADASUN, M. & KING, R., 1989: Textural features corresponding to textural properties. – IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics **19** (5): 1264–1274.
- ASENDORF, G. & HERMES, T., 1996: On Textures: An Approach for a New Abstract Description Language. – IS & T SPIE: Human Vision and Electronic Imaging **2657**: 98–106.
- BÄHR, H.P. & VÖGTLE, T., 2005: Digitale Bildverarbeitung. Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS. – Wichmann, Heidelberg.
- BISHOP, C.M., 2005: Pattern recognition and machine learning. – Springer, Heidelberg.
- CORINE LAND COVER, 2000: Bodenbedeckungsdaten für Deutschland. – DLR, Köln.
- DUDA, R.O., HART, P.E. & STORK, D.G., 2001: Pattern Classification. – Wiley, New York.
- FORSYTH, D. & PONCE, J., 2002: Computer Vision – A Modern Approach. – Prentice Hall, New Jersey.
- FOTH, O., 2007: Deutsche 3D-Community, 3D Galerie, Tutorials, Texturen. – www.3d-ring.de (15.01.2008).
- GALLOWAY, M., 1975: Texture analysis using gray level run lengths. – Computer Graphics and Image Processing **4**: 172–179.
- GOOL, L. VAN, DEWAELE, P. & OOSTERLINCK, A., 1985: Texture analysis anno 1983. – Computer Vision, Graphics and Image Processing **29**: 336–357.
- HARALICK, R., SHANMUGAM, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural features for image classification. – IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics **3**: 610–621.
- HARALICK, R. & SHAPIRO, L.G., 1992: Computer and Robot Vision. – Prentice Hall, New Jersey, USA.
- HERMES, T., 1999: Texturen: Analyse, Beschreibung und Synthese. – Universität Bremen.
- JULESZ, B., GILBERT, E., SHEPP, L. & FRISCH, H., 1973: Inability of Textured Images by Edge Detection in Multidimensional Features. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **11** (4): 414–421.
- JAHNE, B., 2002: Digitale Bildverarbeitung. – Springer, Berlin.
- LAWS, K., 1979: Texture Energy Measures. – DARPA Image Understanding Workshop: 47–51.
- NETUSCHIL, K. & FISCHER, M., 2003: Bildverarbeitung. – Vieweg und Teubner, Wiesbaden.
- SUN, C. & WEE, W.G., 1982: Neighboring gray level dependence matrix for texture classification. – Computer Vision, Graphics and Image Processing **23**: 341–352.
- VÖLKER, A., 2005: Automatische Extraktion von Schlaggrenzen für die Erosionsberatung. – Universität Münster.
- WU, C.-M. & CHEN, Y.-C., 1992: Statistical feature matrix for texture analysis. – Computer Vision, Graphics and Image Processing **54**: 407–419.

Adresse der Autoren:

Dr. TORSTEN PRINZ und Dipl. Geoinf. NORMAN RENGERS, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Geoinformatik, Robert-Koch-Str. 28, D-48149 Münster, Tel.: +49-251-8330015, Fax: +49-251-8330016, e-mail: [prinz@uni-muenster.de](mailto:prinz@uni-muenster.de), [norman.rengers@gmail.de](mailto:norman.rengers@gmail.de).

Manuskript eingereicht: Februar 2009  
Angenommen: Juni 2009



## Mitteilungen der DGPF

### **Ehrendoktorwürde für Prof. Friedrich Ackermann**

Das Ehrenmitglied der DGPF, Prof. i. R. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Friedrich Ackermann von der Universität Stuttgart, hat am 25. Mai 2009 von der Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK) anlässlich der Feier ihres 230jährigen Bestehens den Titel eines Ehrendoktors (h.c.) verliehen bekommen. Es ist sein vierter Ehrendokortitel. Die DGPF gratuliert Prof. Ackermann zu dieser Auszeichnung.

### **Neustrukturierung der Berufsausbildung in der Geoinformationstechnologie**

Modernisierter Ausbildungsberuf *Vermessungstechniker/in mit integrierter Bergvermessungstechnik* und Neuer Ausbildungsberuf *Geomatiker/in*

Auf Bundes- und Länderebene werden gegenwärtig die Weichen gestellt, dass voraussichtlich zum Termin **1. August 2010** im Berufsumfeld der Geoinformationstechnologie ein modernisierter Ausbildungsberuf Vermessungstechniker/in und ein neu geschaffener Ausbildungsberuf Geomatiker/in angeboten werden können. Die Ausbildungszeit beträgt jeweils drei Jahre.

Die Geoinformationstechnologie beschäftigt sich umfassend mit der Bearbeitung von Geobasisdaten der Vermessungs- und Katasterverwaltungen sowie von Geofachdaten im privatwirtschaftlichen und behördlichen Umfeld. Die Bearbeitung von Geodaten beinhaltet u.a. die Erfassung (örtliche Vermessung, Digitalisierung, Fernerkundung), die Interpretation und Qualifizierung, die Integration unterschiedlicher Datenquellen, die Analyse sowie die Präsentation und die Bereitstellung von Daten mit den jeweiligen modernen Verfahren und Techniken.

Der Ausbildungsberuf Vermessungstechniker/in mit integrierter Fachrichtung Bergvermessungstechnik wird inhaltlich modernisiert und folgt damit der technologischen Entwicklung in der Messtechnik (u.a. Laservermessung, Satellitenmessverfahren) und der computergestützten Weiterverarbeitung der Daten zu Produkten (wie Rissen, Karten und Plänen). Im Bauwesen ist auch der umgekehrte Arbeitsprozess erforderlich, nämlich aus georeferenzierten Projektdaten die örtliche Lage von Bauwerken zu bestimmen.

Für das Berufsbild des Geomatikers liegt die Priorität in der Vermittlung einer breiten Prozesskette von der Geodatenerfassung über die Weiterverarbeitung (Interpretation, Integration, Analyse, Speicherung) bis zur Visualisierung und dem Marketing. Der neu geschaffene Beruf Geomatiker/in wird nicht nur die wichtigen Inhalte aus dem dann nicht mehr angebotenen Beruf Kartograph/in auffangen, sondern neben Elementen der Vermessungstechnik auch wesentliche Inhalte aus der Photogrammetrie und Fernerkundung aufnehmen.

