

VGI

Österreichische Zeitschrift für VERMESSUNG & GEOINFORMATION

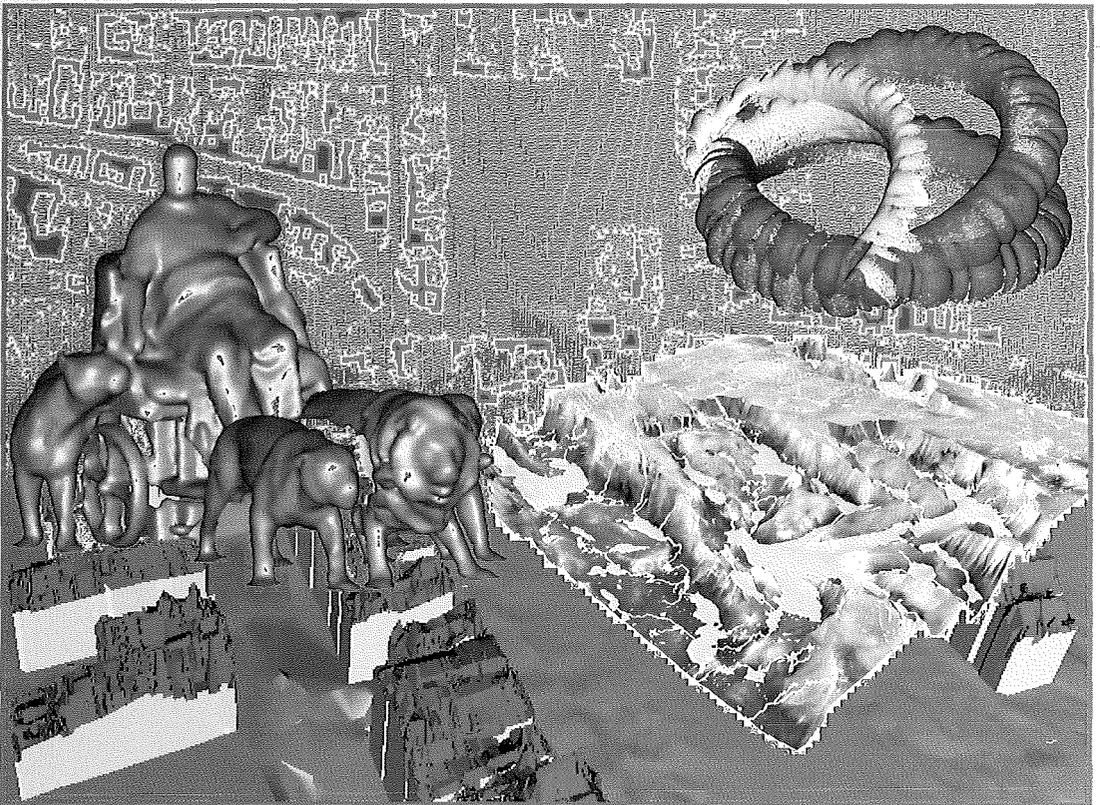
91. Jahrgang 2003

Heft 4/2003

Organ der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation und der Österreichischen Geodätischen Kommission

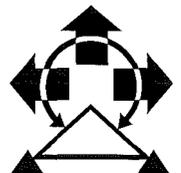
A-1025 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

Österreichische Post AG
Info.Mail Entgelt bezahlt



Universitätslehrgang
Laserscanning

Datenerfassung und
anwendungsorientierte Modellierung



VGI

Österreichische Zeitschrift für VERMESSUNG & GEOINFORMATION

91. Jahrgang 2003
ISSN 0029-9650

Heft 4/2003

Schriftleiter: Dipl.-Ing. Wolfgang Gold
Stellvertreter: Dipl.-Ing. Stefan Klotz
Dipl.-Ing. Ernst Zahn
A-1025 Wien, Schiffamtsgasse 1-3

Organ der Österreichischen Gesellschaft für
Vermessung und Geoinformation und der
Österreichischen Geodätischen Kommission

INHALT

	Seite
<i>K. Kraus:</i> Universitätslehrgang „Laserscanning – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung“	219
<i>W. Wagner, A. Ullrich, C. Briese:</i> Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche	223
<i>H. Kager:</i> Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips	235
<i>N. Pfeifer:</i> Oberflächenmodelle aus Laserdaten	243
<i>P. Dorninger:</i> Analyse und geomorphologische Verbesserung von Geländemodellen mittels Regensimulation	253
<i>J. Jansa, H. Stanek:</i> Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen	262
<i>M. Attwenger, C. Briese:</i> Vergleich digitaler Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning	271
<i>A. Ullrich, R. Schwarz, H. Kager:</i> Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera	281
<i>A. Haring, C. Briese:</i> Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten am Beispiel der Marc-Anton-Plastik	288
<i>M. Hofer, H. Pottmann:</i> Orientierung von Laserscanner-Punktwolken	297
Impressum	308

Titelbild: Collage aus Abbildungen der Hauptartikel

Editorial

Nach der VGI 1/2003 gibt es im Jahrgang 2003 bereits zum zweiten Mal Anlass eine Sonderausgabe der Österreichischen Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI) herauszugeben. War das oben erwähnte Heft eine Dokumentation von Arbeiten österreichischer Wissenschaftler auf dem Gebiet der Geodäsie anlässlich der IUGG-Generalversammlung in Japan, so steht diese Ausgabe ganz im Zeichen des Universitätslehrganges „Laserscanning – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung“. Diese Veranstaltung wurde vom 22. – 24. September 2003 durch das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien abgehalten.

Die hohe Teilnehmerzahl – es waren 61 Hörerinnen und Hörer inskribiert – bringt das große Interesse und die Aktualität dieses Themas zum Ausdruck. „Laserscanning“ ist somit ein drängendes Thema für VGI-Artikel. Der Leiter des

Universitätslehrganges, Prof. Dr. Karl Kraus, konnte die Vortragenden dieses Universitätslehrganges dazu überreden, die Inhalte in dieser VGI zu publizieren. Die Fachbeiträge basieren auf den Lehrgangsunterlagen und wurden für die Veröffentlichung stark überarbeitet. Eine Zusammenfassung des Lehrgangsablaufes mit einer fachlichen Einleitung sowie mit Hinweisen welche Lehrgangsthemen nun hier oder an anderer Stelle publiziert sind, ist im Vorwort von Prof. Dr. Karl Kraus zu finden.

Den Autoren, die ihre Vorträge publikationsreif ausformulieren mussten, sowie dem Initiator, Prof. Dr. Karl Kraus, möchte ich für die gute Zusammenarbeit danken. Ich gehe davon aus, dass diese VGI-Ausgabe Initialzündung für viele weitere Laserscanning-Artikel in dieser Zeitschrift sein wird.

*Wolfgang Gold
Schriftleiter*



Universitätslehrgang „Laserscanning“ – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung

Vorwort

Karl Kraus, Wien

Motivation für den Universitätslehrgang

Das Laserscanning ist gegenwärtig eine stark expandierende Disziplin zur metrischen Erfassung von Oberflächen. Mit flugzeuggetragenen Laserscannern werden Geländeoberflächen, aber auch Vegetation und Dachlandschaften ermittelt. Mit terrestrischen Laserscannern werden Gebäudefassaden, Deponien sowie der Aushub im Tunnel und im Steinbruch, aber auch Architekturmodelle, Kunstgegenstände, etc. erfasst. Das Laserscanning liefert sehr große Punktwolken, aus denen – in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung – die relevanten Informationen (Geländemodelle, Geländeoberkanten von Hochwasserschutzdämmen, CAD-Modelle von Gebäuden etc.) extrahiert werden müssen. Das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien bearbeitet gegenwärtig mit mehreren Partnern umfangreiche einschlägige Pilotprojekte. Die Konzeption dieser Pilotprojekte, die zum Einsatz kommenden mathematischen Methoden und Softwarepakete sowie die zu erschließenden Anwendungsbereiche eignen sich für einen Universitätslehrgang.

Dankenswerterweise widmet die VGI-Schriftleitung das gesamte Heft diesem Universitätslehrgang. Im Folgenden sollen die einzelnen Beiträge dieses Heftes in einen Zusammenhang gestellt und auch Beiträge des Universitätslehrganges erwähnt werden, die nicht in diesem VGI-Heft enthalten sind.

Einführungs- und Basisvorlesungen

Der Leiter des Universitätslehrganges hat in den folgenden drei Vorlesungen die Grundlagen gelegt und die Einsatzmöglichkeiten angerissen:

- Prinzipien des flugzeuggetragenen Laserscannings und seine Abgrenzung zu anderen Datenerfassungsverfahren (z.B. Stereophotogrammetrie).
- Die wichtigsten Parameter (Genauigkeit, Punktdichte, etc.) für die Projekt- und Flugplanung.
- Konstruktionsprinzipien sowohl terrestrischer Laserscanner als auch Laserscanner für den

extremen Nahbereich und Aufnahmeplanung sowie Strategien zur Objektmodellierung.

Das Manuskript dieser drei Vorlesungen erscheint als 7. Auflage des Bandes 1 „Photogrammetrie“ mit dem Untertitel „Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen“ beim Walter de Gruyter Verlag, Berlin, im Februar 2004.

Die reflektorlose Entfernungsmessung mit dem Laserstrahl setzt die diffuse Reflexion an dem vom Laserstrahl getroffenen Oberflächenelementen voraus. Inwieweit diese Voraussetzung zutrifft – und viele andere physikalische Einflussfaktoren der Laserentfernungsmessung – behandelt der Beitrag „Der Laserstrahl und seine Interaktion mit Oberflächen unterschiedlicher Beschaffenheit“ von W. Wagner, A. Ullrich und Ch. Briese.

Georeferenzierung flugzeuggetragener Laserscanneraufnahmen

Bei einer Laserscanner-Flugmission müssen mehrere Mess- und Registriereinrichtungen mit einer hohen Präzision zusammenspielen. Mit differenziellem GPS wird weitgehend die Flugbahn ermittelt, mit einer inertialen Messeinrichtung (IMU) vor allem die Stellung des Flugzeuges und schließlich mit einer Ablenkeinrichtung im Laserscanner die Richtung der zu messenden Entfernungen. Außerdem besteht noch ein komplexes Datumsproblem, denn die GPS- und IMU-Informationen beziehen sich auf ein globales Koordinatensystem, die Ergebnisse der Laserscanner-Mission erwartet man aber im Landeskoordinatensystem.

Während der Flugmission sind zwei bis drei Referenzstationen zu besetzen. In Zukunft werden es virtuelle Referenzstationen sein. Außerdem erhält die Flugfirma zur Kalibrierung des Gesamtsystems die Höhen einiger horizontaler Testflächen. Die Flugfirma liefert die kartesischen Koordinaten – streifenweise – im GPS-Koordinatensystem, in der Regel im WGS 84.

Anschließend erfolgt die Qualitätskontrolle. In den Überlappungsbereichen der Streifen, insbe-

sondere entlang der Querstreifen, werden an vegetationsfreien Stellen die Diskrepanzen automatisch ermittelt. Außerdem ist es empfehlenswert, terrestrische Passpunkte zu bestimmen und ihre Diskrepanzen zu den Laserscannerdaten zu ermitteln.

Im Gegensatz zur Photogrammetrie gibt es beim Laserscanning – wegen der verhältnismäßig groben Auflösung – allerdings keine Passpunkte und keine Verknüpfungspunkte. An die Stelle der Passpunkte treten geneigte Passebenen und an die Stelle der Verknüpfungspunkte zwischen den Streifen treten automatisch zu bestimmende Verknüpfungsebenen. Mit den Diskrepanzen an den Passebenen und an den Verknüpfungsebenen kann eine Blockausgleichung mit den Laserscanner-Streifen als Elementareinheiten durchgeführt werden. Die einzelnen Streifen werden dabei verschoben und gedreht, eventuell auch mit zusätzlichen Parametern deformiert. Wenn die Passpunkte mit ihren Landeskoordinaten eingeführt werden, werden auf diese Weise auch die Geoidundulationen und die Spannungen im Festpunktfeld der Landesvermessung weitgehend berücksichtigt. Erfolgt diese Blockausgleichung im globalen Koordinatensystem, was theoretisch zu bevorzugen ist, sind im Anschluss an die Blockausgleichung die Geoidundulationen und die Netzspannungen mit entsprechenden Transformationen zu berücksichtigen. Der komplexen Aufgabe der Georeferenzierung ist der Beitrag „Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips“ von H. Kager gewidmet. Er ist in englischer Sprache entstanden. Aus Zeitgründen ist die Übersetzung unterblieben.

Gelände- und Stadtmodelle aus flugzeuggetragenen Laserscanneraufnahmen

Nach Überführung der Laserscannerpunkte in das Landeskoordinatensystem sind aus der Punktwolke die Objektmodelle zu bilden. Die Aufgabe wird dadurch erschwert, dass man nicht weiß, welche Objekte angemessen und an welchen Objektstellen die Messungen vorgenommen wurden. Die Einzelmessungen sind verhältnismäßig genau, eine darüber hinausgehende Genauigkeitssteigerung kann durch Einbeziehung der großen Anzahl der Messungen erreicht werden. Diese Charakterisierung der ursprünglichen Laserscannerpunkte legt die Auswertung mittels statistischer Methoden nahe. Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien wurde bereits 1996/97 eine solche Methode entwickelt, die im VGI-Heft

1/1997, S. 25 ff., erstmals publiziert und im Wienerwald-Projekt der Magistratsabteilung 41 der Stadt Wien erstmals mit Erfolg erprobt wurde (VGI-Heft 3/1997, S. 174 ff.). Herr Dr. N. Pfeifer, der inzwischen zur TU Delft gewechselt ist, war maßgebend bei der Methodenentwicklung am I.P.F. beteiligt (siehe VGI-Heft 2/2001, S. 83 ff.). Sein Beitrag „Oberflächenmodelle aus Laserdaten“ geht näher auf die I.P.F.-Methode ein. Sein Beitrag spricht auch die vielen anderen Methoden an, die in letzter Zeit entstanden sind.

In der Fortsetzung des Universitätslehrgangs hat Herr Dipl.-Ing. Ch. Briese die folgenden beiden Vorträge gehalten:

- Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle.
- Extraktion von Strukturelementen aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten.

Der erste Beitrag behandelt das Problem, die aus den sehr dichten Laserscannerdaten abgeleiteten digitalen Geländemodelle auf ein Datenvolumen zu reduzieren, das auch Folgeprogramme (z.B. im GIS-Bereich, in der Hydrologie) bewältigen können. Der I.P.F.-Ansatz geht davon aus, alle Laserscannerdaten zur Ableitung des digitalen Geländemodells heranzuziehen (Genauigkeitssteigerung!) und erst dann die Datenreduktion vorzunehmen. Man kann auch eine andere Strategie verfolgen. In den Heften 5/2003, S. 312 ff. und 6/2003, S. 357-366, der zfv (Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement) ist darüber eine längere Diskussion – gemeinsam mit vielen anderen Aspekten – publiziert.

Der zweite Beitrag von Herrn Briese soll vor einer Publikation noch weiter verfeinert werden. Eine interessante Zwischenlösung bietet sich für die österreichische Datensituation an. Am Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) wurden nämlich in den letzten Jahren in photogrammetrischen Stereomodellen die geomorphologischen Strukturlinien aus 21 cm-Aufnahmen mit dem Bildmaßstab 1:15000 digitalisiert. Die Faustformeln für die Stereophotogrammetrie ergeben daraus eine Lagegenauigkeit von ± 25 cm und eine Höhengenaugigkeit von ± 45 cm. Diese Lagegenauigkeit ist etwas besser als die Lagegenauigkeit des flugzeuggetragenen Laserscannings; die Höhengenaugigkeit ist dagegen wesentlich schlechter als die Höhengenaugigkeit des flugzeuggetragenen Laserscannings. Damit kommt eine interessante Symbiose von Photogrammetrie und Laserscanning zustande: Die Lage der Strukturlinien übernimmt man von der Photogrammetrie, die Höhen dieser Linien werden aus den Laserscannerdaten ermittelt.

Die Lage der wichtigsten Strukturelemente kann man auch mittels einer Regensimulation im verhältnismäßig stark geneigten Gelände finden. Darüber und zusätzlich über attraktive Visualisierungen berichtet der Beitrag „Analyse und geomorphologische Verbesserung von Geländemodellen mittels Regensimulation“ von P. Dorninger. Der Dorninger'sche Beitrag spannt den Bogen von einem Projekt im Wienerwald über ein Projekt der Schneeealpe bis zum Weltraumprojekt Mars-Express der Europäischen Weltraumbehörde (ESA).

Aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten lassen sich auch Gebäudemodelle ableiten. Der Aufsatz „Ableitung von Stadtmodellen aus Laserscannerdaten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen“ von J. Jansa und H. Stanek berichtet darüber. Es werden zwei Methoden präsentiert. Die erste Methode wurde im Kompetenzzentrum „Advanced Computer Vision“ mit Beteiligung des Ingenieurbüros P. Schmid, Wien, entwickelt. Diese Methode liefert sehr genaue CAD-Modelle. Sie setzt die zweidimensionalen Gebäudegrundrisse voraus. Losgelöst von dieser Voraussetzung hat Dr. F. Rottensteiner am I.P.F. eine auf Bildverarbeitung gestützte Methode entwickelt, die ebenfalls in dem erwähnten Beitrag „Jansa/Stanek“ beschrieben ist.

Eine Abrundung des flugzeuggetragenen Laserscannings bildet der Beitrag „Vergleich digitaler Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning“ von M. Attwenger und Ch. Briese. Im Pulkautal wurde sowohl ein Geländemodell mittels Stereophotogrammetrie als auch mittels flugzeuggetragenen Laserscanning abgeleitet. Der Vergleich der beiden Geländemodelle ist von großem praktischen Interesse.

Terrestrisches Laserscanning

Der zweite Teil des Universitätslehrganges war dem terrestrischen Laserscanning und dem Laserscanning im extremen Nahbereich gewidmet. Der Einführungsvortrag des Leiters des Universitätslehrganges wurde bereits erwähnt. In der Fortsetzung wurde der Beitrag „Multistationsausgleichung für ein Laserscannersystem mit aufgesetzter Kamera“ von A. Ullrich, R. Schwarz und H. Kager präsentiert. Er zeigt die vielseitigen Möglichkeiten der Datenerfassung und Datenauswertung auf, wenn der Laserscanner mit einer aufgesetzten photographischen Digitalkamera kombiniert wird. Im Beitrag „Modellierung terrestrischer Laserscannerdaten am Beispiel der Marc-Anton-Plastik“ von A. Haring,

Ch. Briese, N. Pfeifer wird das terrestrische Laserscanning mit einem unabhängigen Bildverband aus digitalen Kodak-Aufnahmen kombiniert und nachgewiesen, dass die hybride Ausgleicheung aller Informationen einen erheblichen Genauigkeitsgewinn an den Objektpunkten bringt. Im zweiten Teil dieses Aufsatzes wird beschrieben, wie aus Laserscanner-Punktwolken eine anspruchsvolle Oberflächenmodellierung mit einem in der Geometrie entstandenen Softwarepaket erfolgen kann.

Noch weiter in das Fachgebiet der modernen Geometrie dringt der Beitrag „Orientierung von Laserscanner-Punktwolken“ von M. Hofer und H. Pottmann ein. Aus der Sicht der Photogrammetrie lösen die Geometrie-Experten die Orientierungsaufgaben unkonventionell. Sie finden zum Beispiel auch Lösungen der Orientierungsaufgaben von Punktwolken ohne die in der Photogrammetrie „heiligen“ Verknüpfungspunkte. Im Rahmen des Innovativen Projektes „3D-Technik“ (<http://www.geometrie.tuwien.ac.at/3dtechnik>) der TU Wien, das Prof. Pottmann leitet und in dem mehrere Institute – auch das I.P.F. – zusammenarbeiten, werden verschiedene Fachgebiete zusammenwachsen und sich gegenseitig befruchten. Die Klammer bildet der in dem Innovativen Projekt angeschaffte VI-900-Minolta Laserscanner für den extremen Nahbereich, der auch im Übungsprogramm des Universitätslehrganges eingebunden war.

Abschluss des Universitätslehrganges

Den Abschluss des Universitätslehrganges bildete der Vortrag „Anwendungsmöglichkeiten des Laserscannings einschließlich Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen“ von K. Kraus. Die wichtigsten Aussagen sollen im Folgenden zusammengefasst werden:

- Kunstgegenstände (Statuen etc.) sowie Bauteile (Maschinenbau, Bauingenieurwesen, etc.) werden in Zukunft mit Laserscanning – eventuell ergänzt mit digitalen photographischen Aufnahmen – erfasst bzw. dokumentiert.
- Bei der Erfassung und Dokumentation ebener Gebäudefassaden mit vielen Details ist die digitale photogrammetrische Entzerrung nach wie vor das adäquate Verfahren.
- Tiefenmäßig stark gegliederte Objekte mit gewölbten Flächen werden in Zukunft mit terrestrischen Laserscannern – eventuell ergänzt mit digitalen Kameras – bearbeitet.
- Die Erfassung und Dokumentation tiefenmäßig stark gegliederter Objekte, insbesondere

Fassaden, mit vielen Kanten ist nach wie vor eine Domäne der Stereophotogrammetrie. Falls Laserscanner eingesetzt werden, ist unbedingt eine digitale Kamera zusätzlich erforderlich.

- Die Volumen-Veränderungen bei kleinen Deponien und Steinbrüchen wird man in Zukunft mit terrestrischen Laserscannern – möglichst mit erhöhten Standpunkten – überwachen.
- Topographische Datenbestände, die den Kartenmaßstäben 1:10000 bis 1:50000 entsprechen, werden nach wie vor mittels Stereophotogrammetrie erfasst. Hochauflösende Satellitenaufnahmen werden in diesem Bereich in Zukunft konkurrenzfähig werden.
- Naturbestandsaufnahmen, die dem Kartenmaßstab 1:5000 entsprechen (DGM $\pm 1\text{m}$, Situation $\pm 1\text{m}$, Orthophoto-Pixel 25cm, Gebäudeklötzchen), werden vermutlich noch eine gewisse Zeit mit der Stereophotogrammetrie bearbeitet werden. Die Wende zum flugzeuggetragenen Laserscanning ist aber absehbar. Falls bereits digitale Orthophotos verfügbar sind und diese als Situationsauswertung akzeptiert werden, sollte man das noch erforderliche DGM aus flugzeuggetragenen Laserscanning mit einem Punktabstand von ca. 2m ableiten. Für die Gebäudeklötzchen ist allerdings ein Punktabstand von 1m erforderlich.
- Naturbestandsaufnahmen, die dem Kartenmaßstab 1:1000 entsprechen (DGM ± 10 bis 20cm, Situation $\pm 25\text{cm}$, Orthophoto-Pixel mit etwa einem Dezimeter bzw. dreidimensionale Photomodelle, CAD-Gebäudemodelle), wird man in den Hochwassergefährdungszonen (sehr oft starker Bewuchs) in Zukunft mit flugzeuggetragenen Laserscanning – eventuell kombiniert mit digitalen Zeilen- und/oder Flächenkameras – bearbeiten. Auch Stadtmodelle auf diesem hohen Qualitätsniveau können vermutlich – wenn die Methoden noch weiter ausgereift sind – in Zukunft sehr wirtschaftlich mit flugzeuggetragenen Laserscanning gewonnen werden. Die Datendichte

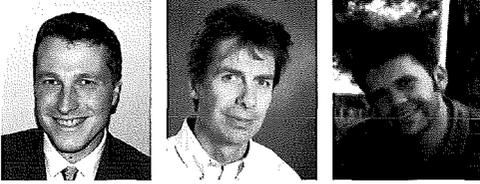
muss allerdings mindestens bei vier Punkten pro Quadratmeter liegen.

Am Ende dieses Vortrages wurde noch ein Szenario zum Monitoring tatsächlicher Hochwasserereignisse skizziert. Ein genaues DGM ist dafür Voraussetzung. Die Kosten für die DGM-Erstellung sind innerhalb solcher Katastrophenüberwachungen eine zweitrangige Frage. Das einschlägige Manuskript wird im Heft 12/2003 der Zeitschrift für raumbezogene Informationen und Entscheidungen (GeoBIT/GIS, Wichmann Verlag) publiziert werden.

Die umfangreichen Übungen zum Vorlesungsstoff, die wegen der großen Teilnehmeranzahl als Demonstrationen abgehalten wurden, haben teilweise die bereits genannten Vortragenden und teilweise folgende Personen betreut: Ch. Eberhöfer, Dipl.-Ing. S. Hofbauer, Dipl.-Ing. G. Mandlbürger, Dipl.-Ing. M. Trommler, Dr. C. Ressler (in seiner Hand lag auch die Organisation des gesamten Lehrgangs), Dipl.-Ing. B. Wöhrer und Mitarbeiter der Firma Riegl.

Ausblick

Das Laserscanning wird unser engeres und weiteres Fachgebiet umkrempeln. Das I.P.F. beteiligt sich intensiv daran. Die in der modernen Photogrammetrie entwickelten Prinzipien lassen sich weitgehend auf das Laserscanning übertragen. Zusätzlich setzt die Laserscanning-Technik viele neue Impulse. Ein Zusammenwachsen von Laserscanning und Photogrammetrie wird eintreten. Erfreulicherweise ist es gelungen, ein Christian-Doppler-Labor mit der Bezeichnung „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ zu gründen und dem I.P.F. anzugliedern. Die Professoren Wagner und Jansa sind die Leiter dieses Labors, das am 1. Dezember 2003 seinen Betrieb unter Einbeziehung von sechs privaten Unternehmungen aufgenommen hat. In diesem Labor und am I.P.F. werden die großen Herausforderungen, die im Laserscanning anstehen, aufgegriffen und sowohl in ihren Grundlagen als auch in ihrer Anwendung erforscht werden.



Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche

Wolfgang Wagner, Wien; Andreas Ullrich, Horn und Christian Briese, Wien

Zusammenfassung

Flugzeuggestützte Laserscanner wurden bisher hauptsächlich für die Erfassung der Topographie eingesetzt, doch auch in anderen Bereichen wie der Forstwirtschaft und Stadtplanung hat diese Technik ein großes Potential. Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Laserscanner und dem breiter werdenden Anwendungsfeld wird es immer wichtiger, sowohl die geometrischen als auch die physikalischen Aspekte des Messprozesses genau zu verstehen. Da es im deutschsprachigen Raum bisher kaum Literatur gibt, die sich dem Thema von der physikalischen Seite nähert, werden in diesem Aufsatz das physikalische Messprinzip und die wichtigsten theoretischen Grundlagen (Radargleichung, Streuquerschnitt, Impulsform) des Laserscannings diskutiert. Die in diesem Artikel vorstellten Konzepte sind unter Beachtung unterschiedlicher Systemparameter auch auf terrestrische Laserscanner anwendbar.

Abstract

Airborne laser scanners have so far predominantly been used for measuring the Earth's topography. But this technology has also a huge potential in other application fields such as forestry or urban planning. With the increasing technical capacity of laser scanners and the broadening field of applications, it becomes more and more important not only to consider the geometric but also the physical aspects of the measurement process. Since there is hardly any German literature available that approaches the subject from a physical point of view, this paper discusses the physical measurement process and the most important theoretical concepts (radar equation, scattering coefficient, waveform) of airborne laser scanning. Under consideration of different sensor characteristics these concepts are also valid for terrestrial laser scanners.

1. Einleitung

Die Technik der flugzeuggestützten Fernerkundung mittels Laserscanner hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und setzt in Bereichen wie der Geländeaufnahme, der Objekterfassung oder der Forstinventur neue Maßstäbe. Kraus (2002) spricht gar von einem durch das Laserscanning ermöglichten Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie. Während in der traditionellen Photogrammetrie dreidimensionale Objekte aus mindestens zwei Bildern rekonstruiert werden, genügt im Falle des Laserscanning nur eine Aufnahmerichtung, da für jeden Laserstrahl nicht nur die Richtung sondern auch die Entfernung gemessen wird. Für die Praxis ist der potentiell hohe Automatisierungsgrad des flugzeuggestützten Laserscannings von besonderer Bedeutung weil dadurch große Gebiete kostengünstig bearbeitet werden können.

In der Fernerkundung bezeichnet man einen Laser als einen aktiven Sensor, da dieser einen Lichtstrahl aussendet, der an der Erdoberfläche gestreut wird. Ein Empfänger registriert dann jenen Teil des Laserstrahls, der von der Erdoberfläche in Richtung der Fernerkundungsplattform zurückgestreut wird. Im Gegensatz dazu stellen

passive Fernerkundungssysteme reine Empfänger dar, die, abhängig von der Frequenz, entweder die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung oder die Thermalstrahlung der Erdoberfläche messen (Kraus und Schneider, 1988). Ein großer Vorteil des Laserscanning gegenüber bildgebenden, optischen Fernerkundungssystemen liegt darin, dass man nicht an die gute Beleuchtung der Objekte durch die Sonne gebunden ist. So werden Laserscanneraufnahmen weder durch störende Wolkenschatten beeinträchtigt, noch beeinflussen Abschattungen durch das Gelände, Gebäude oder der Vegetation die Intensität der rückgestreuten Strahlung (weil die Bestrahlungsrichtung und die Aufnahmerichtung ident sind).

Seit ihrer Erfindung im Jahre 1960 wurden Laser für militärische und zivile Aufgaben der Fernerkundung eingesetzt. Im militärischen Bereich stehen die Aufklärung und Zielenksteuerung im Mittelpunkt des Interesses, während im zivilen Bereich lange Zeit die Altimetrie (Messung der Höhe) und atmosphärische und ozeanische Anwendungen im Vordergrund standen. Erst seit Mitte der neunziger Jahre gibt es kommerzielle Anbieter, die auf Kundenwunsch Laserscannerflüge zur Erfassung der Topographie und ande-

rer Eigenschaften der Landoberfläche durchführen (Flood, 2001). Die seit diesem Zeitpunkt rasante Entwicklung in diesem Bereich wurde durch eine Vielzahl von Faktoren ermöglicht: Flood (2001) nennt als Gründe die verbesserte Instrumententechnologie und die Verfügbarkeit kommerzieller „off-the-shelf“ Sensoren ab 1995. Ackermann (1999) verweist auf die Wichtigkeit der präzisen Orientierung der Laserscannerdaten, die erst durch ein kombiniertes Positions- und Orientierungs-System, zum Beispiel bestehend aus einem „Global Positioning System“ (GPS) und einer „Internal Measurement Unit“ (IMU), ermöglicht wird. Schlussendlich dürfte

Photonen. In der Natur werden Photonen von Materie spontan bei einem Übergang von einem höheren zu einem niedrigeren Energiezustand der Materie emittiert (Abbildung 1). Wie Albert Einstein (1879–1955) bereits im Jahre 1917 erkannt hatte, kann aber auch jener Fall eintreten, dass ein einfallendes Photon bei seiner Interaktion mit Materie die Emission eines identischen Photons anregen („stimulieren“) kann. Aus einem Photon werden somit zwei Photonen mit gleicher Frequenz und gleicher Phase. Das Phänomen der stimulierten Emission birgt somit die Möglichkeit zu einer Erzeugung und Verstärkung von kohärenter Strahlung in sich.

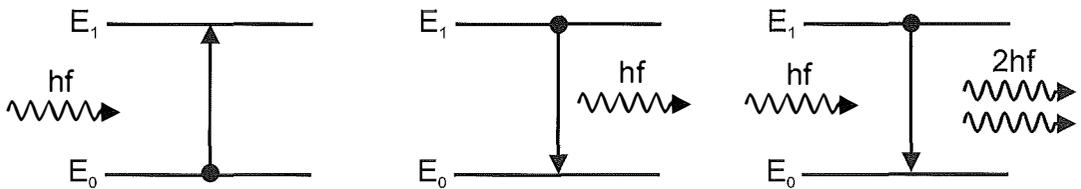


Abb. 1: Absorption (links), spontane (Mitte) und stimulierte (rechts) Emission eines Photons. E_0 und E_1 sind die gedachten Energieniveaus der Materie, f ist die Frequenz, h ist das Plancksche Wirkungsquantum, und $h \cdot f = E_1 - E_0$.

aber auch die steigende Leistungsfähigkeit der Computertechnologie nicht unwesentlich dazu beigetragen haben, wird doch bei jedem Laserscannerflug eine sehr große Menge an Messpunkten aufgenommen (0.1 – 10 Punkte pro m^2).

Laserscanner liefern eine 3D Punktwolke, welche an sich noch keine verwertbare Information darstellt (Ackermann, 1999; Axelsson, 1999). Es braucht daher geeignete Modelle, um aus den Punktwolken relevante Parameter (Geländeoberfläche, Höhe von Gebäuden, Volumen der Vegetation, etc.) zu extrahieren. Bisher standen für die Auswertung von Laserscannerdaten hauptsächlich mathematische und geometrische Modelle im Vordergrund (Axelsson, 1999; Kraus, 2002). Mit der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Laserscanner-Systeme wird es aber auch immer wichtiger, die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse besser zu verstehen. Es ist daher das Ziel dieses Artikels, die grundlegenden physikalischen Modelle vorzustellen und anhand einfacher Beispiele zu erläutern.

2. Physikalische Grundlagen des Laserscannings

2.1. Eigenschaften des Laserlichts

Das Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung in einem Laser basiert auf dem physikalischen Prinzip der stimulierten Emission von

Diese Möglichkeit wurde aber erst viel später erkannt. Charles H. Townes (geb. 1915) war der erste, dem es im Jahre 1954 gelang, elektromagnetische Strahlung bei einer Frequenz im Mikrowellenbereich (2,4 GHz) mit Hilfe eines sogenannten Masers („Microwave amplification by stimulated emission of radiation“) zu verstärken (Townes, 2002). Diese Entdeckung stimulierte die Entwicklung vergleichbarer Geräte, die in der Lage sein sollten, Strahlung im infraroten (700 nm – 1 mm) und optischen (400 – 700 nm) Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu erzeugen. Im Jahre 1960 baute Theodore Maiman (geb. 1927) den ersten Laser („Light amplification by stimulated emission of radiation“), der Strahlung bei einer Wellenlänge von 694.3 nm erzeugte. Seit diesem Zeitpunkt sind Laser aus unserem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken und finden breite Anwendung in so unterschiedlichen Gebieten wie der Informations- und Kommunikationstechnologie, der Medizin, der Materialverarbeitung, der Navigation oder der Vermessungstechnik (Harbison und Nahory, 1998).

Im Vergleich zu natürlichem Licht hat das von einem Laser erzeugte Licht eine Reihe ausgezeichneter Eigenschaften. Je nach der Art des eingesetzten Lasers ist das Laserlicht annähernd monochromatisch (exakt definierte Frequenz), stark gebündelt (kleiner Öffnungswinkel des Lichtstrahls), kohärent (Wellenpakete schwingen zueinander in Phase) und von hoher Intensität.

Für das flugzeuggestützte Laserscanning ist der kleine Öffnungswinkel des gebündelten (kollimierten) Laserstrahls und die hohe Strahlintensität von großer Bedeutung. Die Bündelung kann durch den Einsatz optischer Komponenten weiter verbessert werden. So beträgt der Öffnungswinkel kommerzieller Laserscanner zirka $0.2 - 2$ mrad, was bei einer Flughöhe von 1000 m bedeutet, dass der Durchmesser des Laserstrahls auf der Erdoberfläche nur $0.2 - 2$ m beträgt. Auch der annähernd monochromatische Charakter vieler eingesetzter Laser hat eine praktische Bedeutung: Durch den Einsatz von optischen Interferenzfiltern, die nur Frequenzen in einem engen Frequenzband (typisch 10 nm) passieren lassen, wird der reflektierte Laserstrahl „herausgefiltert“, während störende Hintergrundstrahlung weitestgehend unterdrückt wird (Wehr und Lohr, 1999). Ferner kann die hohe zeitliche Kohärenz einiger verfügbarer Laserquellen genutzt werden, um neben der Entfernung von Objekten auch noch Informationen über deren Geschwindigkeit zu erhalten (Jelalian, 1992). Dies ist zum Beispiel im Bereich der militärischen Aufklärung von Bedeutung.

2.2. Messprinzip des Laserscannings

Laserscanner stellen eine Erweiterung konventioneller Radartechniken auf den optischen Frequenzbereich dar. Es sind in den unterschiedlichen Anwendungen auch eine Reihe anderer Begriffe wie *Laser Radar*, *Lidar* („*Light detection and ranging*“), oder *Ladar* („*Laser detection and ranging*“) gebräuchlich, aber unabhängig von der Namensgebung arbeiten alle Systeme nach dem selben grundlegenden Messprinzip (Jela-

lian, 1992). Weil Laserscanner bei einer kürzeren Wellenlänge als Mikrowellensysteme arbeiten, erzielen sie bei vergleichbarer Antennengröße (im Bereich der Optik eben der Durchmesser der sendeseitigen Apertur des Teleskopes zur Strahlformung) eine viel höhere räumliche Auflösung (Kapitel 4.1.1.). Allerdings werden optische Messungen stärker durch unkontrollierbare atmosphärische Einflüsse (Dunst, Nebel, Niederschlag) beeinflusst.

Der physikalische Messvorgang des Laserscannings ist im Prinzip einfach: der Laser sendet ein Lichtsignal aus, das an einer Oberfläche gestreut und anschließend mit einer Photodiode registriert wird (Abbildung 2). Eine Ablenkungseinheit („Scanner“) lenkt den Laserstrahl quer zur Flugrichtung ab, wodurch ein Geländestreifen entlang des Flugwegs abgetastet wird. Laser können entweder kontinuierlich Licht aussenden oder in kurzen Impulsen. Im Falle eines „*Continuous Wave*“ Laserscanners kann die Entfernung zu einem Zielobjekt über den Vergleich der Phasenlage der ausgesandten und der empfangenen intensitätsmodulierten Strahlung gemessen werden; im Falle eines „*Pulsed Lasers*“ über die Zeit, die der Lichtimpuls benötigt, um vom Laserscanner zum Objekt und zurück zu gelangen (Wehr und Lohr, 1999).

Mit der Ausnahme eines von der Universität Stuttgart gebauten „*Continuous Wave*“ Lasers, basieren heute alle verfügbaren flugzeuggestützten Laserscanner auf dem Prinzip der Laufzeitmessung von Laserimpulsen. Dabei wird die Messrate durch einen Pulsgenerator vorgegeben und die Laufzeit eines oder, bei Mehrfachreflexionen auf der Erdoberfläche, mehrerer rückge-

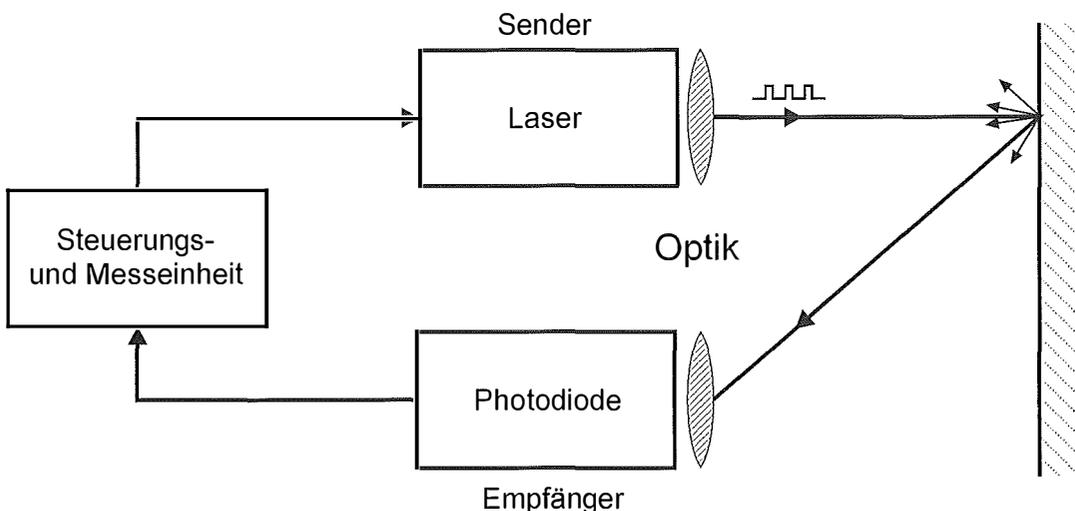


Abb. 2: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners.

streuten Impulse gemessen. Bei der Umrechnung in Entfernungen muss berücksichtigt werden, dass der Laserimpuls sich mit einer von der Lichtgeschwindigkeit abweichenden Gruppengeschwindigkeit bewegt. Die Abweichung beträgt bis zu 0.03 %, was bei einer Flughöhe von 1000 m immerhin eine Differenz von 0.3 m ausmacht (Rees, 2001).

2.3. Natürliche Einflussfaktoren auf den Messvorgang

Der Messvorgang wird durch eine Reihe natürlicher Einflussfaktoren beeinflusst. Als erstes ist dabei die Sonnenstrahlung zu nennen, die durch Reflexionen an der Erdoberfläche und an atmosphärischen Bestandteilen direkt zum Laserscanner hin gestreut werden kann. In der Photodiode werden dann die Intensitäten der reflektierten Laser- und Sonnenstrahlung (inkohärent) aufsummiert. Die gesamte vom Laserscanner empfangene Fremdstrahlung wird als Hintergrundstrahlung bezeichnet und sollte, um einen optimalen Betrieb des Laserscanners zu gewährleisten, um ein Vielfaches kleiner als die Intensität des reflektierten Laserimpulses sein. Der Einfluss der Hintergrundstrahlung ist bei optischen Wellenlängen größer als im Infrarotbereich weil 1) bei zirka 480 nm die Sonnenstrahlung ihr Maximum aufweist und mit zunehmender Wellenlänge rasch abnimmt, und 2) die Streuung von Sonnenlicht in einer klaren Atmosphäre ebenfalls mit zunehmender Wellenlänge rasch abnimmt (Kraus und Schneider, 1988). Daher sollte, unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lasertypen und Empfänger, eine möglichst langwellige Laserfrequenz gewählt werden. Dies ist auch von Vorteil in Hinblick auf das Gefährdungspotenzial für das menschliche Auge, welches im optischen und nahen Infrarot (bis zirka 1 μm) sehr empfindlich auf Strahlung reagiert.

Der Laserstrahl muss die Atmosphäre zweimal durchlaufen und wird dabei durch Absorptions- und Streuvorgänge gedämpft. In vielen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums wird die Strahlung auf kürzestem Wege absorbiert, weshalb nur in den sogenannten atmosphärischen Fenstern Fernerkundung möglich ist. Im atmosphärischen Fenster von 0.7 – 2.5 μm sind Dunst, Nebel, Aerosole und die Streuung durch atmosphärische Gase von Bedeutung. Zum Beispiel beträgt bei einer Wellenlänge von 1.06 μm (die Wellenlänge des vielfach eingesetzten Nd:YAG Lasers) die Abdämpfung in einer klaren Atmosphäre 0.2 – 0.8 dB/km und bei Dunst zirka 3.9 dB/km (Jelalian, 1992).

Der atmosphärische Einfluss ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität von Wasserdampf, Wassertröpfchen und Aerosole oft schwer zu erfassen. Diese atmosphärischen Bestandteile verursachen nicht nur Streu- und Absorptionsphänomene, sondern beeinflussen auch die Gruppengeschwindigkeit des Laserimpulses. Bei einer Wellenlänge von 1 m führt laut Rees (2001) 1 mm im atmosphärischen Strahlungsweg enthaltenes Wasser bei der Abschätzung der Entfernung zu einem Fehler von ca. $4 \cdot 10^{-4}$ m. Wenn man zum Beispiel annimmt, dass sich 25 mm Wasserdampf (dies entspricht der mittleren Wassersäule in der Gesamtatmosphäre) in der atmosphärischen Schicht unterhalb der Flughöhe befinden, so ergibt sich bei Nichtberücksichtigung des Einflusses des Wasserdampfs ein Fehler von 0.02 m.

3. Laserscanner-Systeme

Derzeit zum Einsatz kommende kommerzielle Laserscannersysteme basieren alle auf dem Prinzip der Laserimpulsmessung und sind oftmals in der Lage, mehrere Impulse zu registrieren. Abbildung 3 illustriert, wie ein ausgesandter Laserimpuls (zur Vereinfachung als Rechteckimpuls dargestellt) durch die Interaktion mit der Erdoberfläche in seiner Form verändert werden kann, wenn er auf räumlich ausgedehnte Streuobjekte trifft. Dieses Thema wird ausführlich in Kapitel 4.6. besprochen.

Für die Bestimmung der Entfernung einzelner Objekte werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die in Abhängigkeit von der Form und Anordnung der Streukörper unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Abbildung 3 zeigt ein einfaches Schwellwertverfahren, welches auf ansteigende Impulsflanken anspricht. Andere Verfahren können zum Beispiel darauf abzielen, den Impulsschwerpunkt zu bestimmen. Bei dem Impulsschwerpunktverfahren wird das Echo im Normalfall einem späteren Zeitpunkt (größerer Entfernung) als vergleichsweise beim Grenzwertverfahren zugeordnet. Ein weiteres alternatives Verfahren beruht auf der Bestimmung der lokalen Maxima über die zeitliche Differenzierung des Echosignals und die Bestimmung der Nulldurchgänge (zero-crossing Verfahren). Diese Überlegung zeigt, wie wichtig es für die Interpretation von Laserscannerdaten ist, genau zu verstehen, wie das empfangene Signal in weiterer Folge zu diskreten Impulsen verarbeitet wird.

Die Kenntnis der gesamten Impulsform lässt weitergehende Rückschlüsse auf das aufgenommene Objekt zu. Daher wurden experimentelle

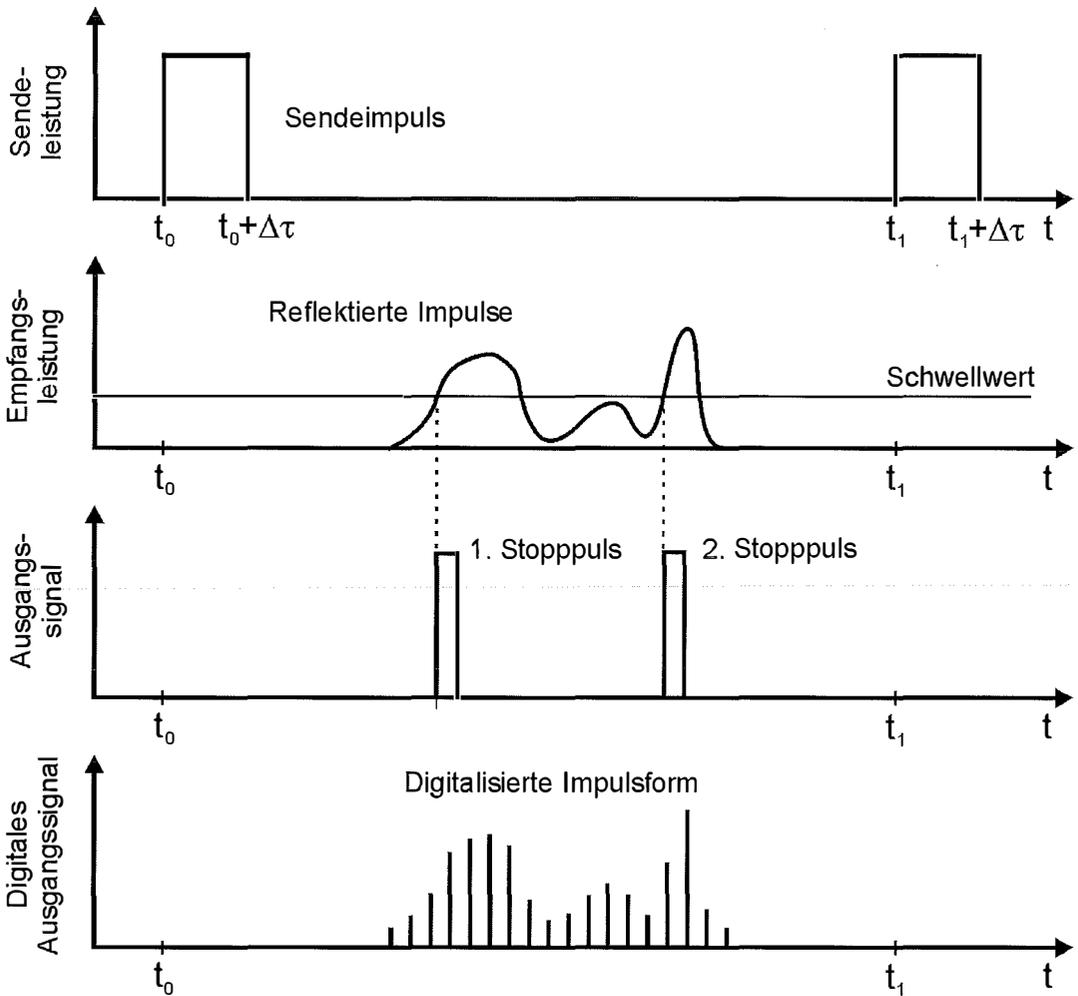


Abb. 3: Gesendeter und empfangener Impuls beim Laserscanning. Kommerzielle Laserscanning-Systeme erfassen einen oder mehrere Stopppulse, experimentelle Systeme digitalisieren die gesamte Impulsform des empfangenen Signals.

	Typische Werte kommerzieller Systeme	LVIS (Laser Vegetation Imaging Sensor)
Wellenlänge	1.04 – 1.06 μm (0.8 – 1.55 μm)	1.064 μm
Pulsdauer	5 – 10 ns	10 ns
Pulsenergie	100 μJ	5 mJ
Messrate	20-80 kHz	100 – 500 Hz
Signalaufzeichnung	erster/letzter Impuls Intensitätsmessung möglich	500 MSamples/s
Öffnungswinkel des Laserstrahls (Divergenz)	0.2 – 2 mrad	8 mrad
max. Blickwinkel	7 – 40°	7°
Flughöhe	500 – 3000 m	< 10 km
Auflösung am Boden	0.2 – 2 m	1 – 80 m

Tabelle 1: Physikalisch-technische Systemparameter kommerzieller und experimenteller Laserscanner-Systeme. Die Werte für die kommerziellen Systeme basieren auf Baltsavias (1999), Flood (2001) und Riegl (2003). Für LVIS wurden die Werte aus Blair et al. (1999) entnommen.

Laserscanner wie zum Beispiel der von der NASA entwickelte „Laser Vegetation Imaging Sensor“ (LVIS) gebaut, welche sich nicht nur auf die Zeitmessung individueller Impulse beschränken, sondern die gesamte Impulsform des reflektierten Laserstrahls digitalisieren. Tabelle 1 ist eine Gegenüberstellung der, in Hinblick auf die physikalische Interpretation der Daten wichtigsten Systemparameter kommerzieller Systeme und LVIS.

4. Interaktion des Laserstrahls mit der Erdoberfläche

Intuitiv ist die Interaktion eines Laserstrahls mit der Erdoberfläche scheinbar einfach zu verstehen. Trifft der Laserstrahl auf ein Objekt, so wird dieser an der Objektoberfläche gestreut, wobei ein Teil der gestreuten Strahlung wieder in Richtung zum Sensor gestreut werden kann. Die Impulse repräsentieren somit die „Oberfläche“ der erfassten Objekte. Befinden sich mehrere Objekte im Strahlengang, so kommt es zu mehrfachen Teilreflexionen, die der Reihe nach die Entfernungen der Objekte zum Sensor repräsentieren. So wird zum Beispiel der über einem Waldgebiet registrierte erste Impuls normalerweise mit der „Oberfläche“ des Kronendaches assoziiert und der letzte Impuls mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (in erster Linie abhängig von der Bestandsdichte) mit dem des Waldbodens. Statistische Methoden, die sich indirekt auf dieses Bild stützen, sind bereits in der Lage, Waldparameter wie Baumhöhe oder Biomasse mit einer guten Genauigkeit zu liefern (Næsset, 2002; Popescu, 2002). Allerdings ist speziell im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Methoden ein physikalischer Ansatz wünschenswert. Dieser sollte in der Lage sein, die Streuzentren der einzelnen Impulse, beziehungsweise die gesamte Impulsform, in Bezug zu wichtigen Waldparameter zu setzen. Ebenfalls von Interesse sind physikalische Modelle zur Erklärung der Intensität der rückgestreuten Impulse, da dadurch zusätzliche Informationen über die erfassten Objekte erhalten werden. Im folgenden werden die wichtigsten physikalischen Grundlagen (Auflösungs- und Trennungsvermögen, Radargleichung, Streuquerschnitt und Impulsform) besprochen. Die vorstellten Konzepte sind unter Beachtung unterschiedlicher Systemparameter auch auf terrestrische Laserscanner anwendbar.

4.1. Auflösungs- und Trennungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Laserscanners ist begrenzt durch die räumliche Ausdeh-

nung des Laserstrahls. In der Ebene normal zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls ist das Auflösungsvermögen begrenzt durch den Strahlöffnungswinkel und in Ausbreitungsrichtung durch die Impulsdauer. Für eine klare Begriffstrennung verwenden wir hier für den zweiten Fall den Begriff des Trennungsvermögens.

4.1.1. Auflösungsvermögen

Im Fall des flugzeuggestützten Laserscannings ist das Auflösungsvermögen Δx des Laserstrahls auf der Erdoberfläche gegeben durch

$$\Delta x = R\beta = \frac{H}{\cos \theta} \beta \quad (1)$$

wobei R die Entfernung zwischen Laserscanner und Objekt und β der Öffnungswinkel des Laserstrahls ist. Die Entfernung R ist wiederum bestimmbar aus der Flughöhe H und dem Blickwinkel θ . Schaut der Laserscanner direkt senkrecht nach unten ($\theta = 0^\circ$) so gilt natürlich $R = H$.

Die Übertragung der Laserimpulse in den Außenraum und deren Empfang geschieht mit Hilfe optischer Linsen. Als Folge des Wellencharakters elektromagnetische Strahlung kommt es unvermeidlich zu Beugungserscheinungen, die das Auflösungsvermögen begrenzen (Hänsel und Neumann, 1993). Der Öffnungswinkel β einer optischen Apertur hängt sowohl von der Wellenlänge λ , dem Durchmesser der Apertur D , und einer gerätespezifischen Konstante K_a ab:

$$\beta = K_a \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

wobei die Konstante K_a zwischen Werten in der Größenordnung von 1 bis 100 schwanken kann. Gleichung (2) ist auch im Mikrowellenbereich gültig, womit man aufgrund der viel größeren Wellenlängen in diesem Bereich (1 mm bis 1 m) bei vergleichbaren Antennengrößen eine viel schlechtere Auflösung erzielt.

4.1.2. Trennungsvermögen

Das Trennungsvermögen zweier von Laserstrahl erfassten Objekte hängt ab von der Dauer $\Delta \tau$ des ausgesendeten Laserimpulses und der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist gegeben durch die Gruppengeschwindigkeit v_g welche etwas kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist. Für einfache Betrachtungen reicht allerdings die Näherung $v_g \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Betrachten wir zwei Punkte in einem Abstand ΔR . Da der Laserstrahl den Weg ΔR bis zum weiter entfernten Punkt zweimal durchlaufen muss,

kommt das Echo von zweiten Punkt um $\Delta T = 2\Delta R/v_g$ später beim Empfänger an als der erste Punkt. Damit die beiden Echos nicht überlappen, muss $\Delta T > \Delta \tau$ sein. Damit ist der kleinste Entfernung Δr zweier Objekte, wo noch keine Überlappung der Echos auftritt, gegeben durch:

$$\Delta r = \frac{v_g \Delta \tau}{2} \quad (3)$$

Die Größe Δr gibt somit das räumliche Trennungsvermögen an. Für einen 10 ns langen Impuls ist $\Delta r = 1.5$ m.

Das räumliche Trennungsvermögen ist nicht zu verwechseln mit der Messgenauigkeit eines Laserscanners, welche sich auf die Genauigkeit der Entfernungsangabe für ein Objekt bezieht. Letztere Größe hängt unter anderem von der Form des reflektierten Impulses (Kapitel 4.6.) und dem verwendeten Detektionsalgorithmus ab.

4.2. Radargleichung

Die Intensität des empfangenen Laserimpulses hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab, welche in der aus der Mikrowellenfernerkundung bekannten *Radargleichung* erfasst werden. Die

Ableitung der Radargleichung für den Fall des Laserscanning wird hier in einer etwas abgewandelten Form präsentiert. Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Einflussgrößen, wobei zur bessern Übersichtlichkeit Laser (Sender) und Photodiode (Empfänger) an verschiedenen Orten gezeichnet sind.

Nimmt man an, dass die Optik des Laserscanners die Gesamtenergie der Strahlung in einem kreisförmigen Raumwinkel $\pi\beta_s^2/4$ bündelt, so beträgt die Strahlungsleistungsdichte S_O (Watt/m²) am Streuobjekt, welches sich in einer Entfernung R vom Laser befindet:

$$S_O = \frac{4 P_s}{\pi R^2 \beta_s^2} \quad (4)$$

wobei zu beachten ist, dass $\pi R^2 \beta_s^2/4$ die vom Laserstrahl beleuchtete Fläche ist. Diese Beziehung berücksichtigt, dass mit zunehmender Entfernung der Laserstrahl auseinander läuft und somit die flächenbezogene Laserleistung abnimmt.

Der Streukörper wird normalerweise einen Teil der einfallenden Strahlung absorbieren (und in Wärmeenergie umwandeln) und den Rest in alle Richtungen streuen. Im Falle eines lichtdurchläss-

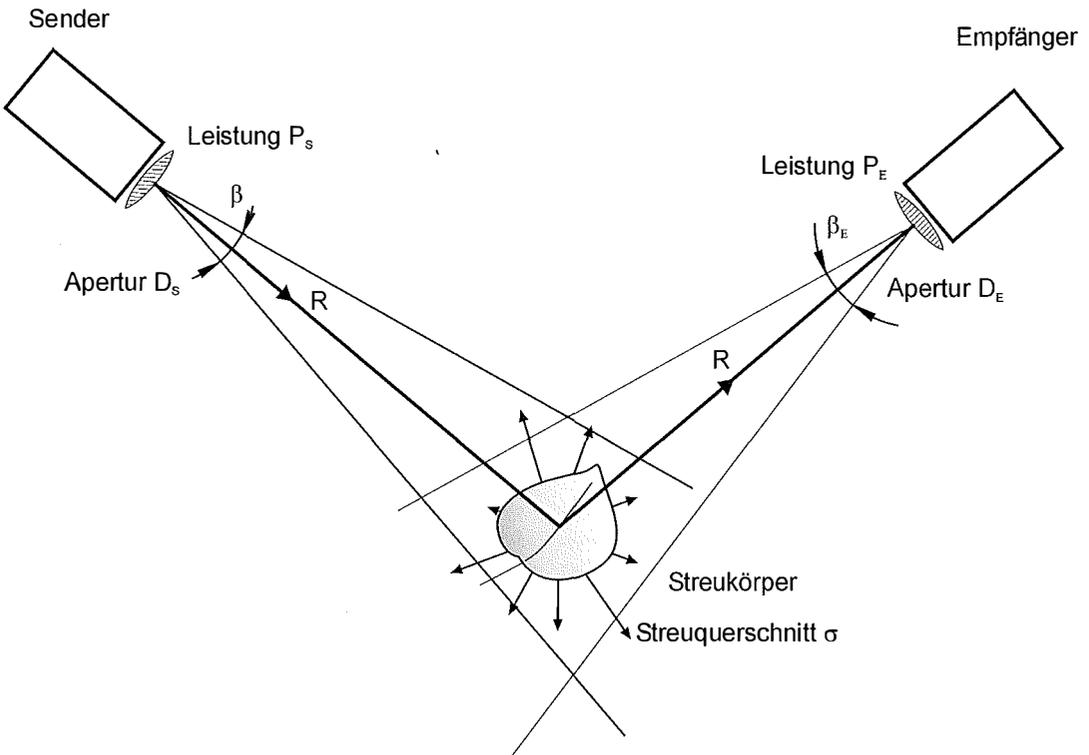


Abb. 4: Geometrie und Messgrößen in der Radargleichung.

sigen Körpers (z.B. ein Blatt) durchdringt ein Teil der Strahlung das Objekt. Oftmals wird nur ein sehr kleiner Anteil der einfallenden Strahlung zurück in Richtung des Empfängers gestreut. Das Maß für den Anteil der reflektierten Leistung ist der sogenannte Streuquerschnitt σ (m²). Die rückgestreute Leistung P_r ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$P_r = S_O \cdot \sigma = \frac{4 P_S}{\pi R^2 \beta_S^2} \cdot \sigma \quad (5)$$

und die Strahlungsleistung S_E am Empfänger

$$S_E = \frac{P_r}{4\pi R^2} = \frac{4P_S}{\pi R^2 \beta_S^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (6)$$

Die vom Empfänger mit einer kreisrunden Apertur mit Durchmesser D_E gemessene Leistung ist dann gegeben durch

$$P_E = S_E \frac{\pi D_E^2}{4} = \frac{4P_S}{\pi R^2 \beta_S^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{\pi D_E^2}{4} = \frac{P_S D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} \cdot \sigma \quad (7)$$

Zum Schluss werden noch Verluste im Gerät und in der Atmosphäre berücksichtigt:

$$P_E = \frac{P_S D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} \cdot \eta_{SYS} \eta_{ATM} \cdot \sigma \quad (8)$$

wobei η_{SYS} der Wirkungsgrad des Laserscanners ist und η_{ATM} der Transmissionsfaktor durch die Atmosphäre. Gleichung (8) ist die für den Fall des Laserscanning angepasste Radargleichung und ist Grundlage für eine quantitative Bestimmung des Rückstreuquerschnittes σ . Voraussetzungen dafür sind die präzise Kalibrierung des Sensors und die Kenntnis der atmosphärischen Bedingungen. Wenn σ bekannt wäre, könnten Messung aufgenommen in unterschiedlichen Gebieten und mit unterschiedlichen Laserscannersystemen direkt miteinander verglichen werden.

4.3. Einflussgrößen auf den Streuquerschnitt

Da im Falle des Laserscannings die Dimensionen der Streukörper immer um ein Vielfaches größer als die Wellenlänge sind, kann der Streuprozess mithilfe der geometrisch-optischen Näherung beschrieben werden (Schanda, 1986). Wir betrachten einen Streukörper mit einer (projizierten) Fläche dA . Die auf den Streukörper auftreffende Strahlungsleistung ist gleich $S_O dA$, wovon ein Teil reflektiert wird. Diesen Anteil bezeichnen wir mit $\rho S_O dA$, wobei ρ der Reflexionsgrad ist. Um den Streuquerschnitt zu erhalten, muss noch berücksichtigt werden, dass die Streuung gerichtet ist. Nimmt man an, dass die reflektierte Strahlung gleichmäßig in einen

Raumwinkel Ω gestrahlt wird, so ergibt sich folgende Beziehung für den Streuquerschnitt (Jelalian, 1992):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \cdot \rho \cdot dA \quad \text{innerhalb des Streukegels} \quad (9)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{außerhalb des Streukegels}$$

Eine sehr glatte Oberfläche zeichnet sich durch eine gerichtete Streuung und somit einen kleinen Wert für Ω aus; eine raue durch einen relativ großen Wert für Ω (Abbildung 5). Ob eine Fläche glatt oder rau ist, hängt davon ab, in welchem Größenverhältnis die Unebenheiten der Oberfläche zur Wellenlänge des verwendeten Systems stehen (Schanda, 1986). Bei in der Mikrowellenfernerkundung verwendeten Wellenlängen (1 mm – 1 m) sind Objektklassen wie Asphalt oder naturbelassener Boden als glatt zu bezeichnen, während dies im optischen und Infrarotbereich nur auf wenige Objektklassen wie Wasser oder Glas zutrifft.

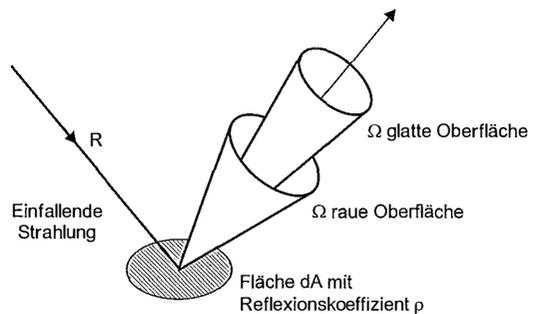


Abb. 5: Streuquerschnitt eines Körpers mit glatter und rauher Oberfläche.

Wenn der Streukörper gegenüber dem Sensor gedreht wird, wird der Empfänger anfangs noch immer ein Echo empfangen. Sobald aber der Streukegel nicht mehr den Empfänger schneidet, ist der Streukörper für den Laserscanner „unsichtbar“. Dieser Fall wird für eine glatte Oberfläche bei kleineren Drehungen als vergleichsweise bei rauhen Flächen eintreten.

Als Referenzmodell für rauhe Oberflächen wird oft ein Lambertscher Strahler herangezogen, der die meiste Energie in einen Raumwinkel der Größe π streut (Jelalian, 1992). Damit erhält man

$$\sigma_{Lambert} = 4 \cdot \rho \cdot dA \quad (10)$$

Tabelle 2 gibt gemessene Werte des Reflexionsgrads ausgewählter Materialien bei einer Wellenlänge von 1 μ m wieder. Der Schwankungsbereich von ρ ist generell relativ hoch und die Bedingungen unter welchen die Messungen vorgenommen wurden sind auch nicht immer

bekannt. Daher sollten die Werte mit Vorsicht verwendet werden.

Material	Reflexionsgrad bei 1 μm
Ahornblatt ¹	0.4
Aluminiumfolie ¹	0.8 – 0.9
Asphalt ¹	0.2
Chrom ¹	0.6
Edelstahl ¹	0.2 – 0.6
oxidiert	0.1 – 0.2
Eichenblatt ¹	0.65
Kupfer ¹	0.9
Maisblätter ³	0.9
Platin ¹	0.45 – 0.60
Sandboden ²	
nass	0.15
trocken	0.3
Schluff trocken ²	0.6
Schnee ²	0.25
Terra Cota ¹	0.3
Wasser ^{1,2}	
senkrechter Einfall	< 0.01
stark schleifender Einfall	bis zu 0.3
Weizen ³	
Stängel	0.9
Frucht	0.65
Zement ¹	0.4

Tabelle 2: Reflexionsgrad für verschiedene Materialien bei einer Wellenlänge von 1 μm . Quellen: ¹Jelalian (1992), ²Kraus und Schneider (1988) und ³Egan (1985).

4.4. Streuquerschnitt verschiedener Objekte

Der Streuquerschnitt eines Objekts hängt stark von dessen Form und Größenausdehnung ab. Daher werden im folgenden die Streucharakteristika von kleinen Objekten, freihängenden Leitungen, Flächen und räumlich verteilten Streuobjekten besprochen (Abbildung 6). Es wird angenommen, dass die Oberflächen der Objekte rau sind und der Streuvorgang mithilfe der Formel (10) für einen Lambertschen Strahler beschrieben werden kann. Die vorgestellten Zahlenbeispiele dienen in erster Linie dazu, die Größenordnungsunterschiede zwischen verschiedenen Streuprozessen zu verdeutlichen.

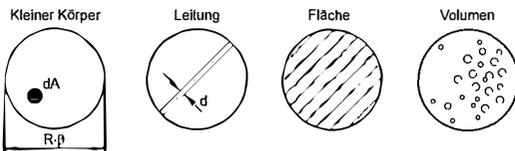


Abb. 6: Streuung an verschiedenen Objekten.

4.4.1. Streuung an einem Kleinen Körper

Als erstes betrachten wir die Streuung an einem Objekt das klein gegenüber dem Querschnitt des Laserstrahls ist. Dies könnte zum

Beispiel ein Blatt oder ein frei aufgehängtes, künstliches Objekt (z.B. eine Straßenlampe) sein. Wir schätzen anhand von Formel (10) den Streuquerschnitt für ein grünes Laubblatt ab: Unter der Annahme von $dA = 50 \text{ cm}^2$ und $\rho = 0.6$ (im nahen Infrarot) ergibt sich ein Streuquerschnitt von 0.012 m^2 .

4.4.2. Streuung an einer Überlandleitung

Nun betrachten wir die Streuung an einer Überlandleitung mit dem Durchmesser d_{Leitung} . Die vom Laserimpuls erfasste Länge der Überlandleitung hängt von der Entfernung R und dem Öffnungswinkel β ab. Nehmen wir wiederum an, dass die Leitungsoberfläche rau ist, so ist der Streuquerschnitt gegeben durch

$$\sigma_{\text{Leitung}} = 4\rho_{\text{Leitung}} d_{\text{Leitung}} R \beta \quad (11)$$

Sind folgenden Zahlenwerte $\rho_{\text{Leitung}} = 0.8$, $d_{\text{Leitung}} = 5 \text{ cm}$, $R = 1 \text{ km}$ und $\beta = 1 \text{ mrad}$ gegeben, so ist $\sigma_{\text{Leitung}} = 0.16 \text{ m}^2$, was ein zirka 10-fach stärkeres Signal als ein einzelnes grünes Blatt verursachen würde.

4.4.3. Streuung an einer Fläche

Wenn der Laserstrahl auf ein flächenhaftes Objekt auftrifft, d.h. dass der Streukörper größer als der Querschnitt des Laserstrahls ist, zeigt der Streuquerschnitt eine R^2 Abhängigkeit. Für einen Lambertschen Flächenstrahler gilt

$$\sigma_{\text{Fläche}} = 4\rho_{\text{Fläche}} \frac{\pi R^2 \beta^2}{4} = \pi\rho_{\text{Fläche}} R^2 \beta^2 \quad (12)$$

Für eine Asphaltfläche mit $\rho_{\text{Asphalt}} = 0.2$ ergibt sich für eine Flughöhe von 1 km bei senkrechter Einfall und einem Öffnungswinkel von 1 mrad der Rückstreuquerschnitt $\sigma_{\text{Asphalt}} = 0.63 \text{ m}^2$, und für Ackerboden mit $\rho_{\text{Acker}} = 0.4$ ein Wert $\sigma_{\text{Acker}} = 1.26 \text{ m}^2$.

Der Fall der Streuung an einer Wasseroberfläche stellt insofern einen Spezialfall dar, weil einerseits bei quasi senkrechtem Einfall des Laserstrahls nur ein sehr kleiner Anteil reflektiert wird ($\rho_{\text{Wasser}} < 0.01$). Andererseits ist die Wasseroberfläche glatt gegenüber der Wellenlänge womit es zu gerichteten Spiegelreflexionen kommt (kleines Ω). Es ist daher zu erwarten, dass σ_{Wasser} in Abhängigkeit von Einfallrichtung und Welleneigenschaften über große Bereiche schwankt.

Wie in der Mikrowellenfernerkundung kann ein Streukoeffizient σ^0 eingeführt werden

$$\sigma^0 = \frac{d\sigma}{dA} \quad (13)$$

Der Vorteil dieser Formulierung ist, dass σ^0 nicht wie σ von der Flughöhe abhängt, sondern nur mehr von Objekteigenschaften. Dies ist sofort einsichtig, wenn Gleichung (9) in (13) eingesetzt wird.

4.4.4. Streuung an einem Volumen

Von Volumsstreuung spricht man, wenn eine Vielzahl kleiner Objekte vom Laserstrahl erfasst werden. In erster Näherung ist der Streuquerschnitt für das gesamte Volumen gegeben durch

$$\sigma_{\text{Volumen}} = N\sigma_K \quad (14)$$

wobei N die Anzahl der Streukörper und σ_K deren mittlerer, effektiver Streuquerschnitt ist. Äquivalent zu dem Falle der Streuung an einer Fläche kann ein spezifischer Streuquerschnitt σ_V eingeführt werden:

$$\sigma_V = \frac{d\sigma}{dV} = n\sigma_K \quad (15)$$

wobei n die Anzahl der Partikel pro Volumseinheit ist. Wenn die Dichte der Partikel zunimmt, so müssen weitere physikalische Prozesse wie die Dämpfung der Strahlung oder Mehrfachstreuungen berücksichtigt werden (Ishimaru, 1997).

4.5. Intensität des Reflektierten Laserstrahls

Anhand der Radargleichung (8) kann der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf den Messvorgang besprochen werden. Wir nehmen als Beispiel typische Werte eines Laserscannerflugs laut Tabelle 1 an: Pulsdauer = 10 ns, Pulsenergie = 100 μ J, Entfernung $R = 1$ km, und Öffnungswinkel des Laserstrahls $\beta_S = 1$ mrad. Weiters nehmen wir an: $D_E = 0.1$ m, $\eta_{\text{SYS}} = 1$ und $\eta_{\text{ATM}} = 0.9$. Die Leistung des ausgesandten Impulses P_S erhält man durch die Division der Pulsenergie durch die Pulsdauer. In unserem Zahlenbeispiel ist $P_S = 10$ kW. Diese hohe Leistung ist notwendig da das Signal vor allem durch Ausbreitungsverluste stark abgemindert wird:

$$P_E = P_S \frac{10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{12} \cdot 10^{-6}} \cdot 0.9 \cdot \sigma = 7.2 \cdot 10^{-10} \cdot P_S \cdot \sigma \quad (16)$$

Diese Rechnung zeigt, dass bei einem Laserscanner in einem typischen Flugeinsatz vom Sendesignal größenordnungsmäßig nur ein äußerst geringer Bruchteil (10^{-9}) am Empfänger zur Verfügung steht. Bei einem Streuquerschnitt von $\sigma = 0.1$ m² und der vorgegebenen Sendeleistung $P_S = 10$ kW ist die empfangene Leistung P_E gleich $7.2 \cdot 10^{-7}$ W. Dies verdeutlicht die Anforderungen an Laserleistung und Empfänger-

empfindlichkeit damit ein gutes Signal/Rauschverhältnis erzielt wird. Die Intensität des Rauschens hängt von einer Reihe von Einflussgrößen ab. Davon sind die wichtigsten Faktoren das Verstärkerrauschen, der Dunkelstrom (fließt in einer Photodiode auch wenn keine Strahlung einfällt) und die Hintergrundstrahlung (Jelalian, 1992). Die Hintergrundstrahlung kann, wie bereits erwähnt, durch einen Interferenzfilter vermindert werden.

4.6. Impulsform

In den bisherigen Betrachtungen wurde die Zeitabhängigkeit des Laserimpulses nicht berücksichtigt. Nun wollen wir die Form des empfangenen Impulses $P_E(t)$ in Abhängigkeit des ausgesandten Impulses $P_S(t)$ und den Eigenschaften des Streuobjekts untersuchen. Betrachten wir als erstes einen punktförmigen Streukörper mit einem Streuquerschnitt σ , der sich in einer Entfernung R vom Laserscanner befindet. Weil der punktförmige Streukörper keine räumliche Ausdehnung besitzt, ist der empfangene Impuls $P_E(t)$ ein exaktes Abbild des, um die Dauer $\Delta t = 2R/v_g$ zeitverzögerten, Sendepulses. Die zeitabhängige Form der Radargleichung lautet in diesem Fall:

$$P_E(t) = \frac{D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} \cdot \eta_{\text{SYS}} \eta_{\text{ATM}} \cdot P_S \left(t - \frac{2R}{v_g} \right) \cdot \sigma \quad (17)$$

Handelt es sich hingegen um ein räumlich ausgedehntes Streuobjekt mit einem in Intervall dR wirksamen differentiellen Streuquerschnitt $d\sigma = \sigma(R)dR$, so wird unter Vernachlässigung der Dämpfung des einfallenden Laserstrahls aus Gleichung (17) ein Integral (Ulaby et al., 1981):

$$P_E(t) = \int_{R_0}^{R_1} \frac{D_E^2}{4\pi R^4 \beta_S^2} \cdot \eta_{\text{SYS}} \eta_{\text{ATM}} \cdot P_S \left(t - \frac{2R}{v_g} \right) \cdot \sigma(R) dR \quad (18)$$

wobei R_0 und R_1 die räumliche Ausdehnung der Streuobjekte festlegen. Beim Laserscanning wird im Normalfall die Entfernung R sehr viel größer als die räumliche Ausdehnung des Objekts sein. Daher setzen wir $R = R_0 + z$ und $h = R_1 - R_0$ und erhalten unter der Voraussetzung $R_0 \gg h$ folgende Näherung:

$$P_E(t) \approx \frac{D_E^2}{4\pi R_0^4 \beta_S^2} \cdot \eta_{\text{SYS}} \eta_{\text{ATM}} \int_0^h P_S \left(t - \frac{2R_0}{v_g} - \frac{2z}{v_g} \right) \cdot \sigma(z) dz \quad (19)$$

Setzt man weiter $t = 2R_0/v_g + t'$ und fasst den vor dem Integral stehenden Term als eine Konstante k zusammen, so wird das Integral übersichtlicher:

$$P_E(t') = k \int_0^h P_S \left(t' - \frac{2z}{v_g} \right) \cdot \sigma(z) dz \quad (20)$$

Als letzten Schritt transformieren wir die Variable z in den Zeitbereich mit

$$\tau = t' - \frac{2z}{v_g} \quad (21)$$

und erhalten mit $k' = v_g k / 2$ unser Endergebnis:

$$P_E(t') = k' \int_{t' - \frac{2h}{v_g}}^{t'} P_S(\tau) \sigma \left(\frac{v_g(t' - \tau)}{2} \right) d\tau \quad (22)$$

Das empfangene Signal $P_E(t)$ ergibt sich somit aus einer Faltung des ausgesandten Signals $P_S(t)$ mit dem Streuquerschnitt σ . Dabei ist der Faktor 2 im Argument von σ zu beachten. Dieser bewirkt, dass das Streuobjekt auf das Zweifache seiner tatsächlichen Größe im Lasersignal gestreckt wird. Das wird verständlich, wenn man bedenkt, dass die Echos zweier sich im Abstand ΔR befindlicher Objekte um eine Dauer $\Delta T = 2\Delta R/v_g$ zeitverzögert sind (Kapitel 4.1.2.).

In Abhängigkeit von der Form des Sendeimpulses und der Komplexität des Streukörpers kann eine analytische Lösung des Faltungsintegrals (22) sehr schwierig oder gar unmöglich sein. Daher wollen wir uns auf einige numerische

Simulationen beschränken. Dabei wird für die bessere Veranschaulichung des Effekts des Faltungsintegrals angenommen, dass es sich bei dem ausgesandten Impuls um einen Rechteckimpuls mit einer Impulsdauer von 10 ns (entspricht einer Impulslänge von 3 m) handelt. Die Form der Sendeimpulse flugzeuggestützter Laserscannersysteme weicht hingegen oft stark von dem idealisiert gedachten Rechteckimpuls ab. Im Vergleich zu den unten gezeigten Beispielen sind daher die mit Laserscannersystemen empfangenen Impulse stärker abgerundet (womit einzelne Objekte oft weniger leicht voneinander getrennt werden können).

Betrachten wir zuerst eine unebene, raue Fläche (z.B. Acker) mit einer Standardabweichung der Geländehöhe von 5 cm (Abbildung 7 links). Da in diesem Fall die Ausdehnung des Objekts in Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls klein gegenüber der Impulslänge ist, kommt es lediglich zu einer „Abrundung“ der Impulskanten. Zu einer stärkeren Verformung des Sendeimpulses kommt es, wenn der Impuls auf eine gegen die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls stark ge-

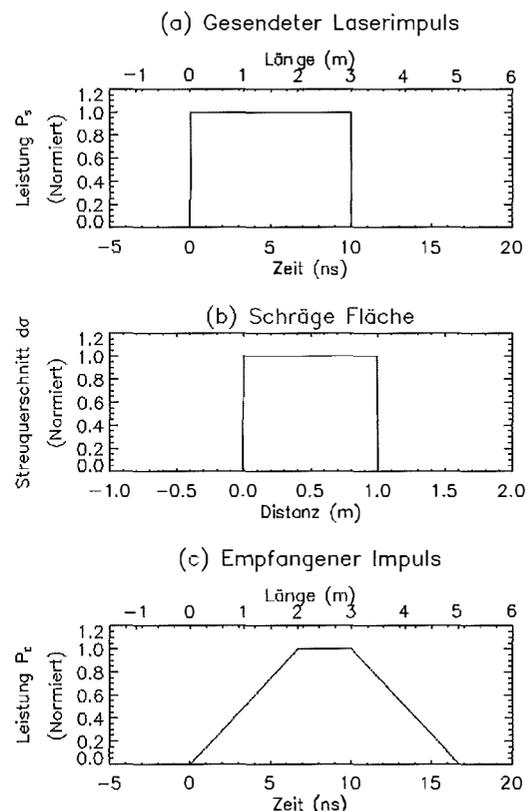
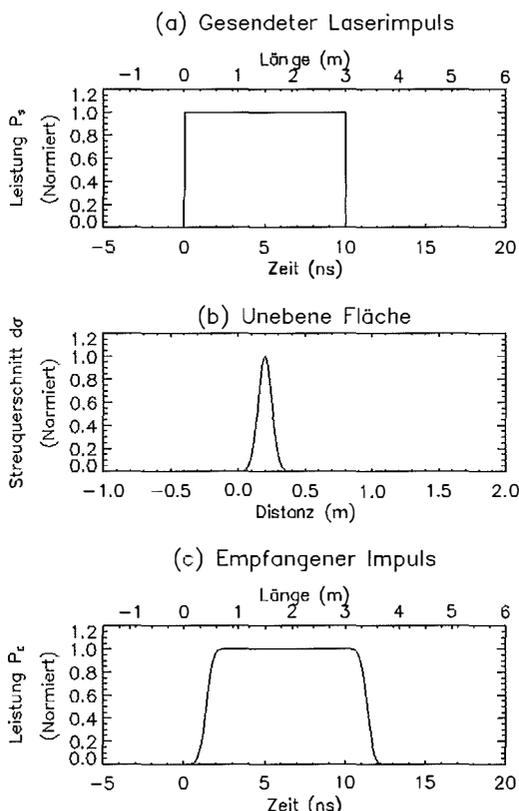


Abb. 7: Streuung eines Laserimpulses an einer unebenen, rauen Fläche (links) und einer schrägen Fläche (rechts). (a) Ausgesandter Laserimpuls mit Impulsdauer 10 ns; (b) differentieller Streuquerschnitt, und (c) empfangener Impuls.

neigte Fläche trifft (Abbildung 7 rechts). Nehmen wir als Beispiel eine um 45° geneigte Dachfläche. Hat der Laserstrahl einen Querschnitt von 1 m, so „sieht“ der Laserstrahl eine Höhendifferenz des Daches von ebenfalls 1 m. Mit anderen Worten, das Dach wirkt auf einer Länge von 1 m als verteilter Streuer. Aus dem ursprünglich 3 m langen Rechteckimpuls wird ein Trapez mit einer Basislänge von 5 m.

Als letztes Beispiel betrachten wir die Streuung des Laserstrahls über einer Waldfläche (Abbildung 8). Der Laserstrahl wird normalerweise an den Blättern und Ästen eines Baumes reflektiert. Wenn der Laserstrahl dabei nicht zu stark abgeschwächt wird, kann es in weiterer Folge auch zu Streuungen an Unterholz und Waldboden kommen. Für eine korrekte Modellierung des reflektierten Impulses müsste auch die Abschwächung des Laserimpulses auf dem Weg von Baumkrone zum Waldboden und zurück berücksichtigt werden. Für unsere einfachen Betrachtungen wollen wir hier allerdings darauf verzichten.

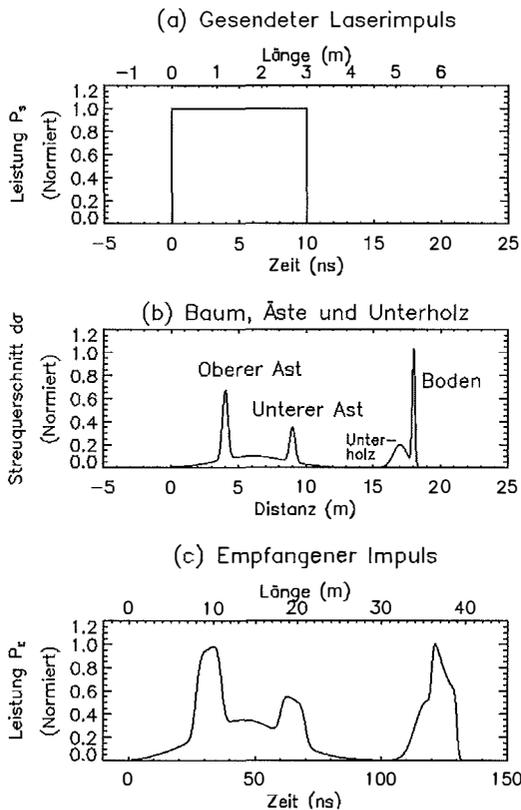


Abb. 8: Streuung an einem Baum mit Ästen und Unterholz (vergleiche Abbildung 7).

Abbildung 8 illustriert den gedachten Fall einer Streuung an einem zirka 18 m hohen Baum, wobei bei Höhen von 9 und 14 m Äste zu stärkeren Reflexionen führen. Neben dem Waldboden verursacht schließlich noch ein zirka 1–2 m hoher Busch ein schwaches Rückstreuungssignal. Das empfangene Signal $P_E(t)$ bildet die Streuprozesse relativ direkt ab, wobei die Lage der Äste klar erkennbar ist. Allerdings sind der Waldboden und der Busch nicht mehr eindeutig zu trennen, da ihr Abstand kleiner als das räumliche Trennungsvermögen ist.

5. Ausblick

Durch technologische Fortschritte ist eine ausschließlich geometrische Betrachtungsweise der von Laserscannern gelieferten Daten nicht mehr hinreichend. Zur Zeit werden Laserscannerdaten als 3D Punktwolken aufgefasst, wobei jeder (x,y) Koordinate eine Höhe z zugeordnet wird. Aber schon jetzt gibt es Laserscanner, die mehrere Echos für jeden einzelnen Laserstrahl registrieren. In absehbarer Zukunft wird es Laserscanner geben, die die komplette Impulsform aufnehmen. Dann wird es möglich sein, den räumlich verteilten Streuprozess aus dem Echosignal und dem bekannten Sendeimpuls durch Rückfaltung zu abbilden. Dann sind geometrisch/physikalische Ansätze gefragt, die den mehrdimensionalen Datensatz in brauchbare Informationen umwandeln.

Literatur

- [1] Axelsson, P. (1999): Processing of laser scanner data – algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54:138–147.
- [2] Baltsavias, E. P. (1999): Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54:164–198.
- [3] Blair, J. B.; Rabine, D. L.; Hofton, M. A. (1999): The Laser Vegetation Imaging Sensor : a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54:115–122.
- [4] Egan, W. G. (1985): Photometry and polarisation in remote sensing. Elsevier, New York, 503p.
- [5] Flood, M. (2001): Laser altimetry: From science to commercial lidar mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67(11):1209–1217.
- [6] Hänsel, H.; Neumann, W. (1993): Physik: Elektrizität, Optik, Raum und Zeit. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 799p.
- [7] Harbison, J. P.; Nahory, R. E. (1998): Lasers, Harnessing the atom's light. Scientific American Library, New York, 214p.
- [8] Ishimaru, A. (1997): Wave propagation and scattering in random media. Oxford University Press, Oxford, 574p.
- [9] Jelalian, A. V. (1992): Laser radar systems. Artech House, Boston, London, 292p.

- [10] Kraus, K. (2002): Laser-Scanning – ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. 10:620-624.
- [11] Kraus, K.; Schneider, W. (1988): Fernerkundung, Band 1, Physikalische Grundlagen. Dümmler, Bonn, 291p.
- [12] Næsset, E. (2002): Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. Remote Sensing of Environment, 80:88–99.
- [13] Popescu, S. C.; Wynne, R. H.; Nelson, R. F. (2002): Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. Computers and Electronics in Agriculture, 37:71–95.
- [14] Rees, W. G. (2001): Physical principles of remote sensing. Cambridge University Press, Cambridge, 343p.
- [15] Riegl (2003): Riegl Measurements Systems, <http://www.riegl.com/>.
- [16] Schanda, E. (1986): Physical fundamentals of remote sensing. Springer-Verlag, Heidelberg, 187p.
- [17] Townes, C. H. (2002): How the Laser happened, Adventures of a scientist. Oxford University Press, Oxford, 200p.
- [18] Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. (1981): Microwave remote sensing: Active and passive. Volume I, Artech House, Norwood, 456p.
- [19] Wehr, A.; Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54:68–82.

Adresse der Autoren

Prof. Wolfgang Wagner und Christian Briese: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien. email: ww@ipf.tuwien.ac.at bzw. cb@ipf.tuwien.ac.at
 Andreas Ullrich: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgerstrasse 48, A-3580 Horn. email: office@riegl.co.at



Simultaneous Georeferencing of Aerial Laser Scanner Strips

Helmut Kager, Wien

Abstract

This paper deals about discrepancies between overlapping laser scanner strips. These gaps can be eliminated to a great portion doing a simultaneous adjustment by least squares. An adjustment strategy is proposed for doing that: correcting exterior orientation elements recorded by dGPS and an IMU, as well as interior orientation elements concerning the Scanner-dGPS-IMU system.

Automated determination (measurement) of tie features (instead of tie points) is described.

The distribution of control features (instead of control points) is discussed.

Kurzfassung

Dieser Artikel befasst sich mit Abweichungen zwischen überlappenden Laserscanner-Streifen. Diese Discrepanzen können zum Großteil durch simultane Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate beseitigt werden. Hierfür wird die folgende Ausgleichungsstrategie vorgeschlagen: Korrigieren der mittels dGPS und einer IMU aufgenommenen äußeren Orientierungselemente sowie der inneren Orientierungselemente hinsichtlich des Scanner-dGPS-IMU-Systems.

Neben der automatisierten Bestimmung (Messung) von Verknüpfungsflächen (anstatt von Verknüpfungspunkten) wird auf die räumliche Verteilung der Passflächen (anstatt von Passpunkten) eingegangen.

1. Introduction

Laser scanners are mounted in aircrafts for collecting 3D-data of the surface of the earth. Proceeding the flight path, the laser beam sent downwards is deflected rhythmically aside and scans the ground surface in a meandric or parallel pattern with a high pulse rate. Most such devices use the technique of run-time measurement: the distance to a ground point then is a function of the time gap between the pulse was sent and received.

The direction of the laser beam is given by some deflecting device like a rotating or oscillat-

ing mirror and some trigger causing discrete pulses. So, the device records polar co-ordinates of ground points in its own local co-ordinate system. The origin of this device co-ordinate system follows the flight path and its movement can be measured with dGPS (differential Global Positioning System) very precisely using the phase comparison method. Since coupled to the aircraft, the attitude of the device changes also during the flight and can be recorded with INS (Inertial Navigation System) – more exactly with an IMU (Inertial Measurement Unit).

The components GPS, IMU and laser scanner have to be synchronised; moreover, their relative

– but constant – displacements have to be determined (calibration of eccentricities).

For transforming laser scanner strips into the national ground-survey co-ordinate system using dGPS and INS, we principally need *only one ground reference station* with known ground-survey coordinates. Moreover, we need also the form of the geoid. But, in practice, we should not be satisfied with that *minimal solution* because:

- The form of the *geoid is not sufficiently* (up to some few cm) *known* in many regions.
- The *on-the-fly-initialisation for solving the GPS phase ambiguities* nowadays is possible for fast moving objects like aircrafts with a r.m.s.e. of about ± 10 cm; this might result in errors of some dm. Usually, neighbouring precision of dGPS is better by one order of magnitude. The errors increase with the strip length. [1]
- The attitudes as delivered from IMUs in use are prone to errors of about ± 0.01 gon resulting in ± 16 cm on the ground assuming 1000 m relative flying height. *Errors of IMU attitude* also introduce some *torsion* of the laser scanner strips inducing errors in ground coordinates. Equally, IMU attitudes have a high neighbouring precision based on the gyros used; nevertheless, they show *drifting* phenomena. The resulting error effects might reach again some dm in the positions of ground points. [1]
- System failure or *system instabilities* shall be mentioned also: e.g. the change of the set of available GPS satellites during a strip might cause some displacement; however, IMU data helps to bridge such critical gaps.
- Last, but not least, the *missing rigorous supervision* of the whole measuring process has to be mentioned.

Instead of the minimal solution cited above (single ground reference station and geoid) the subsequent *alternative* is proposed which eliminates the shortcomings of the above:

- Use of *more GPS ground reference stations* surrounding the area of interest. This may (probably better) be achieved by a *virtual reference station* [7]. Supposing known ground-survey coordinates of all these ground reference stations, this also eliminates the (unknown) linear portion of the geoid's undulation. The undulations of higher degree remain; they might be neglected for the usually relative small extent of practical projects.
- Some of the GPS ground reference stations may be replaced by *ground reference points*

which can be “identified” somehow in the point clouds of the laser scanner strips (see 2.1). For planimetric fitting, roofs of buildings and/or prominent fault lines in the terrain are suitable, for height fitting, horizontal areas free of vegetation are recommended. In photogrammetric terminology, we call those *reference points* usually *control points*.

- Monitoring a many of plane and height discrepancies in the common areas of overlapping laser scanner strips and, therefrom, *improvement of GPS-positioning and IMU-attitude* data. Mathematically, this can be formulated with *correction polynomials* (of probably quite low degree) for the registered orientation elements as function of time: one strip – one polynomial. This procedure preserves the high neighbouring precision of both system components and copes with any drifting phenomena. The adjustment of all these sets of coefficients of the polynomials has to be done simultaneously for all strips of a block (key word: block adjustment by strips) – using the positions of corresponding points (features) in the overlapping areas as observations. Their residuals are to be minimised in the adjustment. A statistically better approach is the strategy to use original observations [2]: the polar coordinates recorded by the laser scanner; given position and attitude of the scanner, the Cartesian ground coordinates are (simple) functions of those recorded (v, χ, ρ)-values, i.e. nadir-angle v , fore-sight angle χ and distance ρ .

The above outline of a technique to improve the geometric quality of laser scanner data should give an idea how to overcome gaps between strip surfaces. Unfortunately, the proposed method requires access to the original data of the laser scanner: *GPS, IMU, and Polar data as function of time*. The laser scanner companies want to provide 3D-data for the end-user – so, they want to provide “DTMs” (i.e. grids) resp. point clouds in the national ground-survey co-ordinate system, only; key word “user-friendly”. But this “end-product” is prone to having bias and is too late in the process-chain for elementary repair. Nevertheless, we have to stress the fact that our criticism is valid only for exploiting the full potential of laser scanner data: we want to get the few-cm-precision of the laser scanner also as accuracy of the end product.

Some *provisorily (temporary) solution* was proposed in [5]: it was based on raw 3D-data given in the national co-ordinate system strip by strip.

Instead of correcting flight path (dGPS) and attitude data (IMU), we tried to compensate for the apparent XYZ-deformations by correction polynomials for individual strips of ground points. This procedure has the disadvantage that it copes merely with phenomena and does not assess the true problem. But it has the advantage that the necessary data is available to end-users.

Here we aim at a strict, highly automateable procedure minimizing 3D-gaps. Before going into adjustment details we have to discuss the determination of strip-tying features.

2. Determination of Strip-tying Features

The principle of strip-tying by features is shown in figure 1 using a special case. As we are not able to associate homologous points in the point-clouds created by Lidar (Light Detection And Ranging), we have to recourse to simple geometric features like planes which can be derived from regions of Lidar-points. Such a plane-feature is an approximation of the tangent-plane of the underlying surface. So, we associate first order differentials of the surface and call them homologous features – a generalization of the well-known “homologous points” of standard photogrammetry. It should be mentioned here that the term „feature“ also includes lines (straight or curved). But this aspect should

not be followed here in detail, since a line can be conceived as intersection of planes (surfaces) and handled by these means.

At some chosen ground position XY, a plane can be interpolated into every point-cloud of overlapping strips. Since the available orientation of the raw strips is relatively good, we can expect that the homologous features will also overlap.

2.1. Discussion of “homologous points” vs. “homologous planes”

A point has three coordinates – so, knowing them in 3D-space this point has no degrees of freedom. A tie-point, i.e. a point common to overlapping regions lets no (relative) degrees of freedom to the such tied regions.

A plane has two degrees of freedom – so, a point in one region can move in two independent directions with respect to the other region. A tie-plane, i.e. a plane common to overlapping regions lets also two degrees of freedom to the such tied regions. I.e., the such tied surfaces may shift relatively in two directions; the third direction (the surface’s normal) is fixed (relatively!).

From these deliberations one can ask for equivalence conditions between homologous planes and homologous points. The answer is simply given by the fact: three intersecting

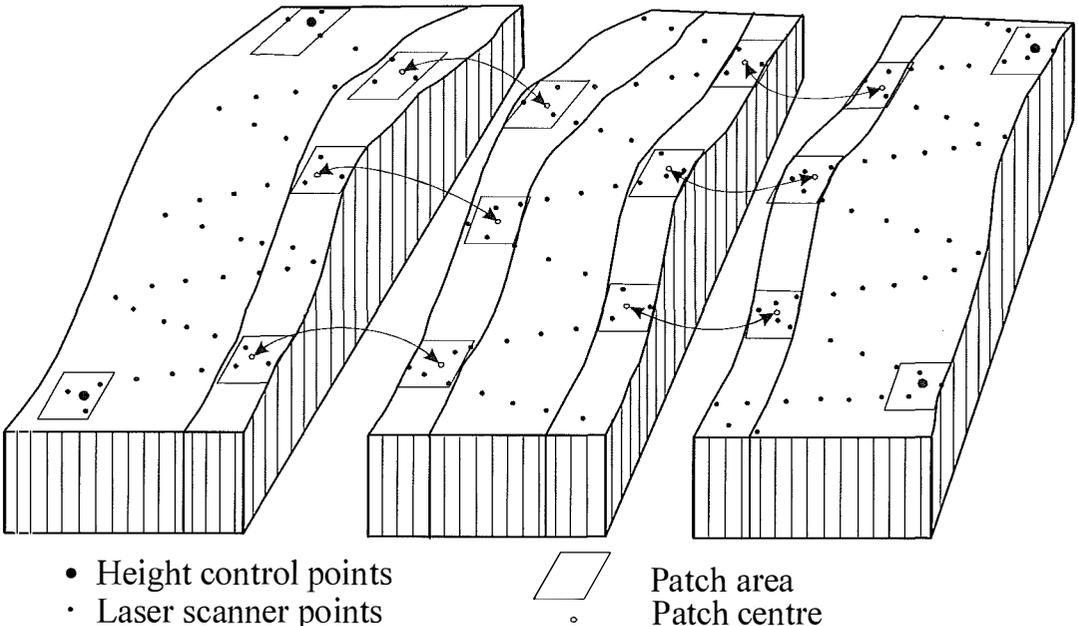


Figure 1: Principle of height block adjustment with laser scanner strips

planes yield a common point. So, we need three (neighbourhood) homologous planes to get the same(?) effect of tying as from one homologous point! And, with the restriction that the intersection angles are steep enough. (A point can be considered as intersection of three orthogonal planes: e.g. the three coordinate planes yield an optimal intersection.)

(The degrees of freedom discussed above only mean shifts in 3D, not rotations!)

Homologous plane features consist of regions of about 5 to 20 m extension; for shortness, we call it a patch. See Figure 2.

The above deliberations also hold true for control points. We have to replace control points by control features: We determine geodetically four supporting points for one patch plane. See Figure 2. The fourth (superfluous) point serves for checking and over-determination purposes.

2.2. The Patch-finding Mission

We use chronological data of the Lidar-strips, since this data-structure preserves topology to a high degree whereas a point-cloud has to be considered topologically unstructured. The usual procedure on giving a point-cloud again a topology is triangulation (e.g. Delaunay [6]). But this is time consuming and in the XY-domain sometimes wrong (e.g. a point on the wall might appear inside the eaves of a house).

Since we want to use original data, i.e. unfiltered data, we don't want to use a regular (desirable), but interpolated (regrettable), grid.

Proposition: A topology in the domain of time and nadir-angle as seen from the trajectory is free of loops. (There is one exception: due to pitch-caused "over-scanning" the scanner may "look back" for a while, scanning parts of the ground three times until regaining its usual attitude. This happens seldom and the such generated data may be eliminated easily – during setting up the topology – to grant our proposition.)

For different types of laser scanners we consider in short the topological properties of the recorded point sequence. "topology" in this context defines the neighbourhood relations of points as to "span" the underlying surface in some useful (approximate) sense.

The topology of a laser scanner with push-broom fibre-optics can be mapped to a matrix grid.

The topology of a laser scanner with rotating mirror can also be mapped to a matrix-like grid where the scan-lines fill the rows from left (e.g.).

The topology of a laser scanner with oscillating mirror can be mapped to also a matrix-like grid where the scan-lines fill the rows alternately from left and right.

Since drop-outs of (single) measurements may occur, the such mapped columns might jump (with respect to Cartesian space) when filling the rows uncritically.

So, we don't use a matrix-approach but the – in this case – superior "vector of vector" approach: We have a vector of rows (i.e. scan-lines); such a row contains a vector of scanner

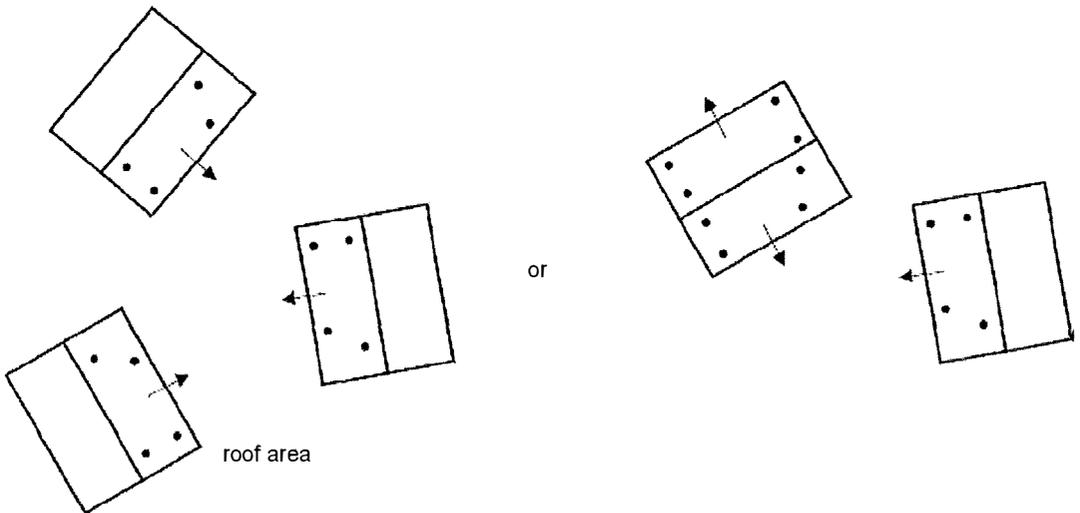


Figure 2: Examples of three tying patches equivalent to one tying point; respective three control patches equivalent to one control point provided different exposition of the patch-set.

points (i.e. the measurements at a point of time, itself being a vector of attributes);

The topology is then given by the rows and – between (timely) neighboured rows – by the monotony of nadir-angles; this yields – on demand – also a simple triangulation between rows. Another advantage is the fact that the strip-files may be processed simply sequentially keeping a relatively short vector of rows in memory. On the other hand it limits the size of recognizable patches.

This actual vector of rows is called “row-buffer”.

We search patch-candidates in the row-buffer.

A *patch-candidate* is now a (tilted) plane supported by a region of laser-scanner points matching a vector of criteria: it

- is above the surrounding (if we search for a roof)
- is planar within some tolerance (e.g. standard deviation 0.04 m)
- has minimal steepness (if we search for a roof)
- has not too many outliers (due to chimney, dormer, etc.)
- has minimal count of supporting points (not too small).
- etc.

Adjustment with data-snooping of a general plane with scan-lag compensation [8] is used to determine patch-candidates in the current row-buffer. So, we get for every strip a list of patch-candidates including quality measures.

A patch is then represented by

- a patch identifier (containing the strip identifier)
- its reference point (chosen centre of the used points of the region; to be kept constant in adjustment)
- its normal vector incl. accuracy
- its shift along the normal incl. accuracy
- scan-lag compensation incl. accuracy
- four anchor points circumscribing the region: each bearing the attributes: time t , polar coordinates nadir angle $\bar{\nu}$, fore-sight $\bar{\lambda}$, distance $\bar{\rho}$ to the adjusting plane; they represent the many of original polar points and will be used in adjustment as observations (so saving computing time)
- other statistics, etc.

When the row-buffer is worked off, its *first row* is replaced by the *next row* as read in from the chronological scanner file becoming logically the *last row*. So we get a moving (along the trajectory) row-buffer which is administrated as circular list.

This first run through the data gives for every strip an independent list of “normalized” patch-candidates.

In a second run, for every strip (the subset of overlapping strips of) these lists (accordingly sorted) are used as seeds for determining the respective homologous patch-candidate. So, an original patch-candidate may get no, one, or more partners.

Any strip produces now a second list of homologous “normalized” patch-candidates. The structure is the same as above. In the first run patch identifiers are created, in the second run they are merely used. Accidental duplication of patch identifiers is prohibited as one can see easily.

It is noteworthy to stress the fact that all these homologous patch-candidates bearing the same patch identifier are of equal rights with concern of adjustment theory since their fundamental argument is merely the same reference point; no correlations between the observations of different strips are introduced.

The second run has an additional criterion in determining the plane: compatibility of normal vectors.

Having these two sets of lists of normalized patches, they serve as input for the adjustment programme. Patches which have no partner are cancelled.

3. Block Adjustment by Strips of Laser Scanner Observations

In the following, we describe our actual method of simultaneously fitting laser scanner strips in 3D. The capitalized terms in the following refer to notions used in ORIENT [3].

The basic *observations* for simultaneous 3D-fitting:

- The polar coordinates $\bar{\nu}$, $\bar{\lambda}$, $\bar{\rho}$ of the anchor points of the patches in the overlapping areas of laser scanner strips as delivered from the patch finding mission above (the cross bar indicates the observation property). The accuracy of such a polar point observation is estimated from the scanner characteristics (for the angles) and from the (redundant) measurement process (adjustment of plane for the distance). They are stored in POLAR-rooms. All polar observations of one strip are stored in one POLAR-room.
- Ground coordinates \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} of control points which are measured geodetically terrestrially

(total station and GPS) on some of the patches as proposed in the previous section. We recommend also to measure four points for a patch to give it also directional support. See figure 2 for an example. They are stored in CONPOI-rooms.