Die gegenseitige inhaltliche Überdeckung in den beiden Berufen wird durch gemeinsame Ausbildungsinhalte von mindestens 12 Monaten verdeutlicht. Gemeinsamkeiten gibt es dabei im Bereich der Geodatenerfassung sowie speziell im Umgang mit geographischen Informationssystemen und der modernen Informations- und Kommunikationstechnik.

Ausbildungsstellen sind insbesondere die Vermessungs- und Katasterverwaltungen der Länder und des Bundes, Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure/innen, Bergbaubetriebe, Geodaten verarbeitende kommunale Dienststellen und Ingenieurbüros sowie Betriebe der Photogrammetrie / Fernerkundung und der Kartographie.

## Berichte von Veranstaltungen

### Symposium Kartographie und Geovisualisierung vom 18.–20. Mai 2009 in Königslutter/Elm

Unter dem Motto *Wirklichkeit – Wahrnehmung – Wissen* fand vom 18. bis 20. Mai 2009 zum siebten Mal das bekannte Symposium für angewandte Kartographie und Geovisualisierung in Königslutter am Elm statt.

Die von der entsprechenden Kommission der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK) organisierte Veranstaltung fand auch in diesem Jahr großen Zuspruch von Teilnehmern aus der Bundesrepublik Deutschland und dem benachbarten Ausland. Ein interessantes und hochqualifiziertes Fachpublikum aus Kartographen, Vermessungsingenieuren, Geographen und Geoinformatikern informierte sich anhand von 20 Fachvorträgen und neun Workshops über die neusten Entwicklungen in der Kartographie und nutzte intensiv die Gelegenheit zum fachlichen Austausch.

Wie schon in den vergangenen Jahren wurde das Tagungsprogramm von einer Fachfirmenausstellung begleitet. Gerade die Kombination von durch die Unternehmen durchgeführten Workshops mit der Möglichkeit zur weiteren Vertiefung der dabei vermittelten Fachthemen in der Ausstellung entwickelte sich erneut zu einer Plattform für kreative Gespräche und innovative Projektideen. In dieser wieder einmal ausgesprochen guten Atmosphäre wurde dann auch ein weiter Spannungsbogen an Fachthemen behandelt.

Das Symposium begann mit der Begrüßung der Teilnehmer durch den Leiter der Kommission, Herrn Dr. BISCHOFF und den Grußworten des 1. stellvertretenden Bürgermeisters von Königslutter, Herrn BODO SEIDENTHAL sowie dem Präsidenten der DGfK Herrn Dr. PETER ASCHENBERNER.

Die fachliche Eröffnung bildeten Vorträge zum Stellenwert der Kartographie im Vermessungswesen, ihre Einbettung in andere Fachdisziplinen sowie die Bedeutung der kartographischen Kommunikation von bedeutenden Repräsentanten aus der Verwaltung und der Wissenschaft.

Ihnen schloss sich am Nachmittag des ersten Tages der Themenblock ‚Drei A‘ (AFIS-ALKIS-ATKIS) an. Hier standen insbesondere Fragen zur Positionierung des Produkts ‚Karte‘ im AdV-Vorhaben AFIS®-ALKIS®-ATKIS® oder die Bedeutung des anstehenden Bezugssystemwechsel nach ETRS89 im Mittelpunkt.

Der zweite Tag des Symposiums startete mit anregenden Vorträgen über die Zukunft der Geo-Informationssysteme sowie über die frei verfügbare Webmapping-Client Technologie ‚OpenLayers‘. Diesem Vortragsblock folgten zwei Blöcke mit unterschiedlichsten Workshops, bei denen die Teilnehmer auch anhand praktischer Übungen am eigenen Notebook vertiefende Einblicke in diverse Softwareprodukte und Technologien (z.B. CityGML, SLD, 3D PDF) erlangen konnten.

Den Abschluss des dritten Tages bildeten zwei interessante Vortragsblöcke mit den Themenschwerpunkten ‚Drei D‘ (3D-Anwendungen) und ‚Drei N‘ (Navigation, Neugier, Nutzen). Zu den 3D-Themen gehörten Vorträge wie die Organisation von 3D-Leitungskatastern oder die Entwicklung von 3D-Anwendungen auf Basis internationaler Standards (CityGML, IFC, OGC). Der Themenblock ‚Navigation, Neugier, Nutzen‘ informierte die Teilnehmer über den Einfluss der Bildschirmgröße auf die Akquisition und Bildung räumlichen Wissens, stellte aktuelle Forschungsaktivitäten der TU Wien aus dem Bereich der Fußgängernavigation vor und vermittelte Informationen über das sogenannte Crowdsourcing anhand zweier Vorträge über ‚Navigation – die Weisheit der Vielen‘ und ‚OpenStreet-Map – Datenqualität, Nutzungsfähigkeit und rechtliche Aspekte‘. Gerade dieser letzte Aspekt wurde im abschließenden Vortrag zum Thema Datenschutz bei Geodaten und insbesondere bei Onlineverfahren inhaltlich aufgegriffen und fortgeführt.

Damit bot dieses Symposium auch 2009 seinen Teilnehmern ein breites Spektrum an Informationen zusammen mit einem interessanten Rahmenprogramm an. Weitere Details wie auch den vollständigen Tagungsverlauf

des Symposiums mit seinen Vorträgen finden Sie unter [www.angewandte-kartographie.de](http://www.angewandte-kartographie.de).

Die Vorbereitungen zum nächsten Symposium der Kommission Angewandte Kartographie – Geovisualisierung, welches vom 30. Mai bis zum 1. Juni 2011 stattfinden wird, haben mit dem neuen Leiter der Kommission, Herrn Dr.- Ing. CHRISTOPH AVERDUNG bereits begonnen.

Weitere Informationen über die Kommission sind unter [www.angewandte-kartographie.de](http://www.angewandte-kartographie.de) oder [www.dgfk.net](http://www.dgfk.net) verfügbar.