- The fictitious observations that all ground points of a patch lie in the same (global) plane. The accuracy of such a plane-point was estimated in the adjustment of the patch's plane. All points of one patch are stored in one GESTALT-room. They stem from both runs of the patch finding mission and from control point measurements. This is the essential tying information between strips and reference frame.
- The shift-coefficients $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ of all (individual) strips honouring their zero-expectation. The subscript i indicates the exponent of time in the polynomial term. They are stored in ADPAR=OBS-rooms. Their accuracy is chosen as to handle eventual rank-deficiencies (preventive regularization).
- The tilt-coefficients $\bar{\omega}_i, \bar{\varphi}_i, \bar{\kappa}_i$ of all (individual) strips honouring their zero-expectation. The subscript i indicates the exponent of time t in the polynomial term. They are stored in ADPAR=OBS-rooms. Their accuracy is chosen as to handle eventual rank-deficiencies (preventive regularization).

The basic *observed constants* for simultaneous 3D-fitting:

- The GPS $\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0$ and IMU $\bar{\omega}_0, \bar{\varphi}_0, \bar{\kappa}_0$ measurements for the involved POLAR-points mentioned above. They are stored in GPSIMU-rooms parallel to the POLAR-rooms. Ever polar point has one entry here with t as common key.

The *unknowns* of the adjustment process are:

- Ground coordinates $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ for all the tie-(anchor-)points of patches and control points mentioned above. They are stored in the REFSYS-room.
- The shift-coefficients a_i, b_i, c_i of all strips (common or individual). The subscript i indicates the exponent of time t in the polynomial term. They are stored in ADPAR-rooms. The terms of order $i = 0$ handle GPS-shift, those with $i = 1$ can handle GPS-drift (i.e. shift change linearly with time).
- The tilt-coefficients $\bar{\omega}_i, \bar{\varphi}_i, \bar{\kappa}_i$ of all strips (common or individual). The subscript i indicates the exponent of time t in the polynomial term. They are stored in ADPAR-rooms. The terms of order handle IMU-index errors; $i = 1$ can handle change of index errors linearly with time (i.e. IMU-drift).

- Common rotations $\bar{\omega}_0, \bar{\varphi}_0, \bar{\kappa}_0$ handle bore-sight alignment, i.e. differential rotation of IMU with respect to the Lidar-device. They are stored in a ROTPAR-room.
- The shift-coefficients $c_{0,0}$ of all planes describing a patch. They are stored in ADPAR-rooms.
- Optionally, the tilt-coefficients $c_{1,0}, c_{0,1}$ of all planes describing a patch. They are stored in ADPAR-rooms. They can handle wrong tilt of patch planes caused by misalignment of the IMU.

The *adjustment* is expected to *minimise* the following quantities by least squares:

- The residuals of observed polar points $\bar{v}, \bar{\chi}, \bar{\rho}$ in the strips.
- The residuals of control points $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ with respect to patch planes.
- The offset of the adjusted ground points from the adjusted global patch plane.
- The polynomial shift-coefficients $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ – since they are expected to have zero-values (corresponding to correct GPS data). This yields relatively small values of the correction polynomials ([2], p37).
- The polynomial drift-coefficients $\bar{\omega}_i, \bar{\varphi}_i, \bar{\kappa}_i$ – since they are expected to have zero-values (corresponding to correct IMU data). This yields relatively small values of the correction polynomials ([2], p37).

The incorporation of the polynomial coefficients a_i, b_i, c_i and $\omega_i, \varphi_i, \kappa_i$ into the LSQ minimum condition is called "*preventive regularisation*". The term *regularisation* comes from the definition of a "*regular matrix*", i.e. a full-rank matrix, i.o.w. an invertible matrix. Alike, a singular normal equation matrix has to be made regular before a solution may be obtained. Such singularities may occur in our context when:

- Not enough ground control information is available (datum problem),
- Not enough deformation control information is available (degree of polynomial problem due to over-parameterisation),
- Bad distribution of ties resp. high correlation between adjacent strips due to weak ground control (typical polynomial oscillations).

ORIENT has built in a *regularisation on the fly*; i.e. when a singularity occurs (solving the normal equation system), a fictitious observation for the affected unknown will be generated allowing the decomposition process to continue. This is done automatically – the user is informed via protocol to let him make up his opinion about the validity of the results.

We have also to take care of getting rid of wrong hypotheses $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i = 0$ or $\bar{\omega}_i, \bar{\varphi}_i, \bar{\kappa}_i = 0$:

Gross error detection by data snooping is recommended for that. Testing of significance of the $a_i, b_i, c_i, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i$ and $c_{1,0}, c_{0,1}$ is also a must.

4. Minimal Distribution of Ground Control Points

We suppose that Lidar-strips have a similar geometric behaviour as strips in DGPS-supported aero-triangulation. We have to cope with deficiencies of the kinematic GPS as drift and even jumps on turns. In the meanwhile – as long as no exhaustive tests (simulations) are performed we suggest ground control to overcome the phenomena. The background of the following figure 3 is discussed in [2].

5. Block Montafon

This block, covering Gargellental and Garneratal in the region Montafon of Vorarlberg,

stretches in altitude from 880m to 2875m, so spanning 2000m in height extent. So, this block had to be flown in two missions, one of them covering the valley regions with 24 strips the other one the superior areas with 52 strips. 4 of the 24 were cross-strips, and 3 of the 52.

Mainly in the crossing strips tie positions were selected according figure 2 and then plane patches were searched for in every overlaying strip automatically. Acceptance criteria for tie patches were: more than 12 points with a standard deviation less than 5cm from the adjusting plane. Since the flown data had been clipped by the vendor at the project limits, a lot of strips lost their crossing partner. For these strips extra tie points had to be determined. Altogether, 1002 such plane-patches were used; the many, 340 of them occurred in 5 strips, 6 of them even in 15 strips, but also 244 only in 2 strips. Only 4 patches showed up as mismatch and had to be evicted by error detection methods. Additionally,

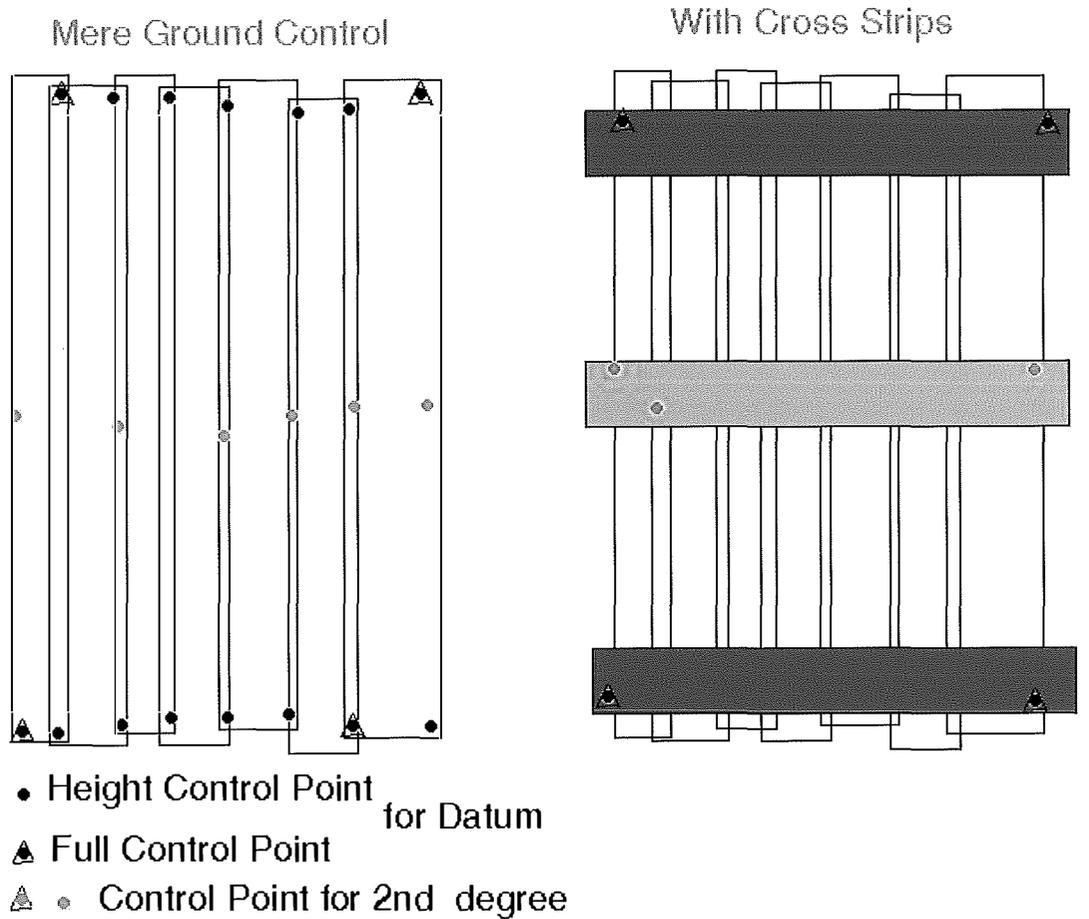


Figure 3: Recommended minimal distribution of ground control points

the LVA Feldkirch hat prepared 42 ground patches (supported by 170 points on roofs in easily accessible areas) in a height range from 850m to 2114m. These control patches were found in up to 14 strips.

Moreover, 18 patches on football fields were also used as height control. The adjustment of all these mentioned observations was done to determine GPS-shift and IMU-misalignment of each of the two flight missions; moreover, experiments with GPS-shift and IMU-misalignment individually for every strip were undertaken using preventive regularisation. The analysis of the variants is still in progress.

6. Résumé

For high demands in accuracy – not mere precision – we need some ground control. The ideal configuration of control points is not yet known. With high probability the same procedure as used for GPS-supported aerotriangulation ([2],p157, fig B5.3–5) can be recommended: i.e. control points in the corners of a block together with cross-strips at the ends of the block. These cross-strips may be replaced by chains of height control points at the ends of the block.

The area of interest should be extended by about one strip-width to grant consistency of the strip-sewing .

Quality control of a block is necessary: graphic representations of discrepancies is a must to detect any system anomalies.

References

- [1] *Cramer, M.*: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 2000
- [2] *Kraus, K., with contributions by J. Jansa und H. Kager*: Photogrammetry – Advanced Methods and Applications. Volume 2, Dümmler Verlag, Bonn, (English edition, translated by P. Stewardson), 466 pages, 1997.
- [3] *Kager, H.*: ORIENT, A Universal Photogrammetric Adjustment System, Reference Manual V1.7, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna,1995.
- [4] *Kraus, K.*: Eine neue Methode zur Interpretation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 85. Jahrgang, Heft 1, 1997, S. 15 – 30. [hk1]
- [5] *Kager, H.; Kraus, K.*: Height Discrepancies between Overlapping Laser Scanner Strips. In Grün/Kahmen (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques V, 2001, pp. 103–110.
- [6] *Heitzinger David*: 3D-Oberflächenmodellierung mit topologischen Grundelementen, Diplomarbeit IPF TU Wien (Begutachter: Kraus / Betreuer: Kager) (1996):
- [7] *Wanninger, Lambert*: Virtuelle GPS-Referenzstationen für großräumige kinematische Anwendungen, zfv3/2003 128. Jg.
- [8] *Kager, H.*: Adjustment of a general plane in LIDAR with scanlag compensation (working title); Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, internal report, 2003.

Adresse des Auteurs

Helmut Kager: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F., TU Wien, Gusshausstr. 27–29 / 122, A-1040 Wien. email: helmut.kager@tuwien.ac.at



Oberflächenmodelle aus Laserdaten

Norbert Pfeifer, Delft

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird eine Übersicht über die Methoden zur automatischen Klassifizierung einer Punktwolke aus flugzeuggetragenen Laserscanneraufnahmen gegeben und ein Vergleich dieser Methoden angestellt. Aus den als Bodenpunkten klassifizierten Daten kann ein Geländemodell hoher Qualität berechnet werden. Besonders wird auf die mathematische Morphologie, auf die Dreiecksnetz- bzw. TIN-Verdichtung und auf die robuste Interpolation eingegangen. In einem zweiten Abschnitt wird die Erstellung von weiteren topographischen Modellen an Beispielen behandelt (Oberflächen- und Baumhöhenmodellen und Modelle im Stadtgebiet).

Abstract

This article gives an overview on the methods for automatic classification of point clouds captured with airborne laser scanning and presents a comparison of these methods. Digital terrain models of high quality can be computed from the classified ground points. Especially the methods of mathematical morphology, the triangular irregular network (TIN-) densification, and the robust filtering will be studied. In the second part, examples for the derivation of other topographic models (i.e. surface models, tree height models, and models in city areas) are presented.

1. Flugzeuggetragenes Laserscanning für die Topographie

Neben der Photogrammetrie hat sich das Laserscanning als eine viel genutzte Methode zur Erfassung der Topographie etabliert. Laserscanning bietet viele Vorteile, wie

- i) die Durchdringung der Vegetation und das Erfassen der Bodenfläche auch in bewaldeten Gebieten,
- ii) der hohe Automatisierungsgrad, der von der Datenerfassung bis zur Erstellung des digitalen Geländemodells (DGM) reicht,
- iii) die hohe Punktdichte (1 Punkt/m²), was eine sehr genaue Beschreibung der Geländeoberfläche ermöglicht,
- iv) die Genauigkeit, ca. 10 cm in der Höhe, und
- v) das aktive System, das Messungen während der Nacht (z.B. über Flughäfen) oder über texturlosen Bereichen (z.B. Schnee) ermöglicht.

Diese vielen positiven Punkte müssen jedoch etwas relativiert werden. Die Qualität des Geländemodells nimmt in bewaldeten Gebieten mit zunehmender Dichte der Vegetation ab. Durch die geringere Anzahl der Punkte, die am Boden gemessen werden, wird auch die Beschreibung der Geländeoberfläche unzuverlässiger. Ein weiterer Nachteil ist, dass mit dem Laserscanning keine Geländekanten gemessen werden.

Die Automatisierung hat vor allem mit zwei Hindernissen zu kämpfen. Einerseits sind das *systematische Fehler* in den Laserpunkten. Sie entstehen bei fehlerhafter Erfassung des Flugpfades mit GPS und Inertialsystemen, wobei das Verhältnis der GPS-Messfrequenz zur Laser-Entfernungsmessfrequenz ca. 1:1000 ist. Besonders tragen aber Fehler in der Kalibrierung des Laser Range Finders (LRF, Entfernungsmesser), des Scanners (Ablenkungseinrichtung), sowie in der gegenseitigen Orientierung aller Komponenten dazu bei. Die systematischen Fehler erkennt man beispielsweise im Überlappungsbereich benachbarter Streifen. Andererseits ist die Ableitung der Geländemodelle in der Praxis oft noch nicht so weit automatisiert, wie es möglich wäre. In der sogenannten *Filterung* der Laserdaten werden die Punkte in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte (auf Hausdächern, in Baumkronen, . . .) klassifiziert. Anbieter von Laserscannerdaten verwenden oft einfache Ansätze zum Filtern der Daten und müssen Zeit in die manuelle Verbesserung der so erhaltenen Geländemodelle investieren.

Um das hohe Genauigkeits- und Automatisierungspotenzial des Laserscannings auszunutzen, müssen also die systematischen Fehler eliminiert werden [1], die Durchdringungsraten in bewaldeten Gebieten ausreichend hoch sein¹, und es müssen qualifizierte Methoden zur

¹) Derzeit sind noch kaum Studien vorhanden, die die Abnahme der Genauigkeit der Geländemodelle im Wald aufgrund niedriger Durchdringungsraten quantifizieren.

Filterung der Daten eingesetzt werden. Untersuchungen der Genauigkeit, die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien durchgeführt worden sind [2], liefern folgende Ergebnisse: Die erreichbare Genauigkeit ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit (Asphalt, Wiese, Büsche, . . .) und kann sogar 5cm erreichen, wenn alle systematischen Fehler eliminiert werden. Weiters nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Geländeneigung ab.

Der vorliegende Artikel soll einen Überblick über die Methoden der qualifizierten Filterung der Laserdaten geben, mit denen Geländemodelle von hoher Qualität automatisch berechnet werden können. Nach einer Begriffsbestimmung (Geländemodell, Oberflächenmodell, . . .) werden drei Filteralgorithmen und Varianten dazu vorgestellt und verglichen. Zwei der Methoden sind in kommerziellen Softwarepaketen implementiert. Anschließend wird kurz auf die Ableitung weiterer topographischer Modelle (Kronenmodellen, Oberflächenmodelle, . . .) eingegangen.

1.1. Begriffsbestimmung für digitale Modelle

Die Erstellung von (mathematischen) Modellen, die die Topographie beschreiben, ist eine der wichtigsten Anwendungen des flugzeuggetragenen Laserscanning. Diese Modelle sind nicht Selbstzweck, sondern ein Zwischenschritt um bestimmte Anwendungen auf Basis dieser

digitalen Modelle, ebenfalls automatisch auszuführen (Höhenschichtlinien für topographische Karten, Überschwemmungssimulationen, . . .). Neben dem Begriff DGM werden oft auch die Begriffe DTM, DSM, DOM, DEM und DHM verwendet, die teilweise verschiedene Modelle beschreiben. Das Ziel ist hier nicht, die einzig gültige Nomenklatur vorzuschlagen, sondern eher einen Überblick über die verwendeten Begriffe zu geben (siehe auch Abb. 1). In Klammern sind die englischen Bezeichnungen angegeben.

DHM (DEM): digitales Höhenmodell (digital elevation model). Ein DHM ist die Beschreibung der Höhe der Erdoberfläche², parametrisiert über geographischen Koordinaten (Länge, Breite) oder einem planimetrischen Referenzsystem (System der Landesvermessung oder lokale Systeme). Die Datenstruktur (regelmäßiges Raster, Triangulierung, . . .) ist damit nicht festgelegt.

DGM (DTM): digitales Geländemodell (digital terrain model). Ein DGM beschreibt – so wie ein DHM – die Höhen der Erdoberfläche. Der Begriff ist spezifischer als DHM, weil explizit festgelegt wird, welche Höhen, nämlich die Geländehöhen, modelliert werden. Teilweise wird der Unterschied zum DHM auch darin gemacht, dass ein DGM im Unterschied zum DHM Geländekanten und Strukturlinien enthält. Dementsprechend sind die verwendeten Datenstrukturen das ,hy-

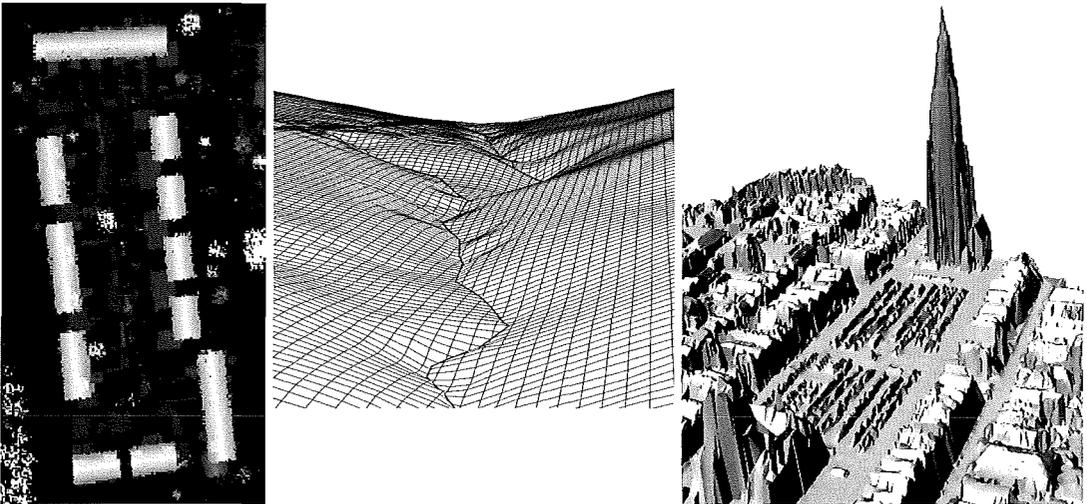


Abb. 1: Digitale Modelle aus Laserdaten. Links: Rastermodell der Originaldaten in einer Ortschaft (Wijhe, Niederlande, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Delft). Mitte: Geländemodell mit Bruchlinie in Form eines hybriden Gitters (Wienerwald, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien). Rechts: Oberflächenmodell in Form einer Triangulierung (Delft, Niederlande).

²) Oft werden auch andere Flächen damit beschrieben, beispielsweise die Marsoberfläche [3].

bride Raster' [4] (Gitter mit zusätzlichen Linien) und die Triangulierung. Ein Nachteil der Triangulierung ist, dass die zufälligen Messfehler direkt ins Geländemodell übernommen werden und durch die unregelmäßige Punktanordnung lange, schmale (und steile) Dreiecke entstehen, die das Gelände nur schlecht beschreiben.

DOM (DSM): digitales Oberflächenmodell (digital surface model). Dabei handelt es sich um das Modell, das die oberste Fläche aus der Vogelperspektive beschreibt. Was offenes Gelände und Häuser betrifft, so ist dieser Begriff recht eindeutig: Im offenen Gelände ist das DOM gleich dem DGM, bei Häusern läuft es aber über die Dachfläche. In bewaldeten Gebieten wird die Oberfläche als jene Fläche definiert, die durch die in einander greifenden Baumkronen gebildet wird, wobei es natürlich verschiedene Generalisierungsstufen gibt. Unsicher wird der Begriff in jenen Fällen, wo die oberste Fläche starken Schwankungen unterliegt (z.B. Weizenfelder, jahreszeitliche Veränderung) oder klein ist (z.B. kleine Baumgruppe im offenen Gelände).

nDOM (nDSM): normalisiertes digitales Oberflächenmodell. Darunter versteht man ein Modell, das die Höhe der Objekte (Häuser, . . .) über dem Gelände beschreibt. Man erhält es z.B. durch Subtraktion eines DOM von einem DTM.

DSM, TIS: digitales Situationsmodell, Topographisches Informationssystem. Diese Modelle beinhalten weiterführende Komponenten als die oben beschriebenen Flächen-Modelle (z.B. Bodenqualität, . . .) [4].

Diese Liste ließe sich noch beliebig fortsetzen, beispielsweise für das Kronenmodell (canopy model), aber ein einheitlicher Gebrauch ist für diese Begriffe nicht gegeben.

2. Filterung von Laserdaten

Flugzeuggetragene Laserscanner registrieren Punkte auf jenen Flächen, die vom Laserstrahl getroffen werden. Das ist einerseits die Gelände- fläche, aber auch Dachflächen und Blätter auf Bäumen reflektieren den Laserstrahl. Auch sehr kleine Flächen, wie bspw. Stromleitungen, können eine Echo hervorrufen. Die Punktwolke die man so erhält, enthält in erster Linie geometrische Information über die reflektierende Fläche, aber keine semantische Information. Um ein Modell des Geländes oder der Baumkronen abzulei-

ten muss daher die Punktwolke klassifiziert werden (z.B. Trennung der Boden-(Gelände-)Punkte von den „Nicht-Boden“-Punkten). Diese Aufgabe wird als Filterung bezeichnet³. Im Folgenden werden drei Methoden genauer vorgestellt: die morphologische Filterung [5] die progressive TIN-Verdichtung [6] und die robuste Interpolation [7]. Außerdem wird der hierarchische Zugang, der für die robuste Interpolation entwickelt worden ist, beschrieben. Für jede Methode werden auch Varianten bzw. verwandte Ansätze angegeben. Es werden auch Methoden vorgestellt, die keiner der drei obigen Methoden ähnlich sind, und ein kurzer Vergleich der Methoden schließt dieses Kapitel.

2.1. Morphologische Filterung

Der morphologische Filter arbeitet mit einem ‚Strukturelement‘, das die Geländehöhenunterschiede in Abhängigkeit von der Entfernung beschreibt. Je größer die horizontale Entfernung, umso größer darf auch der (positive) Höhenunterschied vom ersten zum zweiten Bodenpunkt sein. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2, links dargestellt, wobei das Strukturelement die oben-unten umgekehrte Version dieser Kurve ist, und rotationssymmetrisch zur vertikalen Achse. Dieses Strukturelement kann durch Annahmen über die Geländeneigung (z.B. maximal 30%) oder mit Trainingsdatensätzen für einen bestimmten Geländetypus bestimmt werden. Werden für das Training nur Bodenpunkte herangezogen, so erhält man ein Strukturelement, das keine Bodenpunkte ausfiltert, ist außer den Bodenpunkten auch eine separate Menge von Nicht-Bodenpunkten gegeben, so lässt sich ein Strukturelement bestimmen, mit dem die Klassifizierungsfehler (Boden als Vegetation und umgekehrt) minimiert werden [5].

Für die Filterung wird das Strukturelement vertikal von unterhalb der Punktmenge nach oben verschoben. Dazu wird es planimetrisch auf jedem Punkt zentriert und wandert nach oben, bis es an einem Punkt innerhalb des Umkreises (in der Abbildung ist der Radius 10 m) „hängenbleibt“ und die Verschiebung gestoppt wird. Ist dieser Punkt nicht das Zentrum, also der Punkt auf dem das Strukturelement zentriert worden ist, dann ist der untersuchte Punkt kein Geländepunkt. In dieser Art wird die gesamte Punktwolke klassifiziert. Diese Methode wird in [8] erweitert, wobei das Strukturelement in Abhängigkeit der Neigung eines grob abgeschätzten DGMs verändert wird.

³) Bei der hydrologischen Vermessung mit Fächerecholoten erhält man Daten mit ähnlichen groben Fehlern, allerdings über und unter dem Meeresboden, und die Filterung wird dort als Data-Cleaning bezeichnet.

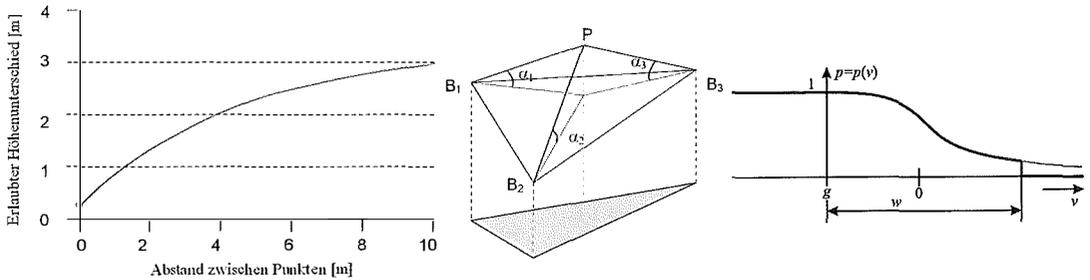


Abb. 2: Links: Erlaubter Höhenunterschied zwischen zwei Bodenpunkten in Abhängigkeit von der Entfernung (nach Vosselman, 2000). Mitte: Der Punkt P wird als Bodenpunkt akzeptiert, wenn die Winkel α zu den Bodenpunkten B_i ($i=1,2,3$) unter bestimmten Schwellwerten sind (nach Axelsson, 2000). Rechts: Gewichtsfunktion für die Berechnung von Gewichten auf Basis der Verbesserung (positive Werte entsprechen Punkten, die über der Fläche liegen). Zu beachten ist, dass die positive z-Richtung in der linken und mittleren Zeichnung nach oben zeigt und in der rechten Zeichnung nach rechts.

In [9] ist die Anwendung der morphologische Operation „Öffnung“ zur Filterung von Laserdaten beschrieben. Ein Fenster wird über die Daten bewegt, und der niedrigste Punkt im Fenster wird als Bodenpunkt angesehen, und Punkte bis zu einem bestimmten Höhenunterschied zu diesem Bodenpunkt ebenso. Das entspricht einem horizontalen Strukturelement in der Höhe des Schwellwerts. Der Vorgang wird mit verschiedenen Fenstergrößen wiederholt und die Punkte erhalten Gewichte in Abhängigkeit der Fenstergröße (multi-level approach). Zum Schluss wird eine Flächeninterpolation (-approximation) unter Berücksichtigung der Gewichte durchgeführt.

In [10] ist der 'dual rank filter' für die Filterung von Laserdaten in einem regelmäßigen Raster, vergleichbar einem digitalen Bild, beschrieben, ebenfalls eine Anwendung der mathematischen Morphologie. Gegebenenfalls ist eine Rasterung der Daten vorzunehmen. Die Fenstergröße wird automatisiert bestimmt, und muss so groß sein, dass das Fenster nicht vollständig im größten Haus im Datensatzes Platz hat. Im ersten Schritt der Filterung wird jede Rasterhöhe im DGM mit der k-niedrigsten Höhe im Fenster ersetzt (Erosion) und im zweiten Schritt jede Rasterhöhe mit der k-höchsten im Fenster (Dilatation). Der Wert k ist der Rang des Filters.

2.2. Progressive TIN-Verdichtung

Für die Anwendung dieses Filters wird als erster Schritt ein TIN (Triangular Irregular Network, eine Triangulierung) auf Basis von wenigen, sicheren Bodenpunkten gebildet. Diese erhält man durch Einteilung des gesamten Gebietes in große Bereiche, wobei in jedem Bereich der niedrigste Punkt gewählt wird. Für jedes Dreieck wird aus den innerhalb liegenden Punkten ein

Bodenpunkt gesucht. Dazu werden der Reihe nach die Abstände der Punkte zu den Dreieckseckpunkten untersucht und die Winkel, die die Verbindungen von den Eckpunkten zum untersuchten Punkt mit der Dreiecksfläche bilden (Abb. 2, Mitte). Liegen diese Werte unter bestimmten Schwellen, so wird der Punkt als Bodenpunkt akzeptiert und der Algorithmus arbeitet auf dem nächsten Dreieck weiter. Lässt sich kein solcher Punkt finden, dann enthält das Dreieck keine Bodenpunkte. In dieser Art wird die Triangulierung schrittweise verdichtet.

Die Kriterien können natürlich von den oben beschriebenen abweichen und in [6] ist beschrieben, dass auch bei Höhengsprünge innerhalb des Geländes alle Bodenpunkte als solche klassifiziert werden. Eine Version dieses Algorithmus ist in der Software TerraScan (Terrasolid, Finnland) implementiert.

Eine vergleichbare Methode ist in [11] entwickelt worden, sie arbeitet auch mit einer Triangulierung. Zuerst wird die konvexe Hülle der gegebenen Punkte gebildet. Die untere ‚Hälfte‘ der konvexen Hülle, also jene Dreiecke, deren auswärts gerichteter Normalvektoren eine negative z-Komponente haben, enthält auf keinen Fall Punkte über dem Gelände und ist eine erste Näherung des Geländes. Die Punkte über dieser Fläche werden abhängig von geometrischen Kriterien zum Gelände dazugefügt.

Eine weitere Variante ist von [12] beschrieben worden. Zuerst werden in den (4) Gebietsecken Bodenpunkte bestimmt und dieses Viereck wird trianguliert. Im ‚downward‘-Schritt wird jedem Dreieck der am tiefsten darunter liegende Punkt dazugefügt und die so erweiterte Punktmenge wird neu trianguliert. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis kein Punkt mehr unter dem vorläufigen Geländemodell ist. Im ‚upward‘-Schritt wer-

den auf Basis von einem Kriterium ein oder mehrere Punkte pro Dreieck als Bodenpunkte ausgewählt und das Geländemodell wird mittels Triangulierung auf den neuesten Stand gebracht.

2.3. Robuste Interpolation

Für die robuste Interpolation wird zuerst aus der gegebenen Punktwolke eine approximierende Fläche mittels linearer Prädiktion berechnet. Dabei werden große Verbesserungen, also große Abstände zwischen den Punkten und der Fläche zugelassen. Dann werden diese Abstände – positiv, wenn der Punkt über der Fläche liegt, negativ, wenn der Punkt darunter liegt – herangezogen um jeden Punkt ein Gewicht zu geben. Die Gewichtsfunktion ist in Abb. 2, rechts dargestellt. Der Ursprung g dieser Gewichtsfunktion ist im Negativen (also „unter“ der Fläche), und alle Punkte die eine Verbesserung kleiner als g haben, erhalten das Gewicht 1. Punkte mit größeren Verbesserungen bekommen ein entsprechend kleineres Gewicht bzw. das Gewicht 0, wenn sie oberhalb von der Abbruchschranke liegen, die durch w definiert ist. Der Wert g wird aus den Daten berechnet [13].

Diese Gewichte werden für die nächste Bestimmung der Fläche herangezogen. Ein Punkt mit großem Gewicht zieht die Fläche näher heran, wohingegen ein Punkt mit kleinem Gewicht geringeren Einfluß auf den Verlauf der Fläche hat. In dieser Art nähert sich die Fläche iterativ den Bodenpunkten an.

Diese Methode ist, in etwas allgemeinerer Form, in der Software SCOP++ (Inpho, Deutschland und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Österreich) implementiert.

Eine vergleichbare Methode ist von Elmqvist in [14] beschrieben. Ähnlich dem Ansatz von Snakes für Kurven [15] wird eine Fläche mittels innerer und äußerer Kräfte bestimmt. Die äußeren Kräfte entsprechen einer negativen Schwerkraft, die die Fläche von unten an die Punkte heranzieht. Die internen Größen sind Flächen-Steifheitsparameter, die verhindern, dass die Fläche zu einzelnen (Vegetations-)Punkten hinaufgezogen wird.

2.4. Hierarchische Filterung

Die hierarchische robuste Interpolation ist eine Erweiterung der robusten Interpolation. Eine Voraussetzung für die robuste Interpolation ist eine Durchmischung der Boden- und Nicht-Bodenpunkte. In Stadtgebieten, wo viele benachbarte Punkte auf Hausdächern gemessen werden ist das nicht der Fall. Daher wurde die Methode um

eine hierarchischen Zugang, der vom Groben ins Feine arbeitet erweitert [16]. Dieser Zugang ist nicht nur für die robuste Interpolation geeignet, sondern auch auf andere Filtermethoden anwendbar.

Der *hierarchische Ansatz* arbeitet mit Datenpyramiden, ähnlich zu den Bildpyramiden, die aus der digitalen Bildverarbeitung bekannt sind. Die verschiedenen Niveaus der Pyramide stellen die Daten in verschiedenen Auflösungsstufen (Generalisierungsstufen) dar. Die höheren Niveaus können mit verschiedenen Methoden aus den niedrigeren gebildet werden. Beispielsweise kann innerhalb eines kleinen, quadratischen Gebiets (Rasterzelle) immer der Schwerpunkt oder der tiefste Punkt selektiert werden. Dadurch wird eine Modellbildung vom Groben ins Feine ermöglicht. Der Ablauf dieser Methode ist durch folgende Schritte gegeben:

1. Berechnung der Datenpyramiden,
2. Filterung (Klassifizierung) und DGM-Berechnung mittels robuster Interpolation, beginnende mit dem höchsten Niveau,
3. Vergleich des DGM mit den Daten der nächstfeineren Auflösung und Auswahl der Punkte innerhalb eines Toleranzbandes.

Die Schritte 2 und 3 werden so lange wiederholt, bis nach dem 2. Schritt das DGM mit der endgültigen, feinsten Auflösung vorliegt. Dieser hierarchische Ansatz ermöglicht neben einer Reduktion der Rechenzeit eine stärkere Robustheit der Methode und ein Überbrücken von Bereichen ohne Bodeninformation.

2.5. Weitere Methoden

In der Methode von Wack [17] wird ein Raster mit einer Kantenlänge von 9 m gebildet, wobei die Höhe jeder Rasterzelle aus den innerhalb liegenden Punkten berechnet wird. Nicht die Höhe des tiefsten Punktes, sondern das 1%-Quantil der aufsteigend sortierten Höhen, wird zur Höhe jeder Zelle gemacht. Verbleibende Gebäude oder Vegetation in diesem Raster sind durch starke Höhengsprünge zu den Nachbarzellen gekennzeichnet und werden eliminiert, um das 9m-DHM zu erhalten. Im nächsten Schritt wird ein 3m-Raster gebildet, wobei nur noch jene Originalpunkte herangezogen werden, die innerhalb eines Toleranzbandes zum 9m-DHM liegen. Basierend auf Höhengsprüngen werden Nicht-Bodenzellen eliminiert, und das 3m-DHM gebildet. Der Vorgang wird noch einmal wiederholt, um ein 1m-DHM zu bestimmen. Natürlich können die Parameter (Fenstergröße, . . .) von den hier beschriebenen abweichen.

Im Ansatz von [18] werden die Daten in ein Gitter einsortiert, wobei innerhalb einer Gitterzelle Ausreißer auf Basis ihrer Höhe eliminiert werden. Dann wird eine lineare Fläche für die Punkte innerhalb eines Fensters bestimmt, wobei eine spezielle Gewichtung, die dem niedrigsten Punkt im Fenster das höchste Gewicht gibt, angewandt wird. Eine Klassifizierung der Punkte in Boden-, Objekt- und unklassifizierte Punkte wird über eine Analyse der Verbesserungen mit Schwellwerten gemacht. Der Vorgang wird ein zweites Mal, mit geringerer Fenstergröße und niedrigeren Schwellwerten für die Klassifizierung wiederholt.

Ähnlich dazu ist der Ansatz von [19], wobei die Fläche innerhalb des Fensters ein bikubischer Spline ist. Die Flächenbestimmung wird zweimal durchgeführt, mit verschiedenen starken Regularisierungstermen. Mittels Schwellwerten für die Verbesserungen und die Flächenneigung wird ein Punkt als Boden- oder Objektpunkt klassifiziert.

In [20] ist eine Methode beschrieben, die auf einem Vergleich von Oberflächenmodellen basiert, die mit verschiedenen Glättungsstärken aus den Originaldaten berechnet worden sind. In [21] ist die ‚block minimum‘-Methode erwähnt, die innerhalb eines Fensters den niedrigsten Punkt als Geländepunkt selektiert, und alle übrigen Punkte nicht weiter untersucht. Zu erwähnen ist noch, dass derzeit Ansätze entwickelt werden, die Segmentierung und Filterung vereinen [22] und [23].

2.6. Vergleich

Die morphologische Filterung und progressive TIN-Verdichtung sind Methoden, die *Annahmen über das Gelände* verwenden (Form des Strukturelement bzw. Kriterien für die Dreiecksverdichtung). Solche Annahmen sind auch in der robusten Interpolation enthalten (Kovarianzfunktion), aber zusätzlich wird durch die Gewichtungsfunktion für die Verbesserungen auch Information über die *Verteilung der Nicht-Bodenpunkte* eingebracht. Entsprechend gibt es auch Filtermethoden, die in erster Linie die vertikale Verteilung der Boden- und Nicht-Bodenpunkte berücksichtigen und nur wenig Geländeinformation benutzen. Wenn in einem vorgegebenen Raster der jeweils tiefstliegende Punkt, oder bspw. Das 5%-Quantil der nach Höhe sortierten Punkte, als Bodenpunkt ausgewählt wird, so spiegeln sich die Geländeeigenschaften ‚nur‘ in der Rastergröße wieder.

In vielen Methoden kann eine implizite Annahme von horizontalem Gelände gefunden wer-

den. Das gilt speziell für die block-minimum-Methoden. Die Methoden der TIN-Verdichtung erfassen den Trend des Geländes deutlich besser, und die robuste Filterung und die Methode von Elmqvist[14] modellieren das Gelände als *eine Fläche* bereits explizit und unter Einbeziehung von zufälligen Fehlern während der Filterung.

Viele Methoden arbeiten vom Groben ins Feine (TIN-Verdichtung, hierarchische robuste Interpolation, und die Methode von Wack [17]) oder auf mehreren Auflösungsstufen (multi-level-approach [9]). Durch die Wahl des Medians oder von Quantilen werden viele Methoden robust gegenüber groben Fehlern gemacht, speziell um Fehler durch Punkte unter der Geländefläche vorzubeugen ([17] und [10] für die Filterung und [18] für die Gitterbildung).

In den Publikationen zur robusten Interpolation wird die Prädiktion (Interpolation nach kleinsten Quadraten) für die Berechnung der Fläche verwendet. Dazu wird die Kovarianzfunktion abgeschätzt, bzw. äquivalent dazu das *Variogram*. Dieses gibt den Erwartungswert des *quadratischen Höhenunterschieds* für eine bestimmte Entfernung an. Bei der Snakes-Methode entspricht das den Steifigkeitsparametern der Fläche. Im Vergleich dazu gibt das *Strukturelement* der morphologischen Filterung den erlaubten Höhenunterschied in Abhängigkeit von der Entfernung zweier Punkte an.

Ein Vergleich von einigen Filter-Methoden für Testdatensätze ist von der ISPRS, Commission III, Working Group 3 durchgeführt worden [24].

3. Digitale Modelle aus Laserdaten

Im vorigen Abschnitt ist die Filterung von Laserdaten beschrieben worden. In erster Linie wird diese für die Extraktion der Geländepunkte oder der *Geländefläche* aus den Laserdaten angewandt. Neben diesen Modellen sind aber auch Oberflächenmodelle von Interesse. In diesem Abschnitt wird zuerst die Methode aus allen Laserdaten ein „Oberflächenmodell“ zu berechnen kritisch betrachtet. Dann wird auf die Ableitung von Kronenmodellen in bewaldeten Gebieten und Modellen im Stadtgebiet eingegangen.

3.1. Einfache Oberflächenmodelle?

Legt man durch alle Punkte eines Laserscanner-Datensatzes eine Fläche so erhält man jene Fläche, die der Sensor „sieht“. Im offenen Gelände ist dies der Boden, bei Häusern ist dies die Dachfläche.

Im Waldgebiet ist diese Fläche aufgrund der Eigenschaft des Laserscannings die Vegetation zu durchdringen eine Fläche, die teilweise am Boden, teilweise durch die Kronen und teilweise in mittlerer Höhe (beispielsweise bei Reflektion des Lasers an einem Ast) verläuft. Der Messmodus (first oder last pulse, also die Abstandsmessung zur obersten oder untersten reflektierenden Fläche) hat ebenfalls Einfluss, und entsprechend erhält man eine Fläche, die näher den Kronen oder dem Boden ist. Abhängig von der Vegetationsdichte, dem Befliegungszeitpunkt und dem Messmodus erhält man somit verschiedene Modelle. Ähnlich verhält es sich mit landwirtschaftlich genutzten Flächen. Getreide und Mais kann, je nach Reifegrad, den Laserstrahl an den oberen Enden der Vegetation reflektieren oder ‚transparent‘ für das Laserscanning sein. Damit können bei einer Laser-Befliegung für benachbarte Felder unterschiedliche Höhenniveaus gemessen werden.

3.2. Kronenmodelle

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Methoden sind für die Klassifizierung der Bodenpunkte in Laserdaten entwickelt worden. Durch entsprechende Adaption des Filters (Strukturelement, bzw. Winkelkriterien, bzw. Gewichtsfunktion) lassen sich mit diesen Methoden aber auch andere Flächen ableiten, beispielsweise die Vegetationsoberfläche. Im offenen Gebiet läuft diese Fläche am Gelände, im Wald aber soll die Fläche durch die Kronen laufen.

Invertiert man das Strukturelement der morphologischen Filterung (Oben-Unten-Umkehr) und führt das Strukturelement nicht von Unten, sondern von Oben an die Daten heran, so erhält man die oberste Fläche, die vom Laserscanner abgetastet wird. Entsprechend ließen sich auch die Kriterien für die progressive TIN-Verdichtung abwandeln um beispielsweise die Kronenoberfläche zu ermitteln. Für die robuste Interpolation

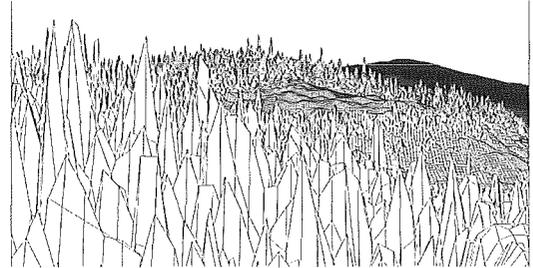
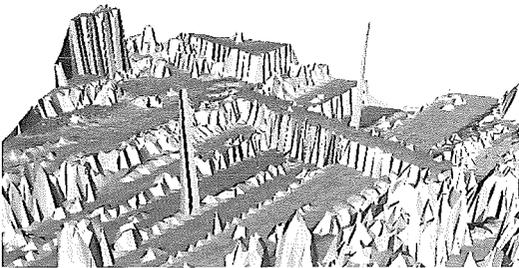


Abb. 3: Modell durch alle Laserpunkte. Links: Neben einer Brücke sind auch Vegetation (rechts vorne) und Gebäude (hinten) erkennbar. Auf der Straße bilden Lichtmasten Spitzen entlang der Fahrbahnmittlinie. Rechts: Interpolation von Punkten auf der Geländefläche und in der Vegetation, das Erkennen der bewaldeten Gebiete ist möglich, aber einzelne Bäume können bei dieser Punktdichte nicht mit Sicherheit unterschieden werden (nach Kraus and Rieger, 1999).

Einzelne Objekte (allein stehende Bäume, Straßenlaternen, Autos, . . .) werden, je nach Punktdichte mit einem oder mehreren Punkten erfasst oder bei entsprechend geringerer Punktdichte nur manchmal erfasst. Bei diesen Objekten lässt sich überdies der Begriff ‚Fläche‘ in einem topographischen Sinn nicht rechtfertigen.

Diese einfachen Oberflächenmodelle hängen also von Messmodus, -zeitpunkt und -höhe, dem jeweiligen Vegetationszustand und noch weiteren Parametern ab. Dennoch können Modelle, die durch die Interpolation der gesamten Punktwolke erstellt werden, sinnvoll verwendet werden. Für die Visualisierung oder eine Vollständigkeitskontrolle ist in vielen Fällen ein solches einfaches Modell ausreichend und Aufgaben die durch manuelle Interpretation gelöst werden (z.B. Messen von Distanzen zwischen Häusern) sind in solchen Modellen möglich (siehe Abb. 3).

ist eine andere Gewichtsfunktion zu wählen, die jene Punkte bevorzugt, die über der approximierenden Fläche liegen. Eine entsprechende Untersuchung für forstliche Zwecke ist in [25] und [26] von Rieger et al durchgeführt worden, und wird im Folgenden kurz beschrieben.

Aus den Laserpunkten einer Winter-Befliegung mit Aufzeichnung des letzten reflektierten Laserechos (Last Pulse) wurde das Geländemodell mittels robuster Interpolation wie oben beschrieben abgeleitet, die Höhenschichtlinien sind in Abb. 4, links zu sehen. Aus den Daten einer Sommerbefliegung mit Registrierung des ersten Echos (First Pulse) wurde das Kronenmodell abgeleitet. Die Gewichtsfunktion für die Klassifizierung der Punkte hat in diesem Fall große Gewichte für Punkte über der approximierenden Fläche vergeben und kleine Gewichte für Punkte darunter (bspw. Punkte am Waldboden). Das Dif-

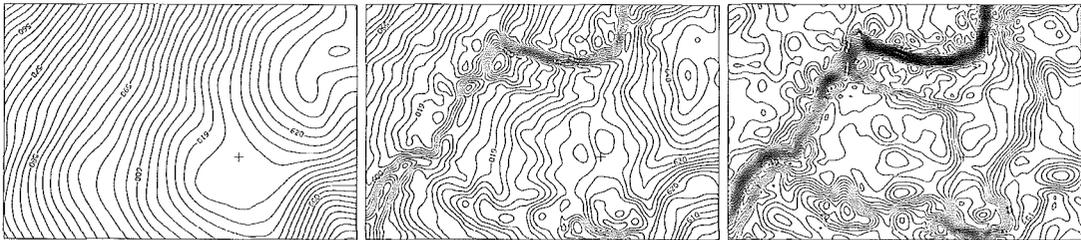


Abb. 4: Höhengichtlinien im Waldgebiet. Links ist das Geländemodell zu sehen, in der Mitte das Kronenmodell (Intervall jeweils 2m), und das Modell rechts zeigt die Waldhöhen, also generalisierte Einzelbaumhöhen (Intervall 1m) (nach Kraus and Rieger, 1999).

ferenzmodell (ein normalisiertes Oberflächenmodell, nDOM) zeigt die Höhe des Waldbestandes, die Höhengichtlinien sind in Abb. 4, rechts zu sehen. In Abb. 3, rechts ist das Modell durch Bodenpunkte und Vegetationspunkte in einer Perspektivabbildung zu sehen.

Weitere Methoden zur Bestimmung von Baumhöhen sind beispielsweise in [27] zu finden.

3.3. Modelle im Stadtgebiet

Modelle im Stadtgebiet können die Straßen und Vegetation beschreiben ([28], unter Zuhilfenahme des Katasterplans), die Gebäude in Form von Prismen (Klötzchenmodell), oder die Dachflächen der Häuser. In der Gebäuderekonstruktion (bspw. [29] und [30]) werden die einzelnen Dachflächen mit Ebenen beschrieben. Im Unterschied dazu lässt sich mittels Triangulierung oder Flächeninterpolation der Originaldaten ein einfaches Dachflächenmodell beschreiben. Dadurch wird das Haus, oder der Häuserblock als Objekt behandelt, ohne die Dachfläche detailliert zu analysieren. Zuerst muss dafür ein Haus als solches detektiert werden. Im Folgenden wird kurz eine neue Methode vorgestellt, mit der bei

gegebenen Grundrissen solche einfachen Hausmodelle erstellt werden können.

Die originalen Laserpunkte innerhalb eines Hausgrundrisses werden selektiert und trianguliert, was eine erste Beschreibung der Dachfläche, die im Allgemeinen nicht bis zu den Hauswänden oder den Traufen – je nach Erfassungsmethode für den Grundriss – reicht. Im nächsten Schritt werden an den Ecken und an regelmäßig verteilten Punkten entlang des Grundrisses die Dachhöhen abgeschätzt. Dazu wird eine Interpolationsmethode, die an die ‚nearest neighbor‘-Interpolation angelehnt ist, angewandt. Für jeden Punkt, für den die Höhe abzuschätzen ist, wird der nächstliegende Originalpunkt gesucht. In diesem Punkt wird die Tangentialebene aus den umliegenden Laserpunkten abgeschätzt. Die Höhe dieser Ebene an der Schätzposition ist die abgeschätzte Dachhöhe für den Grundrisspunkt. Da Dächer oft aus Ebenen zusammengesetzt sind, funktioniert diese Methode gut entlang des Grundrisses. Die so erhaltenen Punkte werden in die Triangulierung eingefügt und ergeben das Dachmodell. Das Modell kann noch mit Methoden zur Ausdünnung der Triangulierung (Verschmelzen von Dreiecken mit ähnlichen Ebenen-

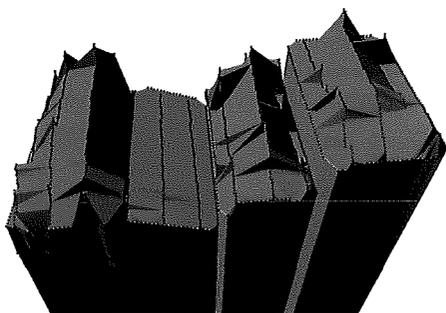


Abbildung 5: Erstellung eines einfachen Hausdachmodells im Stadtgebiet. Links sind einige Häuser von Delft mit dem Bodenmodell dargestellt. Rechts sind vier Häuser nach Anwendung der im Text beschriebenen ‚Verschönerungsalgorithmen‘ gezeigt. Die schwarz dargestellten Punkte auf den Hausdächern sind gegenüber den originalen Messungen in der Höhe verschoben. Die Grundrissdaten sind freundlicherweise von Kadata B.V. zur Verfügung gestellt worden, die Laserdaten freundlicherweise von TopoSys GmbH.

parametern, . . ., [31]) komprimiert werden. Eine Analyse der Höhen entlang der Grundrisskanten kann auch noch zur Verbesserung des Modells beitragen, da bei vielen Häusern die Traufen horizontal sind. Alternativ zur beschriebenen Extrapolationsmethode könnte auch auf Basis der ursprünglichen Triangulierung eine Extrapolation mittels der äußeren Dreiecke durchgeführt werden. Ein Ergebnis für die Methode der „nearest neighbor tangent plane“-Interpolation ist in Abb. 5 wiedergegeben. Mit diesen Modellen lassen sich bspw. einfache Abschätzungen des Dach-Oberflächeninhalts und des Hausvolumens durchführen.

4. Schlußbemerkung

Wie in dem Artikel gezeigt, können mit dem flugzeuggetragenen Laserscanning digitale Modelle vom Gelände, von der Dachlandschaft und von den Baumkronen abgeleitet werden. Die Filteralgorithmen für die Ableitung der Geländemodelle sind weit entwickelt. Filterung der Laserscannerdaten wird oft mit anderen Methoden, z.B. aus der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt um in Vor- oder Nachbearbeitungsschritten die Daten aufzubereiten bzw. das Ergebnis zu verbessern. Um die Qualität der Geländemodelle noch weiter zu steigern ist eine Rekonstruktion der Geländekanten notwendig ([32], [33]). Vorausgesetzt, die Punktdichte einer Laserbefliegung ist ausreichend hoch, lassen sich aber auch viel detailliertere Modelle ableiten, wie z.B. Einzelbaummodelle [34] oder Stadtmodelle, bei denen die Dächer aus einzelnen ebenen Flächen zusammengesetzt sind. Durch die Kombination mit anderen Datensätzen (Grundrissen, digitalen Bildern, . . .) wird die Rekonstruktion dieser Modelle einfacher bzw. zuverlässiger und robuster.

Die Entwicklung der Laserscanner ist noch nicht abgeschlossen, die Messfrequenz und maximale Flughöhe steigen. Dadurch wird der Einsatz von Laserscanning kostengünstiger. Laserscanner können derzeit aus Flughöhen von 2000m über Grund betrieben werden und registrieren bis zu fünf Echos (fünf Reflexionen des Lasers entlang des Strahls). Angekündigt sind bereits Scanner, die auch die Wellenform des reflektierten Signals registrieren (full waveform capture, Verteilung der zurückkommenden Energie über die Zeit) bzw. Scanner für noch größere Flughöhen. Auch Laserscanning vom Satelliten – ohne Ablenkungseinrichtung – ist bereits im Einsatz (z.B. ICESat, Ice Cloude and Land Elevation Satellite).

Literatur

- [1] *Sagi Filin*: Analysis and implementation of a laser strip adjustment model. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [2] *Christian Briese, Karl Kraus, Gottfried Mandelburger, and Norbert Pfeifer*: Einsatzmöglichkeiten der flugzeuggetragenen Laser-Scanner. In Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche in Obergurgl, pages 17–26, Innsbruck, Austria, 2001.
- [3] *Peter Dorninger and Christian Briese*: Modellierung der Marsoberfläche aus Laserscanner Daten. In Tagungsband der 12. Internationale Geodätische Woche in Obergurgl, Innsbruck, Austria, 2003.
- [4] *Karl Kraus*: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme. Dümmler, 2000. An english edition by Taylor and Francis (translator: H. Rütger) is in preparation.
- [5] *George Vosselman*: Slope based filtering of laser altimetry data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIII, B3, pages 935–942, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [6] *Peter Axelsson*: DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIII, B4, pages 111–118, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [7] *Karl Kraus*: Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, 1:25–30, 1997.
- [8] *George Sithole and George Vosselman*: Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [9] *Johannes Kilian, Norbert Haala, and Markus English*: Capture and evaluation of airborne laser scanner data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXI, B3, pages 383–388, Vienna, Austria, 1996.
- [10] *P. Lohmann, A. Koch, and M. Schaeffer*: Approaches to the filtering of laser scanner data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIII, Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [11] *Wolfgang Hansen and Thomas Vögtle*: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, pages 229–236, 1999.
- [12] *G. Sohn and I. Dowman*: Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3B, pages 336–344, Graz, Austria, 2002.
- [13] *Karl Kraus and Norbert Pfeifer*: Advanced DTM generation from LIDAR data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 23–30, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [14] *M. Elmqvist, E. Jungert, F. Lantz, A. Persson, and U. Söderman*: Terrain modelling and analysis using laser scanner data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [15] *M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos*: Snakes: active contour models. International Journal of Computer Vision, 1(4):321–331, 1988.
- [16] *Norbert Pfeifer, Philipp Stadler, and Christian Briese*: Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. In Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden, 2001.
- [17] *R. Wack and A. Wimmer*: Digital terrain models from airborne laser scanner data – a grid based approach. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3B, pages 293–296, Graz, Austria, 2002.
- [18] *Marco Roggero*: Airborne laser scanning: Clustering in raw data. In International Archives of Photogrammetry and Re-

- ote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 227-232, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [19] *M.A. Brovelli, M. Cannata, and U.M. Longoni*: Managing and processing LIDAR data within GRASS. In Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference, Trento, Italy, 2002.
- [20] *T. Thuy VU, Furnio Yamazaki, and Mitsuharu Tokunaga*: Wavelet-based filtering the cloud points derived from airborne laser scanner. In 23. Asian Conference on Remote Sensing, Kathmandu, Nepal, 2002.
- [21] *Ralph A. Haugerud and D.J. Harding*: Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of LIDAR topographic survey data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pages 211-217, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [22] *Carla Nardinocchi, Gianfranco Forlani and Primo Zingaretti*: Classification and filtering of laser data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [23] *Karsten Jacobsen and Peter Lohmann*: Segmented filtering of laser scanner DSMs. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [24] *George Sithole and George Vosselman*: Comparison of filtering algorithms. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [25] *Wolfgang Rieger, Otto Eckmüller, Hermann Müllner, and Thomas Reiter*: Laser scanning for the derivation of forest stand parameters. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, LaJolla, CA, USA, 1999.
- [26] *Karl Kraus and Wolfgang Rieger*: Processing of laser scanning data for wooded areas. In Fritsch and Spiller, editors, Photogrammetric Week '99, pages 221-231, Stuttgart, Germany, 1999. Wichmann Verlag.
- [27] *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*: Vol. XXXIV, 3/W4, Annapolis, MD, USA, 2001.
- [28] *George Vosselman*: 3d reconstruction of roads and trees for city modelling. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany, 2003.
- [29] *Claus Brenner and Norbert Haala*: Erfassung von 3d Stadtmodellen. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 2:109-118, 2000.
- [30] *Franz Rottensteiner and Christian Briese*: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3A, pages 295-301, Graz, Austria, 2002.
- [31] *Michael Garland and Paul S. Heckbert*: Surface simplification using quadric error metrics. In SIGGRAPH 97 Conference Proceedings, pages 209-216, 1997. <http://www.cs.cmu.edu/~garland/research/quadrics.html>.
- [32] *D. Wild and P. Krzystek*: Automated breakline detection using an edge preserving filter. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, B3, pages 946-952, Vienna, Austria, 1996.
- [33] *Christian Briese, Karl Kraus and Norbert Pfeifer*: Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten. In Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, pages 47-52, TU Dresden, Inst. für Planetare Geodäsie, Germany, 2002.
- [34] *Ulla Pyysalo and H. Hyypä*: Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3A, Graz, Austria, 2002.

Adresse des Autors

Dr. Norbert Pfeifer: Delft University of Technology, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Kluyverweg 1, NL-2629 HS Delft, Niederlande. email: n.pfeifer@lr.tudelft.nl



Analyse und geomorphologische Verbesserung von Geländemodellen mittels Regensimulation

Peter Dorninger, Wien

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren etablierte sich das Laserscanning als effiziente Methode zur Erfassung der Topographie eines Gebietes. Im Gegensatz zur analytischen Luftbilddauswertung bietet Laserscanning keine Möglichkeit zur direkten Erfassung und anschließenden Modellierung von Geländekanten. Der Grad der geomorphologischen Strukturierung des erfassten Modells kann daher nur durch die Punktdichte beeinflusst werden.

Im folgenden Artikel wird eine Methode zur Ableitung von Geländekanten aus Laserscanner-Daten beschrieben. Diese können in die weitere Modellierung des Geländes integriert werden. Die angewandte Methode basiert auf Regensimulationsalgorithmen. An Hand von Beispielen werden zwei unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten dieser Methode beschrieben. Im ersten Beispiel werden Strukturkanten zur großräumigen Verbesserung des gesamten Interessensgebietes lage- und höhenmäßig abgeleitet. Im zweiten Beispiel werden durch die Erfassungsmethode bedingte, kleinräumige, geomorphologische Fehlstrukturen eines Geländemodells eliminiert.

Abstract

In the last years, laser scanning has established as an efficient method for the determination of the topography of an area. In contrary to the analytical analysis of aerial images, laser scanning does not enable the direct determination of structure lines. Therefore the level of detail can only be influenced through the point density.

In the following, a method for derivation of structure lines from laser scanner data is described. These lines can be used to improve the terrain model. The method used is based on rain simulation algorithms. Finally two different applications of this method are described with examples. The first example demonstrates the derivation of structure lines for large area improvement of the terrain model. The second example shows the elimination of erroneous small geomorphological structures from an elevation model.

1. Einleitung

Laserscanning ermöglicht die Erfassung der Topographie eines Gebietes durch die Bestimmung vieler Oberflächenpunkte in Form einzelner Punktmessungen. Die Modellierung der Oberflächenstruktur kann durch den gewählten Punkt-Abstand beeinflusst werden: Je kleiner der Punkt-Abstand (abhängig einerseits von der gewählten Flughöhe; andererseits von der Messwiederholfrequenz des verwendeten Aufzeichnungsgerätes), desto detaillierter erfolgt die Erfassung der Geländestruktur. Die zur mathematischen Modellierung verwendeten Methoden haben als vorrangiges Ziel die Schaffung einer homogenen, an den jeweiligen Verwendungszweck angepassten Oberfläche. Dies bedingt eine Glättung des zu modellierenden Geländes. Mit anderen Worten: Auch eine sehr fein aufgelöste Punktwolke vermag es nicht unmittelbar unstetige Oberflächenstrukturen zu modellieren. Es wird somit stets zu Abrundungen im Bereich von Geländekanten (Dammkronen, Felskanten, Talsohlen, . . .) kommen.

Zur Verbesserung des direkt aus den gegebenen Punkten ermittelten Oberflächenmodells ist

es daher sinnvoll, wenn nicht gar notwendig, eben solche Unstetigkeitsstellen der Geländeoberfläche aufzufinden, gezielt zu modellieren und in weiterer Folge gemeinsam mit dem ermittelten regelmäßigen Raster zu verwalten bzw. weiter zu prozessieren. Entsprechende Softwareapplikationen zur Verwaltung und Bearbeitung der Modelle sowie geeignete Dateiformate sind hierfür notwendig. Beispielsweise die am I.P.F. entwickelte topographische Datenbankapplikation TopDM bietet entsprechende Funktionalität. Diese beschreibt Hochstöger [1].

Im Folgenden wird eine Methode zur Bestimmung derartiger Strukturelemente mit Hilfe rasterbasierter DGM-Analysemethoden unter Anwendung von Regensimulation beschrieben. Anschließend wird die Anwendung dieser Methode an Hand zweier Beispiele erläutert. Im ersten Beispiel werden aus einer gegebenen Punktwolke Geländekanten abgeleitet und anschließend in das Modell eingebunden, um die Struktur zu verbessern. Im zweiten Beispiel wird an Hand eines Datensatzes in bewaldetem Gebiet gezeigt, wie geomorphologische Fehlerstrukturen beseitigt werden können.

2. Methodik der Regensimulation

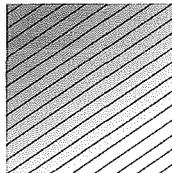
Die in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Ergebnisse basieren auf Berechnungen mit Hilfe des Moduls ‚Surface Exploration‘ der Geländemodellapplikation SCOP++ [2]. Dieses Programm ermöglicht verschiedene, rasterbasierte Geländemodellanalysen. Als Ausgangsdatensatz wird ein regelmäßiger Punktraster, im weiteren als Matrix bezeichnet, verwendet. Dieser kann beispielsweise mit Hilfe Linearer Prädiktionsmethoden [3] aus der ursprünglich gemessenen Laserscannerpunktswolke bestimmt werden.

‚Surface Exploration‘ bietet drei Möglichkeiten zur rasterbasierten, mathematischen Analyse eines Geländemodells: Die Berechnung von Neigungs-, Krümmungs- und Ausrichtungskarten. Darauf wird im Folgenden jedoch nicht näher eingegangen. Es sei hier auf Rieger [4] verwiesen.

Die hydrologischen Analysemethoden basieren auf der Anwendung systolischer Prozesse (Regensimulation). Diese ermöglichen die Bestimmung abflussloser Gebiete (lokale Minima) sowie eine Abflussanalyse, welche in weiterer Folge die Ableitung von Flussläufen sowie deren zugehöriger Einzugsgebiete erlaubt. Eine weiterführende Beschreibung der verwendeten Methoden geben Kraus [3] und Rieger [5]. Das Grundprinzip ist wie folgt:

Geländehöhen – schräge Ebene

90	88	86	84	82
87	85	83	81	79
84	82	80	78	76
81	79	77	75	73
78	76	74	72	70



Beregnung 1:

1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Abfluss 1:

0.0	0.4	0.4	0.4	0.4
0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
0.6	1.0	1.0	1.0	1.0

Beregnung 2:

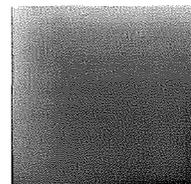
1.0	1.4	1.4	1.4	1.4
1.6	2.0	2.0	2.0	2.0
1.6	2.0	2.0	2.0	2.0
1.6	2.0	2.0	2.0	2.0
1.6	2.0	2.0	2.0	2.0

Abfluss 2:

0.0	0.4	0.6	0.6	0.6
0.6	1.2	1.6	1.6	1.6
1.0	1.8	2.0	2.0	2.0
1.0	1.8	2.0	2.0	2.0
1.0	1.8	2.0	2.0	2.0

Abfluss 8 (Gleichgewicht):

0.0	0.4	0.6	0.6	0.7
0.6	1.5	1.9	2.1	2.2
1.0	2.3	3.1	3.5	3.8
1.2	2.8	4.0	4.7	5.1
1.3	3.2	4.7	5.7	6.4



Prinzip - Iteration von Beregnung u. Abfluss

Beregnung: In jedem Flächenelement wird eine Einheit Wasser eingebracht

Abfluss: Basierend auf der Neigung zu den Nachbarelementen (4) wird der Abfluss bestimmt

Abbruch: Bei Erreichen des Gleichgewichts

Abb. 1: Prinzip der Regensimulation

Per definitionem wird in jedem Punkt der Geländeoberfläche die gleiche Menge Wasser eingebracht. Anschließend wird an Hand der in jedem Matrixelement vorherrschenden Neigungsverhältnisse zu seinen Nachbarelementen der richtungsabhängige Abfluss dieser Wassereinheiten bestimmt, ehe erneut in jedem Element die selbe Wassermenge eingebracht wird. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dies ist vergleichbar mit einer permanent andauernden, homogenen Niederschlagsverteilung auf das gesamte Interessensgebiet. Auf Grund der Geländestruktur werden sich Flüsse bilden, sobald genügend Wasser vorhanden ist. Diese suchen sich nun ihren Weg entlang der Falllinie. Stößt ein Fluss auf ein lokales Minimum, so endet der der Schwerkraft folgende Flusslauf. Anschließend wird das Wasser so lange aufgestaut, bis der tiefste Punkt am Rand der Mulde erreicht ist. Von nun an kann das Wasser wieder der Schwerkraft folgend fließen. Die Überlagerung der Flussläufe und Mulden liefert somit ein realistisches Bild des Wasserverlaufes auf einer Oberfläche bei permanentem Niederschlag.

Die Methode der Abflussermittlung ist in Abbildung 1 an Hand eines einfachen Zahlenbeispiels beschrieben. Das betrachtete Gebiet ist eine schräge Ebene, welche durch eine Matrix von 5 mal 5 Stützpunkten gegeben sei. Auf jedes Matrixelement wird im ersten Schritt eine Wasse-

reinheit eingebracht. Als nächstes wird, basierend auf der Neigung zu den jeweiligen Nachbar-elementen, der entsprechende Abfluss bestimmt. Anschließend erfolgt eine erneute ‚Beregnung‘ des Gebietes. Die beiden Schritte *Beregnung* und *Abflussermittlung* werden so oft wiederholt, bis sich über das gesamte Gebiet ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dieser ist erreicht, wenn eine erneute Iteration keine Veränderung im Abflussverhalten bewirkt.

3. Ableitung von Geländekanten – Schneeealm

Wie in Kapitel 2 beschrieben erlaubt die Methode der Abflussermittlung in weiterer Folge die Ableitung möglicher Flussläufe. Diese werden sich auf Grund ihrer Definition stets entlang von Tälern bilden. Definiert man die so gewonnenen dreidimensionalen Vektoren im abzuleitenden Modell als Kanten (Unstetigkeitsstellen), so kann die geomorphologische Struktur der modellierten Oberfläche erheblich verbessert werden. Länge und Anzahl der ermittelten Flüsse kann durch die Angabe zweier Parameter beeinflusst werden. Diese sind die minimale Fläche der Einzugsgebiete, welche zur Ausbildung von Flusselementen führen, sowie die minimale Flusselementlänge.

Testgebiet ist der Bereich der Schneeealm, ein Bergstock aus Kalkgestein im Nordosten der Steiermark. Die Schneeealm ist als wichtiges Trinkwasserreservoir der Bundeshauptstadt Wien bekannt. Das betrachtete Gebiet erstreckt sich nahezu quadratisch auf eine Fläche von rund 90 km². Der Originaldatensatz stammt von einer ‚herkömmlichen‘, analytischen Luftbildstereoauswertung und enthält rund 55.000, überwiegend gittermäßig angeordnete Einzelpunkte sowie Kanten und Formlinien. Der Unterschied zwischen Kante und Formlinie besteht darin, dass eine Kante tatsächlich eine Linie mit unstetiger Krümmung im Modell bildet, während eine Formlinie lediglich eine verstärkte Krümmung des Modells quer zu einer solchen Linie bewirkt.

Für die folgenden Betrachtungen wurden zunächst die gemessenen Strukturlinien aus dem Datensatz entfernt. Somit stand eine reine Punktwolke, vergleichbar mit dem Ergebnis einer Laserscannerkampagne, zur Verfügung. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen Visualisierungen in Form von Schräglichtbeleuchtungen eines aus den Originaldaten (inkl. Kanten) abgeleiteten Geländemodells sowie des Modells ohne Kanten. Für die weiteren Berechnungen wurde das Modell ohne Kanten herangezogen.

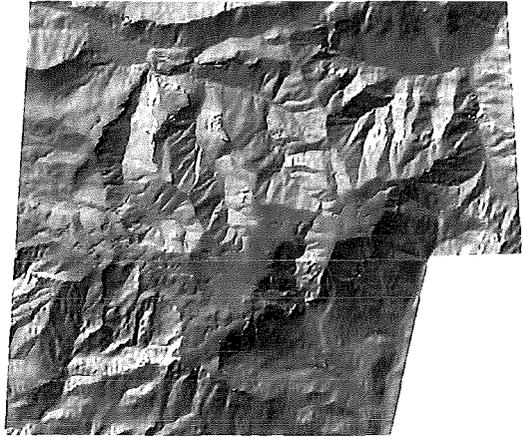


Abb. 2: Schräglichtbeleuchtung des Originalmodells



Abb. 3: Schräglichtbeleuchtung des Modells ohne Kanten

Zunächst wurden mit Hilfe der Abflussanalyse die Flussläufe ermittelt. Diese sind in Abbildung 4 dargestellt. Um mit der gleichen Methode auch Kanten entlang von Bergrücken auffinden zu können, wurde das Geländemodell invertiert. D.h. bei gleichbleibenden Lagekoordinaten wurden die entsprechenden Höhen mit negativen Vorzeichen versehen. Anschließend wurde eine Abflussanalyse durchgeführt. Abbildung 5 zeigt das invertierte Modell gemeinsam mit den daraus abgeleiteten ‚Flussläufen‘. Diese sind, auf Grund ihrer Definition, äquivalent zu einer Teilmenge der Einzugsgebietsgrenzen, welche in der Natur die Wasserscheiden definieren.

Die Zusammenführung beider Ergebnismengen ermöglicht die Einbindung sowohl von Kanten in Tälern wie auch auf Bergrücken. Eine Überlagerung der automatisch abgeleiteten Kanten



Abb. 4: Abgeleitete Flussläufe

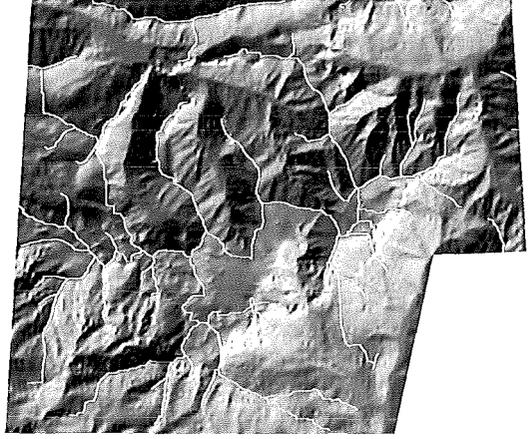


Abb. 5: Aus dem invertierten Modell abgeleitete „Flussläufe“

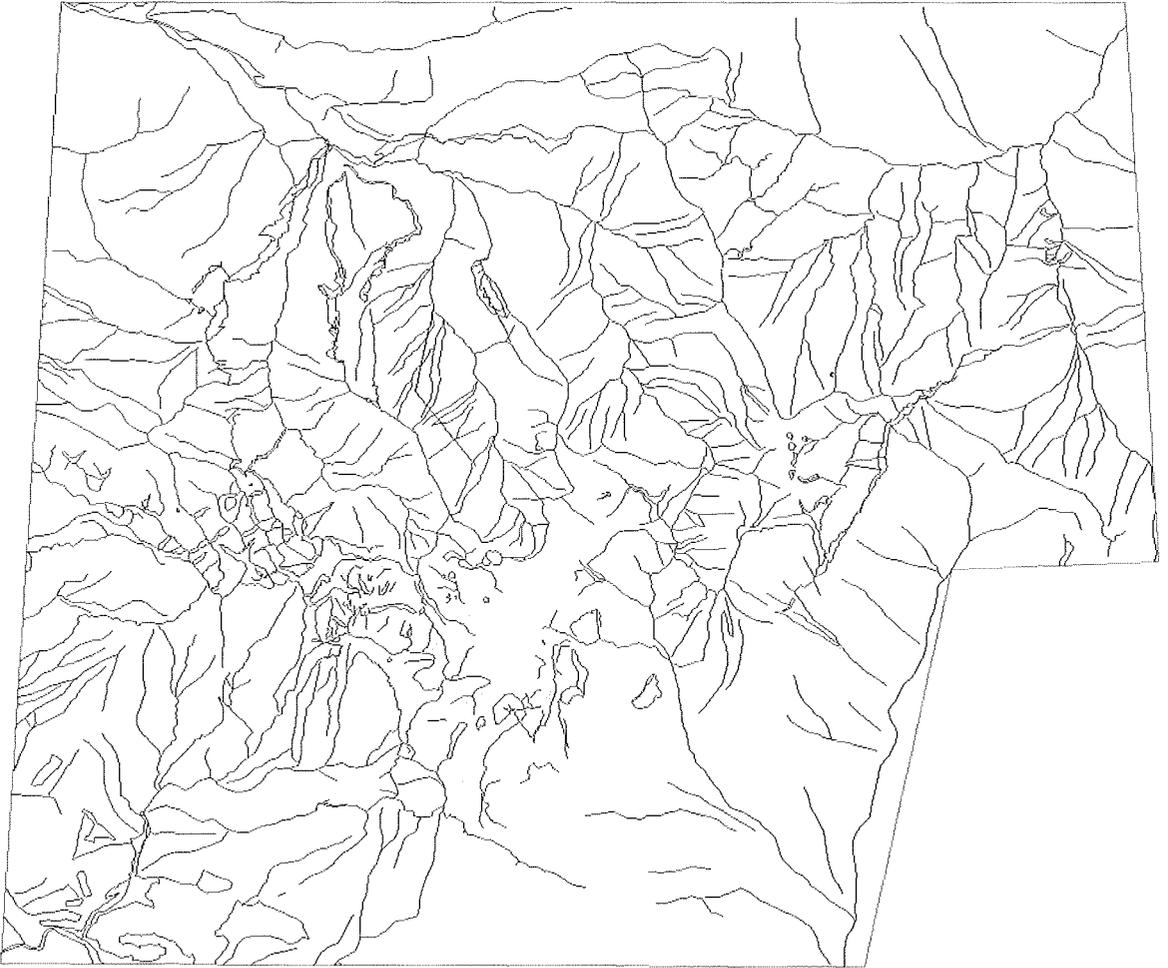


Abb. 6: Kanten aus der Luftbildauswertung



Abb. 7: Abgeleitete Flussläufe und Originalkanten

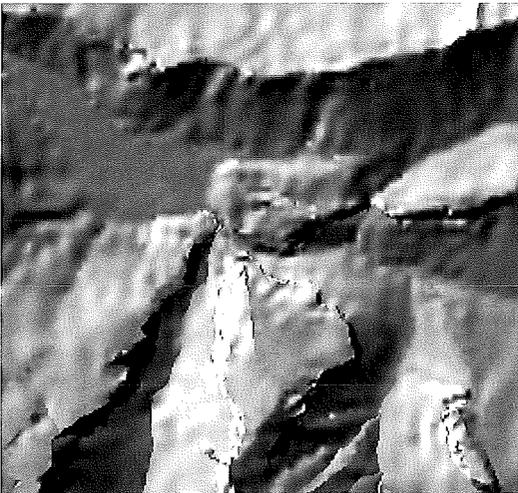


Abb. 8: Originalmodell

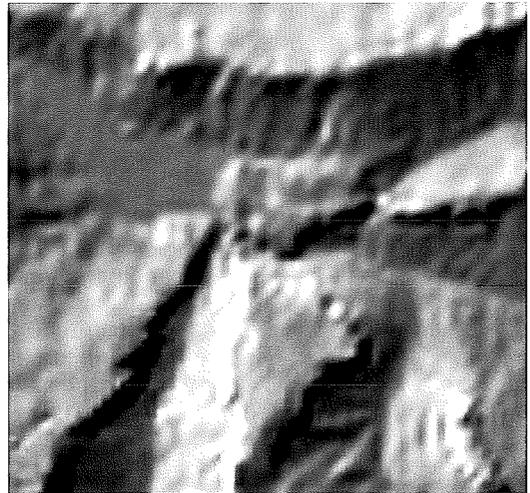


Abb. 9: Modell ohne Kanten

mit jenen im Rahmen der Luftbildauswertung gemessenen zeigt in vielen Bereichen Deckungsgleichheit. Abbildung 6 zeigt die ausgewerteten Kanten; Abbildung 7 eine Überlagerung aus Flussläufen und den Kanten des Originalmodells.

Die Auswirkung der Einbindung von Kanten in die Modellbildung ist an Hand eines Ausschnittes im Nordwesten des Testgebietes demonstriert. Abbildung 8 zeigt das Originalmodell inklusive Kanten (Teilgebiet von Abbildung 2). Abbildung 9 zeigt das selbe Gebiet, berechnet ohne der Einbindung von Kanten (Teilgebiet von Abbildung 3). Abbildung 10 zeigt das durch Flussläufe verbesserte Modell (Zusammenführung der gemessenen Punktdaten und der abgeleiteten dreidimensionalen Vektoren).

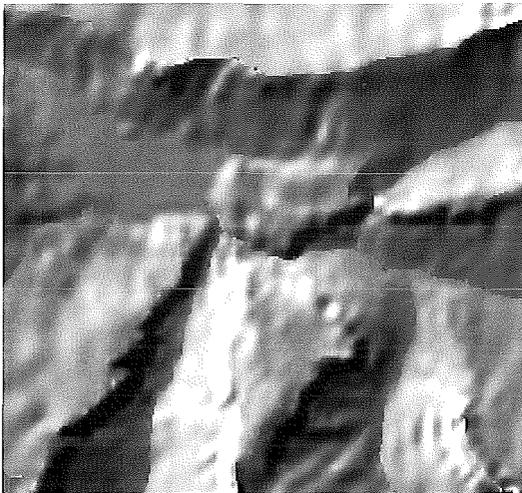


Abb. 10: Verbessertes Modell

Nicht jedes Gelände ist für die Anwendung dieser Methode der Kantendetektion geeignet. Vor allem in flachen Bereichen wird die Lagedefinition ungenau und der Algorithmus neigt zur Mäanderbildung.

Die unmittelbar erzielbare Höhengenaugigkeit der extrahierten Kanten lässt nicht immer eine direkte Einbindung in das gegebene Modell zu. Auf Grund der guten Lagegenauigkeit (siehe Abbildungen 6 und 7) stellen sie jedoch gute und vor allem automatisiert abgeleitete Ausgangsbedingungen für eine weitere Prozessierung zur Ermittlung der Höhe dar. Beispielsweise ermöglicht die Berechnung diskreter Approximationsebenen entlang beider Seiten einer solchen Näherungskante und deren anschließende Verschneidung eine exakte Modellierung der entsprechenden Geländekante. Die Grundlagen dieser Methode beschreiben Briese et. al. [6].

Über dies scheint es sinnvoll, die Analyse der Wasserscheiden und das Ergebnis der Flussanalyse zusammenzuführen und gemeinsam zu betrachten. Eine qualitative Bewertung könnte beispielsweise mit Hilfe von Neigungsmodellen durchgeführt werden, da offensichtlich in flachen Bereichen die Qualität der Ergebnisse abnimmt.

4. Elimination geomorphologischer Fehlstrukturen – Wienerwald

Wie bereits erwähnt, ist die geomorphologische Definition eines Geländes, abgeleitet aus reinen Punktdatenbeständen, nicht exakt möglich. Trifft beispielsweise ein Laserpunkt tatsächlich am tiefsten Punkt eines Grabens auf und definiert somit einen Geländepunkt an dieser Stelle, befinden sich die beiden ihm am nächsten gelegenen Messpunkte jedoch höhenmäßig versetzt zur tiefsten Stelle des Grabens, so wird das Modell durch diese beiden Punkte im Bereich des Grabens deformiert und im Rahmen der Modellbildung wird sich ein künstlicher, in der Natur nicht vorhandener Damm ausbilden. Abbildung 11 zeigt den Isolinienplot eines Bereiches, in dem derartige Deformationen auftreten. Im Folgenden wird eine Methode zur Bereinigung des Modells von derartigen Fehlern beschrieben.

Der herangezogene Testdatensatz ist im Bereich des Wienerwaldes. Er stammt von einem Pilotprojekt der Magistratsabteilung 41 der Stadt Wien [7]. Das gesamte Gebiet ist rund 90 km² groß und wurde mit dem TopScan ALTM 1020 mit rund 9 Millionen Punkten erfasst. Der mittlere Punktabstand beträgt rund 3,1 m. Die folgenden Betrachtungen werden an Hand eines Teilbereichs des Modells durchgeführt. Die gezeigten Beispiele wurden von Molnar (I.P.F.) und Gaisky (Universität Zagreb) berechnet.

Das in Abbildung 11 durch Isolinien repräsentierte Gebiet wurde einer Abflussanalyse unterzogen. Die dabei aufgefundenen abflusslosen Gebiete, im weiteren als Mulden bezeichnet, sind in Abbildung 12 visualisiert.

Um die im Modell enthaltenen Mulden zu beseitigen, werden sogenannte Muldenpfade gesucht. Diese sind wie folgt definiert:

Der Start eines Muldenpfades ist am tiefsten Punkt einer Mulde, der sogenannten Basis. Von dort führt er aufwärts zum Abflusspunkt, also dem tiefsten Sattelpunkt am Rand der Mulde, ehe er wieder abwärts zur Basis der nächstgelegenen Mulde weiterführt. Startet man an der höchst gelegenen Mulde und arbeitet sich von Mulde zu Mulde immer tiefer hinab, erhält man

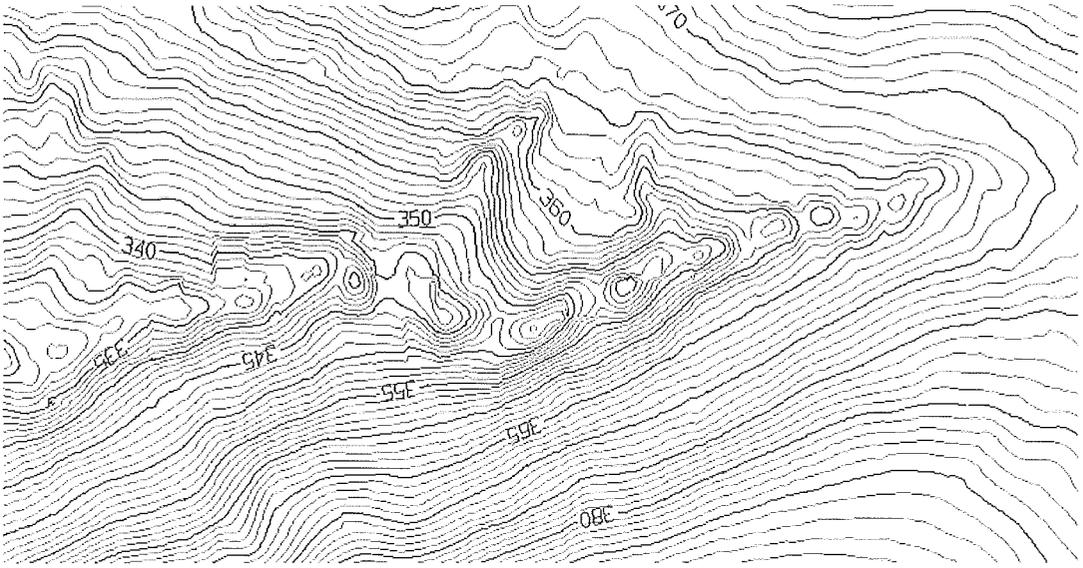


Abb. 11: Isolinenplot eines Grabenbereiches mit fehlerhafter Geomorphologie

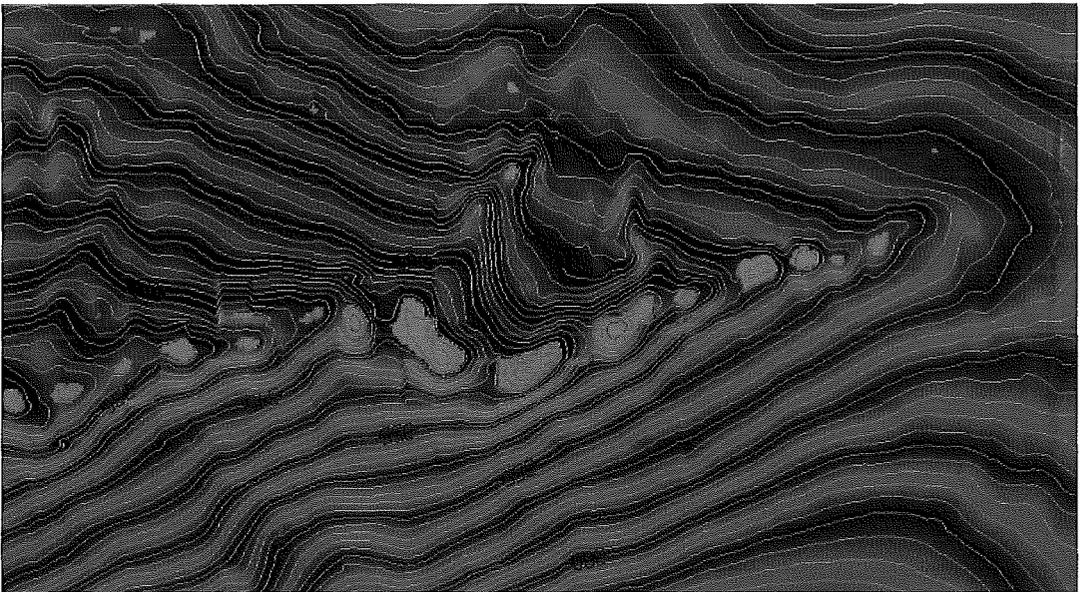


Abb. 12: Farbkodierte Darstellung des selben Bereiches Detektierte Mulden sind überlagert

eine lagemäßige Definition einer möglichen Geländekante. Abbildung 13 zeigt die Definition einer Mulde und die Visualisierung eines Muldenpfades, definiert durch aufeinander folgende Muldenpfadsegmente.

Die Höhe des Pfades wird nun zwischen den einzelnen Basispunkten linear interpoliert. Führt man die so definierte Linie als Zwangskante in

das Modell ein, so entsteht ein geomorphologisch verbessertes Modell, welches jedenfalls aus hydrologischer Sicht exakter definiert ist, da die abflusslosen Mulden entlang von Gräben eliminiert wurden. Abbildung 14 zeigt den Isolinenplot eines verbesserten Modells. Eine ausführliche Beschreibung dieser Methode gibt Gaisky [8].

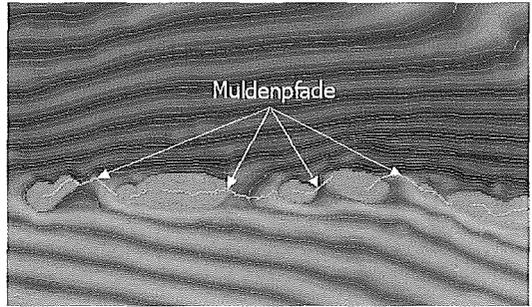
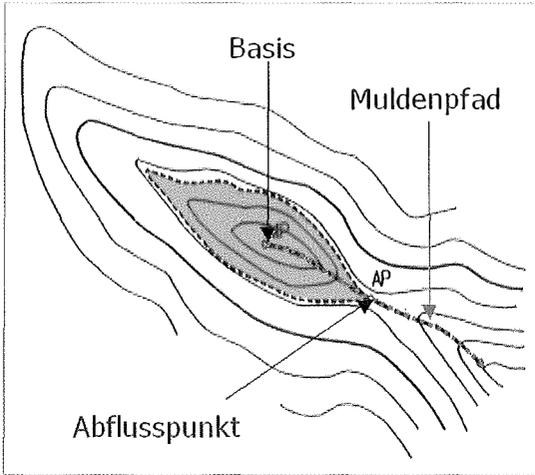


Abb. 13: Definition von Mulde und Muldenpfad

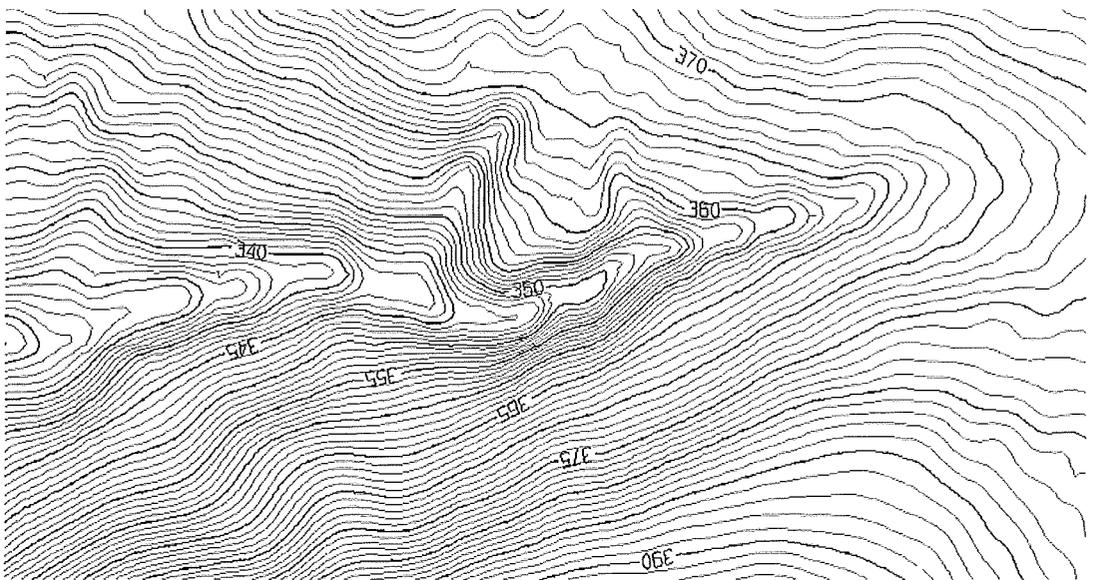


Abb. 14: Isolinienplot des verbesserten Modells

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Methode der Regensimulation hat großes Potential zur qualitativen Verbesserung punktweise erfasster Geländemodelle. Die beschriebenen Verfahren wurden an ausgewählten Testgebieten erprobt. Dabei stellte sich heraus, dass gute Ergebnisse erzielt werden konnten, wenn die Topographie des betrachteten Gebietes vorrangig durch natürliche Erosion und Wasser geformt wurde. Künstliche Objekte wie etwa Dammkronen oder terrassenförmige Geländestrukturen, bei welchen die Kanten nicht unbe-

dingt lokale Minima oder Maxima darstellen, können damit nicht erfasst werden. Es besteht aber die Möglichkeit, an Stelle des ursprünglichen, aus der Laserscanner-Punktwolke abgeleiteten Modells, beispielsweise die 2. Ableitung davon, also ein Krümmungsmodell, als Ausgangsdatensatz für die selbe Analyse-methode heranzuziehen. Auf diese Weise können nicht nur ‚Täler‘ und ‚Bergkämme‘, sondern alle im Modell enthaltenen Linien starker Krümmung, abgeleitet werden. Dieser Ansatz muss jedoch noch weiter untersucht werden. Die Idee wurde im Rahmen der Vortragsdiskussion des Universi-

tätslehrganges Laserscanning durch Dr. Dorffner (Magistratsabteilung 41 der Stadt Wien) eingebracht.

Die unmittelbar erzielbare Höhengengenauigkeit der extrahierten Kanten lässt nicht immer eine direkte Einbindung in das gegebene Modell zu. Auf Grund der guten Lagegenauigkeit (siehe Vergleich der extrahierten Kanten mit jenen bei der Luftbildauswertung erfassten – Kapitel 3) stellen sie jedoch in jedem Fall gute und vor allem automatisiert abgeleitete Ausgangsbedingungen für eine weitere Prozessierung zur Ermittlung der Höhe mittels anderer Methoden dar.

Die geomorphologische Modellierung eines Gebietes lässt sich durch das Auffinden und Einbinden von Muldenpfaden, wie in Kapitel 4 beschrieben, verbessern. Dadurch können lokal, abflusslose Gebiete, welche auf Grund unzureichender Information im punktwise erfassten Modell entstanden sind, eliminiert werden.

Das I.P.F. ist am Projekt Mars Express, der ersten europäischen Mars Mission, unter der Leitung der Europäischen Raumfahrtsorganisation (ESA), beteiligt. Die Finanzierung erfolgt durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) unter der GZ 190.174/2-V/B/10/2000. Im Rahmen dieses Projektes wurden die genannten Methoden ebenfalls erprobt und verbessert. Analyse- und Visualisierungsergebnisse von Geländemodellen der Marsoberfläche beschreiben Dorninger et. al.

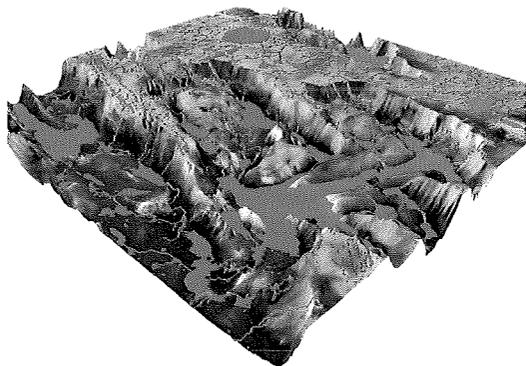


Abb. 15: Visualisierung hydrologischer Analyseergebnisse am Mars

[9]. Abbildung 15 zeigt einen $10^\circ \times 10^\circ$ ($593 \text{ km} \times 593 \text{ km} = 1.186 \text{ km}^2$) großen Ausschnitt im Bereich der Valles Marineris, dem größten Grabensystem am Mars. Die in diesem Gebiet auftretenden Höhenunterschiede betragen rund 10.000 m. Der relative Höhenunterschied vom oberen Rand des Grabensystems zu dessen Sohle beträgt im Mittel etwa 6.000 m! Das DGM wurde mit einer Gitterweite von 463 m berechnet. Das verwendete Rasteroverlay setzt sich aus Ergebnissen der hydrologischen Analyse, einem Orthophotomosaic sowie einer farb-kodierten Darstellung des DGM zusammen.

Literatur

- [1] Hochstöger, F. (1996): Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXI, Part B2, Vienna 1996, S. 160 – 163. http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/fh_pjsprs96.html
- [2] Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien (2003): SCOP++ Produktbeschreibung. http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/scop_dtm_sheet.htm
- [3] Kraus, K. (2000): Topographische Informationssysteme. Photogrammetrie, Band 3, Dümmler-Verlag, Bonn, 419 Seiten, S. 154 ff., S. 398–400
- [4] Rieger, W. (1992): Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles. Dissertation an der TU Wien. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, Heft 39b, 1992, 95 Seiten.
- [5] Rieger, W. (1992): Automated river line and catchment area extraction from dem data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX/B4, Washington, USA, pp. 642–649
- [6] Briese C., Kraus K., Pfeifer N. (2002): Modellierung von dreidimensionalen Geländekanten in Laser-Scanner-Daten. Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Meier, TU Dresden, Inst. für Planetare Geodäsie, S. 47 – 52.
- [7] Kraus K., Hynst E., Belada P., Reiter T. (1997): Topographische Daten in bewaldeten Gebieten. – Ein Pilotprojekt mit Laser-Scanner-Daten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 85. Jahrgang, Heft 3, S. 174 – 181
- [8] Gaisky, D. (2000): Geomorphologic improvement of DTMs especially as derived from laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXII/6W8, Ljubljana, Slovenia, pp. 70–75.
- [9] Dorninger, P., Jansa, J., Briese, C. (2003): Visualization and topographical analysis of the Mars surface, Planetary and Space Science Journal, Elsevier, Netherlands, in print

Adresse des Autors

Dipl.-Ing. Peter Dorninger: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040 Wien. email: pdo@ipf.tuwien.ac.at



Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen

Josef Jansa und Heinz Staneek, Wien

Kurzfassung

Die Ableitung von Stadtmodellen gewinnt derzeit stark an Bedeutung. Es ist daher naheliegend, dass man Verfahren entwickelt, die eine wirtschaftliche Auswertung ermöglichen. Rein photogrammetrische Methoden erwiesen sich als zu wenig automatisierbar. Durch die Laser-Scanner-Technologie kann man aber jetzt einen hohen Automationsgrad erreichen, wobei auch hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit möglich sind. Vorgestellt werden im wesentlichen zwei Verfahren, die einerseits auf der Kombination von Grundriss und Laser-Scanner-Daten, andererseits auf der Kombination von Laser-Scanner-Daten und photogrammetrischen Aufnahmen fußen. Beide beschriebenen Verfahren wurden in Wien entwickelt, eines im Rahmen des Kompetenzzentrum „Advanced Computer Vision“, das andere am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien. Abschließend werden einige wichtige Punkte aus Sicht der Praxis aufgezeigt.

Abstract

The generation of city models is gaining increasing importance. Therefore, a series of approaches have been developed or are currently under development, which take into consideration economic aspects. Pure photogrammetric approaches need much interaction, but Laser Scanning now offers a higher degree of automation without forgetting reliability and accuracy issues. Two approaches are presented, one based on the combination of ground plans and Laser scans, the other based on the combination of Laser scans and photogrammetric images. Both described methods have been developed in Vienna – the first within the Competence Centre “Advanced Computer Vision”, the second at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology. Eventually, important issues regarding practical applications are discussed.

1. Vorbemerkung

Die geometrische Modellierung des städtischen oder allgemeiner gesprochen des besiedelten Raumes ist heute für viele Anwendungsbereiche erforderlich. Wenn im folgenden von einem „Stadtmodell“ gesprochen wird, so ist darunter das Modell der Gebäude eines besiedelten Gebietes zu verstehen. Zur Stadtlandschaft gehören neben den Gebäuden auch die Verkehrswege, diverse Infrastruktureinrichtungen und selbstverständlich auch Vegetation. Hier sollen jedoch die Erfassung und Modellierung der Gebäude im Zentrum der Betrachtungen stehen.

Shiode [19] unterscheidet folgende vier Anwendungsbereiche:

- Planning and Design
- Infrastructures and Facility Services
- Commercial Sector and Marketing
- Promotion and Learning

Typische Aufgabenstellungen, bei denen ein 3D-Stadtmodell sinnvoll ist, wären z.B. die Beurteilung von Veränderungen, Aufbau eines Breitbandfunknetzes, Modellierung und Vorhersage von Naturereignissen, Optimierung von Rettungseinsätzen, Visualisierung für touristische Zwecke etwa für virtuelle Besichtigungstouren.

Eine technische Anwendung ist die Erstellung von „True Orthophotos“ (d.h. Orthophotos, in denen die Gebäude lagerichtig abgebildet werden, siehe z.B. [1]).

Heute ist ein steigender Bedarf für die genaue Erfassung des besiedelten Raumes gegeben, doch sind derzeit kaum geeignete Methoden vorhanden. Auch sind existierende GIS-Grundlagen im allgemeinen nicht geeignet, daraus schnell Stadt- bzw. Siedlungsmodelle zu erzeugen. Die Bedeutung der Erstellung von Stadtmodellen wächst daher nicht nur für die Praxis, sondern auch für die Forschung. Die Aufgabe letzterer ist es, geeignete Erfassungsmethoden und Modellierungsverfahren auszuarbeiten, wobei ein Schwerpunkt auf Automatisierung, Zuverlässigkeit und qualitative Bewertbarkeit gelegt werden muss.

2. Datenerfassung und Modellierung

2.1. Allgemeines

Wenn man von Automatisierung spricht, so denkt man zu allererst an Schnelligkeit und automatisierten Ablauf der Prozesse. In der Vermessungstechnik sind diese beiden Punkte aber be-

deutungslos, wenn nicht Genauigkeit, Richtigkeit und Vollständigkeit bewertet werden kann. Auf dem Gebiet der Computer Vision hat man Algorithmen, mit welchen man schnell – oft in Echtzeit – zu Ergebnissen kommt. Auf der Strecke bleiben dadurch meist zuverlässige Angaben über die Genauigkeit der Ergebnisse, da man zum Zweck der Zeitersparnis möglichst ohne Überbestimmung und Fehleranalyse arbeiten muss. In der Photogrammetrie ist man bemüht, mit Hilfe der Überbestimmung Fehler aufzudecken und Genauigkeitsmaße abzuleiten. Qualitativ schwer zu bewerten, ist die Vollständigkeit. Man muß sich hier auf die visuelle Beurteilung eines Operateurs verlassen, der entweder das gesamte Interessensgebiet oder stichprobenartig die automatisiert erstellte Auswertung überprüft.

Der Grad der möglichen Automatisierung hängt von mehreren Parametern ab:

- vom gewünschten Detaillierungsgrad bzw. vom Maßstab. (Welche Details sollen im Modell vorhanden sein? Wie genau ist die Hausform auszuwerten? Bis in welches Detail soll die Dachform rekonstruiert werden? Sollen Gaupen oder Kamine ebenfalls modelliert werden? Werden Fassadendetails gefordert oder genügt eine repräsentative glatte Wand?)
- vom verfügbaren Material. (Sind Grundrisspläne vorhanden? Ist ein GIS mit entsprechenden Daten für die Gebäudemodellierung verfügbar? Soll man nur Luftbilder verwenden oder nur Laser-Scanner-Aufnahmen? Kann man eine Kombination verschiedener Datensätze verwenden?)
- vom verwendeten Ansatz. (Genügt es die Gebäudegrundrisse aus einem Plan auf eine mittlere Höhe „hochzuziehen“? Muss eine Luftbildstereoauswertung erfolgen? Kann das Oberflächenmodell einer Laser-Scanner-Auswertung analysiert werden? Können Fusion-Ansätze zur Anwendung gelangen?)

In der Praxis stellt sich heute heraus, dass vollautomatische Ansätze zur Ableitung von Stadtmodellen nicht reif für den Einsatz sind. Es wird sehr viel Forschung betrieben, aber praxisgerechte Lösungen sind nicht wirklich vorhanden [2]. Der Grund liegt zu einem großen Teil in der geringen Zuverlässigkeit der Ergebnisse, sobald ein einigermaßen hoher Detaillierungsgrad gefordert wird. Um gute Produkte anbieten zu können, bedarf es einer manuellen Nachbearbeitung, was den Vorteil der Automation mehr als zu Gänze verschlingen würde.

Praxisgerecht sind heute nur die halbautomatischen Verfahren, wo sich nach viel Forschungs-

stätigkeit die ersten Einsätze in der Praxis bewähren. Der kritische Auswerteschritt der Objektinterpretation erfolgt durch den Operateur, die zeitaufwendige Messung bzw. Aufbereitung der Messdaten erfolgt automatisch, schnell, genau und verlässlich. Die folgenden Systeme sind typische Beispiele: CyberCity Modeler (CyberCity AG, [4]), inJECT (Inpho GmbH, [10]).

Als wichtiger Punkt soll hier noch die automatische Unterstützung bei der Aktualisierung (*Updating*) der Datensätze angesprochen werden. Die Nachführung wird umso häufiger notwendig, je detaillierter die Ersterfassung erfolgte, da dann die Wahrscheinlichkeit einer Änderung sehr hoch ist. Viele Details bedeuten aber wiederum eine komplexere Aufgabenstellung. Mit den Problemen der automatisierten Nachführung hat man sich bis jetzt kaum befasst, da die Konzentration auf die Ersterfassung gelegt war.

2.2. Auswerteverfahren

In diesem Artikel wird, wie schon früher angedeutet, nur die Auswertung von Gebäuden näher beleuchtet. Die Auswertung von Vegetation und Infrastruktur ist allgemein etwas vernachlässigt, vielleicht auch deshalb, weil die Luftaufnahmen oft nur sehr unzureichend geeignet sind und hier auch noch einiger Forschungsaufwand notwendig ist.