CHRISTOPH AVERDUNG, Siegburg

### **3. Hamburger Anwenderforum für Terrestrisches Laserscanning am 16. Juni 2009 an der HafenCity Universität Hamburg**

Aufbauend auf den beiden erfolgreichen Veranstaltungen in den Jahren 2005 und 2007 fand am 16. Juni 2009 zum dritten Mal das Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning statt. Hier wurde Anwendern, Wissenschaftlern, Fachleuten und Interessierten die Möglichkeit geboten, Informationen und aktuelle Themen im Bereich des terrestrischen Laserscannings (TLS) auszutauschen. Parallel zur Vortragsreihe fand auch diesmal wieder eine Fachausstellung statt, an der sich mit vierzehn Ausstellern fast doppelt so viele wie 2007 beteiligten. An den Ständen der Firmen bestand die Möglichkeit, sich über den aktuellen Stand der Soft- und Hardware im Bereich des TLS zu informieren. 15 Fachvorträge wurden, verteilt auf vier technische Sitzungen, themenbezogen im großen Vortragszelt (Gebäude D, HCU-Campus City Nord) abgehalten. Insgesamt 96 Teilnehmer, neben Geodäten insbesondere Fachleute aus Architektur, Denkmalschutz sowie Maschinenbau, waren vorrangig aus dem nord- und westdeutschen Raum angereist. Vor allem Vertreter aus Ingenieurbüros (46%), aber auch zahlreiche Universitäten und Forschungseinrichtungen (23%), öffentliche Einrichtungen (11%) und Systemhersteller (20%) nahmen teil.

Nach der Eröffnung durch die Organisatoren, Prof. T. KERSTEN und Prof. H. STERNBERG wurde die erste Session („Grundlagen und

Übersicht“) mit einem Vortrag von H.-J. PRZYBILLA (Hochschule Bochum) mit dem Titel „Triangulationsscanner für Messungen im Submillimeter-Bereich“ eingeleitet. Hier wurden unterschiedliche Systeme und Anwendungen für den Nahbereich präsentiert. Im Anschluss zeigte C. HESSE (dhp:i Hamburg), wie Punktwolken mithilfe automatisierter Verfahren verknüpft werden können. Das „schönste Stadion Deutschlands“ vom HSV diente hier als Objekt, um eine Verknüpfung über automatische Ebenenfindung zu testen. J. BÖHM (Universität Stuttgart) präsentierte unterschiedliche Ansätze zur automatischen Objektrekonstruktion. Anschließend stellte H. STERNBERG kurz die ausstellenden Firmen vor, deren Stände in den Kaffeepausen besucht werden konnten.

Die zweite Session stand unter dem Thema „Prüfverfahren“. F. KERN (i3 Mainz) machte einen Vorschlag für eine kennwertorientierte TLS-Prüfung. Über ein Feldprüfverfahren für terrestrische Laserscanner, das der Anwender direkt vor Ort selbst durchführen kann, referierte W. WEHMANN von der HTW Dresden. Auch an der HCU Hamburg werden Prüfverfahren für TLS entwickelt und an zahlreichen Scannern getestet, wie K. MECHELKE berichtete. Die Session fand ihren Abschluss mit dem Vortrag von A. SCHMIDT-BÖLLERT (Hanack + Partner, Hamburg), der als Anwender noch nicht sicher ist, ob TLS ein „Segen oder Fluch?“ ist.

Nach der Mittagspause, in der genügend Zeit für die Firmenausstellung zur Verfügung stand, folgte die erste Nachmittagssession zum Themenkomplex „Anwendungen“. In dieser Session stellten Anwender ihre Erfahrungen und Ergebnisse in den unterschiedlichsten Einsatzmöglichkeiten des TLS vor: K. ALLERDING zu Anwendungen bei der Hamburg Port Authority, A. TILSNER (LGN, Hannover) präsentierte ihre Bachelor-Arbeit, in der sie das Bismarck-Denkmal in Hamburg erfasst und modelliert hat. T. OVERATH sprach über den Einsatz im Schiffbau zur Deformationsanalyse von Bauteilen und Strukturen. Abschließend zeigte L.G. ZEPPUS (UNISON Berlin), wie Laserscanning erfolgreich im Anlagenbau eingesetzt wird.

Der letzte Vortragsblock wurde eingeleitet von G. GRÄFE von der 3D Mapping Solutions

GmbH aus Oberhaching zum Thema „Kinematisches Laserscanning“ auf Autobahnen und in U-Bahnen. Dem folgte T. KERSTEN (HCU Hamburg) mit einer Dokumentation der historischen Halbinsel von Istanbul durch kinematisches Laserscanning. Es schlossen sich J. MEIER (Metronom Automation GmbH, Mainz) mit einem Bericht über den neuen Lichtraummesszug der Deutschen Bahn sowie abschließend P. RIEGER (RIEGL GmbH) über praktische Erfahrungen zur Kalibrierung mobiler Systeme an.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass der Einsatz des TLS in vielen Bereichen sinnvoll und wirtschaftlich ist. Das Verhältnis zwischen Datenaufnahme und -aufbereitung ist nach wie vor nicht zufrieden stellend. Hier kommt die Forderung nach mehr Automatisierung in den verschiedenen Softwarepaketen auf.

Auch dieses Jahr war die Veranstaltung durch perfekte Organisation und anregende Diskussionen gekennzeichnet und kann sowohl für Veranstalter als auch Teilnehmer als voller Erfolg verzeichnet werden.

Den Abschluss des Tages bildete der *Social Event* in der City Nord, bei dem bei Bratwurst und Salat noch angeregt über neue Erkenntnisse und Einsichten diskutiert wurde.

Weitere Informationen zum 3. Anwenderforum und der Download der Vorträge ist unter [www.hcu-hamburg.de/geomatik/tls2009/tls\\_2009\\_prog.htm](http://www.hcu-hamburg.de/geomatik/tls2009/tls_2009_prog.htm) möglich.

Neben der Geomatik der HCU Hamburg wurde die Veranstaltung vom DVW Landesverein Hamburg / Schleswig-Holstein e.V. und dem Arbeitskreis Nahbereichsphotogrammetrie der DGPF getragen.

ANTJE GRÜNKEMEIER, BOCHUM

## Hochschulnachrichten

### ETH Zürich

Dipl.-Ing. MARTIN SAUERBIER legte am 26. Juni 2009 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich mit der Arbeit *„GIS-based Management and Analysis of the Geoglyphs in the Palpa Region“* die Dissertationprüfung zum Dr. sc. ETH Zürich ab. Prüfungskommission: Prof. Dr. ARMIN GRÜN, Prof. Dr. PETROS PATIAS und Prof. Dr. KAY W. AXHAUSEN.