Heute kommen für die Gebäudeauswertung im wesentlichen folgende Ansätze zur Anwendung:

- Analyse von GIS-Daten eines Stadtinformationssystems. Die GIS-Daten müssen die entsprechenden Daten enthalten, mit denen eine 3D-Rekonstruktion der Form des Gebäudes möglich ist. Solche Datensätze sind in der Praxis kaum vorhanden oder sie bedürfen noch einiger Zusatzerfassungen. [5]
- Verknüpfung von GIS-Daten und Laser-Scanner-Daten. Dieser Ansatz ist sehr verbreitet, wobei aus den GIS-Daten meistens nur der Grundriss eines Gebäudes Verwendung findet. In den letzten Jahren haben sich an vielen Universitäten Forschergruppen damit befasst, von denen hier nur einige erwähnt werden sollen: Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart [3], Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn [7], Technische Universität Delft [12]. Auch am K-Plus Kompetenzzentrum „Advanced Computer Vision“ (ACV, <http://www.acv.ac.at>) in Wien wurde dieser Ansatz gewählt, der später noch detaillierter erklärt werden soll.
- Photogrammetrische Auswertung von Stereo- oder Multibildern. Durch photogrammetrische

Auswertung, vorteilhafterweise von Luftbildern mit 60%- bis 80%-iger Längs- und 60%- bis 80%-iger Querüberdeckung kann eine ziemlich vollständige Erfassung der Stadtlandschaft erfolgen. Der Automatisierungsgrad kann hoch sein, wenn die Aufnahme mit einer 3-Zeilenkamera (z.B. HRSC-A oder Leica ADS40) erfolgt und wenn man sich auf ein Raster-Oberflächenmodell beschränkt, wie ISTAR (<http://www.istar.fr>) zeigt. Mit halbautomatischen Verfahren kann man auch ein strukturiertes Stadtmodell erhalten. Ansätze dieser Art verwendet der CyberCity Modeller [8], inJECT [9] oder das am I.P.F. entwickelte Programm, welches auf der I.P.F.-Software ORPHEUS basiert [15]

- Verbindung von Laser Scanning und Photogrammetrie. Um den Automatisierungsgrad zu erhöhen und dennoch eine hohe Detailgenauigkeit zu erreichen, kann man die Laser-Scan-Analyse mit der photogrammetrischen Auswertung verknüpfen. Das grobe geometrische Modell erhält man sehr rasch über die Laser-Scan-Analyse. Wegen der relativ schlechten geometrischen Auflösung in XY, können Objektstrukturen nur grob erkannt werden, kleinere Details gehen gänzlich verloren. Hat man die groben Strukturen kann der Übergang zu der hochauflösenden Bildinformation erfolgen, in welcher sogar kleine Details erkannt werden können. Die Laser-Scan-Analyse liefert erste Näherungswerte, die Bildanalyse liefert die Genauigkeit. Dieser Ansatz, den Rottensteiner [16] wählte, wird später noch etwas detaillierter besprochen.

2.3. Die Modellerzeugung

Die Modellerzeugung könnte man auch als Aufgabe des „Reverse Engineering’s“ bezeichnen. Aus einer Abbildung der Wirklichkeit wird versucht, den „Bauplan“ (=Modell), welcher dem Baumeister zur Verfügung gestanden ist, zu rekonstruieren. Gegeben ist eine mehr oder weniger vollständige Abbildung der Wirklichkeit, z.B. in Form von photographischen Aufnahmen oder Laser Scans. Gesucht wird ein möglichst genaues und vor allem auch ein möglichst vollständiges Modell. Die Qualität des Ergebnisses ist abhängig von den Ausgangsdaten und natürlich von dem Auswerteverfahren und den zugrunde gelegten Hypothesen.

Ein geeignetes Auswerteverfahren liefert eine formalisierte Beschreibung der Wirklichkeit ausgewählter Objekte anhand der erfassten Daten. Grundsätzlich kann man eine Auswertung in mehrere Schritte unterteilen:

- Das Objekt muss erkannt und verstanden werden.
- Danach folgt eine Generalisierung und ein Abstrahieren und
- schließlich das Messen, welches
- die semantische Zuordnung und die Erfassung der korrekten Geometrie und Topologie beinhaltet.
- Sinnvoll ist auch eine objektorientierte Organisation in echter 3D Repräsentation.

Bevor auf zwei Verfahren beispielhaft näher eingegangen wird, sollte man noch ein paar oft, aber teilweise mit unterschiedlicher Bedeutung verwendete Akronyme erklären.

Das DTM (Digital Terrain Model) beschreibt die natürliche, nackte Geländeoberfläche. Es sollte also weder Bauten noch Vegetation enthalten. Anstelle von DTM ist im deutschsprachigen Raum oft auch DHM (Digitales Höhenmodell) gebräuchlich. Das DSM wird mit Digital Surface Model übersetzt. Als Synonym liest man gelegentlich auch DCM (Digital Canopy Model) oder im Deutschen DOM (Digitales Oberflächenmodell). Es handelt sich dabei um eine Oberflächenbeschreibung der höchstgelegenen Punkte, also des Geländes, der darauf wachsenden Vegetation und der Kunstbauten, so als ob die Natur mit einem Tuch abgedeckt worden wäre. In der Folge wird auch die Abkürzung nDSM verwendet werden. Es bedeutet „normalised DSM“. So bezeichnet wird die Beschreibung des um die nackte Geländeoberfläche reduzierten DSM.

3. Laser Scans und Grundriss

3.1. Prinzip des „ACV“-Verfahrens

Stellvertretend für in Reihe unterschiedlicher Ansätze, soll hier das Verfahren beschrieben werden, welches im Rahmen des Kompetenzzentrums ACV entwickelt worden war. Die Aufgabenstellung war durch die Wiener Firma Vermessung Dipl.Ing. Schmid gegeben worden. Wissenschaftlich erfolgte die Betreuung durch das Institut für Geometrie und das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien [14], [13].

Aufgabe dieses Verfahrens ist die hochautomatisierte Extraktion der Dachgrobstruktur und die Bildung von 3D-CAD-Gebäudemodellen, schließlich die Visualisierung als VRML-Modelle bezogen auf Baublöcke, wobei auch gleichzeitig eine visuelle Beurteilung der extrahierten Dachlandschaft erfolgen soll.

Die Laser-Scanner-Aufnahme liefert eine Punktwolke für das DSM mit einer guten Höhen-

abbildung, aber einer relativ schlechten Grundrissabbildung. Mit Hilfe des Grundrissplans wiederum erhält man die Lage des auszuwertenden Gebäudes und den Gebäudeumriss.

3.2. Arbeitsablauf

Die Vorgangsweise wird im folgenden kurz beschrieben:

- Auswählen jener gemessenen Laserpunkte, die innerhalb des Grundrissbereichs eines Gebäudes fallen (Abb. 1) und
- Analyse dieser Laserpunkte zur Bestimmung der einzelnen (ebenen) Dachflächen (Abb. 2 und Abb. 3)
- Ableitung der gesamten Dachform (Verschnitte und Sprünge) und Einfügen von vertikalen Wänden entlang des Gebäudeumrisses (Abb. 4)
- Fertigstellen des Gebäudemodells zu einem CAD-Modell und Start der nächsten Gebäudeauswertung (Abb. 5)
- Zusammenhängen der Einzel-CAD-Modelle zu einem Gebäudeblock oder einer Stadtlandschaft (Abb. 6)

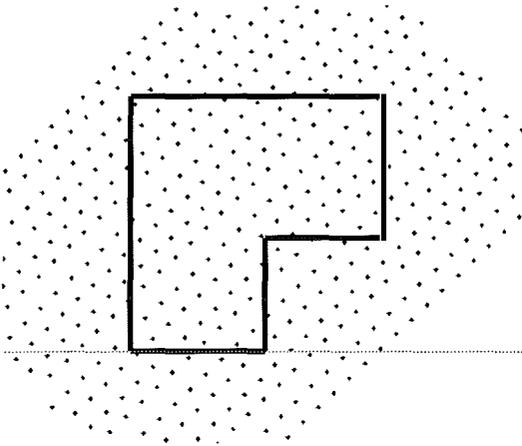


Abb. 1: Laser-Punkte und Gebäudegrundriss

Die Verwendung des Grundrissplanes setzt voraus, dass der Datenbestand aktuell und fehlerfrei ist. Diese Voraussetzung ist zweifellos nicht immer gegeben und daher könnte es bei der Auswertung zu Problemen kommen.

Die Aufgabenstellung fußt auf der Hypothese, dass das Gebäude durch vertikale Wände begrenzt wird, die im Grundriss projizierend erscheinen, und dass die Gebäudedächer aus ebenen Elementen zusammengesetzt sind, die im allgemeinen flacher als 45° sind.

Der Ansatz verwendet eine stückweise Rekonstruktion ebener Objekte aus der Laser-Punkt-

wolke über dem Grundrissbereich. Die Gleichung für eine Ebene ε_i über der Grundrissebene wird analytisch angesetzt durch:

$$\varepsilon_i : z = a_i x + b_i y + c_i$$

Eine jede Ebene ε_i ist durch ein eindeutiges Tripel der drei Parameter a_i , b_i und c_i bestimmt.

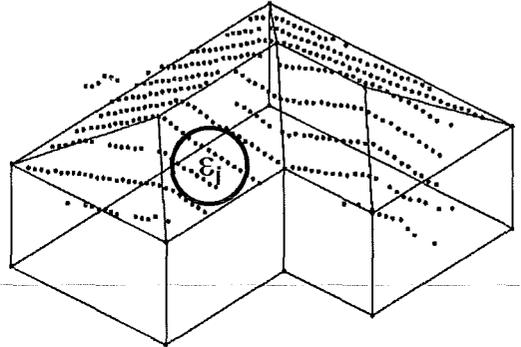


Abb. 2: Analyse der Laser-Punkte

Die Punktwolke wird in kleinen Umgebungen (siehe Kreis in Abb. 2) schrittweise abgetastet und innerhalb jeder Umgebung wird anhand der dort gefundenen Laserpunkte eine ausgleichende Ebene gerechnet, was ein ganz bestimmtes Tripel (a_i, b_i, c_i) ergibt. Während der Ebenenbestimmung wird gleichzeitig eine Qualitätskontrolle durchgeführt, indem bewertet wird, wie gut die Laserpunkte die Ebenengleichung erfüllen. Laserpunkte, die nicht passen (Punkte auf Schornsteinen, überhängenden Bäumen, Seitenwände etc.), werden eliminiert. Die ermittelten drei Ebenen-Parameter werden als Koordinaten eines 3-dimensionalen Parameterraumes angesehen, wo somit jede Ebene durch einen Punkt repräsentiert wird (Abb. 3). Eine Anhäufung von Punkten bedeutet, dass viele kleine Ebenen mit ähnlicher räumlicher Lage gefunden wurden, die daher wahrscheinlich zu einer großen Dachfläche zusammengehören. Der Mittelwert eines solchen Punkt-Clusters (z.B. Kreis in Abb. 3), definiert die Parameter einer Dachfläche und damit ihre geometrische Lage. Punkte, die kein Cluster bilden, bleiben unberücksichtigt. Sie stammen von Ebenenstücken, die offenbar keiner Dachfläche angehören, sondern von Kleindetails (wie zuvor angeführt) und werden daher berechtigterweise ausgeschieden.

Verschneidungen und Vertikalsprünge werden durch Nachbarschaftsanalyse der erhaltenen ebenen Dachelementen abgeschätzt. An den Grundrisslinien und an Höhensprüngen des Daches innerhalb des Grundrisses werden senkrechte Wände eingefügt. Erstere werden mit

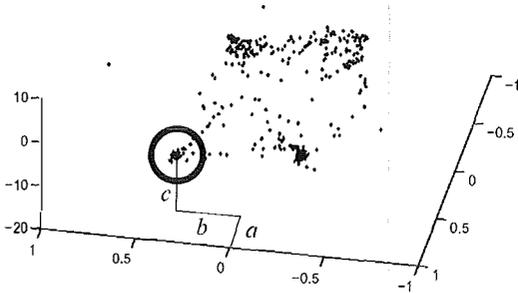


Abb. 3: Parameterraum zum Auffinden der Dachflächen

dem DTM (Digital Terrain Model) als untere Begrenzung verschnitten. Gemeinsam mit den Dachebenen bilden sie dann vollständige Gebäudemodelle. Die modellierten, topologisch geschlossenen Ebenen werden durch Kanten wie zum Beispiel First, Traufe, Ortgang, Grat, Kehle und Höhengsprünge begrenzt. Nicht automatisch modellierbare Bereiche und sehr kleine Bereiche mit wenigen Punkten werden im CAD-Modell durch eine horizontale Ebene in der mittleren Höhe der Laserpunkte approximiert. (Abb. 4).

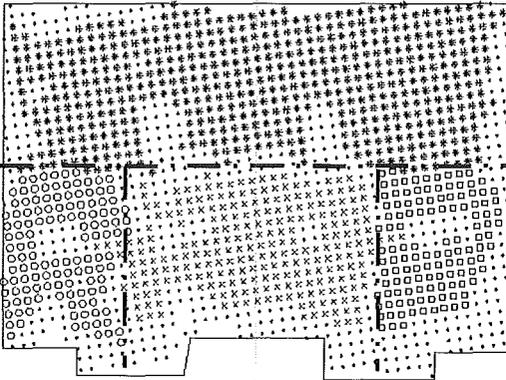


Abb. 4: Dachflächenanalyse (Verschneidungen, Sprünge)

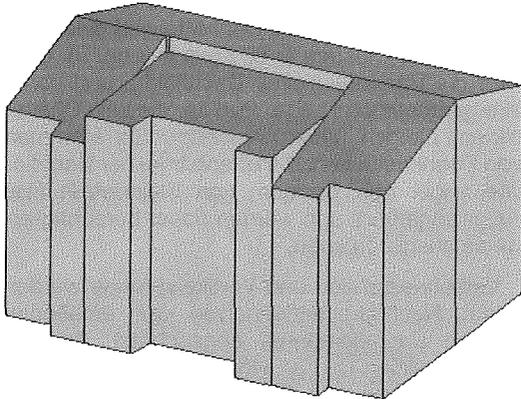


Abb. 5: CAD-Modell eines Einzelgebäudes

Die Rekonstruktionseinheit ist das Einzelgebäude (Abb. 5), welches auch als VRML-Modell dargestellt werden kann und damit eine gute optische Kontrollmöglichkeit bietet. Im Zuge dieser Kontrolle des CAD-Modells werden wenig plausible vertikale Versetzungen an den Verschneidungslinien und andere Modellierungsfehler manuell behoben.

Ganze Gebäudeblöcke bzw. die ganze Stadt entsteht durch Aneinanderreihen von Einzelauswertungen. Das Ergebnis sind CAD-Modelle der Häuser einer Stadt (Abb. 6).

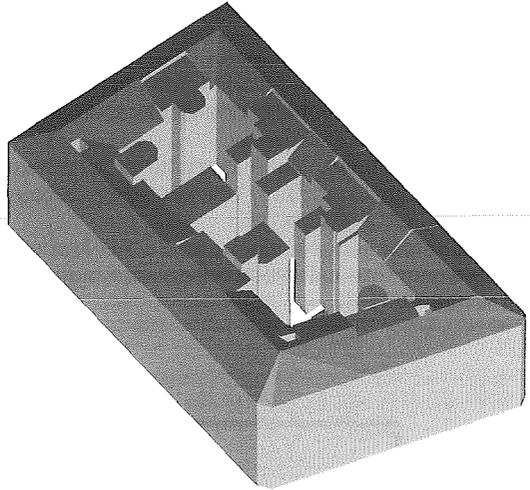


Abb. 6: Kombination zu einem Gebäudeblock

3.3. Praxis-Anforderungen

An die abgeleiteten Gebäudemodelle wurden folgende Anforderungen gestellt:

- **Objektbasierte Modellierung** aus Basisdaten unter Einbeziehung der Geometrie und sonstiger verfügbarer Attribute.
- **Nutzung und Adaptierung von Standardmethoden**, sowie Flexibilität der Modellierung bezüglich Detaillierungsgrad und Zonierung. Für die Wirtschaftlichkeit von Gebäudemodellierungen ist es entscheidend, den erwarteten Detaillierungsgrad der Modelle von der Befliegung bis hin zum extrahierten Gebäudemodell zu berücksichtigen.
- **Hoher Automatisierungsgrad**. Dieser stützt sich auf den reibungsfreien Datenfluss von der Datenerfassung bis zum fertigen CAD-Modell. Die Bestimmung und Verarbeitung von strukturierten Qualitätsparametern ist einerseits für die effiziente Verarbeitung und andererseits für die Beschreibung der Datenbestände als Metainformation relevant.

- *Die einfache und effiziente Handhabbarkeit der Gebäudemodelle* für 3D-Visualisierungen hinsichtlich Performance und Distribution wird bereits bei der Aufbereitung der Gebäudemodelle berücksichtigt.

3.4. Qualität der Modellierung

Je mehr Laserscanpunkte eine Dachfläche beschreiben, desto höher ist die Genauigkeit, mit der sie modelliert werden kann. Die modellierten Dachflächen haben durchwegs eine sehr hohe Genauigkeit. Diese ist je Gebäude und je modellierte Dachfläche durch statistisch abgeleitete Qualitätsinformationen dokumentiert.

Für unterschiedliche Ausgangsdaten (Auflösung, Genauigkeit etc.) und Gebäudetypen (Größe der im Projektgebiet vorkommenden Dachflächen etc.) können die Parameter für die Segmentierung der Laserpunkte, die als Dachebenenpunkte klassifiziert werden, angepasst werden. Die Dachflächenelemente stehen als separierte Objekte zur Verfügung, die mit sachbezogenen Parametern verknüpft werden können. Im Zuge der Dachflächenrekonstruktion fallen ausführliche Qualitätsparameter an. Für jede Dachfläche wird die Anzahl der Punkte vor und nach der Segmentierung und weitere Qualitätsparameter, wie etwa die mittlere (quadratische) Höhendifferenz ausgewiesen.

3.5. Diskussion

Bei der Entwicklung des vorgestellten Verfahrens stand die Anwendung für Städte mit großen Gebäuden respektive großen Dachflächen im Vordergrund. Die Auflösung der verwendeten 3D-Punktwolke beträgt in diesem Fall 0.5 m. Dieser Detaillierungsgrad ist zur effizienten Erstellung von 3D-Stadtmodellen sehr gut geeignet. Ein höherer Detaillierungsgrad ist mit dieser Methode nur mit zusätzlichen Investitionen in Daten mit höherer Auflösung möglich. Eine Kombination mit anderen Daten, wie zum Beispiel Luftbildern unterstützt detailliertere Ergebnisse, wie später noch ausgeführt werden wird.

Optional kann auch bei dieser Methode auf die Verfügbarkeit von Grundrissen verzichtet werden, wobei gekuppelte Gebäudeverbände mit homogener Dachstruktur nicht mehr separiert werden können.

Bei kleinen bzw. architektonisch stark strukturierten Dachformen sollte die Laserscanner-Befliegung mit einer Auflösung von unter 0.5 Meter durchgeführt werden. Auf diese Weise können

feinere Dachformen und Details der Dachlandschaft noch besser differenziert werden.

Durch Kombination mit modellierten Gebäuden und dem flächendeckenden DTM können geplante Objekte und Maßnahmen als 3D-Visualisierung mit vollständigem Raumbezug anschaulich dargestellt werden. Diese Präsentationsformen werden immer häufiger als für jedermann verständliche Basis für Projektvisualisierungen herangezogen.

Die Modellierung von Gebäuden und Landschaftselementen aus 3D-Laserscannerdaten stellt eine effiziente und genaue Methode zur Erstellung von CAD-Modellen von 3D-Dachstrukturen mit Objektsbezug dar. Durch Vergleich der Modelle unterschiedlicher Epochen werden Veränderungen im Bestand effektiv erfasst, analysiert und präsentiert. In dieser Form können etwa die Erfüllung baurechtlicher Bestimmungen an Hand von extrahierten Gebäudemodellen großflächig allgemein verständlich dokumentiert werden.

Derzeit ist bereits ein weites Anwendungsspektrum von universellen 3D-Höhenmodellen, sowie deren Folgeprodukte mit ausgeprägten wirtschaftlichen, juristischen, kulturellen und weiteren Schwerpunktsetzungen erkennbar. Dabei werden räumliche Zusammenhänge einer breiten Öffentlichkeit in allgemein verständlicher und begreifbarer Form vermittelt. Als Ergebnis können durch Einsatz der beschriebenen Verfahren räumlich basierte Entscheidungen rascher, sicherer und zielorientierter getroffen werden.

4. Laser Scans und Luftbild

Der Ansatz mit den Laser-Scanner-Daten und Luftbildern soll einerseits den Automationsgrad der Auswertung erhöhen und andererseits das in den hochauflösenden Bildern enthaltene Detaillierungs- und Genauigkeitspotential ausnützen. Das am I.P.F. von Rottensteiner [15] entworfene rein photogrammetrische Verfahren bedarf starker interaktiver Eingriffe und ist für die Erstellung großräumiger Modelle aus wirtschaftlicher Sicht nicht optimal, obwohl es sich bei Pilotprojekten durchaus bewährt hat [18]. Es war daher naheliegend, Luftbild und Laser-Scanner-Daten gemeinsam zu nutzen (siehe auch z.B. [20]). Am I.P.F. befindet sich ein neue, erweiterte Methode noch im Stadium der Forschung [16]. Sie wird daher in der Folge nur von der Idee her besprochen.

Ausgangsdaten sind Laser-Scanner-Daten und möglichst zum gleichen Zeitpunkt geflogene

Luftbilder oder Bildscannerdaten. Die Auswertung teilt sich in zwei Abschnitte:

- Erstellung eines DSMs im Rasterformat aus den originalen Laserpunkten der Aufnahme
- Bestimmung des nDSM, beginnend mit der Bestimmung des DTMs aus dem DSM (=Laserpunkte) mit Hilfe geeigneter Filterverfahren [17]
- Analyse des nDSM (um Gebäuderegionen zu detektieren) und des DSMs (um Dachflächen zu detektieren) mit Verfahren, die aus der digitalen Bildverarbeitung bekannt sind.
- Aufstellen eines ersten genäherten Stadtmodelles des Interessensgebietes
- Verknüpfung mit dem Bildmaterial, um genaue Dachflächen- und Gebäudebegrenzungen zu erhalten. Auch Flächenelemente, die wegen zu niedriger geometrischer Auflösung der Laser- Scanner-Daten nicht gefunden werden, können durch die Analyse der Luftbilder ergänzt werden.

Ein Ablaufdiagramm ist in Abb. 7 zu sehen.

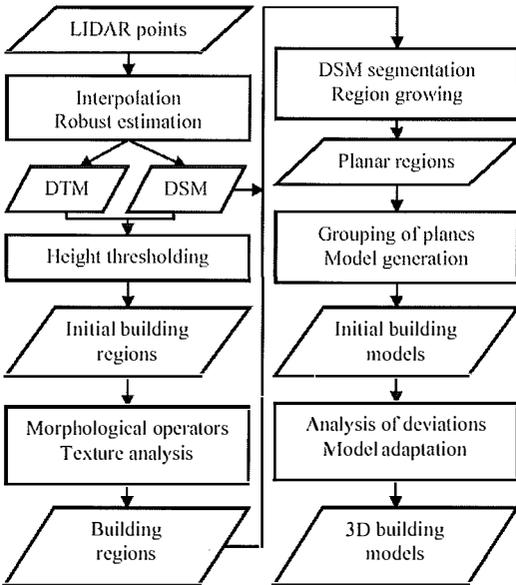


Abb. 7: Ablaufdiagramm [17]

Das Verfahren hält sich an die aufgenommenen Daten und nicht notwendigerweise an vorhandene Pläne. Es wird daher der tatsächliche Naturstand zum Zeitpunkt der Aufnahme ausgewertet. Falsche oder nicht aktuelle Darstellungen in Plänen spielen keine Rolle, allerdings sind deshalb auch rechtlich relevante Begrenzungen nicht erkennbar. Die Auswerteeinheit ist nicht das Einzelgebäude, sondern der gesamte Interessensbereich, zum Beispiel ein Stadtbezirk oder mehrere Häuserblöcke.

Das in Abb. 8 dargestellte Laser-Scanner-Bild (Raster-DSM) eines Stadtgebietes diente als Beispiel für ein Pilotprojekt. Nach einer Vorverarbeitung mit Filterung und Schrankensetzung erhält man die Maske mit den potentiellen Gebäudeflächen. Weitere Analyseverfahren, welche die Textur untersuchen, erlauben schließlich das Entfernen von Vegetationsflächen, sodass die Gebäudemasken übrigbleibt.

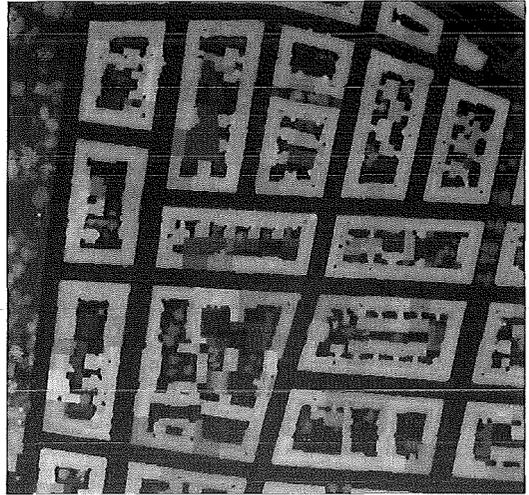


Abb. 8: DSM eines Stadtgebietes

Das DSM wird in der Folge innerhalb der Gebäudemasken näher untersucht. Abb. 9 zeigt die erkannten Dachflächen eines Häuserblocks (jede Fläche ist mit einem einheitlichen Grauton kodiert), welche durch eine Folge von Bildverarbeitungsoperationen im DSM-Bild ermittelt werden können.

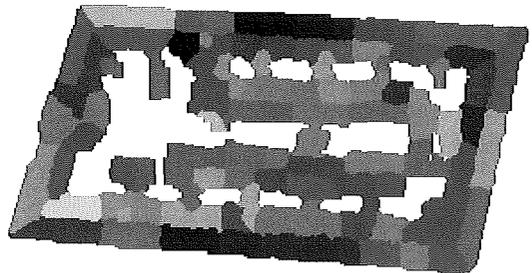


Abb. 9: Aus DSM ermittelte Dachflächen eines Gebäudeblocks

In Abb. 10 wurden die aus dem DSM ermittelten Dachflächen dem vorhandenen Luftbild überlagert. Die Differenzen lassen erkennen, dass das Luftbild noch ein weiteres Genauigkeits- und Vollständigkeitspotential bietet. Aus den so erhaltenen Näherungswerten kann man

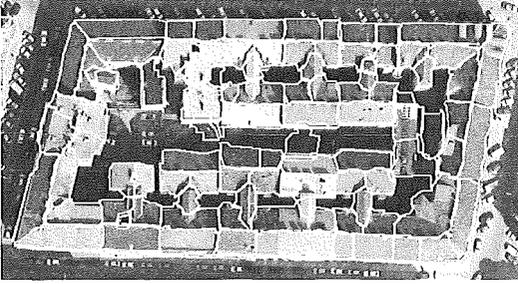


Abb. 10: DSM-Dachflächen dem Luftbild überlagert

die Bildanalyse starten und die Dachflächen verbessern bzw. ergänzen.

Schließlich erhält man das detaillierte Gebäudblock-Modell. Abb. 11 zeigt die VRML-Darstellung des im Abb. 8 dargestellten Gebietes, das in einem Durchgang bearbeitet worden war, allerdings noch ohne die Verfeinerung durch die Photoauswertung.

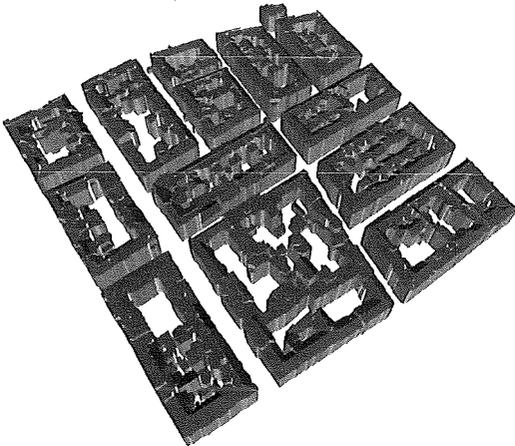


Abb. 11: VRML-Modell eines Stadtteiles

5. Terrestrische Laser Scans und Photos

Die Auswertung aus Luftaufnahmen mit Kamera oder Laser Scanner kann nur die Dachlandschaft liefern und ist kaum geeignet die Fassaden auszuwerten. Benötigt man ein großmaßstäbiges Stadtmodell, bei welchem auch Fassadendetails und Fassadentextur erforderlich ist, muß man terrestrische Kameras und terrestrische Laser Scanner einsetzen. Als Beispiel für solche mobile auf Fahrzeugen montierte Systeme, die zumindest die Straßenfronten der Gebäude aufnehmen, soll der City Scanner der Fa. No Limits erwähnt werden [6].

Der City Scanner besteht aus einem Riegl Laser Scanner (derzeit Modell LMS-Z360) und

zwei digitalen Kameras. Er arbeitet in verschiedenen Aufnahme-Modi: der Continuous Modus und der Stop-and-Go Modus. Im ersteren fährt das Aufnahmesystem mit zwar geringer aber kontinuierlicher Geschwindigkeit durch die Straßen, wobei die Kameras mit hoher Überdeckung die Fassaden aufnehmen (vergleichbar einem horizontalen Bildflug). Am Anfang und Ende einer Fassadeneinheit wird die Bildfolge in eine Laser-Scanner-Wolke eingehängt. Im Stop-and-Go Modus fährt das Fahrzeug von einem Standpunkt zum nächsten und nimmt dort eine Rundum-Punktwolke auf. Der Abstand zwischen den Standpunkten richtet sich nach der Überdeckung aufeinanderfolgender Punktwolken, welche etwa 50% sein soll. Die Auswertung erfolgt hoch automatisiert und liefert im ersten Fall schnell und kostengünstig einen guten Eindruck von der Fassadenlandschaft. Die Auswertung im zweiten Fall ist aufwendiger, liefert aber viele Details der gesamten Straßenlandschaft.

6. Stand der Technik und Ausblick

Heute sind halbautomatische Verfahren bereits im Einsatz. Entsprechende Software-Pakete werden auch als kommerzielle Produkte angeboten. Allerdings soll man nicht vergessen, dass bei komplexer Siedlungsstruktur sehr viel manueller Aufwand notwendig ist. Bei Nutzung eines Grundrissplanes ist die Automatisierung weit fortgeschritten, sofern man es mit einfachen Siedlungsstrukturen (Einzelbauten, wenig Vegetation, einfache Dachlandschaft) zu tun hat. Bei fehlerhaftem oder nicht aktuellem Grundriss sind Probleme unvermeidlich.

Durch die gleichzeitige Verwendung mehrerer Datenquellen kann man den Automationsgrad und damit die Wirtschaftlichkeit erhöhen. Diese Ansätze werden oft auch Fusion-Methoden genannt. Es ist dabei sinnvoll auch geometrische Bedingungen im Auswerteansatz zu berücksichtigen. Dies erlaubt nicht nur bessere Zuverlässigkeit, sondern auch eine gute qualitative Beurteilung mit Hilfe abgeleiteter Fehlermaße. Besonders vielversprechend scheint die gemeinsame Nutzung von Laser-Scanner-Daten, Luftbildern und Grundrissdaten zu sein.

Literatur

- [1] Amhar F., Jansa J., Ries Ch. (1998): The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. Internat. Archives of Ph & RS, Vol.32 / 4, Stuttgart, S 16–22.
- [2] Brenner C. (2001): City Models – Automation in Research and Practice. Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, S149–158.

- [3] Brenner C., Haala N. (1999): Rapid Production of Virtual Reality City Models. GIS, S 22–28.
- [4] CyberCity AG (2003): www.cybercity.tv
- [5] Dorflner L., Zöchling A. (2003): Das 3D Modell von Wien – Erzeugung und Fortführung auf Basis der Wiener Mehrzweckkarte. Proceedings CORP 2003, Wien, S 161–166.
- [6] Forkert G., Holzer J. (2003): Das digitale Stadtmodell als Dokument des urbanen Raumes. Proceedings CORP, Wien, S 167–170.
- [7] Förstner W. (1999): 3D-City Models: Automatic and Semi-automatic Acquisition Methods. Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, S 291–303.
- [8] Grün A., Wang X. (1999): CyberCity Modeler, a tool for interactive 3-D city model generation. Photogrammetric Week, Wichmann Verlag, S 1–11.
- [9] Gülch E. (2001): Image Analysis in Semi-automatic building extraction. Künstliche Intelligenz, Heft 4, Arendt Verlag Bremen, S 28–31.
- [10] Inpho GmbH (2003): www.inpho.de
- [11] Karner K., Klaus A., Bauer J., Zach Ch. (2003): MetropoGIS: A City Modelling System. Proceedings CORP, Wien, S199–204.
- [12] Maas H.-G., Vosselman G. (1999): Two Algorithms for Extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data. ISPRS Journal of Ph & RS 54, S153–163.
- [13] Peterzell M., Steiner T. (2003): Reconstruction of Piecewise Planar Objects from Point Clouds. Computer Aided Design, Elsevier Verlag. Im Druck.
- [14] Pottmann, H., Leopoldeder St. Wallner J., Peterzell M. (2002): Recognition and Reconstruction of Special Surfaces from Point Clouds. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV/3A, Graz, S271–276.
- [15] Rottensteiner F. (2001): Semi-Automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS. Geowissenschaftl. Mitteilungen, Heft 56, TU Wien.
- [16] Rottensteiner F. (2003): Automatic generation of high-quality building models from lidar data. IEEE Journal, Computer Graphics and Applications, Vol.23 / 6, S42–50.
- [17] Rottensteiner F., Briese Ch. (2002): A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data. Internat. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV/3A, Graz, S295–301.
- [18] Rottensteiner F., Schulze M. (2003): Performance Evaluation of a System for Semi-automatic building extraction using adaptive primitives, Int. Archives of Ph&RS, Vol. XXIV-3/W8, München, S47–52.
- [19] Shiode N. (2001): 3D urban models: recent developments in the digital modelling of urban environments in three dimensions. GeoJournal 53(3), S263–269.
- [20] Vosselman G., Suveg I. (2001): Map based building reconstruction from laser data and images. In Baltasvias, Gruen (Eds): Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, S231–239.

Adresse der Autoren

Prof. Dr. Josef Jansa: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29/122, A-1040 Wien.

E-mail: jj@ipf.tuwien.ac.at

Dr. Heinz Stanek: Vermessung Schmid, Kreilplatz 1, Stg. 2, A-1190 Wien. E-mail: stanek@geoserve.co.at



Vergleich digitaler Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning

Maria Attwenger und Christian Briese, Wien

Zusammenfassung

Digitale Geländemodelle wurden lange Zeit ausschließlich aus manuellen photogrammetrischen Auswertungen oder terrestrischen Messungen abgeleitet. Im letzten Jahrzehnt änderte sich die Situation durch das Aufkommen des Laserscannings und durch digitale Methoden in der Photogrammetrie. Der Vorteil dieser beiden neuen Methoden liegt in einem deutlich höheren Automatisierungsgrad im Rahmen der Datenaufnahme. Zudem liefern beide Methoden eine sehr große Anzahl von Oberflächenpunkten, wodurch eine detaillierte Beschreibung der Geländeoberfläche ermöglicht wird. Zur Geländemodellerstellung ist es allerdings im Gegensatz zu den manuellen Datenerfassungsmethoden notwendig, eine Klassifizierung der Punkte in Boden- und Nicht-Bodenpunkte durchzuführen.

Dieser Beitrag ist dem Vergleich digitaler Geländemodelle aus der manuellen sowie digitalen Photogrammetrie und dem flugzeuggetragenen Laserscanning gewidmet. Neben einer Analyse der unterschiedlichen Daten, zum Beispiel mit Punktdichtekarten, werden die aus diesen Daten abgeleiteten Geländemodelle untersucht. Die Datenbasis für diese Untersuchung bietet ein Projektgebiet im Pulkautal, in dem sowohl ein photogrammetrischer Bildflug als auch eine Laserscannerbefliegung zur Verfügung stehen. In einem abschließenden Kapitel werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Aufnahmemethoden zusammengefasst.

Abstract

Digital terrain models have been derived from manual photogrammetric or terrestrial measurements for a long time. In the last decade this situation has changed because of the appearance of other capable methods. On one hand airborne laserscanning was introduced as a suitable method for point determination, whereas on the other hand digital methods were developed in photogrammetry. The big advantage of these two methods is the high level of automation. Additionally, they provide a great number of points whereby a detailed description of the terrain is possible. A classification of the automated generated point cloud into terrain points and off terrain points is essential for the determination of terrain models. This is contrary to the manual methods of data capturing.

This paper focuses on the comparison of digital terrain models derived from manual and digital photogrammetry as well as from airborne laserscanning. Beneath the analysis of the different data sets, for example with the help of point density maps, the terrain models derived from these different data are investigated. The basis data of this examination is given by photogrammetric and airborne laser scanner missions within the project area Pulkautal. Finally the advantages and disadvantages of the different data capture methods are summarised.

1. Einleitung

Stereophotogrammetrie und Laserscanning sind grundsätzlich unterschiedliche Messmethoden. Während bei einer photogrammetrischen Aufnahme von einem passiven System, der Luftbildmesskamera, Luftbilder gewonnen werden (Abb. 1) und anschließend in den Überlappungsgebieten der Luftbilder mit Hilfe von Auswertegeräten gemessen wird, ist ein Laserscanner ein aktives System, das durch die Synchronisierung der Richtungs- und Distanzmessung meist zeilenweise Polarkoordinaten entlang eines Flugpfades liefert (Abb. 2) [1]. In der Photogrammetrie werden zur Transformation der Messungen ins Landeskoordinatensystem Passpunkte gemessen, die Orientierung der Luftbilder zueinander erfolgt anhand homologer Punkte, die Verwendung von GPS und IMU ist optional. Beim Laserscanning sind Messungen mit einem POS (*position and orientation*

system), zum Beispiel bestehend aus GPS und IMU, unerlässlich und müssen mit der Richtungs- und Distanzmessung synchronisiert werden.

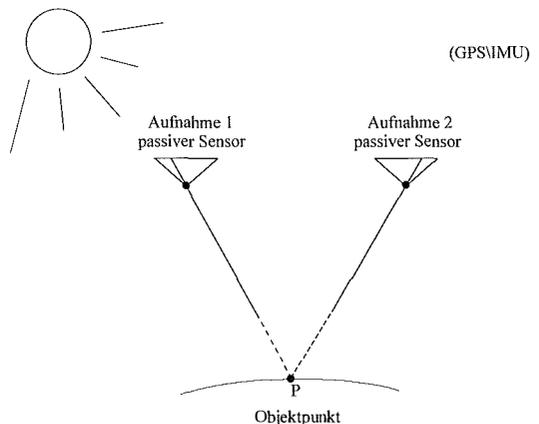


Abb. 1: Grundprinzip der Stereophotogrammetrie

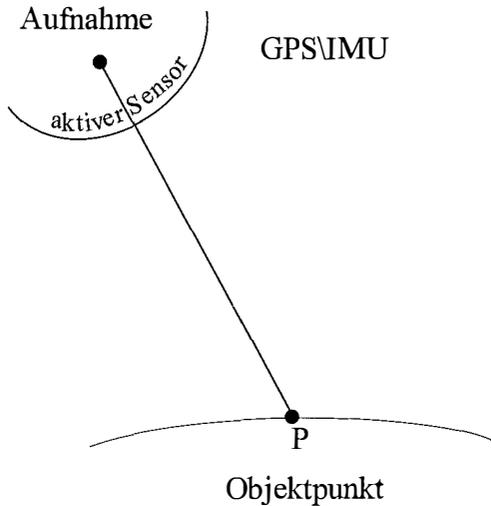


Abb. 2: Grundprinzip des Laserscannings

Im nächsten Abschnitt werden die für den Vergleich der digitalen Geländemodelle aus Photogrammetrie und Laserscanning verwendeten Datensätze aus dem Gebiet des im nördlichen Niederösterreich gelegenen Pulkautals vorgestellt. Die nachfolgenden Analysen wurden größtenteils der am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der Technischen Universität Wien verfassten Diplomarbeit „Vergleich digitaler Geländemodelle aus Laserscanning und Photogrammetrie“ entnommen [2].

2. Projekt Pulkautal

Im Rahmen eines Hochwasserprojekts im Pulkautal, das im Auftrag der niederösterreichischen

Landesregierung durchgeführt wurde, erfolgte im Jahr 1998 eine photogrammetrische Aufnahme. Im Jahr 2001 wurde zur Erprobung der Leistungsfähigkeit von flugzeuggetragenen Laserscanning von der Firma Geoconsult ZT GmbH in einem Teilbereich der photogrammetrischen Aufnahme eine Laserscanner-Befliegung initiiert (Abb. 3). In Abb. 7a wird ein Ausschnitt aus dem Orthophoto des Pulkautals gezeigt, der in weiterer Folge zur Visualisierung der Untersuchungen der analytischen photogrammetrischen Auswertung und der Laserscanner-Daten verwendet wird.

a) Photogrammetrie

Bei der photogrammetrischen Aufnahme wurden 117 Luftbilder in einem Bildmaßstab von 1:7500 erfolgen. Am I.P.F. erfolgte eine Bündelblockausgleichung und anschließend eine analytische photogrammetrische Auswertung, bei der Massenpunkte in einem 25m-Raster, markante Höhenpunkte, Geländekanten und Formlinien gemessen wurden (Abb. 7b) [4]. Zu Testzwecken wurde in einem kleinen Gebiet (Abb. 8a) auch eine digitale Auswertung mit dem Programm MATCH-T der Firma INPHO durchgeführt. Diese Methode ist allerdings nur in sehr gut texturierten Bereichen erfolgreich. In der Abb. 8b ist die direkt aus der automatischen Bildzuordnung stammende Punktwolke dargestellt.

b) Laserscanning

Die Laserscanner-Befliegung fand in einem Teilbereich der photogrammetrischen Aufnahme statt, dabei wurde das Gebiet in 12 Streifen er-

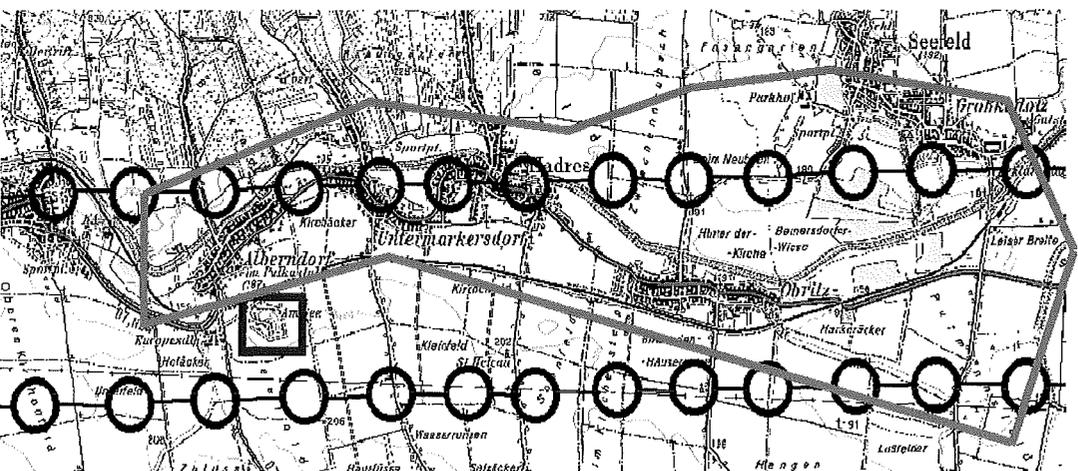


Abb. 3: Projektgebiet Pulkautal [3] - Aufnahmezentren der photogrammetrischen Aufnahme (schwarz), Gebiet des DGMs aus der digitalen Photogrammetrie (blau), Gebiet des Laserscanner-DGMs (rot)

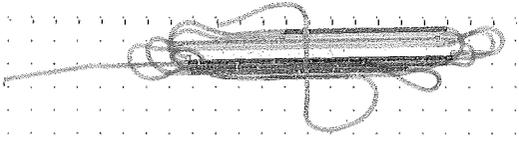


Abb. 4: Streifenübersicht der Laserscanner-Befliegung, in den nicht-roten Bereichen werden Daten aufgenommen, die roten Bereiche stellen Flugmanöver dar

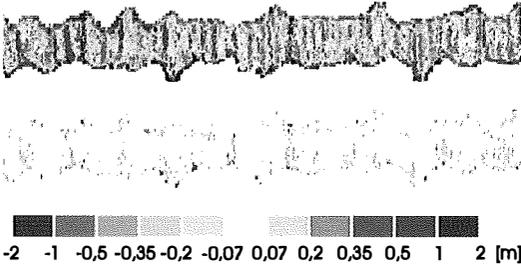


Abb. 5: Differenzenmodell der Laserscanner-Streifen Nr. 10 und Nr. 11 vor der simultanen Höheneinpassung (oben) und Differenzenmodell der gleichen Laserscannerstreifen nach der simultanen Höheneinpassung (unten)

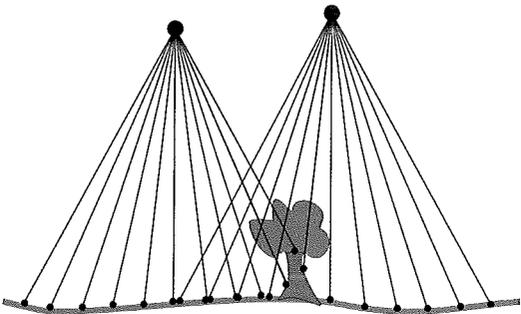


Abb. 6: Schattenbildungen am Rand von Laserscanner-Streifen

fasst (Abb. 4). Zur Datenerfassung wurde der Laserscanner ALTM 2025E der Firma Optech verwendet, der die Aufzeichnung des ersten und letzten Impulses des reflektierten Laserstrahls ermöglicht. Zur Erstellung eines digitalen Geländemodells ist die Messung des letzten Impulses sehr wichtig, da dieser in Gebieten mit hoher Vegetation meist an der Erdoberfläche reflektiert wird. Laserscanner-Daten weisen eine hohe Nachbarschaftsgenauigkeit auf, zwischen den einzelnen Laserscanner-Streifen treten allerdings nicht zu vernachlässigende Höhenunterschiede auf, was anhand von Differenzenmodellen in den Überlappungsgebieten der Flugstreifen nachgewiesen werden kann (Abb. 5 oben). Wünschenswert wäre als Ergebnis des Differenzen-

modells ein normal verteiltes Rauschen um die Farbe Weiß. Erreichbar ist dieses Ziel durch Schatteneffekte, die durch Vegetation und Gebäude verursacht werden, am Laserscanner-Streifenrand vor allem bei Verwendung eines großen Scan-Winkels nicht ganz, da die Klassifikation der Punktwolke eines einzelnen Laserscanner-Streifens in Bodenpunkt und Nicht-Bodenpunkte bei Hindernissen direkt am Streifenrand fehlschlägt (Abb. 6). Die Differenzen in Nord-Süd-Richtung sind auf den so genannten Scan-Lag, das ist ein Synchronisierungsfehler zwischen Richtungs- und Distanzmessung, zurückzuführen, der bei dieser Laserscanner-Befliegung unerwarteterweise aufgetreten ist. Zur Steigerung der Genauigkeit wurde deshalb eine simultane Höheneinpassung (siehe Artikel von Herrn Dr. Kager in diesem VGI-Heft) durchgeführt, wodurch sich die Höhengenaugkeit wesentlich verbesserte (Abb. 5 unten). Es ist allerdings anzumerken, dass die in Abb. 5 oben sichtbaren und mit sehr großen Fehlern (aufgrund des Umkehrprozesses des Ablenkspiegels) behafteten Randpunkte der Laserscanner-Streifen eliminiert wurden.

3. Berechnung der Geländemodelle

Die Erstellung des digitalen Geländemodells (DGMs) aus der analytischen photogrammetrischen Auswertung erfolgte mit der im Programm SCOP++ implementierten Interpolation nach den kleinsten Quadraten [5]. Wichtig dabei ist, dass



Abb. 7a: Orthophoto eines Teilgebiets des DGMs aus analytischer photogrammetrischer Auswertung und des Laserscanner-DGMs

die analytische photogrammetrische Auswertung ohne weitere Zwischenschritte direkt verwendet werden kann. Eine Schummerung des DGMs ist in Abb. 7c dargestellt. Bei Laserscanner-Daten und Daten aus der digitalen photogrammetrischen Auswertung muss vor der Interpolation eine Klassifikation der Punktwolke in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte erfolgen. Dafür wurde die ebenfalls im Programm SCOP++ implementierte hierarchische robuste Interpolation verwendet (siehe Kraus, VGI 1/1997, und Briese, Belada und Pfeifer, VGI 2/2001) [5]. Die Schummerung des DGMs aus La-

aserscanner-Daten ist in Abb. 7d ersichtlich, die der digitalen photogrammetrischen Auswertung in Abb. 8c.

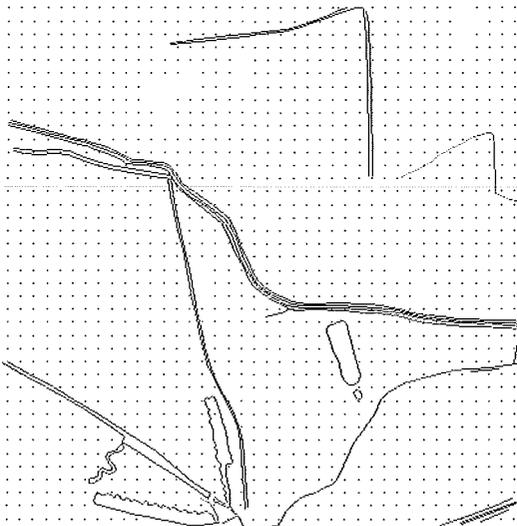


Abb. 7b: Analytische photogrammetrische Auswertung

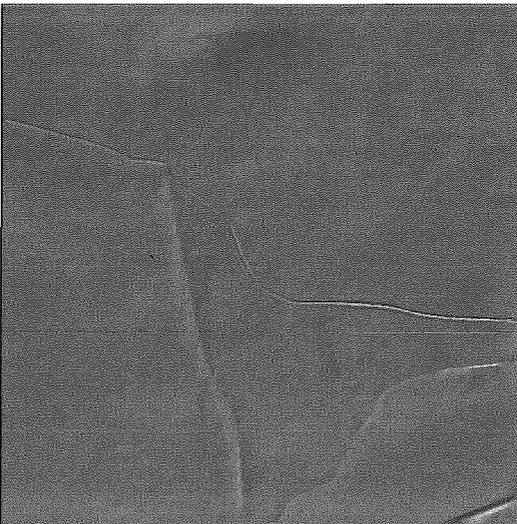


Abb. 7c: Schummerung des DGMs aus analytischer photogrammetrischer Auswertung



Abb. 7d: Schummerung des Laserscanner-DGMs

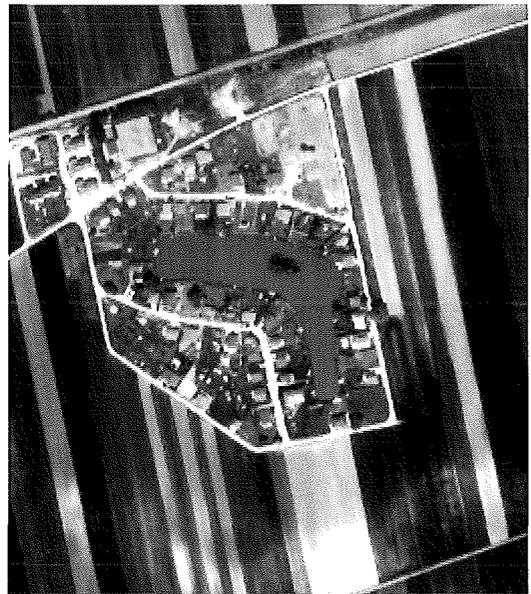


Abb. 8a: Orthophoto des Gebiets des DGMs aus digitaler photogrammetrischer Auswertung

4. Analyse der Daten

Die Güte eines DGMs hängt zum Großteil von den dafür erfassten Daten ab. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, wird in diesem Abschnitt die Datendichte behandelt und eine Abstandskarte gezeigt. Für die Analyse der analyti-

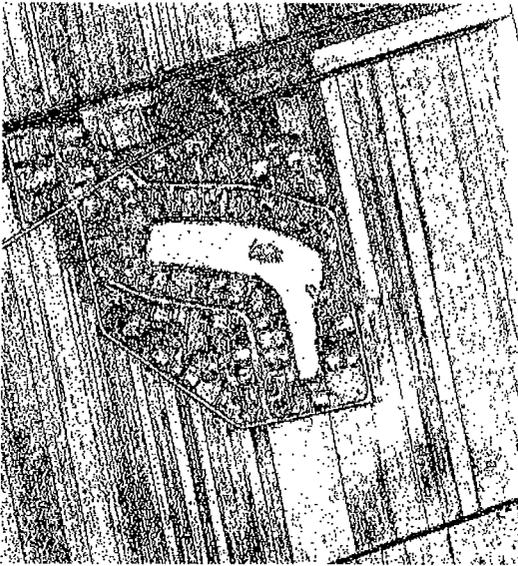


Abb. 8b: Punkte der digitalen photogrammetrischen Auswertung

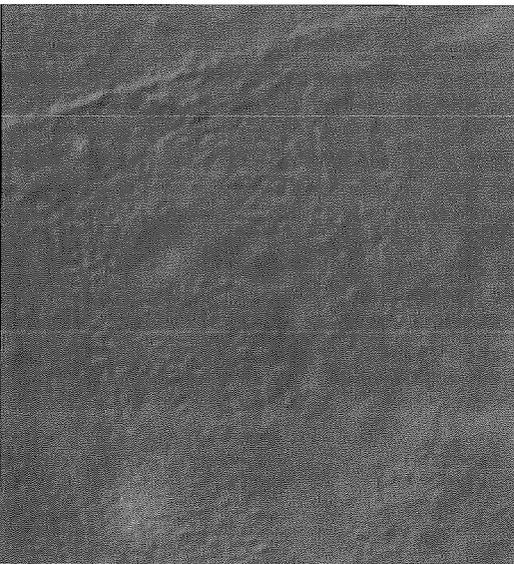


Abb. 8c: Schummerung des DGMs aus digitaler photogrammetrischer Auswertung

schen photogrammetrischen Auswertung und der Laserscanner-Daten wurde das Gebiet von Abb. 7a, bei der digitalen photogrammetrischen Auswertung das Gebiet von Abb. 8a verwendet.

a) Datendichte

Die Berechnung und Visualisierung der Dichteverhältnisse der Daten aus der analytischen pho-

togrammetrischen Auswertung erfolgte in sogenannten Analyseeinheiten von 625 m^2 , weil dadurch sichergestellt sein sollte, dass in jeder Analyseeinheit zumindest ein Massenpunkt gemessen wurde (Die Rasterweite des Digitizers betrug – wie bereits erwähnt – 25 m). Die im Gebiet von Abb. 9 maximal vorkommende Anzahl von Punkten in einer Analyseeinheit beträgt 13 (dunkelbraun), was einer Dichte von $0,021 \text{ Punkten/m}^2$ entspricht. In manchen Analyseeinheiten konnte aufgrund von Gebäuden kein Punkt gemessen werden (weiß). Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass im Großteil der Analyseeinheiten eine verhältnismäßig geringe Punktdichte vorhanden ist (hellgrün), und zwar eine Dichte von maximal $0,0035 \text{ Punkten/m}^2$, was bis zu zwei Punkten pro Analyseeinheit entspricht. Eine größere als die minimale Dichte in einzelnen Analyseeinheiten wird durch Geländekanten, Formlinien und zusätzlich gemessene markante Höhenpunkte erreicht.

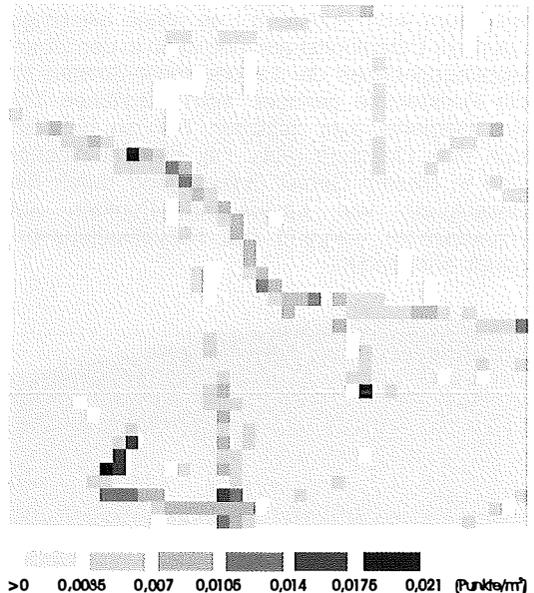


Abb. 9: Dichtemodell der analytischen photogrammetrischen Auswertung im Gebiet von Abb. 7a

Zur Veranschaulichung der Datendichte der Laserscanner-Daten wurde als Größe der Analyseeinheiten 25 m^2 gewählt. Es wurde sowohl die unklassifizierte Punktwolke untersucht, als auch die aus der Klassifikation stammenden Bodenpunkte. Abb. 10 zeigt die Dichte der nicht klassifizierten Laserscanner-Daten. Die in diesem Fall maximal vorkommende Dichte in einer Analyseeinheit beträgt $4,64 \text{ Punkte/m}^2$ (dunkelbraun), was einer maximalen Punktzahl von 116 in

einer Analyseeinheit entspricht. Diese hohe Punktzahl wurde allerdings nur an den Rändern der Überlappungsgebiete der Laserscanner-Flugstreifen erreicht, die in der Abbildung deutlich erkennbar sind. Am Rand eines Laserscanner-Streifens ist allerdings die Anzahl der Bodenpunkte in den Laserscanner-Daten geringer, da – wie bereits erwähnt – Vegetation und Bauwerke, einen größeren Schatten werfen, in dem keine Bodenpunkte gemessen werden können (Abb. 6). Je größer der Scan-Winkel ist, desto stärker tritt dieses Problem in Erscheinung. Im Großteil des Gebiets erreicht die Dichte einen Wert von bis zu 0,77 Punkten/m² (hellgrün). Deutlich sichtbar sind Datenlöcher (weiß), die vor allem im südlichen Teil des dargestellten Gebietes aufgrund von gerichteter Reflexion beziehungsweise Absorption des Laserstrahls über stehenden Gewässern entstanden sind. In Abb. 11 werden die Dichteverhältnisse der klassifizierten Bodenpunkte dargestellt. Die maximale Punktdichte in einer Analyseeinheit beträgt wiederum 4,64 Punkte/m²; es treten allerdings viel mehr Datenlöcher auf, und auch in den Überlappungsgebieten der Laserscanner-Streifen ist die Punktdichte geringer. Vom nördlichen Teil des Gebietes zum östlichen Teil hin befindet sich eine Ortschaft (Abb. 7a), die Datenlöcher sind in diesem Gebiet überwiegend durch die Beseitigung von Laserscanner-Punkten auf Hausdächern während des Klassifikationsvorgangs entstanden.

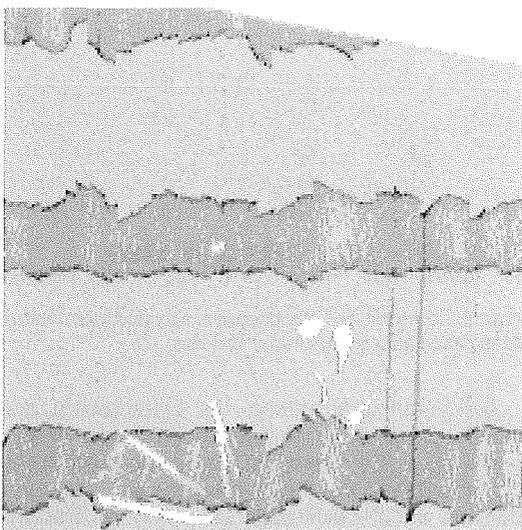


Abb. 10: Dichtemodell der Laserscanner-Punktswolke im Gebiet von Abb. 7a

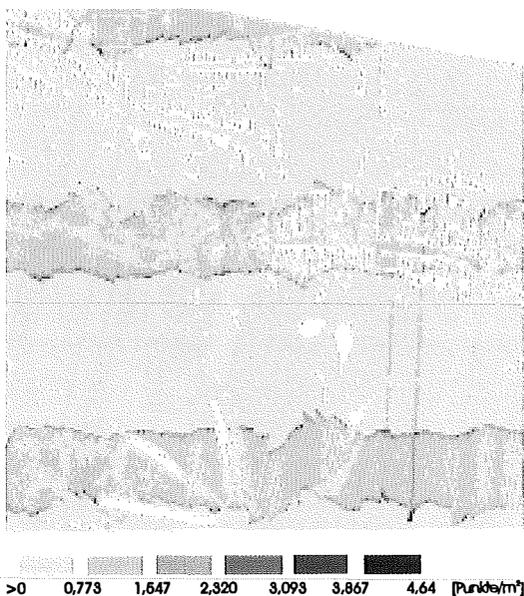


Abb. 11: Dichtemodell der klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkte im Gebiet von Abb. 7a

Wie beim Laserscanning wurden bei der Analyse der digitalen photogrammetrischen Auswertung Analyseeinheiten mit einer Größe von 25m² verwendet. Daten aus der digitalen photogrammetrischen Auswertung zeichnen sich durch eine große Punktdichte aus, wenn genügend vergleichbare Merkmale vorhanden sind, das Gebiet also eine reichhaltige Textur aufweist. Allerdings müssen die Punkte aus der digitalen Photogrammetrie einem Klassifikationsvorgang unterzogen werden, aufgrund dessen die Dichte der Bodenpunkte (Abb. 12) deutlich geringer ist als bei den Laserscanner-Daten. Die maximale Punktdichte im Gebiet von Abb. 12 beträgt 0,72 Punkte/m², was 18 Punkten in einer Analyseeinheit entspricht. Es treten allerdings auch große Flächen, in denen keine Punkte durch die automatische Bildzuordnung erzeugt worden sind, auf. Als Beispiele dafür können der Teich in der Bildmitte und Felder ohne Textur genannt werden.

b) Abstandsmaß

Ausgehend von einem regelmäßigen Raster werden die Abstände zu den nächsten gemessenen Punkten berechnet (Abb. 13).

In Abb. 14 wird eine Abstandskarte für die klassifizierten Bodenpunkte der Laserscanner-Daten gezeigt. Dafür wurden eine Gitterweite von 1m und die darunter dargestellte Farbpalette

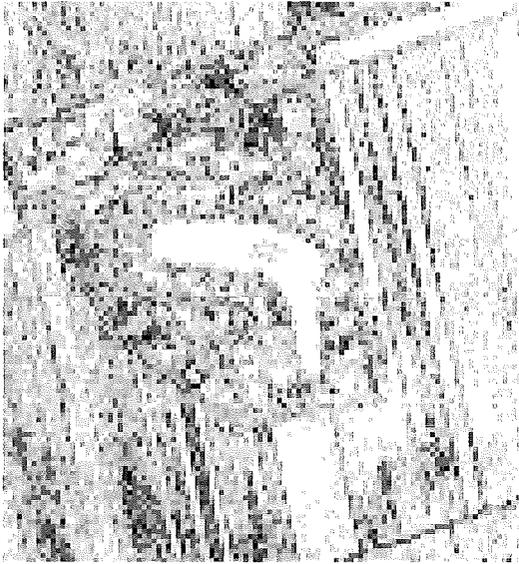


Abb. 12: Dichtemodell der klassifizierten Bodenpunkte aus der digitalen photogrammetrischen Auswertung im Gebiet von Abb. 8a

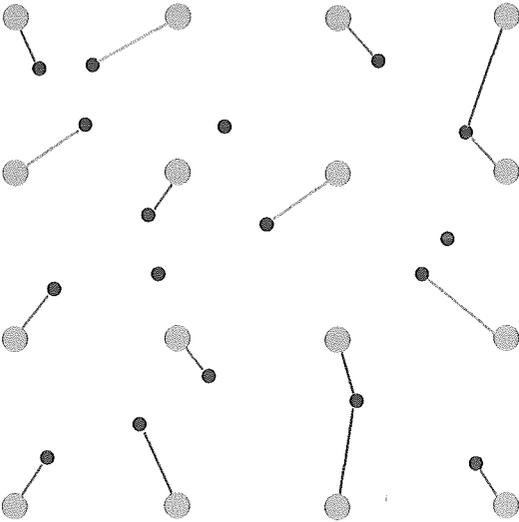


Abb. 13: Berechnung des kürzesten Abstandes der Gitterpunkte (grau) zum nächstgelegenen gemessenen Punkt (schwarz)

verwendet. Es werden Gitterpunkte, deren Abstand zum nächsten gemessenen Punkt maximal 0,5m beträgt, dunkelgrün und Gitterpunkte, deren Abstand zum nächsten gemessenen Punkt mehr als 5m beträgt, dunkelrot dargestellt. Im Bereich der Ortschaft im Norden und Nord-

Osten der Abbildung entstanden, wie bereits oben erwähnt, größere Datenlöcher durch das Beseitigen der Laserscanner-Punkte auf Hausdächern. Hier beträgt der Abstand der Gitterpunkte zum nächstgelegenen gemessenen Punkt teilweise mehr als 5m. Im Bereich dichter Vegetation im Süden und Westen der Abb. 14 (vergleiche Abb. 7a) wurden durch die Aufzeichnung des letzten Impulses während der Laserscanner-Befliegung viele Bodenpunkte gemessen und so ist der Abstand der Gitterpunkte zum nächstgelegenen gemessenen Punkt nach der Beseitigung der Vegetationspunkte maximal 2m (gelb).

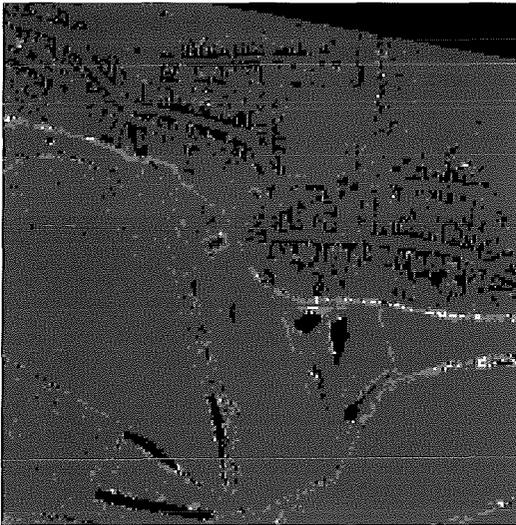


Abb. 14: Abstandskarte der klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkte im Gebiet von Abb. 7a

5. Analyse der Geländemodelle

Eine Möglichkeit, ein Geländemodell mit der ursprünglichen Punktwolke zu vergleichen, ist die Berechnung des *root mean square errors* (RMS) in den jeweiligen Analyseeinheiten. In Abb. 15 wird der RMS der klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkte im Gebiet von Abb. 7a und des daraus berechneten DGMS in Analyseeinheiten von 25m² visualisiert. Das Ergebnis ist großteils sehr gut, nur im Bereich von im Gelände auftretenden Kanten tritt ein RMS von mehr als ± 10 cm auf. Diesem Umstand kann man durch die Ableitung von Geländekanten in den Laserscanner-Daten begegnen, woran am I.P.F. intensiv gearbeitet

wird. Aus dem Histogramm in Abb. 16, das die Residuen der klassifizierten Bodenpunkte im Bereich der Abb. 7a zeigt, ist ersichtlich, dass über 90% der klassifizierten Bodenpunkte im Bereich von $\pm 10\text{cm}$ um das aus ihnen berechnete Geländemodell liegen.



0 0,1 0,2 0,3 >0,5 [m]

Abb. 15: Modell des RMS der klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkte bezogen auf das aus ihnen berechnete DGM im Gebiet von Abb. 7a

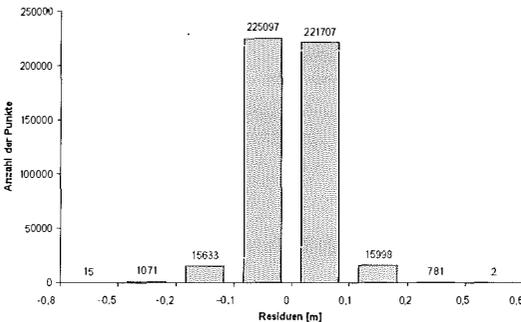
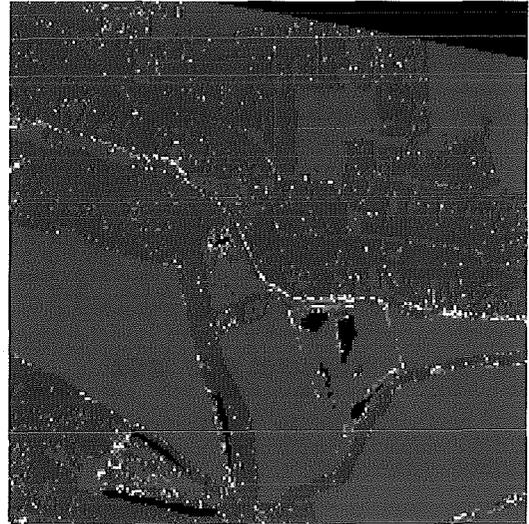


Abb. 16: Histogramm der Residuen der klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkte bezogen auf das aus ihnen berechnete DGM im Gebiet von Abb. 7a

Die Gebiete mit starkem Bewuchs oder Bebauung sind hingegen in Abb. 17 deutlich erkennbar (rot). Hierbei wird der RMS der ursprünglichen Laserscanner-Punktwolke und des aus den klassifizierten Bodenpunkten berechneten Geländemodells in Analyseseinheiten von 25m^2 gezeigt. Die in Abb. 17 dunkelrot darge-

stellten Gebiete weisen einen RMS von mehr als $\pm 0,5\text{m}$ auf. Das Histogramm in Abb. 18 weist durch die Anzahl der ursprünglichen Laserscanner-Punkte, die oberhalb des DGMS in einem Bereich von 1m bis 25m liegen, ebenfalls auf die im Bereich von Abb. 7a vorhandene Vegetation und Bebauung hin.



0 0,1 0,2 0,3 >0,5 [m]

Abb. 17: Modell des RMS der Laserscanner-Punktwolke bezogen auf das mit den klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkten berechnete DGM im Gebiet von Abb. 7a

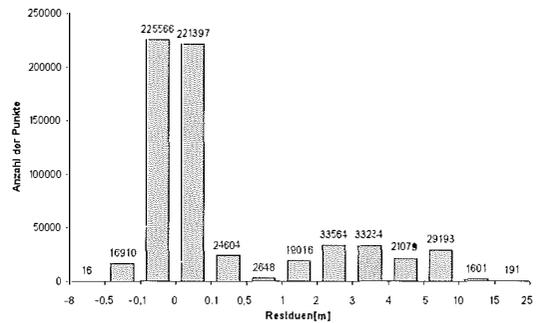


Abb. 18: Histogramm der Residuen der Laserscanner-Punktwolke bezogen auf das mit den klassifizierten Laserscanner-Bodenpunkten berechnete DGM im Gebiet von Abb. 7a

6. Differenzenmodell

Abschließend wird in Abb. 19 ein Ausschnitt aus dem Differenzenmodell des DGMS aus La-

serscanner-Daten und des DGMs aus der analytischen photogrammetrischen Auswertung dargestellt. Auffallend sind die Höhenunterschiede der einzelnen photogrammetrischen Modellbereiche, die aufgrund von kleinen Restfehlern in der absoluten Orientierung der Stereomodelle entstanden sind. Die im Differenzenmodell ersichtlichen Kleinformen in den Feldern stammen aus den Laserscanner-Daten (man vergleiche die Abbildungen 7c und 7d). Die oft fehlende Textur in den Feldern beeinträchtigt die photogrammetrische Messung. Die ebenfalls sichtbaren Geländekanten sind auf die analytische photogrammetrische Auswertung zurückzuführen. Im photogrammetrischen DGM ist auch die Flusssohle, die terrestrisch erfasst wurde, eingearbeitet. Zu beachten sind auch hier die in Nord-Süd Richtung verlaufenden kleinen Differenzen, die auf den bereits oben erwähnten Scan-Lag zurückzuführen sind.

ein Operateur für die Messungen geeignete Stellen auswählt, relativiert sich die große Dichte der automatischen Methoden wieder. Die Interpolation nach kleinsten Quadraten, ob direkt auf die analytische photogrammetrische Auswertung oder iterativ in der hierarchischen robusten Variante auf die Lasermessung und Messungen der digitalen Photogrammetrie angewandt, ist bestens zur Wiedergabe der Geländeoberfläche geeignet.

Bei der Entscheidung, auf welche der erwähnten Methoden der Datenerfassung zur Erstellung eines DGMs man zurückgreifen soll, stellt sich die Frage, mit welcher Qualität die Oberfläche dargestellt werden soll. Ist man an einem Überblick interessiert, so genügt eine analytische photogrammetrische Auswertung mit einem groben Raster und das manuelle Digitalisieren der wichtigsten Geländekanten. Wünscht man aber eine sehr detaillierte Beschreibung der Ge-

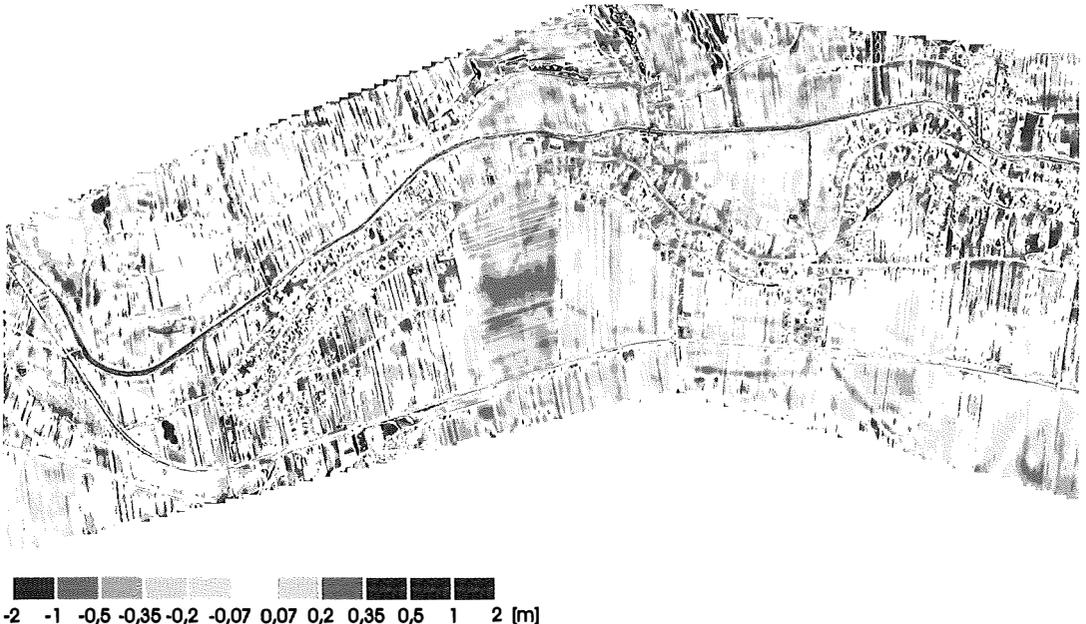


Abb. 19: Ausschnitt aus dem Differenzenmodell des Laserscanner-DGMs und des DGMs aus der analytischen photogrammetrischen Auswertung

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Dichte der Laserscanner-Daten und der Daten aus digitaler photogrammetrischer Auswertung ist bedeutend höher als die der analytischen photogrammetrischen Auswertung. Bedenkt man allerdings die Tatsache, dass bei der analytischen photogrammetrischen Auswertung

ländeoberfläche, ist der Einsatz von Laserscanning sicherlich wirtschaftlicher. Inwieweit es gelingen wird, die Geländekanten aus den Laserscanner-Daten effizient abzuleiten, wird die Entscheidung zugunsten des Laserscannings entscheiden. Auch die starke Wetterabhängigkeit der Photogrammetrie ist bei der Entscheidung ein Thema, manchmal fehlt die Zeit, um auf

schönes Wetter zu warten. Ist man allerdings zusätzlich auch an Bildinformation interessiert, zum Beispiel zur Orthophoto-Erzeugung, ist die analytische Photogrammetrie im Vorteil, gegebenenfalls kommt auch eine Unterstützung durch die digitale photogrammetrische Auswertung in Frage. Mittelfristig wird die Zusammenführung von Laserscanning und Photogrammetrie die Vorteile beider Methoden vereinen.

Es besteht die Möglichkeit, aus der Dichtedichte, dem Abstand zum nächstgelegenen Punkt, den Krümmungsverhältnissen und dem Abstand des Geländemodells von den Messungsdaten die Höhengenaugkeit der Interpolationspunkte unabhängig von der verwendeten Interpolationsmethode abzuleiten. Eine diesbezügliche Veröffentlichung ist am I.P.F. in Vorbereitung. Die Qualitätsmaße zum DGM werden das Vertrauen in die DGM-Technologie weiter verbessern.

Danksagung

Das Projekt wird vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziell unterstützt (Projekt Nr. 15789).

Die Autoren bedanken sich bei Dr. Martin Kerscher, Dipl.-Ing. Gottfried Mandlbauer und Dr. Norbert Pfeifer, die die methodischen und programmtechnischen Voraussetzungen für die Analyse der DGM geschaffen haben.

Literatur

- [1] *Kraus, K.*: Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie, in: Eckhardt Seyfert (Hrsg.), Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, Konstanz, 2001, S. 13–22, und in: Geomatik Schweiz, VPK 10/2002, S. 620ff
- [2] *Attwenger, M.*: Vergleich digitaler Geländemodelle aus Laserscanning und Photogrammetrie, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, 2003
- [3] *ÖK200 des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV)*: Ausschnitt aus der Austrian Map, Version 1.0, 1999
- [4] *Wurmsdobler, K.*: Einsatz eines digitalen Geländemodells für Hochwassersimulationen, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, 1999
- [5] *Produktbeschreibung SCOP++*: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop> und Firma INPHO: <http://www.inpho.de>, [Zugriff: 18.12.2003]

Adresse der Autoren

Maria Attwenger und Christian Brieser:
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung –
I.P.F., TU Wien, Gusshausstraße 27–29, A-1040 Wien.
email: ma@ipf.tuwien.ac.at bzw. cb@ipf.tuwien.ac.at



Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera

Andreas Ullrich und Roland Schwarz, Horn;
Helmut Kager, Wien

Kurzfassung

Eine hybride Multistationsausgleichung („Freie Stationierung“) für die Verarbeitung von 2D- (photographischen) und 3D-(Laserscanning-)Daten in einer integrierten Umgebung wird präsentiert. Der verwendete zusammengesetzte Sensor besteht aus einem Langstreckenhochleistungslaserscanner der Fa. RIEGL, dessen Distanzmessung auf dem Laufzeitverfahren basiert und einer handelsüblichen hochauflösenden CCD-Kamera. Sowohl Datenerfassung als auch Ausgleichung werden mit Hilfe eines geeigneten Softwarepakets durchgeführt. Fragen der Kalibrierung und Vorteile einer solchen kombinierten Methode werden behandelt.

Abstract

A hybrid multi-station adjustment for processing 2D (photographic) and 3D (laser scanning) data in an integrated environment is presented. The composite sensor being used is made up of a long-range high-performance RIEGL laser scanner, based on “time-of-flight” ranging, and a commercial high-resolution CCD camera. The data acquisition and adjustment is performed by means of a dedicated software package. Questions of sensor calibration and advantages of such a combined approach are addressed.

1. Einleitung

1.1. Laser Scanning

Die RIEGL Laser Measurement Systems GmbH hat sich einen ausgezeichneten Namen für die Entwicklung, die Herstellung und den Vertrieb von herausragenden abbildenden 3D Lasersensoren erworben. Die Sensoren basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung mit Laserpulsen im Bereich des nahen Infrarot [1]. Die Lasersensoren zeigen eine einzigartige hervorragende Kombination von hoher Messgenauigkeit, sehr weitem Datenerfassungsbereich im Erfassungswinkel und in der Entfernungsmessung und einer hohen Datenerfassungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Kompaktheit und vielfach erprobter Robustheit.

1.2. Photogrammetrie

Die Nahbereichsphotogrammetrie hat eine lange Tradition, Objekte aus Photos zu rekonstruieren, beginnend mit einer Photo-Triangulation (Bündelblockausgleichung) und gipfelförmig in der Herstellung von dreidimensionalen Photo-Modellen, welche Objektmodelle mit aus Photos gewonnener Texturinformation sind [2], [3].

1.3. Integration

Seit kurzer Zeit bietet RIEGL abbildende 3D Lasersensoren (Laser-Scanner) mit einer hochauflösenden Digitalkamera als Option an. Die

Kamera ist mit dem Scanner fest verbunden kalibriert und die Orientierung der Kamera in Bezug auf das Scanner-Koordinatensystem ist bekannt. Der gesamte Erfassungsbereich des Laserscanners von $90^\circ \times 360^\circ$ kann durch eine Bildsequenz abgedeckt werden. Dieses integrierte System aus Laserscanner und Digitalkamera, auch als Hybridsensor bezeichnet, liefert damit sowohl 3D Daten von der Lasermessung als auch 2D Bilder von der Kamera [4].

Der Hybridsensor ist während der Datenaufnahme mit einer Steuer- und Datenerfassungseinheit, üblicherweise einem Laptop, über ein kabelbasiertes Ethernet oder über ein WirelessLAN verbunden. Alle Messdaten werden in der Datenerfassungseinheit in einer einzigen Projektstruktur gespeichert. Für jedes der erfassten Kamerabilder wird gemeinsam mit einem Satz von Montageparametern der Kamera auch ein Satz von Orientierungsparametern des Scanners erfasst, aus welchen sich in einfacher Weise die Parameter der äußeren Kameraorientierung bestimmen lassen. Dadurch können beide Datensätze ohne Anwendung einer eigenen Ausrichtungsprozedur gemeinsam weiterverarbeitet werden.

2. Software Paket RiSCAN PRO

2.1. Projektstruktur

Üblicherweise besteht der Vorgang der 3D Datenerfassung mit Laserscannern aus der Erfassung einiger 3D Scans aus unterschiedlichen

Positionen. Diese Positionen werden so gewählt, dass der Datensatz das Objekt der Datenerfassung annähernd komplett abdeckt. Besonders störende Abschattung sollten vermieden oder zumindest bei der Standortwahl berücksichtigt werden. Für die Beurteilung der Abdeckung des Objektes mit den bereits erfassten Daten ist eine Überblicksdarstellung im Felde von besonderem Vorteil zur weiteren Standortplanung. Zu diesem Zwecke werden alle Daten vom Softwarepaket RiSCAN PRO in einer einzigen Projektstruktur zusammengefasst und in einer Projektdatei gespeichert. Die Projektdatei bündelt unter anderem alle Scannerdaten, Kameradaten und die erforderlichen Koordinatentransformationen. Innerhalb der Projektstruktur sind die 2D und 3D Daten in einer einfachen Baumstruktur organisiert. 3D und 2D Daten benutzen dasselbe hierarchische System von Koordinatensystemen. Das Datenformat der Projektstruktur ist textbasiert und im XML Standard realisiert. Das Format ist weitestgehend veröffentlicht, um unabhängigen Softwareentwicklern von Nachverarbeitungsprogrammen den vollen Zugang zu diesen Daten zu ermöglichen (siehe zum Beispiel PHIDIAS von PHOCAD [5]). RiSCAN PRO unterstützt den Anwender neben der eigentlichen Datenerfassung auch in der Sensorkonfiguration, der Datenvisualisierung und Datenarchivierung. Darüber hinaus bietet das Paket auch die Möglichkeit der Kamerakalibration.

2.2. Koordinatensysteme

Alle Scandaten und Bilddaten stehen über hierarchisch strukturierte Koordinatensysteme in Wechselwirkung. Die Beziehungen der Koordinatensysteme zueinander werden konsequent über 4x4 Matrizen beschrieben. Obgleich für gewöhnlich nur sechs Freiheitsgrade verwendet werden, kann diese Beschreibungsart im Prinzip zusätzlich auch Skalierungsoperationen enthalten.

2.2.1. Das „scannereigene Koordinatensystem“ (SOCS für Scanner's Own Coordinate System).

Der Laserscanner liefert seine Rohdaten im scannereigenen Koordinatensystem SOCS. Abbildung 1 zeigt das Koordinatensystem eines LMS-Z-Seriengerätes. Jeder Datenpunkt jedes abbildenden RIEGL 3D Laserscanners beinhaltet geometrische Daten (Kartesische Koordinaten x , y , z oder sphärische Koordinaten r , ϑ , φ) und zusätzliche Eigenschaften (zumindest Intensität, optional Farbinformation). Aus der zeitlichen Abfolge der Datenaufnahme innerhalb eines Scans

besteht eine Nachbarschaftsbeziehung zwischen den Einzelmessungen. Daher kann das primäre Messergebnis eines RIEGL 3D Sensors als organisierte Punktwolke mit zusätzlichen Knotenpunktattributen bezeichnet werden.

2.2.2. Das Projektkoordinatensystem (PRCS für Project Coordinate System)

Das Projektkoordinatensystem PRCS wird vom Anwender definiert. Zum Beispiel kann als PRCS ein bereits im Scangebiet definiertes Koordinatensystem verwendet werden, wie z.B. ein Betriebskoordinatensystem. Die RiSCAN PRO internen Zahlenformate verlangen, dass alle geometrischen Daten hinreichend genau mit „single precision“-Zahlen beschrieben werden können (7 signifikante Stellen). Wird z.B. mm-Genauigkeit gefordert, so dürfen die größten Koordinatenwerte 10 km nicht überschreiten.

2.2.3. Das globale Koordinatensystem (GLCS für Global Coordinate System)

Das globale Koordinatensystem GLCS ist jenes Koordinatensystem, in welches das PRCS eingebettet ist und wird üblicher Weise durch äußere Vorgaben bestimmt. Das GLCS ist in der Lage mit großen Zahlenwerten umzugehen (z.B. Landeskoordinatensystem).

2.2.4. Das Kamerakoordinatensystem (CMCS für CaMera Coordinate System)

Das Kamerakoordinatensystem ist das Koordinatensystem der Digitalkamera.

2.3. Orientierung

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für die Koordinatensysteme GLCS, PRCS und SOCS. Das zu erfassende Objekt ist ein Gebäude, dargestellt in der Vogelperspektive. Das Projektkoordinatensystem verläuft mit seiner y-Achse (y_{pr}) parallel zur längeren Gebäudekante und mit dem Ursprung an einer Gebäudeecke. Das PRCS muss stets ein rechtshändiges Koordinatensystem sein. Hingegen ist das GLCS in diesem Beispiel linkshändig, z.B. Nordwert, Ostwert und Höhe. Eine Reihe von Aufstellungen des 3D Lasersensors, bezeichnet als Scanpositionen, sind dargestellt und mit SOCSi bezeichnet. Jede Scanposition hat ihr eigenes lokales Koordinatensystem SOCS, skizziert mit den Achsen x_{SOCSi} , y_{SOCSi} und z_{SOCSi} . Bei nahezu jeder Datenerfassung in der Praxis werden Scans von unterschiedlichen Scannerstandorten aus mit dem Ziel aufgenommen

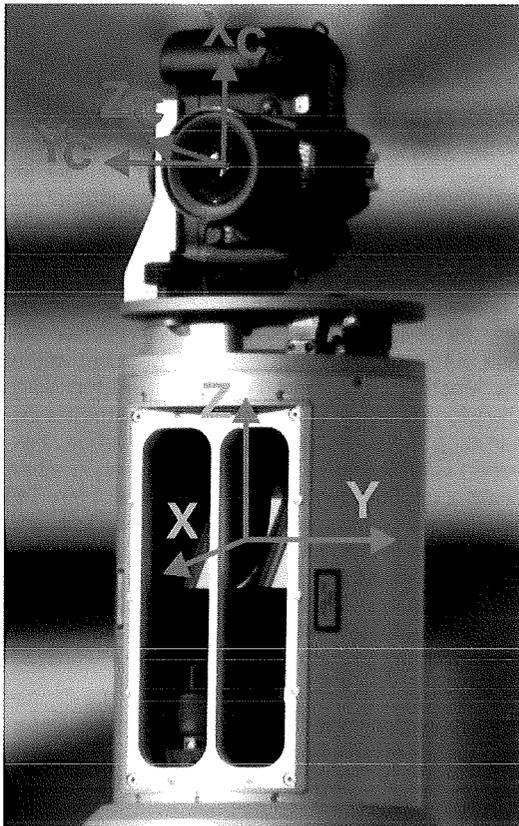
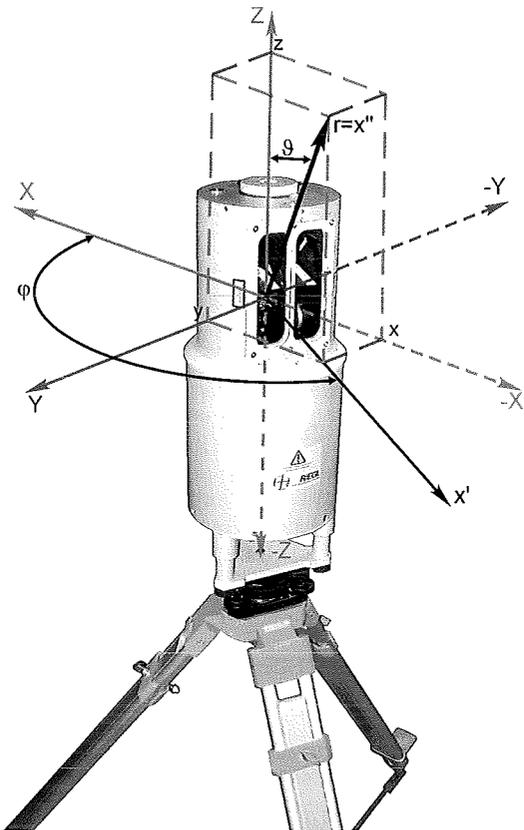


Abb. 1: Definition des scannereigenen Koordinatensystems SOCS bei einem RIEGL LMS-Z-Seriengerätes (links) und bei einem RIEGL LMS_Z360 mit aufgesetzter Digitalkamera (rechts).

men, einen mehr oder weniger vollständigen Datensatz ohne Lücken oder Scan-Abschattungen zu erhalten. Zu Beginn einer Datenerfassung legt der Anwender eine neue Scanposition in RiSCAN PRO an. Diese Scanposition enthält dann alle Daten, die an dieser Aufstellung gewonnen werden. Ein Teil dieser Daten ist die Transformationsmatrix M_{SOPN} , (SOP steht für scanner's own position and orientation), die alle Daten aus dem lokalen Koordinatensystem SOCS in das Projektkoordinatensystem PRCS transformiert. Obgleich die Transformation als 4×4 Matrix abgespeichert und angewendet wird, werden bloß 6 Freiheitsgrade tatsächlich benutzt, da keine affine Verzerrung bei den Scandaten zu berücksichtigen ist.

Die Matrix M_{POP} transformiert die Daten aus PRCS in GLCS. Die komplette Transformationskette vom lokalen Scannerkoordinatensystem in das globale Referenzkoordinatensystem ist damit

$$X_{GLCS} = M_{POP} M_{SOPN} X_{SOCS_N} \quad (1)$$

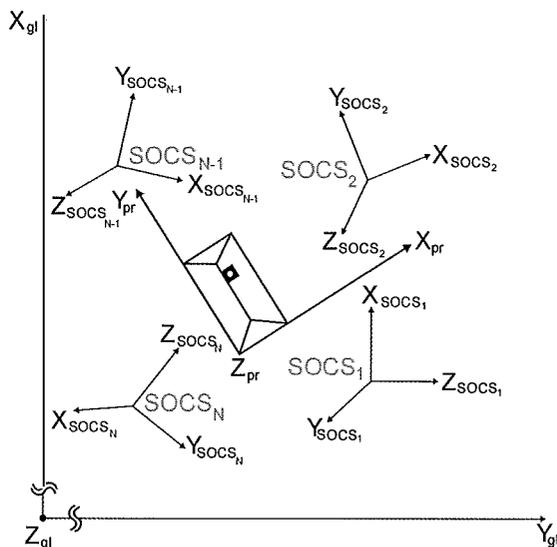


Abb. 2: Koordinatensysteme PRCS, GLCS und einige lokale Systeme SOCS am Beispiel der Datenaufnahme an einem Gebäude.

Eine ähnliche Transformationskette existiert für Daten im Kamerakoordinatensystem:

$$\mathbf{X}_{GLCS} = \mathbf{M}_{POP} \mathbf{M}_{SOPN} \mathbf{M}_{COP,N,M} \mathbf{M}_{mount}^{-1} \mathbf{X}_{CMCS_{S,M}} \quad (2)$$

wobei N für den N-ten Aufstellungsort steht und M für das M-te Bild an diesem Aufstellungsort. \mathbf{M}_{mount} ist die Kamera-Montage-Matrix, die als konstant während der gesamten Datenaufnahme angenommen werden kann. Diese Matrix beinhaltet wieder die 6 Freiheitsgrade der Montage (3 Translationsparameter, 3 Rotationsparameter). Die Matrix $\mathbf{M}_{COP,N,M}$ beschreibt die bloße Rotation um die z-Achse des SOCS, unter welcher das Bild aufgenommen wurde, wobei der Drehwinkel als Messergebnis vom Scankopf geliefert wird. Die Montage-Matrix und die Rotationsmatrix zusammen beschreiben die Transformation zwischen CMCS und SOCS. Die Aufteilung in einen zeitlich unveränderlichen und kalibrierbaren Teil \mathbf{M}_{mount} und in einen veränderlichen Teil und messbaren Teil erlaubt ein einfaches Zusammenführen von Bilddaten und Scandaten. Die separate Speicherung von \mathbf{M}_{mount} erlaubt auch zwei unterschiedliche Anwendungsszenarien, wie sie in 4.1 und 4.2 weiter unten beschrieben werden.

Während der Datenerfassung sind die Transformationsmatrizen zu bestimmen, um die Daten der einzelnen Scanpositionen im PRCS zusammenführen zu können. Eine verlässliche Methode besteht darin, retro-reflektierende Signale im Aufnahmegebiet zu postieren. Diese können aufgrund ihrer hohen Reflektivität in den Scandaten, speziell in den Intensitätsdaten, automatisch erkannt werden. Die Koordinaten dieser Signale werden in einer projektweiten Liste gesammelt und mit einem eindeutigen Namen identifiziert. Eine halbautomatische Prozedur erlaubt es dem Anwender, korrespondierende Signale an den einzelnen Scanpositionen aufzufinden. Bei diesem Vorgang wird eine erste grobe Ausrichtung der Scanpositionen im PRCS bestimmt (\mathbf{M}_{SOP1} , \mathbf{M}_{SOP2} , . . . , \mathbf{M}_{SOPN}). Diese Grobausrichtung ist üblicherweise ausreichend für eine Visualisierung der Scandaten und für eine Beurteilung, ob noch zusätzliche Scanpositionen zur Abdeckung des Scanobjektes erforderlich sind.

Sofern globale Koordinaten einiger Signale verfügbar sind, kann das PRCS in Bezug auf das GLCS ausgerichtet werden. Diese Signale werden als Passpunkte bezeichnet, während alle übrigen als Verknüpfungspunkte bezeichnet werden. Sind keine Signale verfügbar, so können über manuelles Markieren von Scandaten die erforderlichen Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Dies ist speziell dann hilfreich, wenn keine Signale am Objekt angebracht werden können, z.B. an einem Kirchturm.

Da die Signalkoordinaten aus einem üblichen Scan nur mit grober Auflösung bestimmt werden können, bietet RiSCAN PRO die Möglichkeit, Signale automatisch mit der höchstmöglichen Auflösung zu scannen. Diese sogenannten Feinscans ergeben dann die Signalkoordinaten mit der bestmöglichen Genauigkeit.

Die Kamerabilder können dazu herangezogen werden, bereits kurz nach der Datenaufnahme die Daten in Echtfarbendarstellung zu visualisieren. Dies wird, wie oben bereits erwähnt, möglich, da alle Transformationsmatrizen zwischen lokalen Scandaten und Bilddaten stets bekannt sind.

Die Transformationsmatrizen zur Zusammenführung der Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem (PRCS oder GLCS) bedarf noch einer weiteren Bearbeitung zur Verbesserung der Genauigkeit. Dies wird durch den im Folgenden beschriebenen hybriden Ansatz bewerkstelligt, der alle zur Verfügung stehenden Daten simultan ausgleicht.

3. Softwarepaket ORIENT

ORIENT [3] ist ein Programmsystem, das in erster Linie für strenge Ausgleichungen im Bereich der photogrammetrischen Punktbestimmung geplant wurde. Es wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien entwickelt.

Viele Arten von Beobachtungen und/oder Parametern können simultan behandelt werden. Jene Teilmenge davon, die im Kontext dieser Publikation benötigt wird, betrifft (mathematischer Hintergrund siehe: [2])

- Beobachtungen:
 - Bildpunkte (x,y) stammend aus einem CMCS: PHOTO
 - Polarpunkte (Richtung φ , Zenitwinkel θ , Distanz r) in einem SOCS: POLAR
 - Passpunkte (X,Y,Z), gegeben im PRCS: CONPOI
 - Differenzen von Parametern: ROTPAR=OBS für \mathbf{M}_{COP}
- Parameter:
 - Objektpunkte (X,Y,Z) im PRCS REFSYS
 - Transformations-(Orientierungs)parameter
 - äußere Bezugspunkte (Ursprünge REFSYS der SOCS)
 - Rotationen ROTPAR
 - Zusätzliche Parameter ADPAR
 - für Bilddeformation (Verzeichnung)
 - für Exzentrizität der Montage (vgl. GPS-Antenne bei Aero-triangulation)
 - für Rotationen der Montage (vgl. IMU-Ausrichtungsfehler bei LIDAR)

Das Programmsystem wird mittels einer Kommandosprache kontrolliert, wodurch es sich auch für die Ausführung im Batch-Modus eignet. ORIENT ist als DLL (Dynamic Link Library) mit RISCAN PRO verknüpft, wobei CMD-Dateien als Interface verwendet werden. Die Ausgleichung wird folglich als Black-Box-Modul in einer standardisierten Umgebung durchgeführt. Nur wenige Parameter können durch den Operateur kontrolliert werden.

Robuste Schätzung wird verwendet, um grobe Fehler automatisch aufzuspüren und zu eliminieren.

4. Methode der Hybriden Ausgleichung

4.1. Verbesserte Orientierung

Die Bestimmung eines kompletten Satzes von M_{SOP} -Matrizen kann allein aus Lasermessungen erfolgen oder das alleinige Ergebnis von photogrammetrischen Standardmethoden sein. Es ist jedoch ein naheliegender Vorgang, beide Methoden zu kombinieren, um die Genauigkeit zu verbessern, oder um die Gesamtzeit für die Messung einzuschränken.

Die Erfassung der Signalkoordinaten aus einem Weitwinkel-Laserscan erfolgt aufgrund von zeitlichen Einschränkungen üblicherweise nur mit mäßiger Genauigkeit. Obwohl der Laser prinzipiell auf hochauflösende Datenerfassung programmiert werden kann, würde dies jedoch bei weitem zu viel Zeit in Anspruch nehmen und riesige Mengen an unnötigen Daten in Regionen liefern, wo keine Signale vorhanden sind (was in den meisten Bereichen des Bildes der Fall ist). Eine mögliche Strategie ist es, zunächst grobe Signal-Koordinaten aus dem Scan zu ermitteln und anschließend eine Serie von hochaufgelösten Scans kleiner Dimension durchzuführen, die jeweils gerade ein einzelnes Signal abdecken. Während dies die Messzeit bereits beträchtlich herabsetzt, können sogar noch weitere Einsparungen erzielt werden, indem stattdessen hochaufgelöste Kamerabilder verwendet werden, um Signalkoordinaten mit hinreichender Auflösung zu ermitteln. Die aus dem Laserscan vorhandene grobe Koordinatennäherung kann dazu benützt werden, das Suchgebiet – in diesem Fall – innerhalb des Kamerabildes einzuschränken, sodass eine verlässliche Durchführung auch ohne die Verwendung eines Blitzlichts möglich wäre, welches ansonsten notwendig ist, um die Retro-Signale zu entdecken. Dies teilt die Schritte für Erkennung und Näherungswertbeschaffung zwischen den beiden Technologien auf.

Auf der anderen Seite ist es möglich, die Genauigkeit ohne Einsparung von Messzeit zu verbessern, indem die Daten beider Subsysteme einfach kombiniert und dem Ausgleichsalgorithmus als eine einzige Menge von Daten zugeführt werden.

Beide Ansätze implizieren, dass die Kamera bereits kalibriert wurde. Es könnte noch eine interessante Frage sein, ob dies eine notwendige Voraussetzung ist, oder ob die Kamerakalibrierung aus den Daten gewonnen werden kann, nachdem die Messungen abgeschlossen wurden, indem eine Methode verwendet wird, die jener in der Folge beschriebenen ähnlich ist: Selbstkalibrierung.

4.2. Kamerakalibrierung aus Felddaten

4.2.1. Testfeldkalibrierung

Das Laserscanner-System mit integrierter Kamera, das von der Technik der hybriden Ausgleichung Gebrauch macht, bietet auch die Möglichkeit unabhängig von anderen Messungen in einem selbsterstellten kleinen (einige wenige Punkte) Testfeld Kamerakalibrierungen durchzuführen.

In der traditionellen Photogrammetrie stellte das Einrichten und Aufrechterhalten eines Testfeldes eine mühsame und aufwändige Aufgabe dar. Da es sich um ein Laserscanner-System mit automatisierter Erkennung von Retro-Signalen und Feinscan-Fähigkeiten handelt, das insbesondere die Richtung zu diesen Signalen präzise misst, steht somit ein Instrument zur Verfügung, das die Aufgabe der Bestimmung der Signalkoordinaten mit hinreichender Genauigkeit auf schnellem Weg löst. Da die Kamera nur eine kleine Exzentrizität in Bezug zum Laser-Zentrum aufweist, ist die Distanzgenauigkeit von untergeordneter Bedeutung.

Somit bestimmt der Laserscanner einerseits die Koordinaten des Testfeldes und löst andererseits die Aufnahme von Photos in bekannte (d.h. gemessene) Blickrichtungen aus. Die Signale werden ebenfalls automatisch bestimmt und in den digitalen Bildern identifiziert, was den Ansatz einer hybriden Ausgleichung von Beobachtungen mit den folgenden Unbekannten erlaubt: alle Objektkoordinaten der Signale, 3 Rotationen der Kameramontage gegenüber dem Scan-Gehäuse, 3 Exzentrizitätskomponenten der Kameramontage (d.h. die relativen Koordinaten des Laser-Zentrums, gezählt im CMCS), 3 Koordinaten der inneren Orientierung, und eine Menge an Verzeichnungskoeffizienten. Beobachtungen sind Polar- und Bildkoordinaten.

Vom ausgleichungstheoretischen Standpunkt gesehen ist dieser Ansatz sehr sauber, da Korrelationen zwischen den Punkten des Testfeldes vermieden werden.

Die Datumsdefinition (d.h. Wahl des PRCS) für diese lokale Ausgleichung wird einfach so gewählt, dass Position und Stellung des SOCS festgehalten werden: PRCS:=SOCS. (Die Datumsdefinition hat keinerlei Einfluss auf die Qualität (Genauigkeit) der Kamerakalibrierung.)

Minimalanforderungen an das Testfeld:

Man könnte ein Testfeld einrichten, wie es für Kamerakalibrierungen mit einem einzigem Standpunkt empfohlen wird: viele Punkte in verschiedenen Entfernungen (Vorder- und Hintergrund), jeweils verteilt über das gesamte Bildformat. Hierbei sind etwa $2*(5*5)$ bis $2*(8*8)$ Signale notwendig, um auch die Verzeichnung verlässlich bestimmen zu können (man könnte jedoch auf viele der nahen inneren Punkte verzichten, ...).

Jedoch kann man sich sogar die meisten dieser Signale sparen: Das Laserscannersystem mit integrierter Kamera erlaubt das virtuelle Duplizieren der Retro-Signale: Angenommen, der Scanner wird mit näherungsweise vertikaler z-Achse des SOCS aufgestellt; des weiteren stelle man sich eine vertikale Ebene vor, die durch den Ursprung des SOCS verläuft und eine Spalte von nahen und weiten Signalen enthält, etwa $2*5$ bis $2*8$ Signale. Man lässt nun den Laser diese wenigen Punkte im PRCS \equiv SOCS bestimmen und ein Bild aufnehmen, was eine M_{COP} ergibt; dann lässt man den Scannerkopf sich um ein $d\varphi$ weiterbewegen, was eine andere $M_{COP}(\varphi)$ ergibt, und nimmt ein weiteres Bild auf. Dieser letzte Schritt wird wiederholt, bis das ganze Bildformat mit einem Raster bedeckt ist, der durch Duplizieren der einzelnen Signal-Spalte entstanden ist.

In der Praxis können diese Signale an einer Hauswand (an der Innenseite von Fensterleibungen – einfacher Zugang) in zwei Vertikalprofilen angeordnet werden; das Laserscanner-Gerät steht in der Nähe dieser Wand, die dann näherungsweise projizierend erscheint.

Diskussion des Zeitaufwands:

Im Standardfall (Raster von beispielsweise $2*(8*8)$ Signalen) benötigt man zahlreiche (in diesem Beispiel: 128) Fein-Scans und nur ein Bild – im virtuellen Fall (eine Spalte von Signalen) braucht man nur einige (im Bsp.: 16) Fein-Scans, jedoch eine Serie (im Bsp.: 8) von Bildern. Falls

man das Bild teilweise auslesen kann (die Untergrenze für die notwendige Spaltenanzahl kann leicht abgeschätzt werden), ist eine weitere Reduzierung der Bearbeitungszeit möglich.

Diskussion der Stabilität:

Für beide Methoden gelten die gleichen Voraussetzungen bezüglich Stabilität des Laserscannersystems mit integrierter Kamera genauso wie für das gewöhnliche Verfahren.

Es sollte betont werden, dass keinerlei zusätzliche Messungen mittels Theodolit oder Totalstation notwendig sind, um die Koordinaten der Passpunkte zu bestimmen.

Man könnte diskutieren, ob die Bestimmung der Montageparameter in M_{mount} ebenfalls zur Aufgabe der Kamerakalibrierung gehört; in jedem Fall sind diese Parameter mit Hilfe der durchgeführten Orientierungsmethode bestimmbar; dennoch muss M_{mount} nach jeder neuerlichen Befestigung der Kamera auf den Laserkopf bestimmt werden, wobei die internen Parameter der Kamera als stabil betrachtet werden [4]. Jedoch sind in diesem Fall nur wenige Ziele notwendig, um die Ausrichtung der Montage durchzuführen, welche dann auf die Rotationskomponenten beschränkt werden kann, falls die Exzentrizität als konstant angenommen werden kann.