#### Kurzfassung

Die Dissertation resultiert aus den Arbeiten im Rahmen des Projektes Nasca/Palpa, welches am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich in Kooperation mit dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI-KAAK Bonn) durchgeführt wurde. Die vorgestellten Untersuchungen konzentrieren sich auf die Geoglyphen der Nasca-Region, die allgemein hin auch als „Linien von Nasca“ bekannt sind, und im Speziellen auf die Geoglyphen im Gebiet um den Ort Palpa.

Die durchgeführten Untersuchungen decken zwei Bereiche ab: Zum einen die photogrammetrische Datenakquisition und -prozessierung inklusive der 3D-Rekonstruktion der Geoglyphen, zum anderen das GIS-basierte Management und räumliche Analysen der Geoglyphen.

Die Motivation dieser Arbeit resultiert aus dem Bedarf an geeigneten Datenverwaltungs- und Analysemethoden aus der Archäologie heraus, um eine quantitative Untersuchung der räumlichen Eigenschaften der Geoglyphen und der sie umgebenden Landschaft zu ermöglichen, mit dem Ziel, ihre soziale und geschichtliche Bedeutung besser verstehen zu können. Neben den Geoglyphen wurde außerdem eine zweite Klasse figurativer Überreste alter Kulturen in der Region untersucht: Die Petroglyphen von Chichictara.

Komplementär zu den archäologischen Arbeiten des DAI konzentrierte sich die Arbeit des Autors auf Methoden zur 3D-Datenerfassung zu archäologischen Zwecken, und dabei insbesondere auf die Modellierung mittlerer und großer Objekte mittels Photogrammetrie.



Ein zweiter Schwerpunkt wurde auf das Design und die Implementierung einer Datenbank für die Speicherung und Verwaltung archäologischer und räumlicher Informationen sowie die Entwicklung von Methoden zur räumlichen Analyse archäologischer Objekte gelegt. Die durchgeführten Arbeiten resultierten in einer Fülle von abgeleiteten Daten und Analyseresultaten, die den Archäologen neue Einsichten über die historische Funktion und Bedeutung der Geoglyphen erlaubten. Im Einzelnen sind dies vor allem Digitale Geländemodelle, die aus Luft- und Satellitenbildern abgeleitet wurden, hoch auflösende Orthobilder, 3D-Vektordaten, die die Geoglyphen repräsentieren, und numerische Resultate aus den durchgeführten Analysen.

Die entwickelten und angewandten Methoden zielen darauf ab, die Geoglyphen in möglichst objektiver Art und Weise zu untersuchen und konkrete archäologische Fragestellungen zu beantworten.

Obwohl verschiedene Hypothesen zu Bedeutung und Funktion der Geoglyphen existieren, war das Ziel nicht, eine einzelne zu bestätigen oder zu widerlegen, sondern basierend auf den zur Verfügung stehenden Daten räumliche Eigenschaften der Geoglyphen aufzudecken und diese im Kontext der Hypothesen zu analysieren. Die für die Datenakquisition, Objektdefinition und die quantitativen Analysen der Geoglyphen angewandten Methoden sind ein wichtiger Aspekt dieser Dissertation und können in künftigen Studien auf weiter komplettierte Daten sowie in ähnlichen Studien auf andere Geoglyphenfundorte angewandt werden.

Die Analysen bezogen sich vor allem auf räumliche Eigenschaften der Bodenzeichnungen, wie z.B. ihre Geradlinigkeit, Sichtbarkeit und Einfluss verschiedener räumlicher Variablen auf ihre Konstruktion sowie die statistische Auswertung der Analyseresultate.

Ähnliche Methoden wurden darüber hinaus für die Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara eingesetzt, die sich, verglichen mit den Geoglyphen, durch ihre Größe und ihren echten 3D-Charakter unterscheiden. Um diesen Eigenschaften gerecht zu werden, musste die photogrammetrische Datenerfassung terrestrisch erfolgen sowie eine 3D-Datenbank implementiert werden.

Das entwickelte System kann auch in Zukunft als Basis für die weitere Untersuchung und archäologische Interpretation der beschriebenen Landschaftsdekorationen dienen und stellt außerdem ein einzigartiges Archiv zur Dokumentation dieses wertvollen Kulturerbes dar. Zum aktuellen Zeitpunkt enthält die Datenbank Informationen zu den Geoglyphen der Region um Palpa und eines Teils der Petroglyphen von Chichictara. Die entwickelte Datenstruktur erlaubt jedoch eine Ergänzung der Daten um Nasca-zeitliche Geoglyphen und Paracas-zeitliche Petroglyphen anderer Fundorte.

Der Autor bedankt sich bei der Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für archäologische Forschungen im Ausland (SLSA), der AVINA Stiftung und der ETH Zürich für ihre engagierte Unterstützung, ohne die diese Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Die Dissertation wird in der Blauen Reihe des IGP der ETH Zürich veröffentlicht.

## ETH Zürich

Dipl.-Ing. HENRI EISENBEIß legte am 10. Juli 2009 am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich mit der Arbeit „*UAV Photogrammetry*“ die Dissertationsprüfung zum Dr. sc. ETH Zürich ab.

Prüfungskommission: Prof. Dr. ARMIN GRÜN, Prof. Dr. IMPYEONG LEE und Prof. Dr. KAY W. AXHAUSEN.

### *Kurzfassung*

Der Begriff UAV steht für unbemannte Luftfahrzeuge, somit kann UAV-Photogrammetrie als neue photogrammetrische Aufnahmemethode unter Verwendung von unbemannten Luftfahrzeugen aufgefasst werden. Die Verwendung von UAV-Photogrammetrie erlaubt neue Anwendungen im Nahbereich und in der Kombination von Luftbild- und Nahbereichsphotogrammetrie. Mit UAVs ergeben sich low-cost Alternativen zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie. Die Dissertation beschäftigt sich mit der Herausforderung: „*Verwendung von UAV-Systemen (unbemannte Luftfahrzeuge) als photogrammetrische Datenakquisitionsplattform*“.

UAV-Photogrammetrie beschreibt ein photogrammetrisches Aufnahmesystem, welches manuell, semi-automatisch oder automatisch gesteuert und kontrolliert werden kann und behandelt die photogrammetrische Auswertung der aufgenommenen UAV-Daten. UAV-Plattformen können Ballons, Drachen, Gleitschirme, Luftschiffe, Hubschrauber, Quadkopter und Flächenflieger sein. In diesem Zusammenhang ist eine umfassende Literaturübersicht gegeben, die UAVs mit ihren Anwendungen in der Photogrammetrie darstellt. Unter der Verwendung von vorhandenen Klassifizierungen von UAVs, der vorliegenden Literaturstudie und den durchgeführten Experimenten wurden neue Klassifikationsmethoden für UAVs definiert. Diese Klassifikationen unterscheiden zwischen low-cost und high-end Systemen und der Kapazität für den real-time-Prozess in Abhängigkeit vom implementierten Sensor und Umwelteinflüssen.

Es wurden verschiedene UAV-Systeme für die Untersuchungen auf ihre Anwendbarkeit als photogrammetrische Datenakquisitionssysteme ausgewählt. Basis bildeten spezifische gegebene Klassifikationen. Die ausgewählten Systeme werden in dieser Arbeit vorgestellt und untersucht. Zudem ist ein allgemeiner Workflow für die Flugplanung, Akquisition und Prozessierung von UAV-Bilddaten dargestellt. Abhängig vom UAV-System und dessen Anwendung kann der Workflow an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Dafür wurden spezielle Tools, wie z.B. Bildflugplanung für UAVs, entwickelt. Basierend auf den erzielten Ergebnissen sind die Flugsteuerungssysteme angepasst, das Flugverhalten verbessert und kommerzielle sowie am IGP entwickelte photogrammetrische Softwarepakete für das Prozessieren von UAV-Bilddaten analysiert worden. Der generierte Workflow ermöglicht die Kombination von Feld- und Büroarbeiten in Einem, so dass die Ergebnisse für erste Analysen im Feld verwendet werden können.

Diese Arbeit beschäftigt sich darüber hinaus mit dem Einfluss von manueller, semi-automatisch und automatisch durchgeführter Steuerung auf die Flugeigenschaften der UAV-Flüge und die photogrammetrische Auswertbarkeit der erfassten Bilddaten. Das Flugverhalten und die Positionierungsgenauigkeit ei-

ner UAV-Plattform werden damit erstmalig mittels automatischer Verfolgung und Messung mittels eines Tachymeters durchgeführt. Für diese Analysen wurde ein Testfeld am Campus Höngerberg der ETH Zürich angelegt. Dieses Testfeld erlaubte die Untersuchung der Flugtrajektorie und -performance von verschiedenen UAVs. Zusätzlich zu der Untersuchung mit dem Tachymeter konnte mit einem Laserscanner integriert an einem UAV ein Höhenmodell vom Testfeld generiert werden. Mit den ersten Analysen der Ergebnisse konnte die Flugtrajektorie des UAVs verbessert werden.

Ergänzend zum entwickelten Workflow sind im Rahmen dieser Arbeit verschiedene reale Anwendungen mit UAVs in der Photogrammetrie in den letzten fünf Jahren durchgeführt worden: Die Vor-Inka-Siedlung Pinchango Alto (Peru), die Maya Tempelanlage Copán (Honduras), Schloss Landenberg, Felssturz bei Randa, Volumenabschätzung einer Kiesgrube und Untersuchung des Einflusses von genmodifiziertem Mais (simuliert) auf natürlichen Mais. Die Ergebnisse der durchgeführten Studien zeigen das große Potential der Plattformen für die Verwendung in der Photogrammetrie und in zukünftigen Anwendungen auf. Der Fokus bei den Anwendungen wurde dabei auf die Archäologie und auf die Dokumentation der Umwelt gelegt. Die durchgeführten Anwendungen erlaubten die Bestätigung des generierten Workflows und betonten das große Potential von UAV-Systemen (besonders für autonome und stabilisierte Systeme) für ausgewählte photogrammetrische Aufgaben. Abschließend wurde mit den gewonnenen Ergebnissen aus den Experimenten ein Workflow für die Kombination von LiDAR- und Bildsensoren für ein UAV-System entwickelt.

Die Dissertation wird in der blauen Reihe des IGP der ETH Zürich veröffentlicht.

## Universität Stuttgart

Herr Dipl.-Ing. FREDERIK BLUMRICH wurde am 10. März 2009 von der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart mit der Dissertation „*Optische korrelationsbasierte Messtechnik mittels zu-*

*fälliger Punktemuster*“ zum Dr.-Ing. mit Auszeichnung promoviert.

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. DIETER FRITSCH. Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. ANDREAS DILLMANN.

### *Kurzfassung*

Die grundlegende Idee der optischen korrelationsbasierten Messtechnik besteht darin, die lokale Kreuzkorrelation zur Lösung des Korrespondenzproblems anzuwenden. Dazu wird ein zufälliges, und dadurch eindeutig zu korrelierendes, Punktemuster in zwei unterschiedlichen Zuständen mittels einer digitalen Kamera aufgenommen. Je nach Anwendungsfall können die beiden Zustände durch unterschiedliche Zeitpunkte, Perspektiven, Oberflächenformen oder Dichtegradienten gegeben sein. Die Auswertung des so gewonnenen Bildpaares erfolgt mit Hilfe von Kreuzkorrelationsalgorithmen auf Basis von räumlichen Auswertefenstern. Dieser Ansatz zur Lösung des Korrespondenzproblems ist schnell, eindeutig und robust. Es wird keine Abfolge von Bildern benötigt, wie dies z.B. bei der Streifenprojektion der Fall ist. Daher ist auch eine Messung von dynamischen Vorgängen möglich.

Im Vergleich zur klassischen Photogrammetrie entfällt das explizite Signalisieren einzelner Messpunkte. Die kleinen Punkte des zufälligen Musters können, unter Berücksichtigung ihrer Umgebung, als sehr dichtes, zufällig verteiltes Feld von photogrammetrischen Messmarken angesehen werden. Aufgrund der fehlenden Kodierung der einzelnen Punkte erfolgt die Auswertung daher mittels lokaler Auswertefenster, die jeweils mehrere Punkte des Musters enthalten und somit eindeutig zugeordnet werden können. Durch die Verwendung von lokalen Auswertefenstern zur Lösung des Korrespondenzproblems reduziert sich allerdings die räumliche Auflösung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der Ansatz der Ensemble-Korrelation angewendet. Dabei wird durch den Einsatz mehrerer verschiedener zufälliger Punktemuster im Falle stationärer oder periodischer Vorgänge entweder eine Erhöhung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) der Kreuzkorrelationsfunktion oder eine Verbesserung der räumlichen Auflösung erreicht. Es wird eine Imple-

mentierung der Single-Pixel-Ensemble-Korrelation vorgestellt, mit der die räumliche Auflösung um einen Faktor von bis zu 1024 verbessert werden kann.

Neben der geometrischen Kalibrierung des Messsystems hängt die Genauigkeit der optischen korrelationsbasierten Messtechnik insbesondere von der Genauigkeit der Kreuzkorrelationsalgorithmen ab, die zur Lösung des Korrespondenzproblems verwendet werden. Die Kreuzkorrelationsalgorithmen selbst erlauben eine Messgenauigkeit im Sub-Pixel-Bereich. Dies ist mittels spezieller Sub-Pixel-Detektoren unter Berücksichtigung der lokalen Umgebung des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion möglich. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf die Untersuchung der Algorithmen zur Sub-Pixel-Detektion gelegt.

Es wird gezeigt, dass die bisherigen Algorithmen zur Sub-Pixel-Detektion im Falle elliptischer Korrelationsmaxima einen systematischen Fehler besitzen, der die normalerweise zu erwartende Messgenauigkeit deutlich übersteigt. Zusätzlich ist eine Herleitung der analytischen Beschreibung des systematischen Fehlers Teil dieser Arbeit. Durch die Anwendung eines allgemeinen zweidimensionalen Algorithmus zur Sub-Pixel-Detektion, der in dieser Arbeit entwickelt, ausführlich dargestellt und getestet wird, kann dieser systematische Fehler vollständig eliminiert werden.

Die analytische Beschreibung des systematischen Fehlers und der allgemeine zweidimensionale Algorithmus zur Sub-Pixel-Detektion werden im Rahmen einer Simulation untersucht und mit den Ergebnissen verglichen, die man beim Einsatz kommerzieller Kreuzkorrelationsalgorithmen erhält.

Da es sehr einfach möglich ist, den verbesserten Algorithmus zur Sub-Pixel-Detektion mit der neuen Implementierung der Single-Pixel-Ensemble-Korrelation zu kombinieren, wird insgesamt eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit und der räumlichen Auflösung für sämtliche optischen korrelationsbasierten Messtechniken erreicht.

Die Dissertation ist sowohl elektronisch bei der Bibliothek der Universität Stuttgart ([elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4018/](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4018/)) als auch in Form eines DLR Forschungsberichts (ISSN: 1434-8454) publiziert worden.

## Buchbesprechung

**JÖRG ALBERTZ, MANFRED WIGGENHAGEN, 2009: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. 334 Seiten. Herbert Wichmann Verlag**

Mein eigenes Exemplar des Photogrammetrischen Taschenbuches aus dem Jahr 1989 ist in die Jahre gekommen. Es zeigt inzwischen jene Anzeichnungen, Schrammen und Knicke, die auf den wahren Gebrauchswert eines Arbeitsbuches hinweisen.

Diesen alten, grün eingebundenen Standard des photogrammetrischen Praktikers, konnte ich jetzt ersetzen durch eine druckfrische Neuausgabe des Wichmann Verlages. Das neue Buch ist geringfügig großformatiger, hat einen grauen, festen Einband, und bietet für 44 Euro deutlich mehr Inhalt als seine vier Vorgängerausgaben. Gestaltung, Druckqualität und Papierwahl entsprechen den Ansprüchen an ein gut gemachtes, modernes Buch.

Das von den Autoren neu betitelte Buch geht über die Neuauflage eines bewährten Werkes weit hinaus. Es ist vielmehr ein inhaltlich erweitertes Nachfolgewerk des Photogrammetrischen Taschenbuches geworden.

Der Inhalt wurde neu strukturiert und zeitgemäßen Entwicklungen angepasst. Zugleich wurden die bisher viersprachigen Texte gekürzt auf Deutsch und Englisch. Bewährtes, wie etwa die Formelsammlung, oder mathematisch / physikalische Grundlagen der Bildaufnahme, ebenso Nomogramme, blieben erhalten. Anderes, wie traditionelle photogrammetrische Lehrbuchthemen, wurde gekürzt oder gestrichen. Neues, wie Optische und Mikrowellen Fernerkundung, wurde aufgenommen. Dabei ist die Radartechnik zu umfangreich geraten, während wirtschaftlich relevante Entwicklungen wie Pictometrie und 3D-Gebäudemodelle keine Erwähnung finden.

Die inhaltlichen Erweiterungen gehen einher mit einer Veränderung des Konzeptes.

Insbesondere durch die Ausweitung der beschreibenden Anteile entstand quasi ein Lehr- und Fachbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung in komprimierter Darstellung. Darin sind Fachbegriffe systematisch erfasst und kurz erläutert. Die nunmehr überwiegend textliche Darstellung wird verdeutlicht durch didaktisch gut ausgewählte und gestaltete Abbildungen.

Gefallen hat mir der Verweis der Autoren im Vorwort, dass sich durch die weiterführende Suche im Internet sowohl ergänzende wie neue Informationen erschließen lassen. Eine solche Sichtweise ist angesichts der Halbwertzeit technischer und wissenschaftlicher Entwicklungen sowohl ratsam wie gerechtfertigt.

Trotz Internet wird ein Basiswerk wie das hier vorgelegte Buch jedoch nicht überflüssig. Im Gegenteil: Jeder, der sich im Internet schnelle Hilfe bei der Suche nach verlässlichen Antworten erhofft, wird den Wert eines gezielt zugänglichen, klar gegliederten und komprimierten Grundlagenwerks von gleichbleibend hoher Aussagequalität sehr zu schätzen wissen. Sein Wert besteht in der systematischen Aufbereitung von Fachwissen nach einheitlichen Qualitätsgrundsätzen.

JÖRG ALBERTZ, emeritierter Professor der TU Berlin, und sein neuer Co-Autor MANFRED WIGGENHAGEN, Akademischer Oberrat an der Leibniz Universität zu Hannover, haben ein äußerst nützliches Werk vorgelegt. Das Buch ist zu empfehlen als Nachschlagewerk für praktisch arbeitende Fachleute wie für Studierende des Fachgebietes Photogrammetrie und Fernerkundung.

Ich wünsche mir für die Zukunft, dass die Halbwertzeit des Buches geringer ausfallen wird als die des Photogrammetrischen Taschenbuches aus dem Jahr 1989.

ALFRED MEHLBREUER, MÜNSTER

## Veranstaltungskalender

### 2009

11.–15. Oktober: 22<sup>nd</sup> **CIPA Symposium** in **Kyoto**, Japan. [www.rgis.lt.ritsumei.ac.jp/cipa2009/](http://www.rgis.lt.ritsumei.ac.jp/cipa2009/)

20.–21. Oktober: **ISPRS 3<sup>rd</sup> International Workshop on the Future of Remote Sensing in Antwerpen**, Belgien. [isprs.vgt.vito.be/events.html](http://isprs.vgt.vito.be/events.html)

21.–22. Oktober: **n-DGIS 2009 - ISPRS International Workshop on Multidimensional and Mobile Data Model 2009** in **Johor Bahru**, Malaysia. [www.fksg.utm.my/isprswgII5/](http://www.fksg.utm.my/isprswgII5/)

4.–6. November: 17<sup>th</sup> **ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS 2009)** in **Seattle**, USA. [acmgis09.cs.umn.edu/](http://acmgis09.cs.umn.edu/)

3.–4. Dezember: **ISPRS Workshop on Quality, Scale & Analysis Aspects of Urban City Models** in **Lund**, Schweden. [www.commission2.isprs.org/wg2/](http://www.commission2.isprs.org/wg2/)

### 2010

25.–27. Januar: **Symposium GIS Ostrava 2010 "GIS meets Remote Sensing & Photogrammetry towards Digital World"** in **Ostrava**, Tschechien.

3.–4. Februar: 9. **Oldenburger 3D-Tage**: Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laserscanning. [www.fh-ooe.de/institute/iapp/workshop/](http://www.fh-ooe.de/institute/iapp/workshop/)

10.–12. Februar: **ISPRS WG I/5 Workshop on Calibration & Orientation (EuroCOW 2010)** in **Castelldefels**, Spanien. [www.ideg.es/page.php?id=787](http://www.ideg.es/page.php?id=787)

9.–11. März: 15. **Münchener Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme** in **München**. [www.rundertischgis.de/](http://www.rundertischgis.de/)

10.–12. März: **ISPRS WG V/2 Workshop on Advances in Cultural Heritage Measurement Techniques** in **Kanpur**, Indien.

26.–28. Mai: **ISPRS Commission II Symposium "Theory & Concepts of Spatial Information Science"** in **Hong Kong**, China. [isgis.lsgi.polyu.edu.hk/](http://isgis.lsgi.polyu.edu.hk/)

2.–4. Juni: **ISPRS Commission VI Symposium "Education & Outreach"** in **Enschede**, Niederlande.

8.–10. Juni: 58. **Deutscher Kartographentag** in **Berlin/Potsdam**. [dkt2010.dgfk.net/](http://dkt2010.dgfk.net/)

10.–11. Juni: 6. **GIS-Ausbildungstagung 2010** in **Potsdam**. [gis.gfz-potsdam.de](http://gis.gfz-potsdam.de)

16.–18. Juni: **ISPRS Commission I Symposium "Image Data Acquisition - Sensors & Platforms"** in **Calgary**, Kanada. [sensorweb.geomatics.ucalgary.ca/isprs/tc1/index.php?q=node/4](http://sensorweb.geomatics.ucalgary.ca/isprs/tc1/index.php?q=node/4)

22.–24. Juni: **ISPRS Commission V Symposium "Close-Range Sensing: Analysis & Applications"** in **Newcastle upon Tyne**, Großbritannien. [www.isprs-newcastle2010.org/](http://www.isprs-newcastle2010.org/)

1.–3. Juli: 30. **Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF** im Rahmen der Dreiländertagung in **Wien**. [www.dgpf.de/neu/jahrestagung/informationen.htm](http://www.dgpf.de/neu/jahrestagung/informationen.htm)

5.–7. Juli: **ISPRS Commission VII Symposium "100 Years ISPRS – Advancing Remote Sensing Science"** in **Wien**, Österreich. [www.isprs100vienna.org/](http://www.isprs100vienna.org/)

9.–13. August: **ISPRS Commission VIII Symposium "Remote Sensing Applications & Policies"** in **Kyoto**, Japan.

1.–3. September: **ISPRS Commission III Symposium "Photogrammetric Computer Vision & Image Analysis"** in **Paris**, Frankreich.

1.–5. September: **7<sup>th</sup> ICA Mountain Cartography Workshop** in **Borsa**, Rumänien. [www.mountaincartography.org/activities/workshops/](http://www.mountaincartography.org/activities/workshops/)

14.–17. September: **GIScience 2010 – 6<sup>th</sup> International Conference on Geographic Information Science** in **Zürich**. [www.giscience2010.org/](http://www.giscience2010.org/)

5.–7. Oktober: **INTERGEO®** – Kongress und Fachmesse für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement in **Köln**. [www.intergeo.de/de/deutsch/kongress/kongress.php](http://www.intergeo.de/de/deutsch/kongress/kongress.php)

16.–18. November: **ISPRS Commission IV Symposium "Geodatabases & Digital Mapping"** in **Orlando, USA**.

## Neuerscheinungen

JOSEF STROBL, THOMAS BLASCHKE & GERALD GRIESEBNER (Hrsg.), 2009: *Angewandte Geoinformatik 2009*. Beiträge zum 21. AGIT-Symposium Salzburg. XVI, 858 Seiten, kartoniert, ISBN 978-3-87907-480-8, Wichmann, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm.

ADRIJANA CAR, GERALD GRIESEBNER & JOSEF STROBL (Ed.), 2009: *Geospatial Crossroads@GI\_Forum '09*. X, 245 pages. Softcover, ISBN 978-3-87907-481-5, Wichmann, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm.

THOMAS JEKEL, ALFONS KOLLER & KARL DONERT (Ed.), 2009: *Learning with Geoinformation IV – Lernen mit Geoinformation IV*. IX, 243 pages, Softcover, ISBN 978-3-87907-484-6, Wichmann, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm.

ROBERT MARSCHALLINGER, WILLI WANKER & FRITZ ZOBL (Hrsg.), 2009: *Online Datenerfassung, berührungslose Messverfahren, 3D-Modellierung und geotechnische Analyse in Geologie und Geotechnik*. Beiträge zur COG-Fachtagung Salzburg 2009. VIII, 254 Seiten, Softcover, ISBN 978-3-87907-490-7, Wichmann, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm.

## Zum Titelbild

### Stammgelände der Technischen Universität München



Das Titelbild zeigt das räumliche Umfeld des Instituts für Photogrammetrie und Kartographie (IPK) im Stammgelände der Technischen Universität München (TUM), dessen 60jähriges Bestehen mit dieser Ausgabe der PFG gefeiert wird. Das Gelände wurde für eine Reihe von Untersuchungen als Testgebiet gewählt und mit verschiedenen Sensoren und in unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen. Im Weiteren sind verschiedene Daten und Ergebnisse dargestellt. *Oben links:* Gebäudeflügel rechts vom Haupteingang an der Arcisstraße. Das IPK befindet sich im ersten Obergeschoß. *Oben rechts:* SAR-Intensitätsbild vom Testgebiet TUM, das aus hoch aufgelösten Daten des Satelliten TerraSAR-X prozessiert wurde. Das Bild wurde durch Mitteilung eines Bildstapels gewonnen, der für die

Analyse von stabilen Rückstreuern (Persistent Scatterer) benötigt wird (siehe Beitrag von BAMLER et al. in diesem Heft). *Mitte links:* Laserpunktwolke vom Testgebiet TUM, die mit einem schräg vorwärtsschauenden Laserscanner von einem Hubschrauber aus aufgenommen wurde. Im Vordergrund ist die alte Pinakothek zu sehen. Die Farben der Punkte entsprechen bestimmten Klassen, die durch eine Segmentierung der Punkt wolke den Punkten zugeordnet wurden (siehe Beitrag von HEBEL & STILLA, PFG Heft 3/2009). *Mitte rechts:* Thermisches Infrarotbild (TIR) einer Videosequenz, die beim Überflug des Testgebiets TUM von einem Hubschrauber aus aufgenommen wurde. TIR-Bildsequenzen werden sowohl im Zusammenhang mit der automatischen Texturierung von Gebäudemodellen (siehe Beitrag von HOEGNER et al., PFG Heft 6/2007) als auch für die Fahrzeugextraktion (siehe Beitrag von YAO et al. in diesem Heft) analysiert. *Unten links:* Orthophoto (© LVG München) vom Testgebiet TUM mit der alten Pinakothek (rechts). *Unten rechts:* 3D Gebäudemodell mit Fassadentexturen, die aus terrestrischen Bildfolgen im sichtbaren Bereich (siehe z.B. Bild oben links) und im TIR-Bereich entnommen wurden. Im hinteren Bereich des Gebäudemodells ist in blau eine Laserpunkt wolke überlagert. Das Bild auf der Bodenfläche ist eine Collage aus dem Orthophoto (Bild unten links) und der digitalen Flurkarte.

#### Weitere Informationen:

Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung, 80333 München, Tel.: +49-89-289-22671, Fax: +49-89-2809573, e-mail: stilla@tum.de

## Korporative Mitglieder

### Firmen

AEROWEST GmbH  
 AICON 3D Systems GmbH  
 aphos Leipzig AG  
 Applanix Corporation  
 Becker GeoInfo GmbH  
 Bernhard Harzer Verlag GmbH  
 Blom Deutschland GmbH  
 Brockmann Consult  
 BSF Luftbild GmbH  
 Büro Immekus  
 CGI Systems GmbH  
 con terra GmbH  
 Creaso GmbH  
 DEFINIENS AG  
 DELPHI IMM GmbH  
 Deutsches Bergbau-Museum  
 J. Linsinger ZT-GmbH  
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH  
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH  
 ESRI Geoinformatik GmbH  
 EUROPEAN SPACE IMAGING  
 Eurosense GmbH  
 fokus GmbH  
 fpi Fuchs Ingenieure GmbH  
 g.on experience gmbh  
 GAF GmbH  
 GeoCad GmbH  
 GeoCart Hertzen GmbH  
 GeoContent GmbH  
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH  
 GEOSPACE Beckel GmbH  
 GEOSYSTEMS GmbH  
 GGS - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service  
 GIP Geoinformatics & Photogrammetric Engineering  
 Hansa Luftbild AG  
 Herbert Wichmann Verlag Hüthig GmbH  
 IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH  
 ILV Ing.-büro für Luftbildausw. und Vermessung  
 Imetric 3D GmbH  
 Inpho GmbH  
 Intergraph GmbH, Geschäftsbereich Z/I Imaging  
 INVERS - Industrievermessung & Systeme  
 J. Linsinger ZT-GmbH  
 Jena-Optronik GmbH  
 Johan Piedfort Photogrammétrie  
 KAZ Bildmess GmbH  
 Leica Geosystems GmbH  
 Luftbild Brandenburg GmbH  
 LUFTBILDDATENBANK, Ing. Büro Dr. H. G. Carls  
 MAPS geosystems GmbH  
 Messbildstelle GmbH  
 Microsoft Photogrammetry  
 MILAN Geoservice GmbH  
 PHOENICS GmbH  
 PMS - Photo Mess Systeme AG  
 Rollei Metric GmbH  
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Photogrammetrie  
 technet GmbH  
 TERRA-Bildmessflug GmbH & Co.  
 TerraVista Umweltdaten GmbH

### TopoSys GmbH

TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH  
 trimetric 3D Service GmbH, Garbsen

### Behörden

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

### Hochschulen

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