4.2.2. Projektbegleitende Kalibrierung (On-The-Job-Calibration)

Die übliche Begriffsauffassung eines Testfeldes ist eine permanente Einrichtung zahlreicher Signale, die mit sehr hoher Genauigkeit eingemessen wurden. Somit sind die Koordinaten dieser Signale üblicherweise gut bekannt, bevor mit der Kamerakalibrierung begonnen wird. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 erwähnt wurde, kann man ein Testfeld (sogar ein temporäres) verwenden, dessen Koordinaten „on the fly“ bestimmt werden. Der Begriff „Projektbegleitende Kalibrierung“ bedeutet in der photogrammetrischen Triangulation, dass im Zuge der Ausgleichung eines Projekts auch die Parameter der inneren Orientierung (einschließlich Verzeichnung) bestimmt werden. Hier (siehe 4.1) handelt es sich um eine ganz ähnliche Situation: Wir verwenden die Anordnung eines Projekts, um auch eine Kamerakalibrierung durchzuführen – projektbegleitend! Vielleicht wurde die Kamera zuvor gar nicht kalibriert; möglicherweise wird die Qualität der Kalibrierung bezweifelt (Temperatur? Erschütterung?). Jedoch kann die vorhandene Anordnung nicht ausreichend sein, um eine umfassende Ka-

librierung zu bekommen, die sogar singuläre Parameter liefert. Nichtsdestotrotz kann das verwendete Ausgleichssystem sogar solche Situationen bewältigen, indem eine Regularisierung durchgeführt wird oder, sogar noch besser, Daten aus einer älteren Kalibrierung als „fiktive“ Beobachtungen der internen Kameraparameter verwendet werden [2]. Daher könnte dieses „projektbegleitende“ Verfahren fortgeschrittenen Anwendern vorbehalten sein, wohingegen die standardisierte Methode aus 4.2.1 als unkritisch betrachtet werden kann.

4.3. Nachverarbeitung

In Anwendungen im Nahbereich ist üblicherweise die Auflösung der Bilddaten am Zielobjekt weitaus höher als die Auflösung der Laserscandaten. Darüber hinaus erscheinen einige Eigenschaften des Zielobjektes ausschließlich in den Bilddaten und nicht in den Scandaten, z.B. Farbansätze. Ferner weisen die Laserscandaten im allgemeinen höheres Rauschen und geringere Genauigkeit an Kanten und an Details auf, die kleiner als der Durchmesser des Lasermessstrahls sind.

Wenn zum Beispiel eine Fassadenkante in zumindest zwei registrierten und kalibrierten Bildern aufscheint, so kann diese Kante mit photogrammetrischen Methoden mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden. Diese rekonstruierte Kante kann dann zur Verbesserung eines Netzes von Scandaten (Triangulierung) verwendet werden, indem diese Kante als Zwangslinie in das Netz integriert wird.

Ein weiteres Beispiel wäre die präzise Bestimmung der Größe eines Verkehrsschildes, indem aus den Kameradaten die Umrisslinie extrahiert wird und mit der Ebene der Schildes verschnit-

ten wird, wobei die Ebene aus den Scandaten hochgenau bestimmt wird.

5. Zusammenfassung

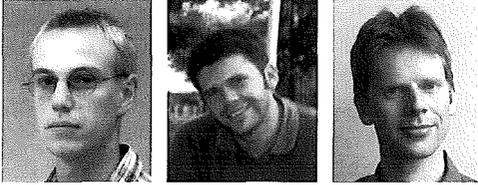
Die Integration einer Digitalkamera, eines Laserscanners, und einer hybriden Multistationsausgleichung bildet somit ein autarkes System, das die gesamte Prozesskette – einschließlich Kalibrierung – von der Datenerfassung bis zu topologisch strukturierten Oberflächendaten abdeckt, welche auf homogene Weise im Projektrahmen ausgeglichen werden.

Literatur

- [1] Ullrich, A., et al., 2001: Time-of-flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing, In: Optical 3-D Measurement Techniques V, Conference Proceedings, October 1-4 2001, Vienna, p. 2-9.
- [2] Kraus, K., 1997: Photogrammetry, Volume 2: Advanced Methods and Applications, with contributions by J. Jansa and H. Kager, 4th edition, Dümmler/Bonn, ISBN 3-427-78694-3, ch. B.3, ch. C.1.7.
- [3] ORIENT, 2003: ORIENT – An Universal Photogrammetric Adjustment System, Product Information, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient_e.html, (30 Jun. 2003).
- [4] Studnicka, N., Ullrich, A., 2003: Acquisition and merging of laser scan data and high-resolution digital images of a hybrid 3D laser sensor. To appear in: T. Luhmann (Hrsg.) Photogrammetrie und Laserscanning, Heidelberg: Wichmann, 2003.
- [5] PHOCAD, 2003: PHIDIAS #- Das Photogrammetrische Interaktive Digitale Auswertesystem, <http://www.phocad.de/Produkte/PHIDIAS/phidias.htm#Laserscanner>, (30 Jun. 2003).

Adresse der Autoren

Andreas Ullrich und Roland Schwarz: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgstrasse 48, A-3580 Horn. email: office@riegl.co.at
Helmut Kager: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F., TU Wien, Gusshausstr. 27-29 / 122, A-1040 Wien. email: helmut.kager@tuwien.ac.at



Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten am Beispiel der Marc-Anton-Plastik

Alexander Haring und Christian Briese, Wien;
Norbert Pfeifer, Delft

Kurzfassung

Sowohl die (Nahbereichs-)Photogrammetrie als auch das terrestrische Laserscanning dienen zur Aufnahme von Objekten im Nahbereich, wobei jede der beiden Technologien ihre Stärken und Schwächen aufweist. Deshalb liegt es nahe, Photogrammetrie und Laserscanning kombiniert einzusetzen, um die Stärken beider Aufnahmemethoden nutzen zu können. Ein Pilotprojekt war die hybride Aufnahme der Marc-Anton-Plastik (Secession, Wien). Der erste Schwerpunkt dieses Artikels umfasst die gemeinsame Orientierung von terrestrischen Laserscanner-Aufnahmen (Riegl LMS-Z360) und digitalen Photos (Kodak DCS 460c) über signalisierte Verknüpfungspunkte mittels einer simultanen, hybriden Ausgleichung. Den zweiten Schwerpunkt bildet die geometrische 3D-Modellierung (Triangulierung, NURBS-Flächen) der Objektoberfläche basierend auf den Laserscanner-Daten. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf das Potential von Photos hinsichtlich Verfeinerung der Modellierung und Erstellung eines 3D-Photo-modells.

Abstract

(Close-range) photogrammetry and terrestrial laser scanning are well-suited methods for the surveying of close-range objects, whereas each of these methods has its individual advantages and drawbacks. So, it seems reasonable to combine photogrammetry and laser scanning in order to use the strengths of both methods. One pilot scheme was the hybrid acquisition of the "Marc-Anton"-Sculpture (city of Vienna). The first main focus of this article contains the simultaneous orientation of terrestrial laser scanner data (Riegl LMS-Z360) and digital photographs (Kodak DCS 460c) using signalised tie points, determined by simultaneous hybrid adjustment. The second main focus is the geometric 3-D modelling (triangulation, NURBS) of the object's surface based on the laser scanner data. Finally, there is an outlook regarding the potential of photographs in the context of improving the modelling and creation of a 3-D photo model.

1. Einleitung

Die Photogrammetrie (genauer: Nahbereichs-photogrammetrie) ist eine altbewährte Methode zur Aufnahme und Dokumentation von Objekten im Nahbereich. Seit einigen Jahren entwickelt sich das terrestrische Laserscanning zu einer zunehmend interessanten Aufnahmemethode für verschiedene Anwendungen. Der Erfolg dieser noch relativ jungen Technologie lässt sich unter anderem auf folgende Vorteile zurückführen:

- Auf der Objektoberfläche kann eine sehr hohe Punktdichte bei weitgehend automatisch ablaufendem Aufnahmevergange erzielt werden [1].
- Laserscanning als aktives Messsystem ist – im Gegensatz zur Photogrammetrie – sowohl von der Textur der Objektoberfläche als auch von den natürlichen Beleuchtungsverhältnissen unabhängig.
- Die Aufnahmeplanung ist wesentlich einfacher als bei der Photogrammetrie, bei der bei der Wahl der Kamerapositionen folgende Grundregel zu beachten ist: Die die Strahlenbündel verknüpfenden Objektpunkte müssen auf mindestens 2 Bildern, besser mindestens auf 3 Bildern abgebildet sein, und außerdem dür-

fen die Strahlen in diesen gemeinsamen Objektpunkten keine schleifenden Schnitte bilden [2]. Beim Laserscanning hingegen reicht bereits eine einzige Aufnahme, um (lokale) dreidimensionale Koordinaten der Objektpunkte zu bestimmen.

Auf der anderen Seite weist die Photogrammetrie folgende Stärken auf:

- Durch eine photographische Aufnahme wird die Textur des Objekts erfasst, was insbesondere bei der Erstellung von qualitativ hochwertigen 3D-Photomodellen notwendig ist.
- Kanten können in photographischen Bildern aufgrund der dort vorhandenen Grauwertsprünge meist direkt und präzise gemessen werden, während das Laserscanning aufgrund der im Vergleich zu Photos deutlich geringeren geometrischen Auflösung gerade an Kanten problematisch ist, weil diese relativ stark abgerundet werden und an Konturkanten wegen der Ausdehnung der vom Laserstrahl beleuchteten Fläche (footprint) grob fehlerhafte Distanzmessungen auftreten.

Man kann erkennen, dass sich Photogrammetrie und Laserscanning hervorragend ergänzen.

Laut Kraus [3] sorgt Laserscanning derzeit für einen Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Auch einige Hersteller terrestrischer Laserscanner-Systeme setzen seit kurzem auf den kombinierten Einsatz beider Methoden und haben daher begonnen, eine Kamera in ihre Systeme zu integrieren.

Im Rahmen einer am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F) der TU Wien durchgeführten Diplomarbeit [4] wurde die 3D-Modellierung eines geometrisch komplexen Objekts durchgeführt. Als Beispielobjekt diente die Marc-Anton-Plastik (befindet sich bei der Wiener Secession). Das Kunstwerk wurde mit dem terrestrischen Laserscanner LMS-Z360 der Fa. Riegl gescannt, wobei zusätzlich auch Photos mit der Digitalkamera Kodak DCS 460c aufgenommen wurden.

Im Folgenden werden – nach einem kurzen Abschnitt über die Datenerfassung – die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert, wobei der erste Schwerpunkt die hybride Ausgleichung von Laserscanner-Aufnahmen und Photos betrifft, während der zweite Schwerpunkt auf die 3D-Modellierung der Objektoberfläche gelegt wird.

2. Aufnahme der Marc-Anton-Plastik

Die Marc-Anton-Plastik befindet sich in der Gartenanlage neben dem Gebäude der Wiener Secession. Sie zeigt den römischen Feldherrn und Staatsmann Marcus Antonius, in einem Streitwagen sitzend, gezogen von einem aus drei Löwen bestehenden Löwengespann (Abb. 1, links). Ein vierter Löwe befindet sich rechts hinter dem Wagen (Abb. 1, rechts). Das Objekt besteht aus einem etwa 5m langen, 2,5m breiten, und 0,8m hohen Sockel, und der eigentlichen Bronzeplastik (Höhe über Boden ca. 3m). Letztere

weist eine äußerst komplexe Geometrie auf: Die Oberfläche enthält einige Stellen mit feinen Strukturen (z.B. Mähne des mittleren Löwen, Falten in der Kleidung des Marc Anton oder dessen Kopf), auch Löcher (z.B. zwischen den Speichen der Räder) erhöhen die Komplexität des Objekts. Besonders komplex und ohne enormen Aufwand nicht erfassbar sind die Bereiche zwischen bzw. unter dem Löwengespann, wo sich auch das Gestänge befindet, und insbesondere der Bereich zwischen den Rädern.

Die Aufnahme des Objekts erfolgte mit dem Laserscanner Riegl LMS-Z360 [5] und mit der Digitalkamera Kodak Professional DCS 460c [6].

Das verwendete Laserscanner-System ermöglicht 360°-Scans mit einem vertikalen Scan-Bereich von maximal 90°. Eine Messrate bis zu 12000 Punkte pro Sekunde ist möglich. Die Entfernungsmessung basiert auf dem Impulslaufzeitverfahren, wobei die Einzelmessgenauigkeit bei $\pm 12\text{mm}$ liegt. Der Laserstrahl (nahes Infrarot) weist eine Strahldivergenz von 2mrad auf. Die maximale Reichweite beträgt für natürliche Ziele bis zu 200m, die notwendige Mindestentfernung liegt bei 1m.

Die digitale Kamera Kodak DCS 460c besitzt einen CCD-Flächensensor mit 3072x2048 Bildelementen mit einer Pixelgröße von ca. $9\mu\text{m}$. 50% der Pixel sind für den grünen, jeweils 25% für den roten bzw. blauen Farbwert empfindlich. Durch Farbinterpolation entsteht schließlich ein RGB-TIFF-Bild mit einer Dimension von 3060x2036 Bildelementen. Für die Aufnahmen wurde eine 28mm-Linse verwendet, was einer Pixelgröße auf dem Objekt von ca. 1/3000 der (variablen) Aufnahmeentfernung entspricht.

Insgesamt wurden 22 Photos aufgenommen und 10 Laserscanner-Standpunkte ausgewählt, wobei pro Standpunkt jeweils sowohl ein 360°-Panorama-Scan (mit dem maximal möglichen

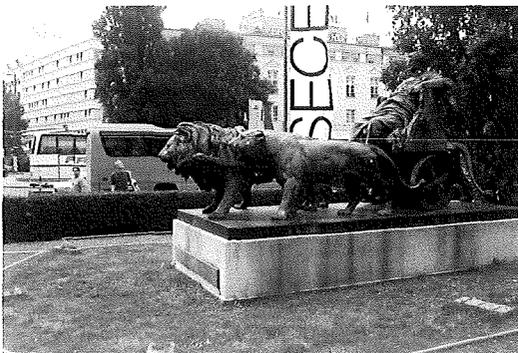
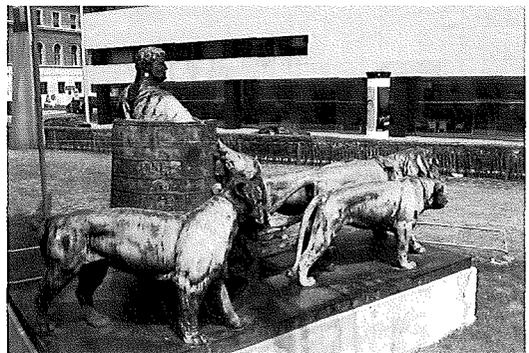


Abb. 1: Marc-Anton-Plastik bei der Wiener Secession



vertikalen Scan-Bereich von 90°) als auch ein Detail-Scan (mit variablem, jeweils angepasstem Scan-Bereich) des Objekts durchgeführt wurde. Die Panorama-Scans, bei denen auch jeweils mehrere Verknüpfungspunkte in der Peripherie aufgenommen wurden, dienten dabei vorwiegend zur Stabilisierung der Orientierung, und erfolgten mit einer groben Auflösung. Ihre Schrittweite betrug 0.2° (222mgon), jene der Detail-Scans 0.05° (56mgon).

Die Aufnahmeanordnung ist in Abb. 2 dargestellt. Um auch die höhergelegenen Bereiche der Objektoberfläche erfassen zu können, wurden 5 Photos von einer Leiter aufgenommen und für 2 Laserscanner-Standpunkte (#9 und #10 in Abb. 2) ein Hochstativ verwendet. Scan #10 wurde aus einer deutlich näheren Position aufgenommen (Abb. 2), um vor allem die Rücken der Löwen zu erfassen.

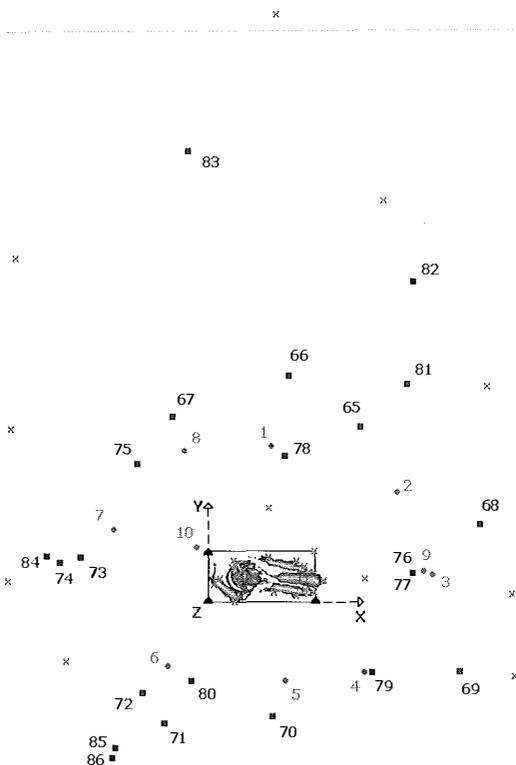


Abb.2: Aufnahmeanordnung: Laserscanner-Standpunkte (rote Kreise), Projektionszentren der Photos (blaue Quadrate) und Verknüpfungspunkte (magenta Kreuze). Drei Eckpunkte des Sockels (schwarze Dreiecke) definieren das globale Objektkoordinatensystem.

Vor der Aufnahme wurden sowohl am Objekt als auch in dessen Umgebung insgesamt 29 Verknüpfungspunkte signalisiert, darunter 18

quadratische retroreflektierende Folien (ca. $2 \times 2 \text{ cm}^2$) direkt an der Plastik und 11 retroreflektierende Zylinder (ca. 5cm Durchmesser und ca. 7cm Höhe) in deren Peripherie. Dabei war zu beachten, dass sowohl in jeder Laserscanner-Aufnahme als auch in jedem Photo zumindest 4 dieser Ziele erfasst wurden, um eine gute Kontrolle für jede Aufnahme sicherzustellen.

Das Signalisieren der Verknüpfungspunkte dauerte sowohl für Retro-Quadrate als auch Retro-Zylinder jeweils 10 Minuten. Die Aufnahme der 22 Photos erfolgte innerhalb einer Stunde, während für die insgesamt 20 Scans etwa 2.5 Stunden benötigt wurden.

3. Gemeinsame Orientierung der Laserscanner-Aufnahmen und der Photos

Um das Objekt als Gesamtes modellieren zu können, mussten alle Aufnahmen in ein einheitliches kartesisches Koordinatensystem (Objektkoordinatensystem) transformiert werden. Dieses wurde folgendermaßen an das Objekt angepasst (siehe Abb. 2): Der Ursprung wurde in den rechten, hinteren Eckpunkt der rechteckförmigen Sockeloberfläche gelegt (Festlegung der drei Translationskomponenten), die Richtung der X-Achse durch einen Punkt mit $Y=Z=0$ an der rechten, vorderen Ecke (Festlegung von zwei Rotationen) und die XY-Ebene durch einen Punkt mit $Z=0$ an der linken hinteren Ecke (dritte Rotation) definiert. Der Maßstab wurde aus den Laserscanner-Messungen übernommen.

3.1. Interaktive Messung der Verknüpfungspunkte in den Intensitätsbildern und in den Photos

Wie bereits erwähnt, erfolgte die gemeinsame Orientierung von Laserscanner-Aufnahmen und Photos über die Verknüpfungspunkte. Diese mussten dazu zunächst sowohl in den Intensitätsbildern der Laserscanner-Aufnahmen als auch in den Photos gemessen werden. Die (manuelle) Messung erfolgte interaktiv mit dem Programmsystem ORPHEUS [7], welches auf dem hybriden Ausgleichssystem ORIENT [8] aufsetzt und die graphische Benutzeroberfläche dazu bietet (Abb. 3). Die Bildkoordinaten konnten mit Sub-Pixel-Genauigkeit gemessen werden, wobei die „Bildkoordinaten“ der Intensitätsbilder vor der hybriden Ausgleichung noch durch bilineare Interpolation in Polarbeobachtungen umgewandelt werden mussten (vgl. [2], [4]).

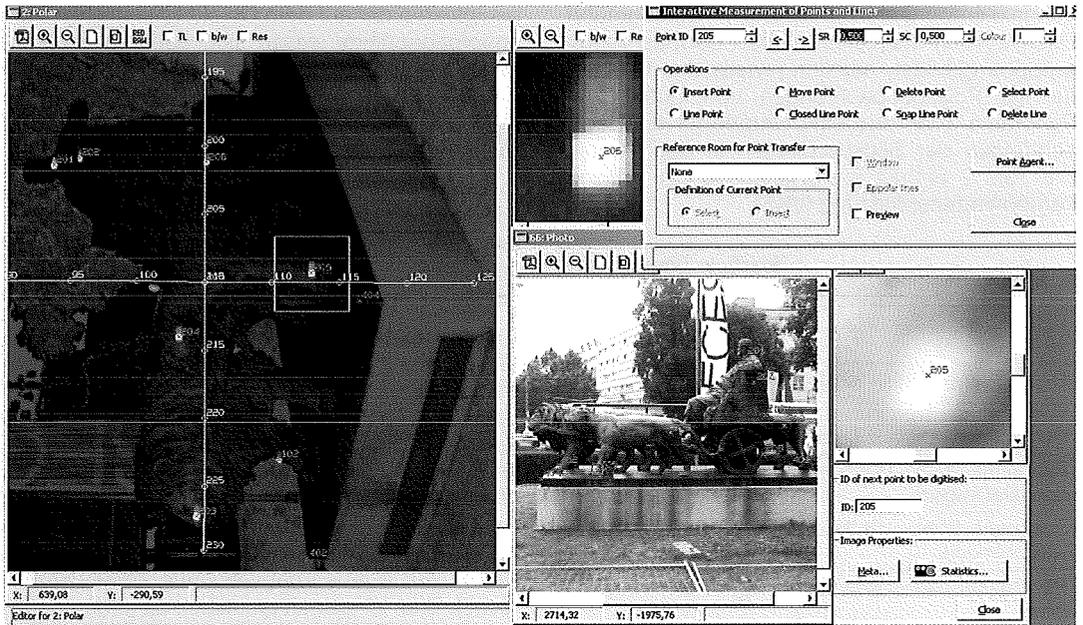


Abb. 3: Interaktive Messung der Bildkoordinaten in Photos und Intensitätsbildern mit Hilfe des Programmsystems ORPHEUS

3.2. Hybride Ausgleichung

In den ursprünglich 1333 Beobachtungen waren noch einige grobe Fehler enthalten, vor allem grob fehlerhafte Distanzen, die vorwiegend in der Nähe von Konturlinien in den schlecht aufgelösten Panorama-Scans auftraten. Das Aufspüren der groben Fehler erfolgte in der ersten Stufe durch Analyse der Residuen (Verbesserungen). Auf diese Weise konnten die „ganz“ groben Distanzfehler (Fehler > 0.5m) erkannt und eliminiert werden. Im zweiten Schritt wurde die Methode

der robusten Schätzung angewandt, die sich zur Elimination von groben Fehlern „mittlerer Größe“ eignet. Der dritte Schritt umfasste die Elimination „kleiner“ grober Fehler mittels Data Snooping (Details siehe [7], [9], [10]).

Die Bilanz der Ausgleichung ist in der Tab. 1 zusammengestellt. Wie man erkennen kann, ist die Redundanz trotz Elimination von insgesamt 95 Beobachtungen noch immer sehr hoch. Zur Verbesserung des stochastischen Modells wurde im Zuge des Data Snoopings auch eine

Anzahl d. Beobachtungen i. d. 20 Intensitätsbildern (273 Punkte mit je 3 Beobachtungen):	819
Anzahl d. Beobachtungen i. d. 22 Photos (254 Punkte mit je 2 Beobachtungen):	508
Anzahl d. fiktiven Beobachtungen („beobachtete“ Datumselemente):	6
Anzahl d. ursprünglich vorhandenen Beobachtungen:	1333
Anzahl d. mittels Residuen-Analyse eliminierten Distanzen:	-33
Anzahl d. Beobachtungen vor der robusten Schätzung:	1300
Anzahl d. nach robuster Schätzung/Data Snooping markierten Punkte:	-62
Anzahl der Beobachtungen:	1238
Anzahl d. zu bestimmenden Orientierungsparameter (32 Standpunkte mit je 6 Parametern):	192
Anzahl d. zu bestimmenden Neupunktkoordinaten (30 Neupunkte mit je 3 Parametern):	90
Anzahl d. zu bestimmenden Datumspunktkoordinaten (3 Datumspunkte mit je 3 Parametern):	9
Anzahl der Unbekannten:	291
Redundanz:	947

Tab.1: Bilanz der Ausgleichung mit Angabe der im Zuge der Residuen-Analyse, der robusten Schätzung, und Data Snooping eliminierten Beobachtungen

Varianzkomponentenschätzung durchgeführt. Dazu wurden insgesamt sieben Beobachtungsgruppen gebildet, nämlich jeweils drei Gruppen für die Polarbeobachtungen von Detail- und Panorama-Scan und eine Gruppe für die Beobachtungen der Bildkoordinaten in den Photos. Die Tab. 2 enthält die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung (VKS).

Beobachtungsgruppe	Ergebnis der VKS	Verwendete Schrittweite
Detail-Scan – Horizontalwinkel [mgon]	48	56
Detail-Scan – Vertikalwinkel [mgon]	31	56
Detail-Scan – Distanz [mm]	12	
Panorama-Scan – Horizontalwinkel [mgon]	74	226
Panorama-Scan – Vertikalwinkel [mgon]	42	226
Panorama-Scan – Distanz [mm]	16	
Photo – Bildkoordinaten [Pixel]	0.37	

Tab.2: Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung (VKS) und Vergleich mit der jeweils verwendeten Schrittweite

Man kann erkennen, dass für die erhaltenen Winkelgenauigkeiten die jeweils verwendete Winkelschrittweite die entscheidende Größe ist. Die für die Distanzmessung erhaltenen Genauigkeitswerte bestätigen die Herstellerangabe von 12mm. Ebenso ist die abgeschätzte Genauigkeit der Bildkoordinaten in den Photos von 37% der Pixelgröße plausibel (vgl. [2]).

Um aussagekräftige Genauigkeitsmaße für die Unbekannten zu bekommen, wurde eine freie Netzausgleichung durchgeführt, welche die inneren Genauigkeiten des Beobachtungsnetzes liefert (siehe Tab. 3). Die besonders hohen Ge-

nauigkeiten der auf dem Objekt befindlichen Verknüpfungspunkte lassen sich dadurch erklären, dass die Überbestimmung sehr hoch und die Aufnahmegeometrie sehr günstig ist, weil die Punkte auf dem Objekt aus vielen verschiedenen Richtungen beobachtet wurden.

Interessant ist schließlich noch die Frage, inwieweit sich die Genauigkeitswerte verschlechtern, wenn man die Photo-Beobachtungen weglässt (also eine reine Ausgleichung der Laserscanner-Aufnahmen durchführt).

Aus der Tab. 4 ist ersichtlich, dass sich die Genauigkeiten der Orientierungsparameter der Laserscanner-Aufnahmen kaum verschlechtern. Auch die Genauigkeiten der (vorwiegend in den Panorama-Scans) enthaltenen peripheren Verknüpfungspunkte werden nur ein wenig durch das Weglassen der Photos beeinträchtigt. Die am Objekt befindlichen Verknüpfungspunkte weisen hingegen einen deutlichen Genauigkeitsverlust auf (Standardabweichung etwa verdreifacht!). Dies ist jedoch plausibel, da in den hochauflösten Photos gerade diese Punkte vorwiegend beobachtet wurden und diese eben aufgrund der hohen Auflösung sehr genau identifiziert werden konnten.

4. Modellierung der Objektoberfläche

Für die Modellierung der Objektoberfläche wurden die zehn Detail-Scans herangezogen. Als Modellierungs-Software wurde Geomagic Studio 5.0 von der Fa. Raindrop Geomagic verwendet [11]. Dieses Programm ermöglicht die Weiterverarbeitung von 3D-Punktwolken, wie sie Laserscanner-Aufnahmen liefern, zu einem Polygonmodell (triangulierte Oberfläche) und anschließend zu einem CAD-Modell, in welchem die Oberfläche durch NURBS- (Non-Uniform Rational B-Splines)-Flächen repräsentiert wird.

	Genauigkeit der Position			Genauigkeit der Drehwinkel		
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	d ω [mgon]	d ϕ [mgon]	d κ [mgon]
Laserscanner-Aufnahmen	1.9	1.8	2.9	38	26	15
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	d α [mgon]	d ξ [mgon]	d κ [mgon]
Photos	2.4	2.2	2.8	17	20	17
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]			
Verknüpfungspunkte (am Objekt)	0.7	0.7	0.6			
Verknüpfungspunkte (Peripherie)	3.3	3.1	3.5			
Verknüpfungspunkte gesamt	1.5	1.5	1.5			

Tab.3: Durchschnittliche Genauigkeiten der Unbekannten ermittelt aus einer freien Netzausgleichung

Bilanz:						
Anzahl der Beobachtungen	749 (1238)					
Anzahl der Unbekannten	159 (291)					
Redundanz	590 (947)					
Genauigkeiten der Unbekannten:						
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	d ω [mgon]	d ρ [mgon]	d κ [mgon]
Laserscanner-Aufnahmen	2.1 (1.9)	2.1 (1.8)	3.2 (2.9)	40 (38)	27 (26)	15 (15)
	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]			
Verknüpfungspunkte (am Objekt)	1.8 (0.7)	2.2 (0.7)	2.3 (0.7)			
Verknüpfungspunkte (Peripherie)	3.9 (3.3)	3.6 (3.1)	5.1 (3.5)			
Verknüpfungspunkte gesamt	2.5 (1.5)	2.6 (1.5)	3.2 (1.5)			

Tab.4: Ausgleichung ohne Verwendung der Photos. Bilanz und durchschnittliche Genauigkeiten der Unbekannten ermittelt aus einer freien Netzausgleichung (in Klammern und kursiver Schrift sind zum Vergleich die Genauigkeiten aus der hybriden Ausgleichung angegeben).

In Geomagic Studio gibt es drei aufeinanderfolgenden Phasen der Modellierung, nämlich „Point Phase“, „Polygon Phase“ und „Shape Phase“.

4.1. Bearbeitung der 3D-Punktwolke

Zunächst mussten die (mit Hilfe der Parameter aus der Ausgleichung) zehn orientierten Punktwolken in das Modellierungsprogramm importiert werden. Da das Rohdatenformat der Firma Riegl (3DD) von Geomagic Studio für den Import leider nicht unterstützt wird, mussten die Punktwolken als xyz-Dateien (ASCII) importiert werden, was einen Verlust der in der Rohdatenmatrix ursprünglich vorhandenen Topologieinformation zur Folge hatte. Dadurch konnten die Programmfunktionen, die für geordnete Punktwolken zur Verfügung stehen, in diesem Fall leider

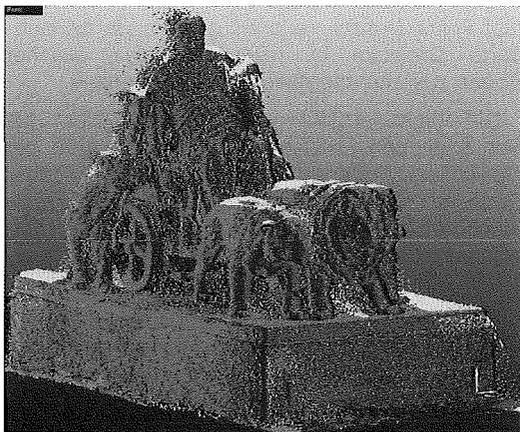


Abb.4: Grob editierte Punktwolke (jede Farbe entspricht einem der 10 Detail-Scans)

nicht genutzt werden (u.a. erhebliche Verringerung der Rechenzeiten).

Da alle zehn Scans vollständig importiert wurden, war es zunächst notwendig, die Punktwolke auf das Interessensgebiet zu reduzieren. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der Punkte von zunächst ca. 7.4 Millionen auf ca. 4.0 Millionen. Die einzelnen Scans sind in Abb. 4 in verschiedenen Farben dargestellt.

Wie man anhand der farblichen Trennung erkennen kann, befinden sich in den einzelnen Scans noch zahlreiche grob fehlerhafte Punkte, die vor allem an den Konturlinien (bezüglich des jeweiligen Aufnahmestandpunktes) bzw. Kanten auftreten, was auf fehlerhafte (zu große) Distanzmesswerte zurückzuführen ist, welche durch Mittelung über die vom Laserstrahl beleuchtete Fläche (footprint) zu Stande kommen (also Mittelung mit dem „Hintergrund“). Diese fehlerhaften Punkte mussten eliminiert werden, was manuelle Arbeit bedeutete. Natürlich wäre es günstiger, diese fehlerhaften Punkte mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus möglichst automatisch bereits in der Rohdatenmatrix zu eliminieren.

Für die weitere Verarbeitung der Punktwolke schien es zweckmäßig, diese (oder besser gesagt das Objekt) in zwei Teilbereiche zu unterteilen, nämlich in den Sockel und in die (eigentliche) Plastik. Diese Unterteilung erfolgte deshalb, weil die beiden Bereiche gegensätzliche Charakteristika aufweisen: Während der Sockel eine prismatische, eckige Form aufweist und durch eine Menge von Ebenen beschrieben werden kann, hat die Plastik eine komplexe Geometrie und lässt sich am besten durch Freiformflächen modellieren. Durch diese Trennung konnte die relativ große Datenmenge (ca. 91MB bzw. 4 Millionen Punkte) auf zwei etwa gleich große Dateien

aufgeteilt werden. Danach folgte noch jeweils eine homogene Ausdünnung der beiden Punktwolken, wobei der gesamte Raum in 1cm-Würfel (Voxels) zerlegt und anschließend in jedem dieser Würfel jeweils alle bis auf einen Punkt gelöscht wurden. Im Falle der Plastik reduzierte sich dadurch die Anzahl der Punkte auf ca. 1.4 Millionen.

Für den Sockel wurde versucht, die Ebenen mit der in Geomagic Studio vorhandenen vollautomatischen Funktion zu detektieren, was jedoch aufgrund des relativ starken Messrauschens in diesem Fall nicht funktionierte. Stattdessen wurde daher die halbautomatische Funktion verwendet, bei welcher der Operateur eine Menge von (seiner Ansicht nach) planaren Punkten vorgibt, und das Programm weitere Punkte der Ebene ermittelt. Letztendlich wurde der Sockel durch insgesamt zehn Ebenen approximiert.

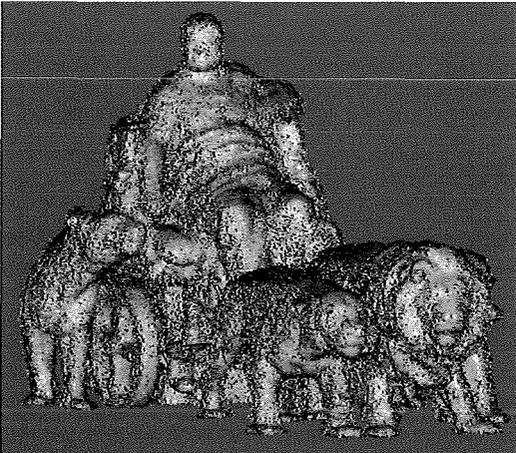


Abb.5: Ungefilterte Punktwolke (noch stark verrauscht)

Jene Punktwolke, die die eigentliche Plastik repräsentiert, musste stark gefiltert werden, da das Messrauschen so hoch war, dass die Berechnung einer Triangulierung noch nicht sinnvoll war (Abb. 5). Das Filtern in Geomagic Studio ist leider nur als Black Box verfügbar. Der Einfluss des Benutzers auf den Filterprozess ist ebenfalls sehr gering, da nur wenige Parameter, deren Bedeutung kaum dokumentiert ist, gewählt werden können. Somit war es notwendig, eine passende Filterstrategie durch systematisches Ausprobieren zu finden. Eine einmalige Filterung reichte nicht aus, um das Messrauschen ausreichend zu reduzieren. Dreimaliges Filtern mit jeweils anschließender Ausreißerelimination stellte sich als guter Kompromiss zwischen Reduzieren des starken Rauschens und

Erhaltung der Details heraus. Nach der Filterung wurde die Punktwolke mittels krümmungsbasierter Ausdünnung auf 25% der Punkte reduziert (auf ca. 320.000). Dies erfolgte durch Berechnung lokaler Krümmungswerte, wobei Punkte in stärker gekrümmten Bereichen der Oberfläche eher beibehalten wurden, während Punkte in schwächer gekrümmten Bereichen entsprechend reduziert wurden. Schließlich wurde die Punktwolke trianguliert und somit in die Polygonphase übergegangen.

4.2. Bearbeitung der Triangulierung

Die Triangulierung war für einen Großteil der Oberfläche bereits recht zufriedenstellend. Dennoch wies die Triangulierung vor allem in der Nähe von Datenlöchern bzw. nicht vollständig erfassten Kleinstrukturen noch ziemlich schwerwiegende Fehler auf, die behoben werden mussten. Die in Geomagic Studio vorhandenen vollautomatischen Operationen zur Verbesserung der Triangulierung führten in diesem Fall nicht zu den erwünschten Ergebnissen. Das Problem lag einerseits in der Komplexität der Objektoberfläche, andererseits daran, dass mehr oder weniger intuitive Entscheidungen – von Fall zu Fall – notwendig waren, welche Bereiche der unzureichend erfassten Kleinstrukturen (z.B. unvollständig erfasstes Gestänge) rekonstruiert oder vernachlässigt werden sollten. Die Nachbearbeitung der Triangulierung musste also halbautomatisch erfolgen, was trotz der vorhandenen interaktiven, komfortablen Werkzeuge einen ziemlich hohen Aufwand an manueller Arbeit bedeutete. Um den Aufwand einigermaßen in Grenzen zu halten, wurde zuvor die Anzahl der Dreiecke mittels der Polygonezimirungsfunktion auf die Hälfte reduziert (von ca. 615.000 auf ca. 307.000), wobei fast keine Details verloren gingen, da benachbarte Dreiecke in näherungsweise gleicher Ebene zusammengefasst werden konnten.

Die Nachbearbeitung umfasste vor allem das Schließen von Löchern, das lokale Glätten der Oberfläche, Entfernen von Spitzen bzw. falscher Dreiecke, Reduzierung von Dreiecken in krümmungsarmen Bereichen, Verfeinerung der Dreiecksvermaschung in stark gekrümmten Bereichen, und ähnliche Maßnahmen.

Die Anzahl der Dreiecke wurde anschließend noch einmal auf die Hälfte reduziert. Am Ende der Polygonphase wurde die Oberfläche der Plastik durch 79.634 Punkte und 155.762 Dreiecke modelliert (Abb. 6). Die Abweichungen dieser Triangulierung zur ursprünglichen Punktwolke sind in Abb. 7 dargestellt, wobei die durchschnittliche

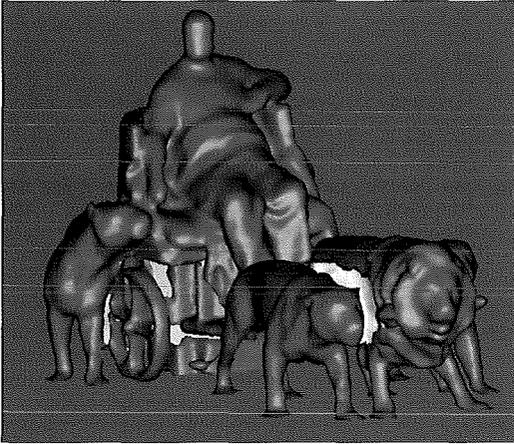


Abb.6: Endergebnis der Triangulierung

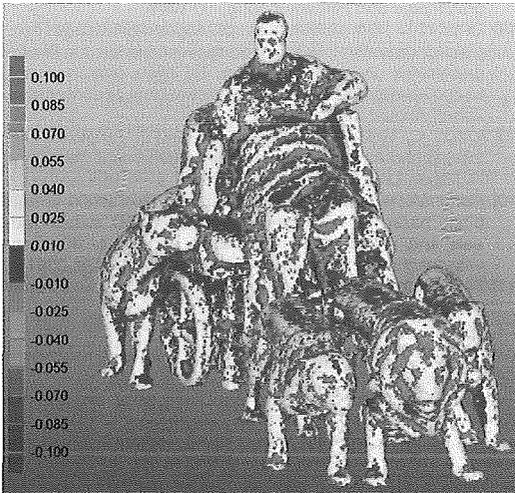


Abb. 7: Farbkodierte Abweichungen zwischen der grob editierten, ungefilterten Punktwolke und der Triangulierung

Entfernung der Punkte zum Modell 12mm sowie die Standardabweichungen dieser Differenzen $\pm 13\text{mm}$ betragen.

4.3. Modellierung der Oberfläche durch NURBS

Für die Erzeugung einer NURBS- (Non-Uniform Rational B-Splines-) Repräsentation der Oberfläche ist ein sogenanntes Patch-Layout notwendig, d.h. die Oberfläche muss für die Berechnung der NURBS in mehrere Flächenstücke segmentiert werden. Mittels Geomagic Studio kann vollautomatisch ein Patch-Layout und die entsprechende NURBS-Modellierung ermittelt

werden, wobei der Benutzer einige Parameter bezüglich Detailerhaltung vorgeben kann. Das Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt.

Das Patch-Layout könnte prinzipiell auch manuell erstellt werden, wobei man wahrscheinlich deutlich weniger Patches verwenden würde. Ziemlich sicher wäre ein manuell erzeugtes Patch-Layout in bestimmten Bereichen der

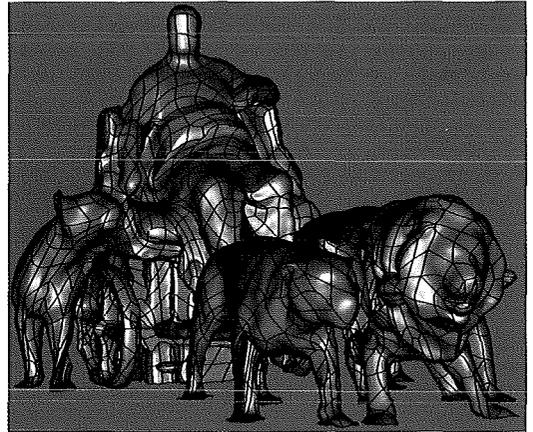


Abb. 8: Ergebnis der NURBS-Modellierung (mit den verwendeten Patches)

Oberflächen ein wenig besser, jedoch wäre der damit verbundene Aufwand im Falle dieses komplexen Objekts enorm.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von Verknüpfungspunkten und hybrider Ausgleichung wurden terrestrische Laserscanner-Aufnahmen und Photos der Marc-Anton-Plastik gemeinsam orientiert. Die Ergebnisse dieser Ausgleichung, insbesondere die Varianzkomponentenschätzung und die Genauigkeiten der Unbekannten wurden untersucht und in diesem Artikel präsentiert. Zur Modellierung der Objektfläche wurden jedoch ausschließlich die Detail-Scans herangezogen. Die Photos dienen in diesem Fall lediglich zur Stabilisierung der Orientierung und zur Erhöhung der Redundanz. Jedoch könnten gerade die Photos im Bereich von Kanten bzw. Konturlinien wertvolle Beiträge zur Oberflächenmodellierung liefern, d.h. die Schwächen, die das Laserscanning gerade an diesen Stellen aufweist, kompensieren.

Die Abb. 9 zeigt eine VRML-Visualisierung, bei der die in einem Photo gemessenen Konturpunkte von zwei Löwen auf eine vertikale Ebene projiziert werden. Durch die Verbindung der pro-

jizierten Punkte mit dem Projektionszentrum des Photos wird eine allgemeine Kegelfläche definiert. Die Information aus dem Photo könnte durch Schnitt dieser Kegelfläche mit dem Modell zur Verbesserung des Oberflächenmodells herangezogen werden.

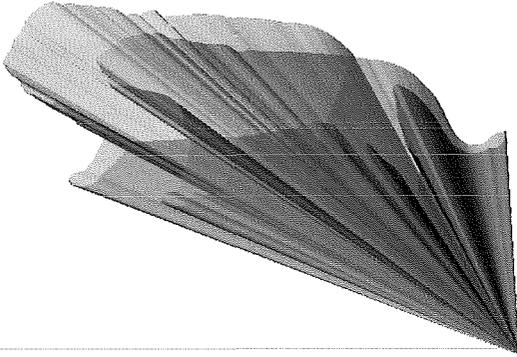


Abb. 9: VRML-Visualisierung der in einem Photo gemessenen Konturlinien von zwei Löwen, die auf eine vertikale Ebene projiziert werden.

Auch die in den orientierten Photos enthaltene Texturinformation könnte beispielsweise auf das Oberflächenmodell aufprojiziert und somit ein 3D-Photomodell von hohem dokumentarischen Wert erzeugt werden. Als mögliche Anwendung wäre ein räumliches Informationssystem denkbar, d.h. durch die Verknüpfung des Modells mit einer Datenbank könnte eine Art dreidimensionales Inhaltsverzeichnis des Kunstwerks (z.B. für den Denkmalschutz) geschaffen werden.

Danksagung:

Das Projekt wird vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Projekt Nr. P15789) sowie durch das innovative Projekt „3D Technology“ der Technischen Universität Wien finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] Pfeifer, N., Rottensteiner, G., 2001: The Riegl Laser Scanner for the Survey of the Interiors of Schönbrunn Palace. Grün, A. und Kahmen, H. (Hrsg.), Optical 3-D Measurement Techniques V. Wichmann, Heidelberg. S. 571–578.
- [2] Kraus, K., 2004: Photogrammetrie Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 2004. 7. Auflage.
- [3] Kraus, K., 2001: Laser-Scanning – Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), 21. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Konstanz, Deutschland, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, September 2001. S. 13–22, und in Geomatik Schweiz, VPK 10/2002. S. 620ff.
- [4] Haring, A., 2003: Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [5] Fa. Riegl: <http://www.riegl.com>, Zugriff August 2003.
- [6] Fa. Kodak: <http://www.kodak.com/global/en/professional/products/cameras/dcs460/dcs460.jhtml>, Zugriff August 2003.
- [7] Kager, H., Rottensteiner, F., Kerschner, M., Stadler, P., 2002: ORPHEUS 3.2.1 User Manual. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [8] ORIENT – Ein universelles photogrammetrisches Ausgleichungssystem: Produktinformation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien. http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient.html, Zugriff August 2003.
- [9] Kraus, K., 1996: Photogrammetrie Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager. Dümmler, Bonn. 3. Auflage.
- [10] Rottensteiner, F., 2001: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 56, Wien, Mai 2001.
- [11] Fa. Raindrop Geomagic: <http://www.geomagic.com>, Zugriff August 2003.

Adressen der Autoren

Alexander Haring: Christian-Doppler-Labor am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F., TU Wien, Gusshausstr. 27–29 / 122, A-1040 Wien. email: ah@ipf.tuwien.ac.at

Christian Bries: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F., TU Wien, Gusshausstr. 27–29 / 122, A-1040 Wien. email: cb@ipf.tuwien.ac.at

Norbert Pfeifer: Delft University of Technology, Section of Photogrammetry and Remote Sensing, Kluyverweg 1, NL-2629 HS Delft, Niederlande.

email: n.pfeifer@lr.tudelft.nl



Orientierung von Laserscanner-Punktwolken

Michael Hofer und Helmut Pottmann, Wien

Zusammenfassung

Die Orientierung von Laserscanner-Punktwolken ist einer der ersten Schritte bei der 3D-Digitalisierung realer Objekte. Unter Orientierung versteht man die Aufgabe, zwei oder mehrere Teilaufnahmen ein und desselben Objektes aus unterschiedlichen Positionen so zusammenzuführen, dass das gesamte aufgenommene Objekt dargestellt wird. Anstatt „Orientierung“ werden in Fachgebieten außerhalb der Photogrammetrie und Fernerkundung auch oft die Begriffe „Registrierung“ bzw. „Matching“ verwendet. Dieser Artikel ist die schriftliche Ausarbeitung eines Vortrags, welcher vom ersten Autor im Rahmen des Universitätslehrgangs „Laserscanning“ des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien am 24. September 2003 gehalten wurde. Es werden die grundlegenden Orientierungsverfahren von Laserscanner-Punktwolken besprochen.

Abstract

The orientation of laser scanner point clouds is one of the fundamental steps in the process of creating three-dimensional digital representations of existing objects. Orientation is the task of finding the correct positions of two or more point clouds (that only partially represent the object) obtained from different viewing positions, such that the full object in consideration is correctly described. In communities outside of Photogrammetry and Remote Sensing, instead of 'orientation' the terms 'registration' or 'matching' are used to describe the same task. This article is an exposition of a talk given by the first author at the continuing education 'Laserscanning' of the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing of the Vienna University of Technology on September 24th, 2003. The article gives an overview of fundamental orientation methods for laser scanner point clouds.

1. Einleitung

Die vollständige Digitalisierung eines dreidimensionalen Objektes erfordert im Allgemeinen mehrere Aufnahmen von verschiedenen Seiten. Um dies zu bewerkstelligen muss entweder das Aufnahmegerät oder das Objekt selbst in verschiedene räumliche Lagen gebracht werden. Ist das Objekt klein genug, verwendet man zur Datenaufnahme üblicherweise einen Drehteller, welcher automatisch gesteuert wird. Aber auch in diesem Fall muss zumindest die Standfläche des Objektes extra gescannt werden, um ein vollständiges digitales Modell zu erhalten.

In den meisten praktischen Fällen stößt man also auf die Fragestellung, einzelne Aufnahmen ein und desselben Objektes, welche in verschiedenen Koordinatensystemen liegen, so in ein einziges Koordinatensystem zu transformieren, dass man eine vollständige Beschreibung des Objektes erhält. Diese Aufgabenstellung wird in der Photogrammetrie als 'Orientierung' bezeichnet (Genau genommen handelt es sich hier um die relative Orientierung der Punktwolken, da die absolute Orientierung, d.h. Position und Stellung des Objektes in Bezug zu einem globalen System nicht von Interesse ist.). In anderen Fachgebieten hat sich im letzten Jahrzehnt dafür

der Begriff 'Registrierung' eingebürgert (Als Übersetzung des in der Englischen Fachliteratur verwendeten Begriffs 'registration', was soviel bedeutet wie 'genaues Ausrichten').

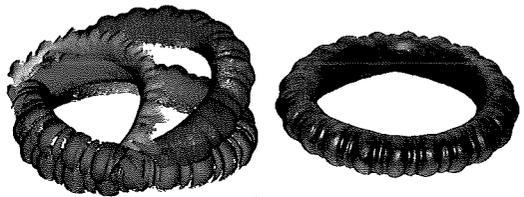


Abb. 1: links: Ausgangslage von vier Punktwolken. rechts: Orientierte und vereinigte Punktwolken mit der Textur des gescannten Objektes. Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Landesarchäologie Salzburg.

Verwendet man zur Datenaufnahme einen 3D-Laserscanner, dann liegen die Aufnahmen als dreidimensionale (geordnete) Punktwolken vor. Abb. 1 zeigt ein Beispiel von vier Laserscanner-Punktwolken vor und nach der Orientierung. Das Objekt ist ein Bronzering-Schmuckstück aus der Hallstattzeit, welches in Salzburg gefunden wurde und mit einem Minolta VI-900 3D-Laserscanner der TU Wien (und teilweiser Verwendung eines Drehtellers) digitalisiert worden ist.

Da es noch keinen zufriedenstellenden vollautomatischen Algorithmus zur Orientierung der einzelnen Aufnahmen gibt, ist die Orientierung der einzelnen Laserscanner-Punktwolken momentan auch in professionellen Softwarepaketen ein semiautomatischer Vorgang: Der Benutzer bringt zuerst die einzelnen Punktwolken interaktiv (z.B. durch Auswählen dreier Paare korrespondierender Punkte, siehe Abb. 2) in eine „gute“ gegenseitige Startlage, und erst dann werden automatische Algorithmen verwendet, welche die Orientierung optimieren. Die Grundlagen der wichtigsten dieser Algorithmen werden in diesem Artikel beschrieben:

- Orientierung zweier Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen
 - Explizite Lösung
 - Iterativer Algorithmus
- Orientierung von mehreren Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen: Iterativer Algorithmus
- Orientierung ohne feste Korrespondenzen
 - ICP-Algorithmus I: Punkt-zu-Punkt Abstand
 - ICP-Algorithmus II: Punkt-zu-Ebene Abstand

Im Anhang fassen wir die im Artikel verwendeten Grundlagen aus der Kinematik, insbesondere Quaternionen, zusammen.

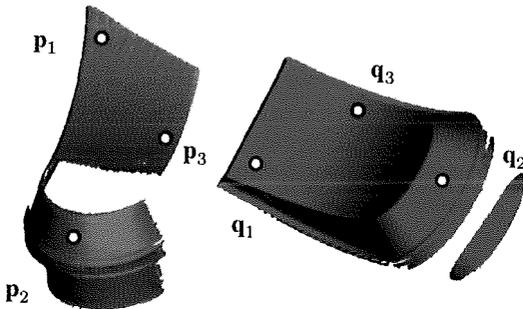


Abb. 2: Manuelle Orientierung zweier Punktwolken durch interaktive Auswahl dreier Paare (p_1, q_1) , (p_2, q_2) , (p_3, q_3) korrespondierender Punkte auf der festgehaltenen (links) und der zu bewegenden Punktwolke (rechts).

2. Orientierung zweier Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen

Die einfachste Aufgabenstellung im Bereich der Orientierung von Punktwolken ist die Orientierung von zwei Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen. Gegeben sind zwei Punktwolken $X = (x_1, \dots, x_N)$, $Y = (y_1, \dots, y_N)$ und Punkte mit demselben Index seien zueinander korrespondierend. Das Ziel ist nun eine Euklidische

Bewegung m (repräsentiert durch Verschiebungsvektor r und Drehmatrix R),

$$m(x) := x' = r + R \cdot x,$$

so zu bestimmen, dass die Punktwolke X ‚möglichst nahe‘ an die Punktwolke Y kommt. Formuliert man dies im Sinne der Methode der kleinsten Quadrate, so erhalten wir folgende Funktion, welche zu minimieren ist:

$$\sum_{i=1}^N \|x_i - y_i\|^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Wir fassen zuerst eine von [6] angegebene explizite Lösung zusammen und präsentieren dann einen alternativen Algorithmus von [11].

2.1. Explizite Lösung

Die explizite Lösung verwendet Quaternionen (siehe Anhang A) und kann in zwei Schritten beschrieben werden:

Lemma 1. Die beste Euklidische Bewegung

bringt den Schwerpunkt $s_x := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ der Punktwolke X in den Schwerpunkt $s_y := \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ der Punktwolke Y .

Beweis. Wir suchen ein Minimum der quadratischen Funktion

$$F(r, R) = \sum_i (x_i - y_i)^2 = \sum_i (r + R \cdot x_i - y_i)^2. \quad (2)$$

Unter den notwendigen Bedingungen für ein Minimum von (2) sind die drei skalaren Gleichungen

$$\frac{\partial F}{\partial r} = 2 \sum_i (r + R \cdot x_i - y_i) = 0. \quad (3)$$

Falls die gesuchte Euklidische Bewegung s_x auf s_y abbildet, gilt $s_y = r + R \cdot s_x$, d.h.,

$$f = s_y - R \cdot s_x. \quad (4)$$

Setzen wir (4) in (3) ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} & \sum_i (s_y - R \cdot s_x + R \cdot x_i - y_i) \\ &= \sum_i (s_y - y_i) + R \sum_i (x_i - s_x) = 0. \end{aligned}$$

Wir sehen also, dass die Gültigkeit von (3) bewirkt, dass der Schwerpunkt s_x von X in den Schwerpunkt s_y von Y abgebildet wird.

Lemma 2. Die optimale Drehung R ist gegeben durch den Eigenvektor $q \in R^4$ zum größten Eigenwert der Matrix $M \in R^{4 \times 4}$, welche in Gleichung

chung (9) definiert ist mit Bezeichnungen aus (7), (8) und Anhang A.1. Aus $\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ kann die Drehmatrix R mit Satz 1 aus Anhang A.1 berechnet werden.

Beweis. Auf die Punktwolke X wenden wir die Schiebung $\mathbf{s}_x \rightarrow \mathbf{s}_y$ an, siehe Lemma 1. Dann wählen wir \mathbf{s}_y als neuen Ursprung und bezeichnen die so verschobene Punktwolke wieder mit X . Nun berechnen wir eine Drehung um den Ursprung O_x , $\mathbf{x}' = R\mathbf{x}$ (mit einer orthogonalen Matrix R , d.h. $R^T R = R R^T = E$ mit der 3×3 Einheitsmatrix E), so dass

$$\begin{aligned} F &= \sum_i \|\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i\|^2 = \sum_i (R\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i)^2 \\ &= \sum_i (\mathbf{x}_i^T R^T - \mathbf{y}_i^T)(R\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i) \\ &= \sum_i (\mathbf{x}_i^T R^T R \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i^T R \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^T R^T \mathbf{y}_i + \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i) \\ &= \sum_i (\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i + \mathbf{y}_i^T \mathbf{y}_i - 2\mathbf{y}_i^T R \mathbf{x}_i) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (5)$$

Um (5) zu minimieren müssen wir R so bestimmen, dass

$$\sum_i \mathbf{y}_i^T R \mathbf{x}_i \rightarrow \max. \quad (6)$$

Wir schreiben die Drehung $\mathbf{x}_i \rightarrow R\mathbf{x}_i$ mit einer Einheitsquaternion \mathbf{q} , und verwenden einige Eigenschaften des Rechnens mit Quaternionen (siehe Anhang A.1),

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_i^T R \mathbf{x}_i &= \langle \mathbf{y}_i, R\mathbf{x}_i \rangle = \langle \mathbf{y}_i, \mathbf{q} \circ \mathbf{x}_i \circ \bar{\mathbf{q}} \rangle = \langle \mathbf{y}_i \circ \mathbf{q}, \mathbf{q} \circ \mathbf{x}_i \rangle \\ &= \langle Y_i \mathbf{q}, \tilde{X}_i \mathbf{q} \rangle = \mathbf{q}^T Y_i^T \tilde{X}_i \mathbf{q}. \end{aligned} \quad (7)$$

Daraus folgt, dass wir die folgende quadratische Funktion maximieren müssen

$$\sum_i \mathbf{y}_i^T R \mathbf{x}_i = \sum_i \mathbf{q}^T Y_i^T \tilde{X}_i \mathbf{q} = \mathbf{q}^T M \mathbf{q} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Dabei ist

$$M := \sum_i Y_i^T \tilde{X}_i, \quad (9)$$

und die Nebenbedingung für die Maximierung von (8) lautet

$$\|\mathbf{q}\|^2 = \mathbf{q}^T \mathbf{q} = 1. \quad (10)$$

Dies führt bekanntlich auf die Lösung eines Eigenwertproblems. Der gemäß (10) normierte Eigenvektor $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^4$ zum größten Eigenwert der Matrix M liefert die gewünschte Lösung.

2.2. Iterativer Algorithmus

Wir diskutieren nun einen iterativen Algorithmus für die Orientierung von zwei Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen. Dieser iterative Algorithmus hat im Vergleich zur expliziten Lösung im Abschnitt 2.1. den Nachteil, dass die

gegenseitige Orientierung der beiden Punktwolken näherungsweise bekannt sein muss. Jedoch bietet sie im Gegensatz zur expliziten Lösung den Vorteil, dass sie auf beliebig viele simultan einzupassende Punktwolken erweitert werden kann; siehe Abschnitt 3.

Da die Punktwolke X also bereits näherungsweise zur festen Punktwolke Y orientiert ist, brauchen wir nur mehr eine kleine Verlagerung $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ von X zu betrachten. Im Anhang A.3 wird gezeigt, dass eine solche – streng genommen differentielle – Verlagerung $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{v}(\mathbf{x})$ mit Hilfe des Geschwindigkeitsvektorfelds $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ beschrieben werden kann:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x}. \quad (11)$$

Die Verlagerung $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ der Punktwolke X soll so bestimmt werden, dass der Abstand zwischen $\mathbf{x}_i + \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)$ und \mathbf{y}_i minimiert wird:

$$F(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}) = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i + \mathbf{v}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{y}_i\|^2 = \sum_{i=1}^N \|\mathbf{x}_i + \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i\|^2.$$

Die Minimierungsfunktion $F(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}})$ ist quadratisch in den Unbekannten \mathbf{c} , $\bar{\mathbf{c}}$ ist. Es seien $\mathbf{d}_i := \mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i$; $\mathbf{u} := (\mathbf{c}^T, \bar{\mathbf{c}}^T)^T$, und

$$B(\mathbf{x}) := \begin{pmatrix} 0 & x_3 & -x_2 & 1 & 0 & 0 \\ -x_3 & 0 & x_1 & 0 & 1 & 0 \\ x_2 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Dann gilt $\bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x} = B \cdot \mathbf{u}$. Ein Minimum von F ist durch die Lösung des folgenden linearen Gleichungssystems gegeben:

$$\sum_{i=1}^N B_i^T B_i \cdot \mathbf{u} = \sum_{i=1}^N B_i^T \mathbf{d}_i, \quad (13)$$

mit $B_i := B(\mathbf{x}_i)$. Wendet man das so berechnete Geschwindigkeitsvektorfeld auf die Punktwolke an, so wird diese nicht wie gewünscht ‚starr‘ verlagert, sondern affin verzerrt. Diese Affinität resultiert daher, dass der Ansatz (11) nur im Differentiellen eine starre, d.h. Euklidische, Transformation beschreibt. Deshalb verwenden wir nicht die berechnete affine, sondern eine Euklidische Transformation, welche die Punkte \mathbf{x}_i in eine Position \mathbf{x}'_i nahe an $\mathbf{x}_i + \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)$ bringt, siehe Abb. 3. Die Wahl dieser abgeleiteten Euklidischen Transformation hängt dabei vom berechneten Vektor \mathbf{u} ab:

- $\mathbf{c} = \mathbf{0}$: wende die *Schiebung* mit Schiebvektor $\bar{\mathbf{c}}$ an.
- $\mathbf{c} \neq \mathbf{0}$: berechne aus $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}})$ mit (47) die Achse G (mit Richtungsvektor \mathbf{g} und Momentenvektor $\bar{\mathbf{g}}$) und den Schraubparameter p , sowie berechne den Drehwinkel als $\varphi = \arctan \|\mathbf{c}\|$; – falls $\mathbf{c} \cdot \bar{\mathbf{c}} = 0$: wende die *Drehung* um G mit Drehwinkel φ an

- falls $\mathbf{c} \cdot \bar{\mathbf{c}} \neq 0$: wende die *Schraubung* mit Achse G , Drehwinkel φ und Schiebanteil parallel zu G mit Länge $p \cdot \varphi$ an.

Im allgemeinen Fall läßt sich die Zusammensetzung der Drehung um die Achse G mit Drehwinkel φ , und der Schiebung parallel zu G mit der Schieblänge $p \cdot \varphi$ wie folgt berechnen:

$$\mathbf{x}' = R(\mathbf{x} - \mathbf{p}) + (p \cdot \varphi) \mathbf{g} + \mathbf{p}. \quad (14)$$

Dabei ist R eine Drehmatrix (welche mit Bemerkung 7 und Satz 1 berechnet wird), und \mathbf{p} ist ein beliebiger Punkt auf G (z.B. $\mathbf{p} = \mathbf{g} \times \bar{\mathbf{g}}$).

Nun iterieren wir die Berechnung des Geschwindigkeitsvektorfeldes und der daraus abgeleiteten Euklidischen Transformation bis wir ein Minimum der Funktion F gefunden haben.

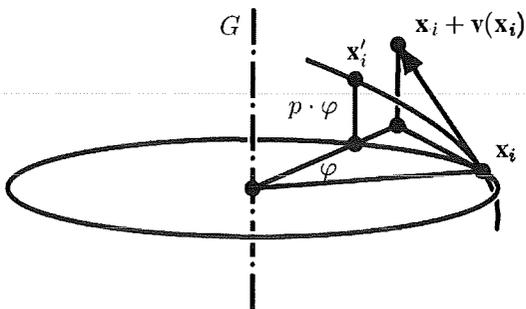


Abb. 3: Neue Euklidische Position \mathbf{x}'_i eines Punktes \mathbf{x}_i , im Gegensatz zur affinen Position $\mathbf{x}_i + \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)$.

Bemerkung 1. Falls man mit Ausreißern in den Daten rechnen muss, wird man eine gewichtete Fehlerquadratsumme minimieren und in einer Gewichtiteration den Einfluss der Ausreißer schrittweise zurückdrängen. Dies gilt auch für die folgenden Algorithmen, wird dort aber nicht mehr gesondert erwähnt.

3. Simultane Orientierung von mehreren Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen

Wir fassen in diesem Absatz einen in [11] beschriebenen Algorithmus zusammen. Gegeben seien K Punktwolken ein und desselben Objektes, welche einander teilweise überlappen. Des weiteren seien bereits Korrespondenzen (mit einem gewissen Konfidenzwert) zwischen Punkten der einzelnen Punktwolken bekannt. Diese können zum Beispiel mit Hilfe von zusätzlich aufgenommenen digitalen Fotos gefunden werden. Die K Punktwolken werden als starre Systeme angenommen und mit Σ_i , $i = 1, \dots, K$ bezeichnet. Eine beliebige Anzahl (≥ 1) der gegebenen Punktwolken wird festgehalten. Die anderen

Punktwolken sollen so bewegt werden, dass nach der Anwendung der berechneten Verlagerungen die Summe der quadrierten Distanzen zwischen korrespondierenden Punkten, gewichtet mit den Konfidenzwerten, minimal wird. Für $K > 2$ ist nur mehr ein iterativer Algorithmus möglich.

Nur jene Punkte jeder Punktwolke werden im Algorithmus verwendet, welche im Überlappungsbereich mit einer oder mehreren anderen Punktwolken liegen. Die N Paare korrespondierender Punkte sind durch $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ mit $\mathbf{x}_i \in \Sigma_j$ und $\mathbf{y}_i \in \Sigma_k$ gegeben. Jedes korrespondierende Punktepaar habe einen Konfidenzwert $w_i \in (0,1]$.

Da wir nur kleine Verlagerungen erwarten, verwenden wir wieder Geschwindigkeitsvektorfelder. Die Verlagerung des Systems Σ_j gegenüber einem fixen System Σ_0 ist durch zwei Vektoren $\mathbf{c}_j, \bar{\mathbf{c}}_j \in \mathbb{R}^3$ gegeben. Der Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v}_{j0}(\mathbf{x}_i)$ eines Punktes $\mathbf{x}_i \in \Sigma_j$ ist dann gegeben als

$$\mathbf{v}_{j0}(\mathbf{x}_i) = \bar{\mathbf{c}}_j + \mathbf{c}_j \times \mathbf{x}_i. \quad (15)$$

Für ein Paar korrespondierender Punkte $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ möchten wir den Abstand nach Verlagerung der Systeme Σ_j und Σ_k abschätzen. Für eine Näherung erster Ordnung verwenden wir die Geschwindigkeitsvektorfelder. Damit berechnet sich der quadrierte Abstand zweier verlagerter Punkte \mathbf{x}_i und \mathbf{y}_i als

$$Q_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) = (\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{j0}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{y}_i + \mathbf{v}_{k0}(\mathbf{y}_i))^2 = (\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i + (\bar{\mathbf{c}}_j + \mathbf{c}_j \times \mathbf{x}_i) - (\bar{\mathbf{c}}_k + \mathbf{c}_k \times \mathbf{y}_i))^2. \quad (16)$$

Der Ausdruck $Q_1(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ ist eine quadratische Funktion in den Unbekannten $\mathbf{c}_j, \bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{c}_k, \bar{\mathbf{c}}_k$.

Eine Alternative zu (16) ist die folgende: Anstatt die Bewegung von Σ_j gegenüber Σ_0 , und die Bewegung von Σ_k gegenüber Σ_0 zu linearisieren, kann man die Relativbewegung von Σ_j gegenüber Σ_k linearisieren. Der Geschwindigkeitsvektor \mathbf{v}_{jk} eines Punktes $\mathbf{x}_0 \in \Sigma_j$ für diese Relativbewegung ist gegeben durch

$$\mathbf{v}_{jk}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{v}_{j0}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{v}_{k0}(\mathbf{x}_i). \quad (17)$$

Der zu minimierende Abstand ist nun zwischen den Punkten $\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{jk}(\mathbf{x}_i)$ und \mathbf{y}_i (d.h., \mathbf{x}_i wird mit dem System Σ_j relativ zum Punkt \mathbf{y}_i des Systems Σ_k verlagert). Der quadrierte Abstand dieser beiden Punkte ist gegeben als

$$Q_2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) = (\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_{jk}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{y}_i)^2 = (\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i + (\bar{\mathbf{c}}_j + \mathbf{c}_j \times \mathbf{x}_i) - (\bar{\mathbf{c}}_k + \mathbf{c}_k \times \mathbf{x}_i))^2. \quad (18)$$

Der Ausdruck $Q_2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ ist wieder eine quadratische Funktion in den Unbekannten $\mathbf{c}_j, \bar{\mathbf{c}}_j, \mathbf{c}_k, \bar{\mathbf{c}}_k$. Jedes Paar korrespondierender Punkte trägt einen entsprechenden Ausdruck Q_1 oder Q_2 in den noch unbekanntem Bewegungsparametern

bei. Um die Summe der quadrierten Abstände zwischen allen Paaren korrespondierender Punkte zu minimieren, minimieren wir die folgenden gewichtete Summe:

$$F = \sum_i w_i Q_2(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i). \quad (19)$$

Das Gewicht w_i ist der bekannte Konfidenzwert des Punktpaares $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$. Da die Korrespondenzen bekannt sind, kann entweder Q_1 oder Q_2 verwendet werden. Die Minimierung der Funktion (19) führt auf die Lösung eines linearen Gleichungssystems in den $6K$ Unbekannten $\mathbf{c}_1, \bar{\mathbf{c}}_1, \mathbf{c}_2, \bar{\mathbf{c}}_2, \dots, \mathbf{c}_K, \bar{\mathbf{c}}_K$. Dieser Zugang erlaubt das Festhalten von mehr als einem System ganz einfach: Soll das System Σ_i fest bleiben, dann braucht man bloß \mathbf{c}_i und $\bar{\mathbf{c}}_i$ gleich Null setzen.



Abb. 4: Simultane Orientierung von 30 gegebenen Punktwolken (oben) mit bekannten Korrespondenzen. Ausschnitt mit 4 Punktwolken welche die überlappenden Bereiche zeigen (unten). Daten mit freundlicher Genehmigung von Gerhard Paar, Joanneum Research Graz.

Die eigentlichen Verlagerungen werden dann, wie in Absatz 2.2. beschrieben, für jedes System berechnet und angewendet. Die beschriebene Prozedur wird dann solange iteriert, bis ein gegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel zur simultanen Orientierung mehrerer Punktwolken mit bekannten Korrespondenzen, deren Orientierungen mit obigem Algorithmus optimiert wurden.

4. Orientierung ohne feste Korrespondenzen

Wir kommen nun zur automatischen Feinorientierung, welche ohne gegebene feste Korrespondenzen durchgeführt wird. Im folgenden sei P das bewegte System und M das festgehaltene. Ziel ist es nun P iterativ so zu transformieren, dass M und P im Überlappungsbereich möglichst gut zur Deckung kommen. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung präsentieren wir zwei Varianten des ICP (Iterative Closest Point) Algorithmus, welche (I) die Summe der quadrierten Punkt-zu-Punkt Abstände, und (II) die Summe der quadrierten Punkt-zu-Ebene Abstände minimieren. Eine Vielzahl von Varianten des ICP-Algorithmus wurden im letzten Jahrzehnt publiziert; einen guten Überblick bietet [12].

4.1. ICP-Algorithmus I: Punkt-zu-Punkt Abstand

Der ICP (Iterative Closest Point) Algorithmus wurde von Chen und Medioni [5] sowie Besl und McKay [1] eingeführt, und durchläuft die folgenden Schritte:

1. Im ersten Schritt jeder Iteration wird für eine bestimmte Anzahl von Datenpunkten aus der Punktwolke P der nächste Punkt auf der Fläche M bestimmt. Das ist der zeitintensivste Schritt des Algorithmus und sollte daher effizient implementiert werden. Wir erhalten so eine Folge von Punkten $Y = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots) \in M$ welche zu Punkten $X = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots) \subset P$ am nächsten liegen. Jeder Punkt \mathbf{x}_i korrespondiert dabei zu einem Punkt \mathbf{y}_i mit demselben Index i .
2. Im zweiten Schritt jeder Iteration wird jene Euklidische Bewegung m berechnet, welche die Funktion (1) minimiert. Die Lösung wird wie in Absatz 2.1. angegeben berechnet.

Nach dem zweiten Schritt wird die neue Position der Punktwolke P via $P_{\text{neu}} = m(P_{\text{alt}})$ berechnet. Anschließend werden die Schritte 1 und 2 wiederholt, und die Lage der Punktwolke P wird jeweils aktualisiert. Die Prozedur wird beendet, falls der Funktionswert einen gewissen Schwell-

wert unterschreitet, oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht wird.

Bemerkung 2. Hinsichtlich der Auswahl von Datenpunkten verweisen wir auf die Literatur [12], es sei jedoch hervorgehoben, dass für die Feinorientierung von Teilaufnahmen desselben Objektes ausschließlich Punkte aus Überlappungsbereichen der Punktwolken zu verwenden sind. Die Überlappungsbereiche folgen im ersten Schritt aus der manuell vorgenommenen Groborientierung.

4.2. ICP-Algorithmus II: Punkt-zu-Ebene Abstand

Im Gegensatz zur ICP-Variante I in Absatz 4.1. wird hier nicht der quadrierte Abstand zwischen korrespondierenden Punktpaaren minimiert, sondern der quadrierte Abstand zwischen Punkten der einen Punktwolke und den Tangentialebenen in den korrespondierenden Lotfußpunkten der anderen Punktwolke. Diese Idee findet sich bereits in Chen und Medioni [5]. Wir präsentieren hier eine Lösung, welche Überlegungen aus der Momentankinematik und Liniengeometrie verwendet und von Pottmann et al. [10] beschrieben wurde. Der erste Schritt besteht wie beim ICP-Algorithmus I im Bestimmen von Lotfußpunkten. Wir erhalten so wieder eine Folge von Punkten $Y = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots) \in M$, welche zu den Punkten $X = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots) \subset P$ am nächsten liegen. Dann linearisieren wir die gesuchte Euklidische Bewegung durch ein Geschwindigkeitsvektorfeld

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x}.$$

Eine ähnliche Idee, die Bewegung zu linearisieren, findet sich bereits bei [4].

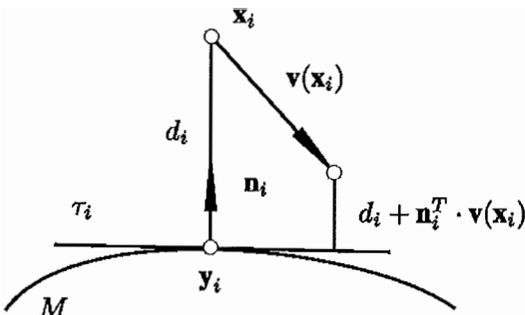


Abb. 5: Abstand Punkt zu Ebene.

Der Abstand eines Punktes $\mathbf{x}_i + \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)$ zur Tangentialebene τ_i im Punkt \mathbf{y}_i mit Einheitsnormalvektor \mathbf{n}_i von M ist gegeben durch $d_i + \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x}_i)$, siehe Abb. 5. Dabei ist d_i der orientierte Abstand von \mathbf{x}_i zu \mathbf{y}_i . Wir minimieren nun die Summe der quadrierten Abstände der Punkte \mathbf{x}_i zur jewei-

gen Tangentialebene im korrespondierenden Lotfußpunkt \mathbf{y}_i ,

$$F(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}) = \sum_{i=1}^N (d_i + \mathbf{n}_i^T \cdot (\bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x}_i))^2 \rightarrow \min. \quad (20)$$

Die Funktion (20) ist quadratisch in den Unbekannten $(\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}})$, die Lösung wird also durch Berechnen eines linearen Gleichungssystems gefunden. Wie in Absatz 2.2. wird die Punktwolke P dann nicht mit dem Geschwindigkeitsvektorfeld verlagert, sondern mit der daraus berechneten Euklidischen Bewegung m , welche eine Überlagerung einer Drehung um eine Achse G durch einen Winkel $\varphi = \arctan(\|\mathbf{c}\|)$ und einer Schiebung parallel zu G um die Länge $\rho \cdot \varphi$ ist. Für die Berechnung von G und ρ siehe Anhang A.3.

Wie in der Variante I des ICP-Algorithmus, siehe Absatz 4.1., wird die neue Lage der Punktwolke P via $P_{\text{neu}} = m(P_{\text{alt}})$ berechnet und dann wird die Prozedur so lange wiederholt, bis der Funktionswert eine bestimmte Schranke unterschreitet bzw. eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht wird.

Bemerkung 3. Flächen, die Teile von Zylinder-, Dreh- oder Schraubflächen darstellen, gestatten Bewegungen in sich. Daher ist eine rein auf Geometrie basierende Orientierung nicht eindeutig durchführbar. In der Praxis wird man dann auch Texturen oder andere Zusatzinformationen berücksichtigen.

4.3. Vergleich ICP I und ICP II

Um den Unterschied im Konvergenzverhalten zwischen ICP I und ICP II zu erklären, verwenden wir ein von Pottmann und Hofer [9] hergeleitetes Ergebnis über lokale quadratische Approximanten der quadrierten Distanzfunktion zu Kurven und Flächen. Wir fassen hier nur das Ergebnis für den Flächenfall zusammen. Eine nicht-negative quadratische Approximation F_d^+ der quadrierten Distanzfunktion zu einer Fläche in einem Raumpunkt \mathbf{p} ist im Gaußschen Dreiein (bestimmt durch die beiden Hauptkrümmungsrichtungen und die Flächennormale) im Normalenlotfußpunkt \mathbf{f} gegeben durch

$$F_d^+(x_1, x_2, x_3) = \frac{d}{d + \rho_1} x_1^2 + \frac{d}{d + \rho_2} x_2^2 + x_3^2. \quad (21)$$

Dabei sind ρ_1, ρ_2 die beiden Hauptkrümmungsradien im Flächenpunkt und $d = \|\mathbf{p} - \mathbf{f}\|$. Zwei Spezialfälle von (21) sind

$$F_\infty = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2, \text{ und } F_0 = x_3^2 \quad (22)$$

F_∞ ist die quadrierte Distanzfunktion zum Lotfußpunkt und F_0 ist die quadrierte Distanzfunktion zur Tangentialebene. In anderen Worten, F_∞ bzw. F_0 sind „gute“ lokale quadratische Approximationen der quadrierten Distanzfunktion in weit von der Fläche entfernten Punkten bzw. in nahe bei der Fläche liegenden Punkten. Der ICP-Algorithmus I verwendet F_∞ , während der ICP-Algorithmus II mit F_0 arbeitet. Damit wird das in Abb. 7 illustrierte unterschiedliche Konvergenzverhalten der beiden ICP-Varianten erklärt.

Bemerkung 4. Es ist leicht einzusehen, dass ICP I ein lineares Konvergenzverhalten aufweist. Hingegen lässt sich zeigen, dass ICP II quadratisch konvergiert, sofern die Abweichungen zwischen P und M im Überlappungsbereich gering sind.

4.4. Beispiele (Industrielle Inspektion)

Eine Aufgabenstellung aus der industriellen Praxis ist die folgende: Gegeben sind ein CAD (Computer Aided Design) Modell M eines Objektes und eine Laserscanner-Punktwolke P eines gefertigten Teils desselben Objektes. Man berechne und visualisiere die Abweichungen zwischen M und P zur Qualitätskontrolle von gefertigten Teilen.

Dies ist ein Orientierungsproblem ohne feste Korrespondenzen. Für das Beispiel in Abb. 6 haben wir synthetische Daten verwendet. Die Punktwolke wurde durch Auswählen bestimmter Punkte des CAD Modells generiert, und anschließend mit Gaußschem Rauschen versehen. Für die bessere Visualisierung ist die Punktwolke in Abb. 6 (a) zusammen mit einer transparenten Fläche abgebildet, welche allerdings für die Berechnung nicht verwendet wird. In jedem Iterationsschritt wird die oben beschriebene Schraubung berechnet und auf die Punktwolke angewendet. Nach vier Iterationsschritten von ICP II erhalten wir die in Abb. 6 (b) gezeigte Endlage.

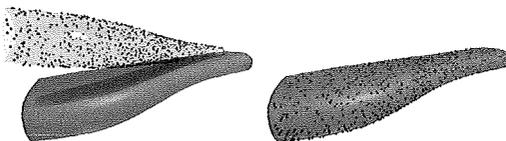


Abb. 6: Orientierung einer Punktwolke zu einer Fläche. (a) Startlage und (b) Endlage nach 4 Iterationsschritten mit ICP II.

In Abbildung 7 vergleichen wir die Konvergenzgeschwindigkeit von ICP I und ICP II, welche in Absatz 4.3. begründet wird. Anschaulich betrachtet erlaubt ICP II tangentielle Bewegungen der Punktwolke, was besonders in den spä-

teren Schritten des ICP-Algorithmus von Bedeutung ist.

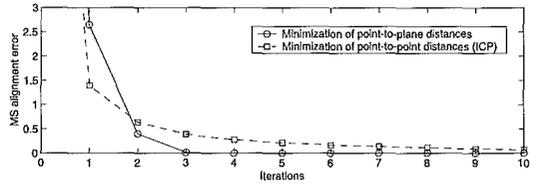


Abb. 7: Vergleich der Konvergenzgeschwindigkeit von ICP I mit ICP II.

Ein zweites Beispiel mit realen Daten zeigt in Abb. 8 (a) die Ausgangslage der Punktwolke zum CAD Modell und in Abb. 8 (b) die Endlage mit farbcodierten Abweichungen zwischen Punktwolke und CAD Modell.

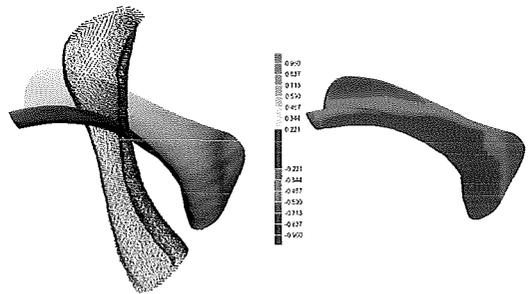


Abb. 8: Industrielle Inspektion. (a) Startlage und (b) Endlage mit farbcodierten Abweichungen. Abbildungen mit freundlicher Genehmigung der Firma Mediceram.

Bemerkung 5. Hat man die Aufgabenstellung, eine ganze Fertigungsserie desselben Objektes einer Qualitätskontrolle zu unterziehen, dann ist folgende Strategie sinnvoll, siehe [7]: In einem Vorverarbeitungsschritt wird der umgebende Raum des CAD-Modells in Zellen zerlegt, welche in einer geeigneten Datenstruktur abgespeichert werden. Für jede Zelle wird eine Funktion F_d (siehe Absatz 4.3.) berechnet und abgespeichert. Im Inspektionsschritt werden dann die Zellen bestimmt, in denen die beteiligten Punkte der Punktwolke liegen und F_d wird in den jeweiligen Zellen ausgewertet und diese Terme werden zu einer in den Unbekannten c, \bar{c} quadratischen Funktion aufsummiert. Die Minimierung erfolgt durch Lösung eines linearen Gleichungssystems. Da das zeitaufwendige Bestimmen von Korrespondenzen entfällt, ist damit eine Inspektion in Echtzeit durchführbar.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung ihrer Arbeit durch das FWF Projekt P16002-N05 und durch das innovative

A Kinematik

Eine umfassende Abhandlung über Kinematik findet man im Klassiker von Bottema und Roth [3].

A.1 Quaternionen

Eine *Quaternion* \mathbf{q} kann als Erweiterung einer komplexen Zahl auf vier Komponenten angesehen werden,

$$\mathbf{q} = q_0 + i q_1 + j q_2 + k q_3, \quad (23)$$

mit $q_0, \dots, q_3 \in \mathbb{R}$. Die Symbole i, j, k heißen *imaginäre Einheiten* und erfüllen die folgenden Rechenregeln

$$i \circ i = j \circ j = k \circ k = 1 \quad (24)$$

$$i \circ j = k = -j \circ i \quad (25)$$

$$j \circ k = i = -k \circ j \quad (26)$$

$$k \circ i = j = -i \circ k. \quad (27)$$

H sei die Menge aller Quaternionen. Die Addition $+$: $H \times H \rightarrow H$ von Quaternionen erfolgt komponentenweise. Die Multiplikation \circ : $H \times H \rightarrow H$ von Quaternionen folgt aus den obigen Multiplikationsregeln für die imaginären Einheiten, und ist nicht kommutativ. Daher bildet $(H, +, \circ)$ einen *Schiefkörper*. Zu jeder Quaternion \mathbf{q} ist die *konjugierte Quaternion* $\bar{\mathbf{q}}$ definiert als

$$\bar{\mathbf{q}} = q_0 - i q_1 - j q_2 - k q_3. \quad (28)$$

Für je zwei Quaternionen \mathbf{q}, \mathbf{p} gilt

$$\overline{\mathbf{q} \circ \mathbf{p}} = \bar{\mathbf{p}} \circ \bar{\mathbf{q}}. \quad (29)$$

Die *Norm* $N(\mathbf{q})$ und die *multiplikative Inverse* \mathbf{q}^{-1} einer Quaternion \mathbf{q} sind definiert bzw. gegeben als

$$N(\mathbf{q}) := q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = \mathbf{q} \circ \bar{\mathbf{q}} = \bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{q}, \quad (30)$$

$$\mathbf{q}^{-1} = \frac{\bar{\mathbf{q}}}{N(\mathbf{q})}. \quad (31)$$

Das *Skalarprodukt* zweier Quaternionen \mathbf{q}, \mathbf{p} ist gegeben durch das Skalarprodukt von zwei Vektoren des \mathbb{R}^4 ,

$$\langle \mathbf{q}, \mathbf{p} \rangle := q_0 p_0 + q_1 p_1 + q_2 p_2 + q_3 p_3, \quad (32)$$

und kann auch wie folgt berechnet werden,

$$\langle \mathbf{q}, \mathbf{p} \rangle = \frac{1}{2} (\mathbf{q} \circ \bar{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \circ \bar{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} (\bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{p} + \bar{\mathbf{p}} \circ \mathbf{q}). \quad (33)$$

Eine weitere nützliche Eigenschaft des Skalarprodukts von Quaternionen ist

$$\langle \mathbf{q} \circ \mathbf{p}, \mathbf{r} \rangle = \langle \mathbf{p}, \bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{r} \rangle. \quad (34)$$

Quaternionen-Multiplikation einer Quaternion \mathbf{x} mit einer Quaternion \mathbf{q} von links kann in Matrixschreibweise geschrieben werden als

$$\mathbf{q} \circ \mathbf{x} = \begin{pmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{x}.$$

Falls $N(\mathbf{q}) = q_0^2 + \dots + q_3^2 = 1$, dann ist die Matrix \mathbf{Q} orthogonal mit $\det \mathbf{Q} = 1$. Quaternionen-Multiplikation einer Quaternion \mathbf{x} mit einer Quaternion \mathbf{q} von rechts kann in Matrixschreibweise geschrieben werden als

$$\mathbf{x} \circ \mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{Q}} \cdot \mathbf{x}.$$

Die Matrix $\tilde{\mathbf{Q}}$ unterscheidet sich von \mathbf{Q} nur in der rechten unteren 3×3 Untermatrix, welche die Transponierte der entsprechenden Untermatrix von \mathbf{Q} ist. Wieder gilt, dass $\tilde{\mathbf{Q}}$ orthogonal ist, falls $N(\mathbf{q}) = 1$.

Vektoren $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3$ werden in $H = \mathbb{R}^4$ als Quaternionen $(0, x_1, x_2, x_3) = i x_1 + j x_2 + k x_3$ eingebettet. Wegen (28) gilt dann $\bar{\mathbf{x}} = -\mathbf{x}$. Für eine Quaternion $\mathbf{q} = q_0 + i q_1 + j q_2 + k q_3$ heißen

$$S(\mathbf{q}) := q_0, \quad V(\mathbf{q}) := i q_1 + j q_2 + k q_3 \quad (35)$$

Skalarteil $S(\mathbf{q})$ bzw. *Vektorteil* $V(\mathbf{q})$. Analog zum Realteil und Imaginärteil einer komplexen Zahl, welche aus der komplexen Zahl und ihrer Konjugierten berechnet werden können, lassen sich Skalar- und Vektorteil einer Quaternion aus der Quaternion und ihrer Konjugierten wie folgt berechnen:

$$S(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} (\mathbf{q} + \bar{\mathbf{q}}), \quad V(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} (\mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}})$$

Wir studieren nun für $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ (d.h., $S(\mathbf{x}) = 0$) und eine feste Quaternion $\mathbf{q} \in H$ die Abbildung

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}' := \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}}. \quad (36)$$

Zuerst berechnen wir den Skalarteil von \mathbf{x}' ,

$$\begin{aligned} 2S(\mathbf{x}') &= \mathbf{x}' + \bar{\mathbf{x}}' = \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} + \overline{\mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}}} \\ &= \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} + \mathbf{q} \circ \bar{\mathbf{x}} \circ \bar{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} - \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

Das Bild \mathbf{x}' ist also wieder ein Vektor in \mathbb{R}^3 . Falls $N(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{q} = \mathbf{q} \circ \bar{\mathbf{q}} = 1$, dann gilt

$$N(\mathbf{x}') = \mathbf{x}' \circ \bar{\mathbf{x}}' = \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{q} \circ \bar{\mathbf{x}} \circ \bar{\mathbf{q}} = N(\mathbf{x}) \quad (38)$$

Also erhält die Abbildung die Länge von Vektoren. Somit ist für $N(\mathbf{q}) = 1$ die Abbildung (37) eine lineare Abbildung von $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ (mit $\det > 0$), welche Längen erhält. Die Abbildung beschreibt also eine Drehung (eine sphärische Bewegung).

Satz 1. Die Abbildung $\mathbf{x}' = \mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}}$ mit einer festen Einheitsquaternion $\mathbf{q} \in H$, $N(\mathbf{q}) = 1$, und $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ beschreibt eine Drehung $\mathbf{x}' = R \cdot \mathbf{x}$ mit der Drehmatrix

$$R = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix}. \quad (40)$$

Dies liefert eine explizite Parametrisierung der Gruppe der orthogonalen Matrizen mit den Parametern q_0, q_1, q_2, q_3 .

Bemerkung 6 (Berechnung der Drehmatrix aus Drehachse und Drehwinkel). Aus dem normierten Richtungsvektor \mathbf{g} der Drehachse und dem Drehwinkel φ berechnet man die Einheitsquaternion \mathbf{q} von Satz 1 wie folgt:

$$\mathbf{q} = \cos \frac{\varphi}{2} + \mathbf{q} \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (41)$$

Man beachte, dass \mathbf{q} und $-\mathbf{q}$ dieselbe Drehung darstellen, und dass \mathbf{q} unverändert bleibt, wenn man die Orientierung von \mathbf{g} und das Vorzeichen von φ gleichzeitig umkehrt.

Bemerkung 7. Für die Quaternionen-Multiplikation haben wir die Matrix-Schreibweisen $\mathbf{q} \circ \mathbf{x} = Q \cdot \mathbf{x}$ und $\bar{\mathbf{q}} \circ \mathbf{x} = Q^T \cdot \mathbf{x}$ hergeleitet. Damit läßt sich für $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ die folgende Darstellung der Abbildung $\mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}}$ herleiten,

$$\mathbf{q} \circ \mathbf{x} \circ \bar{\mathbf{q}} = \mathbf{y} \circ \bar{\mathbf{q}} = \tilde{Q}^T \cdot \mathbf{y} = \tilde{Q}^T \cdot \mathbf{q} \circ \mathbf{x} = \tilde{Q}^T Q \cdot \mathbf{x}, \quad (42)$$

mit $\mathbf{y} := \mathbf{q} \circ \mathbf{x}$. Die Matrix

$$\tilde{Q}^T Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & \\ 0 & R & & \\ 0 & & & \end{pmatrix}$$

ist eine orthogonale Matrix in \mathbb{R}^4 welche die orthogonale Matrix R aus (40) in der rechten unteren 3×3 Untermatrix enthält.

A.2 Plücker-Koordinaten

Es sei G eine Gerade im \mathbb{R}^3 und \mathbf{p} ein beliebiger Punkt auf G . Es seien weiters \mathbf{g} ein Richtungsvektor, und $\bar{\mathbf{g}} := \mathbf{p} \times \mathbf{g}$ der sogenannte Momentenvektor der Gerade G . Die sechs Koordinaten $(\mathbf{g}, \bar{\mathbf{g}})$ heißen *Plücker Koordinaten* von G . Sie besitzen folgende Eigenschaften:

- Der Momentenvektor ist unabhängig von der Wahl von \mathbf{p} auf G : Man wähle einen weiteren Punkt $\mathbf{p}' := \mathbf{p} + \lambda \mathbf{g}$ auf G , dann folgt $\mathbf{p}' \times \mathbf{g} = (\mathbf{p} + \lambda \mathbf{g}) \times \mathbf{g} = \mathbf{p} \times \mathbf{g}$.

- Die Plücker-Koordinaten sind *homogene Koordinaten*, da ein Richtungsvektor $\mathbf{g}' = \mu \mathbf{g}$ einen Momentenvektor $\bar{\mathbf{g}}' = \mathbf{p} \times \mathbf{g}' = \mu(\mathbf{p} \times \mathbf{g}) = \mu \bar{\mathbf{g}}$ mit demselben Faktor μ impliziert. Es gilt also, dass $\mu(\mathbf{g}, \bar{\mathbf{g}})$ dieselbe Gerade beschreibt wie $(\mathbf{g}, \bar{\mathbf{g}})$.
- Die Plücker-Bedingung $\mathbf{g}^T \cdot \bar{\mathbf{g}} = 0$ gilt.

Die Menge aller Geraden in \mathbb{R}^3 ist vierdimensional. Dies steht im Einklang mit der Homogenitätseigenschaft und die Plücker-Bedingung gelten. Hinsichtlich der Zusammenhänge von Liniengeometrie und Kinematik verweisen wir auf [8].

A.3 Das Geschwindigkeitsvektorfeld eines einparametrischen Bewegungsvorgangs

Wir betrachten einen nach der Zeit t parametrisierten Bewegungsvorgang eines starren Systems Σ gegenüber einem ruhenden System Σ_0 . In Σ und Σ_0 seien kartesische Koordinatensysteme ausgezeichnet. Dann lässt sich die Lage $\mathbf{x}_0(t)$ eines Punktes \mathbf{x} aus Σ in Σ_0 darstellen als

$$\mathbf{x}_0(t) = \mathbf{u}(t) + A(t) \cdot \mathbf{x}. \quad (44)$$

Hierbei ist $\mathbf{u}(t)$ die Position des Ursprungs von Σ und A ist eine orthogonale Matrix mit $\det A = 1$. Gleichung (44) ist auch eine Parameterdarstellung der Bahnkurve von \mathbf{x} .

Durch Differentiation erhält man die Geschwindigkeitsvektoren $\mathbf{v}_0(\mathbf{x}_0)$ der Punkte \mathbf{x} aus Σ . Es ist bekannt, dass sich die Geschwindigkeitsvektoren $\mathbf{v}_0(\mathbf{x}_0)$ aus den Punkten \mathbf{x}_0 linear nach dem folgenden Gesetz berechnen lassen:

$$\mathbf{v}_0(\mathbf{x}_0) = \bar{\mathbf{c}} + \mathbf{c} \times \mathbf{x}_0. \quad (45)$$

Offenbar ist $\bar{\mathbf{c}}$ Geschwindigkeitsvektor jenes Punktes des Gangsystems, welcher gerade mit dem Ursprung von Σ_0 zusammenfällt. Der Vektor $\mathbf{c} := (c_1, c_2, c_3)^T$ sammelt die drei wesentlichen Einträge der schiefssymmetrischen Matrix

$$C := \dot{A}A^T = \begin{pmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (46)$$

Man beachte $C \cdot \mathbf{x}_0 = \mathbf{c} \times \mathbf{x}_0$.

Es ist bekannt, dass das momentane Geschwindigkeitsvektorfeld eines einparametrischen Bewegungsvorgangs mit dem Geschwindigkeitsvektorfeld einer bestimmten Schraubung (in Sonderfällen Drehung oder Schiebung) übereinstimmt. Aus $\mathbf{c}, \bar{\mathbf{c}}$ kann man die Achse G , mit Plücker-Koordinaten $(\mathbf{g}, \bar{\mathbf{g}})$, und den Schraubpa-

parameter p dieser Momentanschraubung wie folgt berechnen (siehe [8]):

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{c}}{\|\mathbf{c}\|}, \bar{\mathbf{g}} = \frac{\bar{\mathbf{c}} - p\mathbf{c}}{\|\mathbf{c}\|}, p = \frac{\mathbf{c}^T \cdot \bar{\mathbf{c}}}{\mathbf{c}^2}. \quad (47)$$

Literatur

- [1] *Besl, P.J., McKay, N.D.* (1992): A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell.* 14 (2), 239–256.
- [2] *Blaschke, W.* (1960): *Kinematik und Quaternionen*. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- [3] *Bottema, O., Roth, B.* (1990): *Theoretical Kinematics*. Dover, New York.
- [4] *Bourdet, P., Clement, A.* (1988): A study of optimal-criteria identification based on the small displacement screw model. *Annals of the CIRP* 37, 503–506.
- [5] *Chen, Y., Medioni, G.* (1992): Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing* 10, 145–155.
- [6] *Horn, B. K. P.* (1987): Closed form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society A* 4, 629–642.
- [7] *Leopoldseder, S., Pottmann, H., Zhao, H.-K.* (2003): The d^2 -tree: A hierarchical representation of the squared distance function. Technical Report No. 101, Institute of Geometry, Vienna University of Technology.
- [8] *Pottmann, H., Wallner, J.* (2001): *Computational Line Geometry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [9] *Pottmann, H., Hofer, M.* (2003): Geometry of the squared distance function to curves and surfaces. In: Hege, H.-C. and Polthier, K., eds., *Visualization and Mathematics III*, Springer, 221–242.
- [10] *Pottmann, H., Leopoldseder, S., Hofer, M.* (2002a): Registration without ICP. Technical Report No. 91, Institute of Geometry, Vienna University of Technology.
- [11] *Pottmann, H., Leopoldseder, S., Hofer, M.* (2002b): Simultaneous registration of multiple views of a 3D object. *Proceedings PCV '02, Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3A, Commission III*, 265–270.
- [12] *Rusinkiewicz, S., Levoy, M.* (2001): Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Proc. 3rd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, Quebec.

Adresse der Autoren

Michael Hofer und Helmut Pottmann:
 Institut für Geometrie, Technische Universität Wien,
 Wiedner Hauptstr. 8–10, A-1040 Wien.
 email: hofer@geometrie.tuwien.ac.at,
 pottmann@geometrie.tuwien.ac.at

RICHTLINIEN für die Gestaltung von Beiträgen für die Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI)

1. Die Beiträge bitte in digitaler Form auf CD oder per email übermitteln. Im Falle von mathematischen Formeln oder Sonderzeichen (z.B. griechische Buchstaben) im Text unbedingt einen Ausdruck – analog per Post oder als PDF-Datei digital – mitsenden.
2. Angaben zum Textformat: ASCII-Textformat oder MS-Word (andere Formate bitte nur nach Rücksprache mit der Schriftleitung). Die endgültige Seitengestaltung erfolgt gemäß den bestehenden Layout-Vorschriften erst beim Satz in der Druckerei, daher bitte **keine** Silbentrennungen und **keine** Formatierungen (Einzüge, Tabulatoren, Fett, Kursiv, Unterstrichen, Spalteneinteilung etc.) vornehmen. Gestaltungsvorschläge dieser Art können in einem zusätzlichen Ausdruck beigelegt werden.
3. Für Hauptartikel wird benötigt:
 - Titel der Publikation
 - Name der Autoren
 - ein Portraitphoto (z.B. Passbild) pro Autor (bitte digital)
 - eine kurze Zusammenfassung und ein entsprechender englischsprachiger Abstract
 - Textteil (durch nummerierte Haupt- und Zwischenüberschriften bitte klar strukturieren) inkl. Formeln und Tabellen
 - Literaturangaben fortlaufend in eckiger Klammer [] nummeriert
 - Anschrift der Autoren (Titel, Name, Postanschrift und Email-Adresse)
 - Abbildungen und Tabellen
4. Mathematische Formeln nach Möglichkeit in das Word-Dokument integrieren, sonst als eigene Datei mitsenden und im Textteil die Position anmerken und unbedingt in analoger Form bzw. als PDF-Datei eindeutig lesbar beistellen
5. Abbildungen und Tabellen:
 - mit 1 beginnend fortlaufend nummerieren und mindestens einmal im Text erwähnen
 - Beschreibung der Abbildungen und Tabellen am Ende des Artikels gesondert anführen
 - im Manuskript die Stellen markieren, an denen Abbildungen bzw. Tabellen einzufügen sind
 - Abbildungen bitte digital, jeweils als eigene Datei und nicht in den Text integriert, in einem gängigen Bitmap-Format (JPG, TIF, GIF). Vektorformate sind nach Rücksprache mit der Schriftleitung möglich.
 - Bitte beachten Sie, dass wir für Abbildungen nach Möglichkeit ein Breite von 69 mm oder 143 mm vorsehen. In Ausnahmefällen ist auch eine Breite von 205 mm möglich, die Maximalhöhe beträgt dann jedoch 143 mm.
 - bei Tabellen kann ein analoger Layoutvorschlag beigelegt werden, komplexe Tabellen bitte am Ende des Artikels gesondert anführen
6. Bei Zitaten und Fremddabbildungen sind die dafür erforderlichen Abdruckgenehmigungen einzuholen, sowie erforderlichenfalls Quellenangaben beizubringen. Die diesbezügliche Verantwortlichkeit liegt beim Autor.

Im Sinne einer sparsamen Verwendung der finanziellen Mittel der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation als Herausgeber dieser Zeitschrift ist die Einhaltung dieser Richtlinien erforderlich.

Für Fragen und Auskünfte in diesem Zusammenhang steht Ihnen die Schriftleitung gerne zur Verfügung. Bitte wenden Sie sich an:

- *Dipl.-Ing. Wolfgang Gold, Krotenthallergasse 3, A-1080 Wien,
Tel. +43 (0)1 – 40 146-212, Fax +43 (0)1 – 40 146-333, Email: vgi@ovg.at*
- *Dipl.-Ing. Stefan Klotz, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien,
Tel. +43 (0)1 – 211 76-3609, Fax +43 (0)1 – 216 7551, Email: vgi@ovg.at*
- *Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien,
Tel. +43 (0)1 – 211 76-3209, Fax +43 (0)1 – 216 7551, Email: vgi@ovg.at*

Die nächste VGI
(Heft 1/2004)
erscheint im Juli 2004

Impressum

VGI

Österreichische Zeitschrift für
VERMESSUNG & GEOINFORMATION

91. Jahrgang 2003 / ISSN 0029-9650

Herausgeber und Medieninhaber: Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG), Austrian Society for Surveying and Geoinformation, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien zur Gänze. Bankverbindung: Österreichische Postsparkasse BLZ 60000, Kontonummer PSK 1190933.

Präsident der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Gert Steinkellner, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, Tel. (01) 21176-4604, Fax (01) 2167550.

Sekretariat der Gesellschaft: Dipl.-Ing. Karl Haussteiner, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, Tel. (01) 21176-2311, Fax (01) 2167551.

Schriftleitung: Dipl.-Ing. Wolfgang Gold, Krotenthallergasse 3, A-1080 Wien, Tel. (01) 40146-212, Fax (01) 40146-333, Dipl.-Ing. Stefan Klotz, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, Tel. (01) 21176-3609,

Fax (01) 2167551, Dipl.-Ing. Ernst Zahn, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, Tel. (01) 21176-3209, Fax (01) 2167551.

Manuskripte: Bitte direkt an die Schriftleitung senden. Es wird dringend ersucht, alle Beiträge in digitaler Form auf Diskette zu übersenden. Genaue Angaben über die Form der Abfassung des Textteiles sowie der Abbildungen (Autoren-Richtlinien) können bei der Schriftleitung angefordert werden. Beiträge können in Deutsch oder Englisch abgefaßt sein; Hauptartikel bitte mit einer deutschsprachigen Zusammenfassung und einem englischen Abstract einsenden. Namentlich gezeichnete Beiträge geben die Meinung des Autors wieder, die sich nicht mit der des Herausgebers decken muß. Die Verantwortung für den Inhalt des einzelnen Artikels liegt daher beim Autor. Mit der Annahme des Manuskriptes sowie der Veröffentlichung geht das alleinige Recht der Vervielfältigung und Wiedergabe auf den Herausgeber über.

Copyright: Jede Vervielfältigung, Übersetzung, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen sowie Mikroverfilmung der Zeitschrift oder von in ihr enthaltenen Beiträgen ohne Zustimmung des Herausgebers ist unzulässig

und strafbar. Einzelne Photokopien für den persönlichen Gebrauch dürfen nur von einzelnen Beiträgen oder Teilen davon angefertigt werden.

Anzeigenbearbeitung und -beratung: Dipl.-Ing. Wolfgang Gold, Krotenthallergasse 3, A-1080 Wien, Tel. (01) 40146-212. Unterlagen über Preise und technische Details werden auf Anfrage gerne zugesendet.

Erscheinungsweise: Vierteljährlich in zwangloser Reihenfolge (1 Jahrgang = 4 Hefte). Auflage: 1500 Stück.

Abonnement: Nur jahrgangsweise möglich. Ein Abonnement gilt automatisch um ein Jahr verlängert, sofern nicht bis zum 1.12. des laufenden Jahres eine Kündigung erfolgt. Die Bearbeitung von Abonnementangelegenheiten erfolgt durch das Sekretariat. Adreßänderungen sind an das Sekretariat zu richten.

Verkaufspreise: Einzelheft: Inland 15 €, Ausland 18 €; Abonnement: Inland 50 €, Ausland 60 €; alle Preise exclusive Mehrwertsteuer.

Satz und Druck: Druckerei Berger, A-3580 Horn, Wiener Straße 80.

Home
Aktuelles
Die Adresse ...

Geobasisdaten Austria

für Eich- und Ver

Information

www.bev.gv.at

Vermessungs-
behörde

Natio-
Metro-
Inst
(NF



Bundes

Information
Sitemap

Vermessungswesen

Mess- und Eichwesen



Nationales
Metrologie-
Institut
(NF)

Physikalisch-
technischer
Prüfdienst
(PTP)

Gesetz
Mess-
(Eich)

Vermessung und Geo



Geobasisdaten Austria Ma

Information



Vermessungs-
behörde

... mit dem neuen Service!

See you:
www.bev.gv.at

Willkommen bei



Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen