



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 646

Christoph Dold

**Ebenenbasierte Verfahren
für die automatische Registrierung
terrestrischer Laserscans**

München 2010

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5058-7

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 283, Hannover 2010



DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 646

**Ebenenbasierte Verfahren
für die automatische Registrierung
terrestrischer Laserscans**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christoph Dold

München 2010

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5058-7

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 283, Hannover 2010

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer

Referent: Dr.-Ing. Claus Brenner

Korreferenten: Prof. Dr.Ir. M.G. Vosselman

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

Tag der Einreichung der Arbeit: 08.06.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 12.10.2009

© 2010 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325

ISBN 978-3-7696-5058-7

Zusammenfassung

Die Aufnahme von Objekten mittels terrestrischen Laserscannern gewinnt in vielen Bereichen zunehmend an Bedeutung. Das terrestrische Laserscanning zeichnet sich vor allem durch eine sehr schnelle und flächenhafte Objekterfassung aus. Die Messpunkte werden über eine reflektorlose Entfernungsmessung gewonnen, wodurch sich das Messverfahren auch für die Aufnahme von schwer zugänglichen Objekten eignet. Ergebnis einer Messung ist eine sogenannte *Punktwolke*, welche typischerweise mehrere hunderttausend bis hin zu einigen Millionen Einzelpunkte enthält. Für die straßenseitige Erfassung von Gebäudefassaden oder die Aufnahme von Einzelgebäuden sind normalerweise mehrere Standpunkte notwendig, die nach der Datenerfassung miteinander verknüpft werden müssen. Dies erfordert in der Regel eine manuelle Interaktion. Die Verknüpfung der Daten, auch als *Registrierung* bezeichnet, erfolgt derzeit üblicherweise über die zusätzliche Erfassung von künstlichen Marken oder auch händisch mit speziellen Softwarepaketen. In dieser Arbeit werden neue ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscanning Daten vorgestellt und bewertet. Grundlagen für die Berechnung der Verknüpfungsparameter über identische Punkte, Ebenen und über unbekannte Korrespondenzen werden beschrieben, und vorhandene Verfahren zur Registrierung von Entfernungs- oder 3D-Punktdaten werden in verschiedene Gruppen eingeteilt. Dabei wird zunächst zwischen einer Grob- und einer Feinregistrierung unterschieden und die Verfahren anhand deren Methodik weiter unterteilt, beschrieben und diskutiert.

Eine Automatisierung der Registrierung ist durch die Verwendung ebener Regionen möglich. Aus zugeordneten Ebenen können die Verknüpfungsparameter berechnet werden. Die erfassten Scandaten städtischer Gebiete enthalten aufgrund der Bebauung und der Straßenflächen zahlreiche ebene Regionen, die einerseits schnell extrahiert und andererseits für die Berechnung der Verknüpfungsparameter genutzt werden können. Für die automatische Registrierung erfolgt im ersten Schritt eine Segmentierung von terrestrischen Laserscandaten in ebene Regionen. Dabei werden zusammenhängende Regionen in den Daten automatisch extrahiert. Eine gerasterte Datenstruktur mit mehreren Ebenen beschleunigt die Suche und Extraktion der Ebenen. In Anlehnung an Verfahren aus der Bildverarbeitung können Maskenoperationen auf die dreidimensionalen Messdaten angewandt werden. Die Anpassung eines Bereichswachstumsverfahrens an die Scandaten ermöglicht die vollautomatische Extraktion von ebenen Regionen.

Die Registrierung der Punktwolken erfolgt über Zuordnungsverfahren der extrahierten Ebenen. Ansätze für die paarweise Registrierung basierend auf den Ergebnissen der Segmentierung in ebene Regionen werden präsentiert und diskutiert. Es werden Verfahren beschrieben, welche globale und lokale Merkmale für die Bestimmung der Transformationsvorschrift verwenden. Das sogenannte *Extended Gaussian Image*, eine Darstellung eines 3D-Objekts über dessen Flächennormalen, wird für die Registrierung verwendet. Die globale Verteilung der Flächennormalen zweier Laserscans gibt Auskunft über deren Orientierung zueinander. Die maximale Übereinstimmung wird über ein Korrelationsverfahren ermittelt. Die symbolischen Zuordnungsverfahren nutzen dagegen lokale Merkmale. Ein entwickeltes *formbasiertes Zuordnungsverfahren* nutzt geometrische Eigenschaften und Intensitätswerte der segmentierten Regionen für die Suche nach korrespondierenden Merkmalen in den zu verknüpfenden Standpunkten. Ohne die Verwendung spezieller Eigenschaften der extrahierten Ebenen sind Suchverfahren für die Bestimmung der Korrespondenzen zwischen den extrahierten Ebenen erforderlich. Aufgrund der Größe des Suchraums werden geeignete Restriktionen eingeführt, die den Suchraum begrenzen und schnell zu den gesuchten Verknüpfungsparametern führen. Ein neues *orientierungsbasiertes Zuordnungsverfahren* sowie die Verwendung von *Winkelbedingungen* für die Zuordnung werden präsentiert, welche die Lage der extrahierten Ebenen im Raum für die Suche nach Korrespondenzen ausnutzen. Für die Verifikation korrekter Lösungen werden Varianten an Fitnessfunktionen vorgestellt, die eine Bewertung der ermittelten Lösung erlauben.

Ein realer Datensatz bestehend aus insgesamt 20 Laserscans, aufgenommen in einem städtischen Gebiet, wird für die Evaluierung der entwickelten Verfahren herangezogen. Die Standpunkte sind in dem Datensatz systematisch gewählt und der Abstand zum ersten Scan ist stets vergrößert worden, so dass sich der Überlappungsbereich zwischen den Scans verringert. Die Orientierung des Laserscanners ist bei jedem Standpunkt geändert worden, und an acht Standpunkten wurde das Instrument verkippt aufgestellt. Die entwickelten Verfahren, eine Registrierung über *Extended Gaussian Images*, die formbasierte und orientierungsbasierte Zuordnung von Ebenen sowie die Verwendung von *Winkelbedingungen* für die Zuordnung, werden anhand des Datensatzes untersucht und bewertet. Die Ergebnisse zeigen die Eignung der Verfahren für die Registrierung von terrestrischen Laserscanning Daten städtischer Gebiete.

Schlagwörter:

Registrierung, Orientierungsbestimmung, Terrestrisches Laserscanning, Segmentierung, Zuordnungsverfahren

Abstract

The acquisition of objects using terrestrial laser scanners is becoming increasingly popular. The method of terrestrial laser scanning is especially characterized by a very fast and extensive object acquisition. Measured points are recorded by a distance measurement without using reflectors, which makes the method suitable for hard accessible objects. The result of a measurement is a *point cloud*, which typically contains several hundred thousands and up to several millions of points. For the acquisition of building facades or the acquisition of single buildings, usually several points of views are necessary, which must be orientated to each other after data acquisition. This process normally requires manual interaction. The orientation is also termed as *registration* and is up to now normally done by the additional acquisition of artificial targets or manually using special software packages. Within this work new automatic methods for the registration of terrestrial laser scanning data using planar structures are proposed and evaluated. Principals for the calculation of the orientation parameters using identical points, planes and unknown correspondences are described, existing methods for the registration of range or 3D-point data are divided into different groups. Thereby course- and fine registration is distinguished and the methods are subdivided by the means of their methodology, described and discussed.

An automation of the registration process is possible using planar regions. Matched planes can be used to calculate the orientation parameters. Due to built-up areas and road surfaces, acquired laser scanning data of urban areas contains lots of planar regions, which can be extracted quickly from the data and also be used for the calculation of the orientation parameters. In the first step of the approach a segmentation of the terrestrial laser scanning data in planar regions is performed. Thereby coherent planar patches are automatically extracted from the data. A raster data structure with several layers speeds up the search and extraction of planes. Referring to image processing procedures mask operators are adapted to the 3D point data. The adaption of a region growing algorithm makes the fully automatic extraction of planar patches possible.

The registration of the point clouds is done by matching extracted planes. Approaches for the pair wise registration based on the results of the segmentation in planar patches are presented and discussed. Methods are described, which use global and local features for the determination of the transformation parameters. *Extended Gaussian Images*, a description of 3D-objects with surface normals, are used for the registration process. The global distribution of the surface normals shows the orientation between two laser scans. The maximum consensus is determined using a correlation technique. In contrast, symbolic matching algorithms are using local features. A developed *feature-based matching method* is using geometric properties and intensity values of the segmented patches for the search for corresponding features of the views to register. Without using special features of the extracted planes, search algorithms are required to detect correspondences between the patches. Due to the size of the search space suitable restrictions are introduced to cut off the search space and to find the orientation parameters quickly. A new *orientation-based matching method* and also the use of *angle constraints* for the matching are presented. The methods use the orientation of the extracted planes in space for finding correspondences. The verification of correct solutions is done with score functions, which allow an evaluation of the detected solution.

A real dataset containing 20 laser scans in total was recorded in an urban environment and is used for the evaluation of the developed algorithms. The points of views were selected systematically, the distance from the first scan is increased steadily, which results in a decreasing overlapping of the scans. The orientation of the laser scanner varies in each scan position. In eight points of views the instrument setup is tilted. The developed algorithms, registration using Extended Gaussian Images, the feature- and orientation based matching of planar patches and using angle restrictions for the matching, are evaluated using the dataset. The results show the applicability of the methods for the registration of terrestrial laser scanning data in urban environments.

Keywords:

Registration, Orientation estimation, Terrestrial Laserscanning, Segmentation, Matching

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Abstract	4
1 Einführung	7
1.1 Interpretation und Modellierung terrestrischer Laserscanning Daten	8
1.2 Motivation für eine automatische Registrierung von Punktwolken	9
1.3 Gliederung der Arbeit	10
2 Terrestrisches Laserscanning	11
2.1 3D-Entfernungsmessinstrumente	11
2.1.1 Funktionsweise von Laserscannern	12
2.1.2 Triangulationsmessverfahren	14
2.1.3 Laufzeitmessverfahren	15
2.1.4 Beispiele	16
2.2 Messeigenschaften terrestrischer Laserscanner	16
2.3 Einsatz von Laserscanning	19
2.3.1 Statisches terrestrisches Laserscanning	19
2.3.2 Kinematisches terrestrisches Laserscanning	20
2.3.3 Systemkomponenten eines MLS Systems	21
2.3.4 Beispiele für mobile Messsysteme	21
2.3.5 Hybride Messsysteme	23
2.3.6 Anwendungen des terrestrischen Laserscannings	25
2.4 Zusammenfassung	26
3 Registrierung von terrestrischen Scandaten	27
3.1 Registrierung über identische Punkte	27
3.1.1 Berechnung der Transformationsparameter	28
3.1.2 Transformationsbestimmung mit Euler-Winkeln nach der L2-Norm	29
3.1.3 Transformationsbestimmung mit Quaternionen	30
3.1.4 Transformationsbestimmung über eine Singulärwertzerlegung	32
3.1.5 Diskussion	33
3.2 Registrierung über identische Ebenen	33
3.2.1 Bestimmung der Rotation	34
3.2.2 Bestimmung der Translation	37
3.3 Registrierung anhand der Messdaten mit unbekannten Korrespondenzen	37
3.3.1 Iterative Closest Point Algorithmus und Varianten für die Feinregistrierung	38
3.3.2 Globale Verfahren für die Grobregistrierung	41
3.3.3 Lokale Verfahren für die Grobregistrierung	44
3.3.4 Merkmalbasierte Verfahren für die Grobregistrierung	46
3.4 Simultane Registrierung mehrerer Standpunkte	49
3.5 Diskussion und Schlussfolgerungen	49
4 Segmentierung von terrestrischen Laserscandaten	51
4.1 Ebenenschätzung aus Punktdaten	51
4.2 Regionenbasierte Segmentierung	53
4.2.1 Split-and-Merge	53
4.2.2 Hough-Transformation	54

4.2.3	Segmentierung mit dem RANSAC-Algorithmus	54
4.2.4	Gruppierung von Abtastzeilen	54
4.2.5	Bereichswachstumsverfahren	55
4.3	Darstellung der Laserscandaten als Rasterdaten	55
4.4	Segmentierung von TLS-Daten in ebene Regionen	57
4.4.1	Lokal geschätzte Ebenen	58
4.4.2	Ermittlung zusammenhängender Regionen	58
4.5	Extraktion von Merkmalen	62
5	Registrierung über ein ikonisches Zuordnungsverfahren	66
5.1	Extended Gaussian Images	66
5.2	Methode der Registrierung	67
5.2.1	Ableitung der EGI aus segmentierten Scandaten	67
5.2.2	Korrelation zwischen EGIs	69
5.2.3	Grob-zu-Fein Strategie des Zuordnungsverfahren	70
5.3	Diskussion	71
6	Symbolische Zuordnung von Ebenen	72
6.1	Einführung in die Zuordnungsverfahren	73
6.1.1	Zuordnung korrespondierender Ebenen	73
6.1.2	Auswahl der Merkmalspaare	74
6.2	Formbasierte Zuordnung	75
6.2.1	Ermittlung von korrespondierenden Ebenenpaaren anhand von Merkmalen	76
6.2.2	Heuristik für die Bestimmung der Transformationsparameter	77
6.2.3	Bewertung der Merkmale	78
6.3	Orientierungsbasierte Zuordnung	80
6.3.1	Auswahl von Kombinationen von Ebenentripeln	81
6.3.2	Berechnung eines Fitnesswertes für die Transformationsvorschriften	83
6.3.3	Heuristik für die Wahl der korrekten Lösung	84
6.4	Verwendung von Winkelbedingungen für die Zuordnung	86
6.5	Fitnessfunktionen für die Verifikation von Lösungskandidaten	87
6.5.1	Kompatible Punkte	88
6.5.2	Box-basierte Fitnessfunktion	89
6.5.3	Scanraster-basierte Fitnessfunktion	90
6.5.4	Kompatible Punkte und Normalenvektoren	90
6.6	Integration von Bilddaten in die ebenenbasierte Registrierung	90
7	Bewertung der Verfahren und Ergebnisse	94
7.1	Beispieldatensatz für die Anwendung der Verfahren	94
7.2	Registrierung über Extended Gaussian Images	96
7.3	Registrierung über eine formbasierte Zuordnung von Ebenen	97
7.4	Registrierung über eine orientierungsbasierte Zuordnung	99
7.5	Registrierung mit Ebenen über die Verwendung von Winkelbedingungen	100
7.6	Vergleich der verschiedenen Fitnessfunktionen	103
8	Diskussion und Ausblick	106
A	Quaternionen	108

1 Einführung

Moderne Lasermessinstrumente erlauben heute die Erfassung von Millionen von Messpunkten in kürzester Zeit. Dies ist durch eine reflektorlose Punktmessung im Außenbereich möglich geworden, wodurch ein hoher Automatisierungsgrad bei dem Messvorgang erreicht wurde. Gebündeltes Laserlicht wird von den Instrumenten ausgesendet und das an einem Objekt reflektierte Licht wird von einem Detektor empfangen. Aus der Laufzeit des Laserlichts wird eine Messdistanz berechnet und durch die zusätzliche Messung der Polarwinkel kann ein Punkt bezüglich eines Instrumentenkoordinatensystems referenziert werden. Die kurze Laufzeit des Lichts ermöglicht Messraten von über 100 kHz und hohe Genauigkeiten in der Zeitmessung führen zu exakten Messwerten.

In den neunziger Jahren hat sich das luftgestützte Laserscanning bei der Erfassung von Höhenmodellen etabliert, obwohl die Entwicklungen bereits wesentlich früher in den 70er und 80er durchgeführt wurden (Ackermann, 1999). Inzwischen werden ganze Länder mit Laserscanning aus der Luft erfasst, dabei wird die Erdoberfläche mit einer hohen Messpunktdichte (zum Teil mehrere Punkte pro m^2) erfasst. *Terrestrische Laserscanner* sind Ende der neunziger Jahre auf dem kommerziellen Markt aufgetaucht (Jacobs, 2004), und wurden gegenüber den luftgestützten Systemen weitaus schneller angenommen. Die schnelle Verbreitung der Instrumente wurde durch die zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und vergleichsweise geringen Anschaffungskosten sowie durch mehrere Gerätehersteller begünstigt. Bereits heute werden terrestrische Laserscanner in zahlreichen Ingenieurbüros täglich eingesetzt, das Anwendungsfeld liegt dabei vorwiegend im Bereich der Baudenkmalpflege, der Erfassung von einzelnen Gebäuden oder städtischer Gebiete sowie der Überwachung von Ingenieurbauwerken. Aber auch die Erstellung von Visualisierungen und Animationen spielt eine Rolle. Ein Vorteil des Laserscannings ist die dreidimensionale und flächenhafte Datenerfassung. Unmittelbar nach der Messung ist eine Visualisierung möglich, dabei kann der Informationsgehalt je nach Auflösung der Daten mit photographischen Aufnahmen mit zusätzlicher 3D-Information verglichen werden. Die Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft einen mittels terrestrischen Laserscannings erfassten Datensatz.

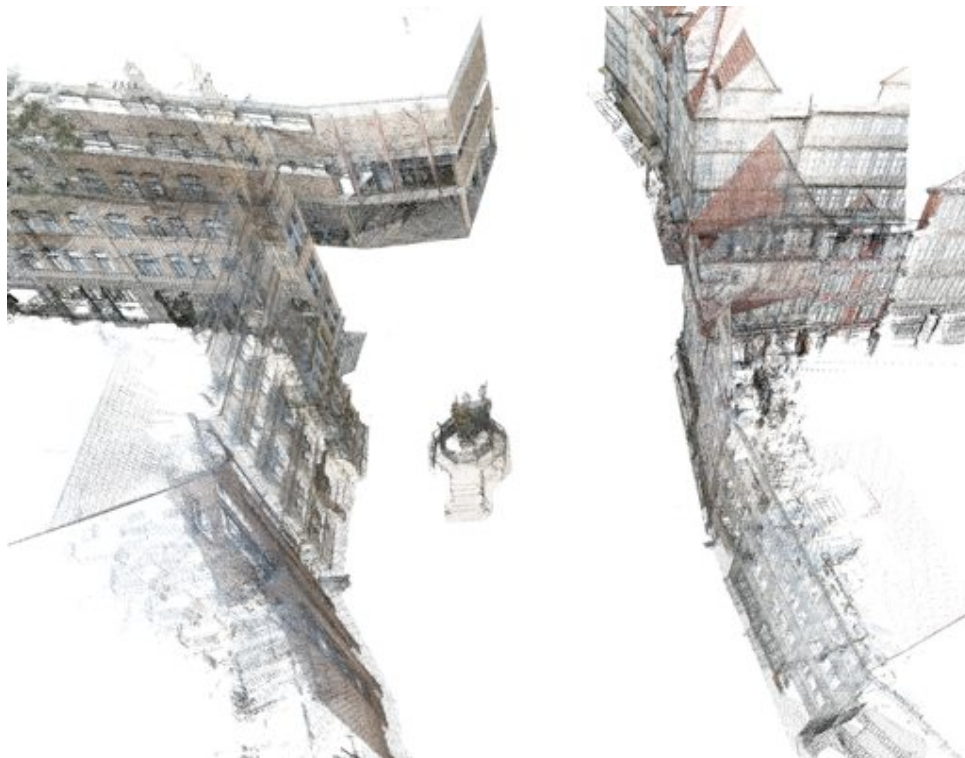


Abb. 1.1: Beispiel für einen mittels terrestrischen Laserscannings erfassten Datensatz. Die Messpunkte wurden für eine bessere Visualisierung ausgedünnt und Bodenpunkte entfernt. Die Einfärbung der Punkte erfolgte über zusätzlich erfasste Bilddaten.

Laserscanner erfassen ihre Umgebung in einer Gesamtheit, die einen zeitlichen Zustand dokumentieren. Eine Auswertung der Messdaten ist nachträglich durch die Ausnutzung der großen Messdichte möglich. Die hohe Akzeptanz des Laserscannings ist mit der Wirtschaftlichkeit einer Messung, der großen Informationsdichte und Qualität der Daten sowie dem berührungslosen Messverfahren zu begründen. Vermessungen mit terrestrischen

Laserscannern sind somit hinsichtlich der Redundanz der Messungen, der Messdichte, der Kontrollmöglichkeiten und der Dokumentation traditionellen Aufnahmeverfahren überlegen. Die Planung und Auswertung von Messungen basierend auf selektierten Punkten wird zunehmend von Laserscanning-Messverfahren verdrängt werden.

1.1 Interpretation und Modellierung terrestrischer Laserscanning Daten

Nach der Aufnahme von terrestrischen Laserscanning Daten ist eine Aufbereitung der Daten erforderlich. Die Verknüpfung einzelner Standpunkte, die Auswahl relevanter Messdaten und eine Interpretation und Modellierung der Daten sind heute übliche Schritte, die nach einer Messung manuell durchgeführt werden. Durch die aufwändige Weiterverarbeitung der Messdaten geht die Zeitersparnis, welche durch die schnelle Erfassung erzielt wurde, oftmals wieder verloren. Jedoch geht in der Regel aus der Auswertung ein Datensatz hervor, der weitaus mehr Informationen enthält, das aufgenommene Objekt visuell ansprechend wiedergibt und auch für Folgeprodukte verwendet werden kann. Diese gehen oft auch weit über den eigentlichen Zweck der Vermessung hinaus, dreidimensionale Animationen oder auch Marketing-Produkte können erzeugt werden. Beispielsweise können erfasste Punktwolken oder die daraus abgeleiteten Modelle für eine Glasinnengravur verwendet werden, bei der das entsprechende Objekt punktweise in das Innere eines Glaskörpers gelasert wird.

Für die Verarbeitung von Punktwolken sind verschiedene Vorgehensweisen möglich. Objekte können durch eine Vermaschung der Punktwolke erzeugt werden. Dabei werden aus benachbarten Punkten nach bestimmten Regeln üblicherweise Dreiecksflächen gebildet (Triangulation), die unter Umständen auch ein geschlossenes Volumenmodell bilden können. Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel für die Triangulation einer Punktwolke und die einzelnen Schritte der Modellierung bis hin zu einer texturierten Darstellung des Modells. Bei dieser Art der Modellbildung wurde durch die Entwicklung entsprechender Algorithmen bereits ein hoher Automatisierungsgrad erreicht. Verfahren für die Vermaschung von Punktwolken und auch eine Texturierung der einzelnen Dreiecksflächen mit Bilddaten ist automatisch möglich. Es existieren kommerzielle Softwarepakete, welche entsprechende Funktionen für die Verarbeitung von Punktwolken beinhalten. Allerdings ist die Erstellung eines solchen Modells teils auch mit erheblichen Aufwand verbunden, da die Punktwolke in der Regel vorher gefiltert werden muss und insbesondere eine topologisch korrekte Triangulation nicht ohne manuelle Nacharbeit erzeugt werden kann.

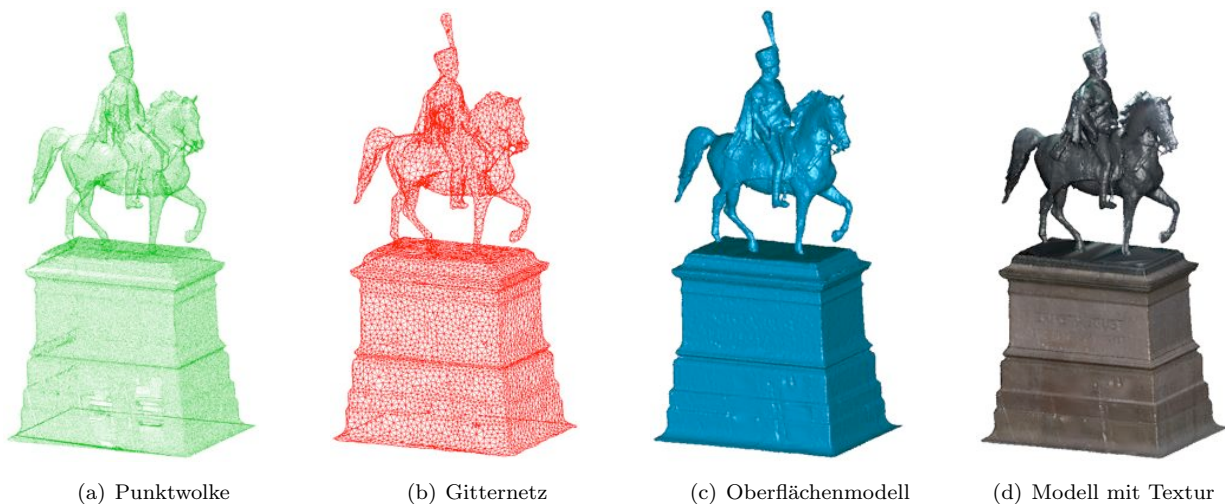


Abb. 1.2: Beispiel für die Modellierung einer Punktwolke durch Dreiecksvermaschung. Die Abbildungen zeigen die einzelnen Modellierungsschritte am Beispiel der Ernst-August-Statue in Hannover.

Die Modellierung der Messdaten durch eine Triangulation fällt unter die so genannte *ikonische Verarbeitung* von Punktwolken. Demgegenüber steht die *symbolische Verarbeitung*, welche Merkmale wie besondere Punkte, Ebenen, Zylinder, Kugeln oder sogar komplette Objekte wie Fenster, Gebäude oder technische Anlagen aus den Daten extrahiert. Dabei werden die Messdaten interpretiert und das Modell anhand der Messdaten gebildet. Die Abbildung 1.3 (a) zeigt ein Beispiel für die Modellierung einer Punktwolke. Das Ergebnis ist in Abbildung 1.3 (b) zu sehen und (c) zeigt schließlich ein texturiertes Modell. In diesem Fall wurde das Modell manuell mit einem CAD-System erstellt. Die einzelnen Elemente des Modells wurden anhand der Punktwolke modelliert.



Abb. 1.3: Modellierung einer Kirche (Lutherkirche in Hannover) durch die manuelle Rekonstruktion anhand der Messdaten mit einem CAD-System.

Ein anderer, ebenfalls symbolischer Ansatz, nutzt die Information der Punktwolke explizit aus, indem die Objekte wie Ebenen oder Zylinder durch eine Parameterschätzung direkt in einen Teil der Punktwolke bestmöglich eingepasst wird. Dadurch basiert die Modellbildung auf den realen Messdaten und die Bildung einzelner Elemente ist einfacher zu automatisieren. Allerdings führt dieser Ansatz bei der Zusammensetzung der gebildeten Einzelobjekte zu Problemen, da diese in der Regel ohne manuelle Nacharbeit nicht zu einem geschlossenen Modell zusammengefügt werden können (z. B. beim Schnitt von vier Ebenen in einem Punkt).

Terrestrische Laserscanning Daten weisen eine sehr hohe Informationsdichte auf. In der Zukunft wird es einen zunehmenden Bedarf an solchen Daten sowie an entsprechenden Auswertemethoden geben. Anstelle der aufwändigen Erstellung von 3D-Modellen werden heute in der Praxis oftmals zweidimensionale Bestandspläne aus den Daten abgeleitet. Hierbei wird von der vollständigen und berührungslosen Messmethode profitiert und beliebige Schnittzeichnungen können erstellt werden. In Zukunft wird jedoch die dreidimensionale Auswertung der Daten an Bedeutung gewinnen.

1.2 Motivation für eine automatische Registrierung von Punktwolken

Nach der Aufnahme von terrestrischen Laserscanning Daten von verschiedenen Standpunkten aus erfolgt die Verknüpfung der Scans. Diese Orientierung von 3D Punktwolken wird auch als *Registrierung* bezeichnet und ist bereits seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts ein diskutiertes Thema in der Forschung. In den Softwarepaketen für die Ansteuerung der terrestrischen Laserscanner sind üblicherweise semi-automatische Verfahren für eine Registrierung der Datensätze vorhanden. Allerdings erfordert die Registrierung einen erheblichen Zeitaufwand, der die eigentliche Messzeit um ein Vielfaches übersteigt.

Für die Registrierung von 3D-Punktwolken können prinzipiell zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen. Zum einen kann die Orientierung einzelner Standpunkte von terrestrischen Laserscannern über zusätzliche Messungen bestimmt werden und zum anderen ist eine Verknüpfung der Daten anhand der Messdaten selbst möglich. Die Einmessung der Standpunkte vorab, z. B. mit einem satellitengestützten Messsystem, wird in der Praxis selten durchgeführt, da sich Laserscanning Instrumente im Gegensatz zu Tachymetern nur schwer über einem Punkt horizontal aufstellen lassen. Auch kann eine Anschlussrichtung in der Regel mit einem Laserscanner nicht exakt festgelegt werden. Allerdings gewinnt die direkte Georeferenzierung von Laserscanning Instrumenten für die dynamische Erfassung von Daten zunehmend an Bedeutung. Hierfür sind zusätzliche Sensoren erforderlich, die wie bei luftgestützten Systemen ständig die Position und die Orientierung messen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Verknüpfung von Laserscans anhand der Messdaten. In diesem Fall sind keine zusätzlichen Sensoren für die Positionsbestimmung der Standpunkte erforderlich. Das Ziel der Arbeit ist die Elimination der manuellen Interaktion und die Minimierung des Zeitaufwands bei der Registrierung. Die relative Orientierung der Punktwolken zueinander erfolgt über die Zuordnung ebener Regionen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Segmentierung der Laserscans in ebene Regionen, die Entwicklung von Verfahren für die automatische Zuordnung der Ebenen und die Ableitung der relativen Orientierung. Hierfür werden Untersuchungen über die Eignung globaler und lokaler Merkmale angestellt, Algorithmen der Verfahren vorgestellt und anhand eines realen Testdatensatzes bewertet.

1.3 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst das terrestrische Laserscanning allgemein vorgestellt. Dabei werden charakteristische Merkmale und die Funktionsweise der Instrumente erläutert. Allgemeine Messeigenschaften terrestrischer Laserscanner werden angesprochen und verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Geräte beschrieben.

Anschließend wird in Kapitel 3 detailliert auf die Registrierung von 3D-Punktwolken eingegangen. Dabei werden die mathematischen Grundlagen von verschiedenen Verfahren für die Bestimmung von Transformationsparameter aus identischen Punkten gegeben. Außerdem werden existierende Methoden für die Registrierung von Punktwolken vorgestellt und diskutiert. Diese sind in Verfahren für eine Grob- und eine Feinregistrierung eingeteilt und entsprechend der verwendeten Methodik weiter untergliedert.

In Kapitel 4 wird die Segmentierung von terrestrischen Laserscanning Daten in ebene Regionen behandelt. Existierende Verfahren werden beschrieben und eine auf die Laserscanning Daten angepasste Implementierung vorgestellt. Besondere Eigenschaften und deren Vorteile für die Segmentierung der Daten werden an dieser Stelle hervorgehoben und auch eine weitergehende Merkmalsextraktion aus den Daten diskutiert.

In Kapitel 5 und 6 werden entwickelte Verfahren für die automatische Registrierung von terrestrischen Laserscanning Daten vorgestellt. Die Kapitel beinhalten ein globales, ikonisches Zuordnungsverfahren basierend auf sogenannten „Extended Gaussian Images“ sowie Varianten von symbolischen Verfahren, die für eine Zuordnung Merkmale und ebene Regionen für die Berechnung der Transformationsvorschrift nutzen. Entscheidend für einen Erfolg der automatischen Verfahren ist die Bewertung möglicher Lösungen. Über eine Gütefunktion muss entschieden werden, welche Lösung die richtige ist. Verschiedene Varianten an Gütefunktionen werden ebenfalls diskutiert. Der Abschnitt 6.6 beinhaltet schließlich eine Erweiterung der Registrierung über die Einbeziehung zusätzlicher Bilddaten. Bilddaten werden häufig zusammen mit den Laserscanning Daten erfasst und können nützliche Informationen für die Bestimmung der Transformationsvorschrift liefern.

In Kapitel 7 wird ein Datensatz bestehend aus insgesamt 20 Laserscans für die Evaluierung der entwickelten Verfahren herangezogen. Anhand der Ergebnisse für die paarweise Registrierung der Standpunkte des Beispieldatensatzes werden die Verfahren bewertet und deren Eignung für die Registrierung städtischer Szenen nachgewiesen. Dabei werden auch Stärken und Schwächen der Verfahren aufgezeigt. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion und einem Ausblick.

2 Terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist im Bereich des Vermessungswesens mit der Einführung der ersten Laserscanning-Instrumente seit ca. 1998 bekannt (Jacobs, 2004; Niebuhr, 1998) und ist inzwischen eine anerkannte und in der Praxis weit verbreitete Messmethode. Mit der Technologie des Laserscannings können sehr schnell tausende von Messpunkten flächenhaft und direkt in 3D erfasst werden. Im Gegensatz zur Tachymetrie, bei der einzelne, charakteristische Punkte mit Hilfe von speziellen Reflektoren aufgenommen werden, ist mit dem Laserscanning eine reflektorlose Vermessung der Oberfläche eines Objektes mit einer hohen Messpunktdichte in kurzer Zeit möglich. Das Ergebnis einer Messung ist eine sogenannte *Punktwolke*. Ein wichtiges Merkmal terrestrischer Laserscanner ist die *flächenhafte* Aufnahme, die je nach der Winkelauflösung der Scans Objektpunkte in einem Abstand von wenigen Zentimetern, oder in manchen Fällen sogar wenigen Millimetern, liefert. Die Datenerfassung erfolgt schnell und eine Visualisierung der Punktwolke in 3D ist unmittelbar nach der Aufnahme möglich. Mit der Verfügbarkeit von terrestrischen Laserscannern wurde die geodätische Sensorik um eine attraktive Komponente erweitert, typische Aufgaben wie die flächenhafte geometrische Aufnahme und Überwachung von Objekten können deutlich schneller als mit konventionellen Methoden bearbeitet werden (Kutterer, 2007).

2.1 3D-Entfernungsmessinstrumente

Im Allgemeinen werden Messinstrumente zur direkten, flächenhaften Erfassung von 3D-Geometrien seit etwa zwei Jahrzehnten in Forschungseinrichtungen, aber auch kommerziell verwendet. Jedoch ist die Zahl der verfügbaren Instrumente erst in den letzten Jahren sprunghaft gestiegen. Blais (2004) gibt eine Übersicht über die Entwicklungen bei 3D Entfernungsmessinstrumenten in den letzten 20 Jahren. Dabei geht er im Wesentlichen auf die verschiedenen Messprinzipien ein und zählt knapp 80 kommerzielle Anbieter derartiger Systeme auf. Die Instrumente messen die Form eines Objekts und registrieren die x,y,z-Koordinaten von einzelnen Punkten der Oberfläche sowie die Intensität des reflektierten Signals. Einige Systeme nehmen gleichzeitig Farbinformationen auf. Die erforderliche Messung einer Distanz zwischen Instrument und Objekt kann nach verschiedenen Methoden erfolgen, die 3D-Entfernungsmessinstrumente können anhand des Messprinzips klassifiziert werden. Mögliche Techniken zur Messung einer Distanz, die bei scannenden Systemen Anwendung finden, sind:

- Interferometrie
- Musterprojektionsverfahren
- (Laser-) Triangulationsverfahren
- Laufzeitverfahren

Neben dem Messprinzip werden scannende Systeme oft auch nach deren maximalen Messentfernung klassifiziert. Üblicherweise erfolgt eine Einteilung der Systeme in drei Entfernungsbereiche, siehe z.B. Rietdorf (2004):

- Nahbereich (wenige cm bis ca. 2 m Messbereich)
- Mittlerer Entfernungsbereich (2 m bis ca. 80 m Messbereich)
- Weiter Entfernungsbereich (80 m bis ca. 2000 m Messbereich)

Im Nahbereich angesiedelte Instrumente nutzen als Messprinzip überwiegend die Interferometrie, Musterprojektionsverfahren sowie das Triangulationsverfahren. Zahlreiche Nahbereichsscanner sind für hochgenaue Vermessungen kleiner Gegenstände konzipiert. Mittels Interferometrie können mit speziellen Messgeräten Oberflächenstrukturen bis in den Nanometerbereich vermessen werden.¹ Musterprojektionsverfahren sind auch ausschließlich im Nahbereich anzutreffen, zu scannende Gegenstände werden mit verschiedenen Mustern zeitlich versetzt beleuchtet (z.B. Streifenprojektor) und mit Hilfe einer Kamera zeitgleich aufgenommen. Über eine Detektion der projizierten Lichtstreifen im Kamerabild und mittels bekannter Kameraparameter wird die Entfernung von Oberflächenpunkten über ein Triangulationsverfahren berechnet. Voraussetzung für den Erfolg des Verfahrens ist die zuverlässige Erkennung der projizierten Muster, was eine entsprechende Beleuchtung der Szene erfordert.

In dieser Arbeit werden scannende Systeme betrachtet, welche die zu erfassenden Objekte mit einem Laserstrahl abtasten. Wird mit solchen Geräten gearbeitet, wird vom „*Terrestrischen Laserscanning*“ oder auch nur von „*Laserscanning*“ gesprochen. Diese Systeme sind im mittleren und weiten Entfernungsbereich angesiedelt. Im

¹Ein Messsystem dieser Art bietet z.B. die NanoFocus AG an, weitere Informationen sind auf der Webseite <http://www.nanofocus.info> verfügbar (Zugriff am 08.11.2007).

Vermessungswesen kamen derartige 3D-Scanning-Instrumente im terrestrischen Bereich Ende der 90er Jahre auf. Instrumente, die als Messprinzip das Laufzeitverfahren verwenden, haben sich durchgesetzt. Im Vergleich zu den bereits seit längerer Zeit eingesetzten luftgestützten Systemen ist die Zahl der Gerätehersteller größer. Die Anschaffungs- und Betriebskosten sind im Vergleich zu den luftgestützten Systemen geringer, was eine schnelle Verbreitung dieser Geräte begünstigt hat. Die Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft terrestrische Laserscanner verschiedener Hersteller. Die Hauptkomponenten der Geräte sind eine *Lasereinheit*, eine *Strahlableiteneinheit* und eine *Empfangseinheit*. In den folgenden Abschnitten wird die Funktionsweise von Geräten dieser Art näher beschrieben.



Abb. 2.1: Beispiele für terrestrische Laserscanner (Abbildungen entnommen von den Webseiten der Hersteller: www.riegl.co.at, www.zf-laser.de, www.leica-geosystems.de, www.callidus.de, www.optech.ca).

2.1.1 Funktionsweise von Laserscannern

Bei terrestrischen Laserscannern wird der Laserstrahl in zwei Dimensionen schrittweise abgelenkt. Der Laserstrahl wandert regelmäßig und systematisch über die zu erfassende Oberfläche. Das ausgestrahlte Laserlicht wird über bewegliche Spiegel abgelenkt, trifft auf das zu vermessende Objekt, wird dort reflektiert und schließlich wieder über eine Empfangseinheit vom Instrument registriert. Über die Laufzeit des Lichts wird die Entfernung zum Objekt ermittelt. Die Geräte erfassen zunächst eine gewisse Anzahl an Punkten in vertikaler Richtung komplett, anschließend wird die Horizontalrichtung um einen Schritt verändert und ein neuer Scan in vertikaler Richtung beginnt. Dabei werden jeweils die Ablenkungswinkel des Laserstrahls exakt bestimmt. Entscheidende Merkmale für Laserscanner sind somit die minimale Schrittweite für die Ablenkung, welche die maximale Auflösung definieren sowie die Messgenauigkeit der tatsächlichen Winkel, die ein Maß für die Güte der gemessenen Punkte darstellt. Zusammen mit der Distanzmessung d liefern die gemessenen Winkel ϑ und φ polare Koordinaten, aus denen sich die kartesischen Objektpunktkoordinaten x , y und z durch die folgende Transformation berechnen lassen:

$$\begin{aligned} x &= d \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi \\ y &= d \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi \\ z &= d \cdot \cos \vartheta \end{aligned} \quad (2.1)$$

Die Messung der Einzelpunkte erfolgt dabei reflektorlos und sehr schnell (Scanraten von einigen 1000 bis zu einigen 100 000 Punkten pro Sekunde sind üblich). Dreidimensionale Koordinaten sind unmittelbar nach dem Scanvorgang verfügbar. In der Regel werden an die Koordinaten noch instrumentenspezifische Korrekturterme angebracht, welche mechanische Konstanten wie Exzentrizitäten enthalten und atmosphärische Einflüsse berücksichtigen. Zusätzlich wird zu jedem Punkt noch ein Intensitätswert registriert, der die Signalstärke des von der Objektoberfläche reflektierten Laserstrahls wiedergibt. Die regelmäßige Aufnahme der Daten ermöglicht eine 2D-Darstellung der Messdaten in einem Raster, wobei die einzelnen Rasterzellen durch die polaren Winkel definiert sind. Viele terrestrische Laserscanner sind mit einem zusätzlichen bildgebenden Sensor ausgestattet und können somit auch RGB-Daten erfassen, entweder mittels einer fest eingebauten oder einer extern angebrachten Kamera. Anhand bekannter Kalibrierungsdaten kann anschließend jedem Messpunkt ein Farbwert aus dem entsprechenden Bild zugeordnet werden. Das Ergebnis ist eine sogenannte *farbige Punktwolke*, die eine realistische Darstellung der aufgenommenen Umgebung wiedergibt. In der Einführung wurde mit Abbildung 1.1 bereits eine 3D-Darstellung dieser Art gezeigt. Abbildung 2.2 dagegen zeigt in einer 2D-Darstellung schematisch

das über die Polarwinkel definierte Scanraaster sowie verschiedene Kanäle der Scandaten. Dargestellt sind ein Intensitäts- und Entfernungsbild sowie mittels zusätzlich aufgenommener Bilddaten eingefärbte Punktdaten.

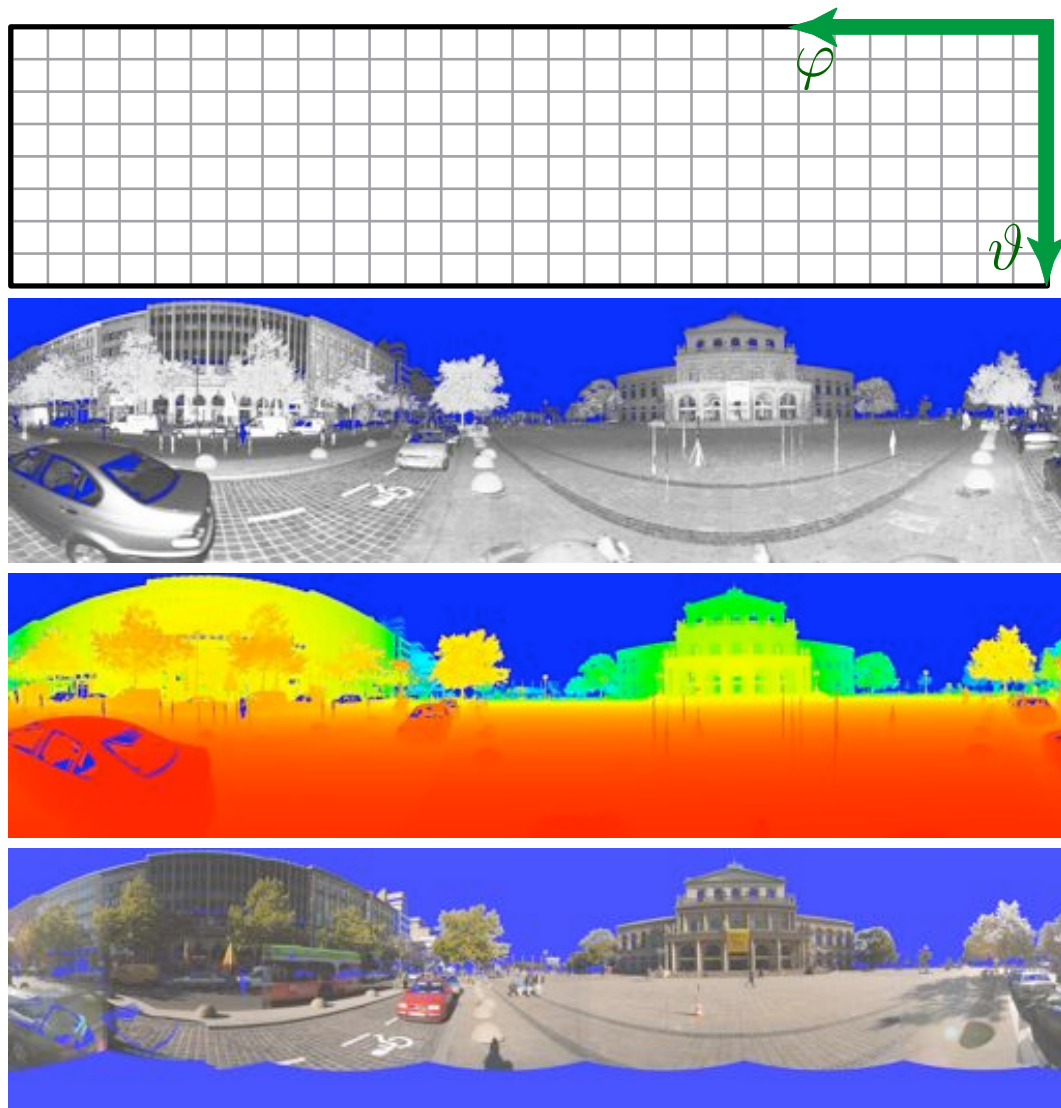


Abb. 2.2: 2D-Darstellungen von Messdaten eines Riegl Scanners vom Typ LMS Z360i. Die Abbildungen zeigen schematisch das Raster einer 2D-Darstellung anhand der Polarwinkel sowie beispielhaft einen 360° Scan vom Opernplatz in Hannover. Dargestellt sind Intensitäts-, Entfernungsbild sowie die mit RGB-Daten eingefärbte Punktdaten (von oben nach unten).

Ein Unterscheidungsmerkmal von terrestrischen Laserscannern ist über das Sichtfeld der Geräte gegeben. Je nach verwendeter Technik zur Ablenkung des Laserstrahls ergibt sich ein unterschiedlicher Ausleuchtungsbereich, welcher schließlich den Messbereich definiert. Es wird zwischen Panorama-, Hybrid- und Kamera-Scanner unterschieden (Staiger, 2003). Abbildung 2.3 zeigt schematisch den entsprechenden Sichtbereich der drei Scannerarten. Panorama-Scanner haben den Vorteil, dass der Sichtbereich nur durch einen minimalen Abschattungsbereich (verursacht durch das Gehäuse des Instruments) eingeschränkt ist. Die Geräte eignen sich insbesondere für über Kopf Aufnahmen wie sie beispielsweise in Innenräumen, Tunnel oder Höhlen erforderlich sind. Hybrid-Scanner decken mit ihrem Sichtfeld ebenfalls den gesamten horizontalen Bereich ab, allerdings ist das vertikale Sichtfeld durch die eingesetzte Ablenkmechanik begrenzt. Der horizontale Abdeckungsbereich von 360° wird sowohl bei den Panorama- wie auch Hybridscannern durch eine mechanische Drehung des Scan-Kopfes oder des gesamten Instruments erreicht. Kamera-Scanner dagegen werden manuell auf das aufzunehmende Objekt ausgerichtet, sie haben äußerlich keine bewegten Bauteile. Das Sichtfeld ist somit auf einen limitierten Ausschnitt begrenzt.

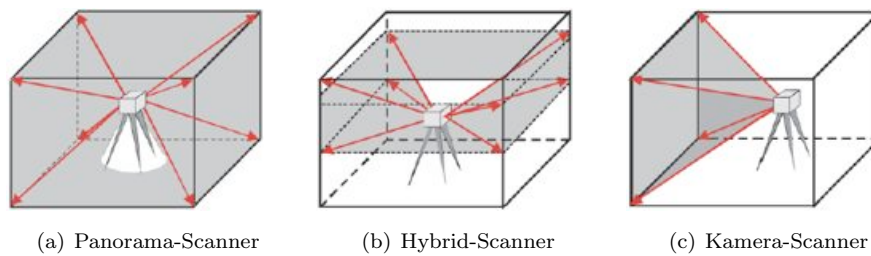


Abb. 2.3: Darstellung der Sichtfelder von verschiedenen Scannertypen (entnommen aus Staiger (2003)).

Je nach Scannerart kommt in der Regel eine andere Strahlableitmechanik zum Einsatz. Abbildung 2.4 zeigt verschiedene Ablenkmechanismen über bewegliche Spiegel. Typischerweise werden rotierende Spiegel bei Panoramascannern, Spiegelpolygone bei Hybrid- und doppelachsige Spiegelsysteme bei Kamerascannern eingesetzt. Als Messprinzip hat sich bei den Laserscannern das Laufzeitverfahren durchgesetzt, in Einzelfällen kommt aber auch das Lasertriangulationsverfahren zum Einsatz.

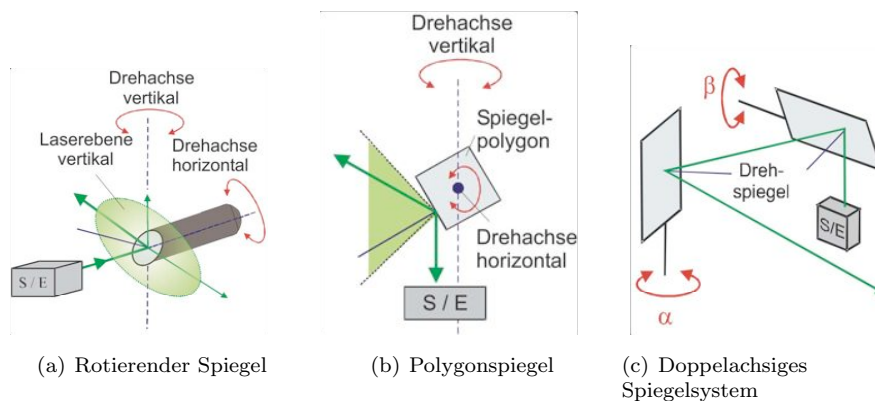


Abb. 2.4: Strahlableitmechanismen für terrestrische Laserscanner (entnommen aus Staiger (2007)).

2.1.2 Triangulationsmessverfahren

Instrumente, welche mit dem Triangulationsmessverfahren arbeiten, benötigen neben dem Laser einen positionsempfindlichen CCD²-Sensor. Der ausgesandte Laserstrahl wird über einen beweglichen Spiegel abgelenkt, trifft auf das zu vermessende Objekt, wird dort reflektiert und schließlich von dem CCD-Sensor registriert (vgl. Abbildung 2.5). Der Ablenkspiegel und der CCD-Sensor sind mechanisch über eine bekannte Basis miteinander verbunden, die Entfernung zwischen Scanner und Objekt kann somit aus dem durch die Basis und dem Objektpunkt gebildeten Dreieck abgeleitet werden.

Durch ein Verändern der Spiegelstellung ergibt sich eine linienhafte Verteilung der Messpunkte. Die Ablenkung des Laserstrahls in der zweiten Dimension wird durch Drehen der Basis samt Lasereinheit und CCD-Sensor erreicht. Die Messgenauigkeit solcher Instrumente hängt entscheidend von der Länge der Basis ab, die aber aus praktischen Gründen wiederum möglichst klein gehalten wird. Instrumente mit diesem Messverfahren haben eine begrenzte Reichweite und sind im nahen und mittleren Entfernungsbereich angesiedelt. Als Beispiel seien die Scanner S10 und S25 mit 10 m bzw. 25 m Reichweite der ehemaligen Firma MENSİ genannt. Laserscanner mit diesem Messverfahren spielen auf dem heutigen Markt von terrestrischen Laserscannern im mittleren Entfernungsbereich nur noch eine untergeordnete Rolle und sind in der Praxis kaum vertreten. Im Nahbereich dagegen wird das Triangulationsmessverfahren häufig angewandt, die Geräte (z.B. MINOLTA VIVID 910) zeichnen sich durch eine Messgenauigkeit im Submillimeterbereich aus.

²CCD (engl.), Abkürzung für Charge Coupled Device (lichtempfindlicher Sensor).

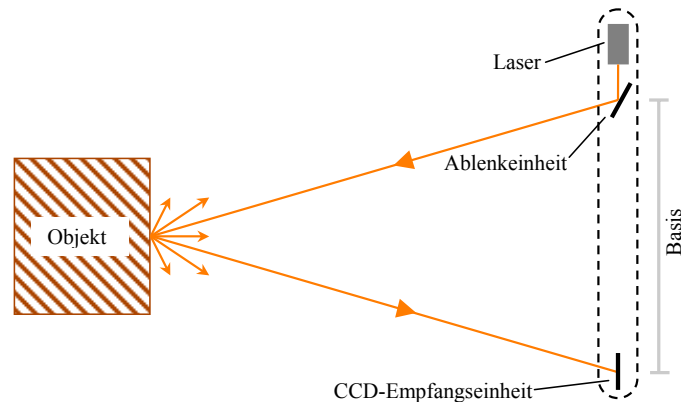


Abb. 2.5: Prinzip des Triangulationsmessverfahrens.

2.1.3 Laufzeitmessverfahren

Bei den Laufzeitmessverfahren wird die Distanz zwischen dem Messinstrument und dem zu vermessenden Objekt über die Laufzeit des Laserlichts ermittelt. Das ausgesandte Laserlicht wird am Objekt reflektiert und schließlich wieder von einem Empfänger registriert (vgl. Abbildung 2.6). Die gesuchte Distanz wird aus der Laufzeit über ein Impulslaufzeit- oder Phasendifferenzverfahren berechnet.

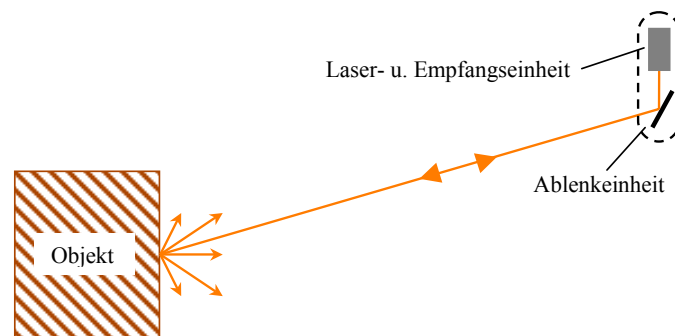


Abb. 2.6: Prinzip des Laufzeitmessverfahrens.

Impulslaufzeitverfahren

Bei diesem Messverfahren werden Laserimpulse in schnell aufeinander folgenden Intervallen erzeugt, ausgesendet und nach der Reflexion am Objekt von einer lichtempfindlichen Empfangseinheit registriert. Die Messdistanz d wird aus der Laufzeit Δt des Laserimpulses und der Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ ermittelt:

$$d = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

Da das zurückgeworfene Signal verrauscht und stark abgeschwächt ist, liegt die Schwierigkeit bei der Messung in der Wahl des Zeitpunkts, an dem das Signal von der Empfangseinheit registriert wird. Die Länge der gemessenen Distanz wird dadurch beeinflusst. Durch eine Registrierung des ersten (First Pulse) oder des letzten (Last Pulse) Signals können verschiedene Distanzen gemessen werden. Je nach der Beschaffenheit des Messobjekts, können sich die Messergebnisse zwischen einer First- oder Last-Pulse Messung erheblich unterscheiden. Die Laufzeit des Laserlichts muss über einen Oszillator präzise bestimmt werden, damit die Entfernung korrekt berechnet werden kann. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung ist direkt von der Zeitmessgenauigkeit abhängig. Für die eindeutige Bestimmung der Laufzeit darf ein weiterer Laserimpuls erst ausgesandt werden, wenn das Signal des vorhergehenden Impulses registriert wurde. Daher ist die maximale Messdistanz direkt proportional zur Pulsrate der Signale. Beispielsweise beträgt die theoretische Messdistanz bei einem mit 25 kHz gepulsten Laser ca. 6 km. In der Praxis wird diese Reichweite aufgrund der Signalabschwächung und der begrenzten Laserleistung in der Regel jedoch nicht erreicht. Die Vorteile der Impulsmessung liegen dennoch in der großen Reichweite (bis zu 2 km) und der Möglichkeit, First- und Last-Pulse Signale einfach zu unterscheiden.

Phasendifferenzverfahren

Im Gegensatz zu den Impulslaufzeitverfahren wird bei den Phasendifferenzverfahren das Laserlicht kontinuierlich ausgesandt. Für die Bestimmung der Messdistanz wird ebenfalls die Laufzeit des Signals ermittelt. Hierzu wird die Phasenverschiebung zwischen dem ausgesandten und empfangenen Signal ausgewertet. Anhand der bekannten Periodenlänge T des Laserlichts und der gemessenen Phasenverschiebung $\Delta\phi$ lässt sich die Messdistanz gemäß der Formel 2.3 bestimmen.

$$d = \frac{\Delta\phi}{4\pi} \cdot c \cdot T \quad (2.3)$$

Die Wellenlänge $\lambda = c \cdot T$ definiert die maximale, eindeutige Messdistanz, welche $\lambda/2$ für eine Zwei-Wege-Messung beträgt. Je größer die Wellenlänge, desto größer ist auch der Eindeutigkeitsbereich und somit die maximale Messdistanz. Allerdings verschlechtert sich mit größeren Wellenlängen die Messgenauigkeit. Daher werden für die Entfernungsmessung verschiedene Modulationen und Wellenlängen verwendet, die Verfahren werden als Mehrton- und Mehrfrequenzverfahren bezeichnet. Die Messauflösung und Messgenauigkeit bei Phasendifferenzverfahren wird durch die höchste, und der Eindeutigkeitsbereich durch die niedrigste verwendete Frequenz definiert (Wehr, 2005). Bei einer Entfernungsmessung nach dem Phasendifferenzverfahren können sehr hohe Messraten (bis zu mehreren 100 kHz) erreicht werden, allerdings werden aufgrund der nur begrenzt verfügbaren kontinuierlichen Laserleistung keine großen Reichweiten (weniger als 100 m) erreicht.

2.1.4 Beispiele

Die Tabelle 2.1 zeigt exemplarisch terrestrische Laserscanner verschiedener Hersteller. Es werden jeweils zwei Modelle nach dem Impulslaufzeit- bzw. dem Phasendifferenzverfahren vorgestellt. Die entscheidenden Unterschiede liegen in der maximalen Messentfernung, der Messrate sowie der Messgenauigkeit.

Laserscanner (HERSTELLER)	ILRIS 3D (OPTECH)	LMS Z420i (RIEGL)	Imager 5006 (ZOLLER+FRÖHLICH)	LS 880 (FARO)
Messverfahren:	Laserimpuls	Laserimpuls	Phasenmessung	Phasenmessung
Ablenkeinheit:	Drehspiegel	Polygonrad	Rot. Spiegel	Rot. Spiegel
Messbereich:	3-1500m (80%)	2-1000m (80%)	1-79m	bis 80m
Max. Messrate (Pkt/s):	2 500	11 000	500 000	120 000
Sichtfeld vert.:	40°	80°	310°	320°
Sichtfeld horiz.:	40°	360°	360°	360°
Min. Schrittweite vert.:	0,00115°	0,004°	0,0018°	0,009°
Min. Schrittweite horiz.:	0,00115°	0,004°	0,0018°	0,00067°
Winkelauflösung vert.:	0,00115°	0,002°	0,007°	0,009°
Winkelauflösung horiz.:	0,00115°	0,0025°	0,007°	0,009°
Messgenauigkeit:	7mm @ 100m	10mm	≤7,5mm @ 50m	3mm @ 25m
Laser:	1,5μm	nahes Infrarot	0,785μm	sichtbar
Webseiten (Zugriff am 19.07.2007):	www.optech.ca	www.riegl.co.at	www.zf-laser.de	www.faro.com

Tabelle 2.1: Beispiele für terrestrische Laserscanner und deren Eigenschaften.

Bei dem Laserscanner ILRIS 3D der Firma OPTECH handelt es sich als einziges Gerät um einen Kamerascanner. Das Instrument kann jedoch zusätzlich mit einer vollmotorisierten Grundplatte ausgestattet werden (ILRIS 36D), welche einen horizontalen Sichtbereich von 360° ermöglicht³. Eine detaillierte Übersicht über die technischen Merkmale verschiedener Laserscanner ist beispielsweise in einer Ausgabe der Zeitschrift *GIM International* in einem Artikel von Lemmens (2007) zu finden.

2.2 Messeigenschaften terrestrischer Laserscanner

Die Schrittweite für die Abtastung der Oberflächen ist bei terrestrischen Laserscannern nahezu frei wählbar, je nach gewünschter Auflösung kann die Abtastrate sowohl vertikal wie auch horizontal eingestellt werden. Ein Nachteil der Aufnahme in regelmäßigen Schritten ist die daraus resultierende ungleichmäßige Auflösung am Messobjekt. Nah am Laserscanner befindliche Oberflächen werden dichter abgetastet als weit entfernte. Für schleifende Auftreffwinkel des Laserstrahls auf eine Oberfläche verstärkt sich dieser Effekt (vgl. Abb. 2.7).

³http://www.optech.ca/pdf/Brochures/ilris_36d.pdf (Zugriff am 19.07.2007).

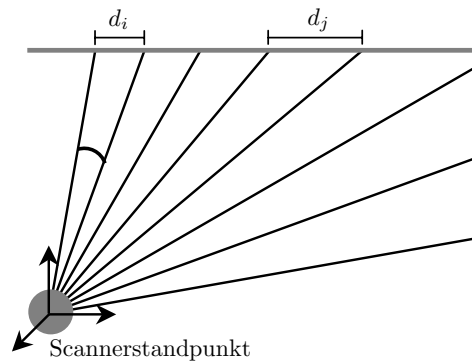


Abb. 2.7: Abtastmuster bei konstanten Ablenkwinkel in Abhängigkeit von der Messentfernung und Ausrichtung des Objekts (adaptiert von Rietdorf (2004)).

Eine weitere wichtige Kenngröße im Zusammenhang mit der Winkelschrittweite ist die Strahldivergenz. Sie definiert den Öffnungswinkel des Laserstrahls und zusammen mit der Messentfernung die Spotgröße am Objekt. Nach Rietdorf (2004) und Schlemmer (2004) ist eine Abstimmung zwischen Strahldivergenz und Winkelschrittweite optimal, wenn die Laserspots am Objekt direkt aneinander angrenzen. Bei einer kleinen Strahldivergenz ist der Objektpunkt zutreffender bestimmt und durch eine Angrenzung der einzelnen Laserspots ist die Abtastung lückenlos. Die Abtastrate sollte bei bekannter Oberflächenstruktur gemäß dem aus der digitalen Bildverarbeitung bekannten Abtasttheorem (siehe z.B. Bähr (1998)) gewählt werden, um keine Informationen bereits während des Scanvorgangs zu verlieren.

Terrestrisches Laserscanning ist wie jedes Messverfahren nicht fehlerfrei, verschiedene Faktoren beeinflussen die Messung und führen zu einem verfälschten Messergebnis. Eine umfassende Zusammenstellung von Literatur zur Untersuchung und Analyse von Fehlern bei Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner sowie eine ausführliche Beschreibung der Fehlerquellen sind in Reshetyuk (2006) zu finden. Die Fehler werden in vier Gruppen eingeteilt: (i) *Instrumentenfehler*, (ii) *atmosphärische Fehler*, (iii) *objektbezogene Fehler* und (iv) *methodische Fehler*. Im Folgenden wird jeweils kurz auf die Fehlerarten sowie deren Auswirkungen eingegangen.

Instrumentenfehler

Diese Fehler lassen sich auf die Bauart und die technischen Spezifikationen der Laserscanner zurückführen und sind entweder *zufälliger* oder *systematischer* Art. Die Ursachen von zufälligen Fehler liegen in den physikalischen Beschränkungen der Entfernungsmesseinheit und der Strahlablenkeinheit der Instrumente und können nicht korrigiert werden. Systematische Messfehler können dagegen detektiert und gegebenenfalls durch eine Kalibrierung oder über einen Korrekturwert berücksichtigt werden.

- **Fehler in der Entfernungsmessung:** Gemessene Entfernungen können mit zufälligen Fehlern behaftet sein, bei gepulsten Lasern beispielsweise erfolgt die Distanzmessung über die Laufzeit eines ausgesandten Lichtpulses. Ein mögliches Verfahren für die Zeitmessung detektiert den zurückgeworfenen Lichtpuls, sobald die empfangene Signalstärke einen definierten Schwellwert übersteigt. Dieser Prozess ist aber stark von der Reflektivität des Messobjekts abhängig, für stärker abgeschwächte Signale wird der Schwellwert später erreicht und die gemessene Laufzeit ist zu lang. Um diesen Einfluss zu minimieren, wird nach der Registrierung des Signals eine Korrektur vorgenommen, die von der maximal empfangenen Signalstärke abhängig ist (Thiel und Wehr, 2004). Durch die Größe des Laserspots entstehen ebenfalls Fehler zufälliger Art. Ein registrierter Messpunkt kann überall innerhalb des projizierten Laserspots liegen, die Berechnung der 3D-Punktkoordinaten erfolgt aber unter Verwendung der Mittellinie des ausgesandten Messstrahls (Lichti und Gordon, 2004).

Systematische Fehler dagegen verfälschen jede Messung um einen konstanten Wert, häufige Ursachen sind beispielsweise ein Nullpunktfehler (Abweichung zwischen dem mechanischen und optischen Nullpunkt), ein unpräzise bestimmter Maßstabsfaktor, der auf jede Messung angebracht wird, oder Temperaturschwankungen im Gerät.

- **Fehler verursacht durch die Ablenkeinheit:** Eine weitere Quelle für instrumentelle Fehler liegt in der Strahlablenkeinheit. Selbst bei hohen Messraten muss für jeden Messstrahl der jeweilige Ablenkwinkel gemessen werden, der einer gewissen Messgenauigkeit unterliegt. Im Gegensatz zu den Fehlern in der

Entfernungsmessung wurden die durch die Ablenkeinheit verursachten Fehlern bislang nicht eingehend untersucht. Katzenbeisser (2003) betrachtet für luftgestützte Laserscanner zwei durch die Ablenkeinheit hervorgerufene Fehler, einen Offset- und einen Skalierungsfehler. Eine weitere Fehlerquelle kann in einer schlechten Synchronisation zwischen Ablenkeinheit und Entfernungsmesseinheit liegen.

- **Achsfehler:** Obwohl Theodoliten und Laserscanner unterschiedlich konstruiert sind, wurden in Genauigkeitsuntersuchungen terrestrischer Laserscanner die vorhandenen Modelle teilweise übernommen. Analog zu einem Theodolit sind auch bei terrestrischen Laserscannern mögliche Achsfehler zu berücksichtigen. Der *Zielachsenfehler* resultiert aus der Abweichung zwischen der Zielachse und der zu ihr senkrecht stehenden Kippachse, der *Kippachsenfehler* aus der Abweichung zwischen Kippachse und der zu ihr senkrecht stehenden Drehachse. Theodolitenachsen sowie deren Fehler werden beispielsweise ausführlich in Kahmen (1997) behandelt. Übertragen auf einen Laserscanner wird die Kippachse als die Achse bezeichnet, um welche der Umlenkspiegel während eines Scanvorgangs rotiert und die Zielachse ergibt sich aufgrund der Strahldivergenz des Laserstrahls als Gerade von dem Punkt, an dem der Messstrahl ausgestrahlt wird zum Mittelpunkt des Laserspots. Neitzel (2006) demonstriert die Berechnung der Achsfehler für einen terrestrischen Laserscanner (Modell Imager 5003 von ZOLLER+FRÖHLICH).

Atmosphärische Fehler

Eine Distanzmessung wird auch von den zur Messzeit vorliegenden Umweltbedingungen beeinflusst. Die Ausbreitung von Lichtwellen ist u.a. abhängig von der Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, der Brechzahl des Mediums, in der sich die Welle ausbreitet sowie von der Wellenlänge selbst. Korrekturterme zu der gemessenen Distanz können rechnerisch angebracht werden, die erforderlichen Rechenschritte sind beispielsweise in Baumann (1998) erläutert. Atmosphärische Einflüsse haben meist einen vernachlässigbaren geringen Einfluss auf die Distanzmessung eines Laserscanners, in der Regel ist es ausreichend, eine geschätzte Umgebungstemperatur anzugeben. Bei einer Temperaturdifferenz von 10° Celsius und 40 hPa liegt der Distanzfehler bei einer Messentfernung von 100 m bei ca. 2 mm und somit unterhalb der Distanzmessgenauigkeit der meisten Geräte (Tauber, 2005). Allerdings werden die Distanzmessungen durch größere Partikel in der Luft wie Staub, Dampf und Regentropfen erheblich beeinflusst. An solchen Partikel kann der Messstrahl reflektiert werden und es werden in der Folge Fehlmessungen registriert.

Objektbezogene Fehler

Fehler dieser Art werden von den gescannten Objekten selbst hervorgerufen und entstehen in erster Linie durch die reflektorlose Distanzmessung. Bei der reflektorlosen Distanzmessung muss ein Teil des ausgestrahlten Laserlichts in Richtung des Sensors reflektiert werden. Es wird zwischen einer *diffusen Reflexion*, *Spiegelreflexion* und *Retroreflexion* unterschieden. In den meisten Fällen kann von einer diffusen oder gerichtet diffusen Reflexionseigenschaft der Oberfläche ausgegangen werden. Aufgrund der Rauigkeit von Oberflächen wird das Licht in der Regel nach dem Lambert'schen Strahlungsgesetz diffus zurückgestreut. Die Spiegelreflexion tritt nur bei natürlichen Oberflächen üblicherweise nicht auf, nach dem Reflexionsgesetz von Snellius kommt es hier zu einer vollständigen Reflexion des Lichts. Bei einem schrägen Einfallswinkel des Laserlichts auf eine solche Oberfläche wird also kein Anteil zurück in Richtung der Lichtquelle reflektiert. Wird der einfallende Strahl zum größten Teil wieder in Richtung der Strahlungsquelle reflektiert, liegt eine Retroreflexion vor.

Die Signalstärke des reflektierten Signals hängt stark von der Beschaffenheit des gescannten Objekts ab, entscheidenden Einfluss haben dabei die Eigenschaften des Materials (z.B. Oberflächenstrukturen von Stein, Holz, Metall, Styropor, etc.) sowie die Oberflächenfarbe. Manche Flächen reflektieren das Laserlicht besser als andere. Als Maß der Reflexion wird der Reflexionskoeffizient ρ angegeben, der je nach Materialart zwischen 0% und 100% liegen kann. Untersuchungen zur Reflektivität verschiedener Oberflächen und Farben wurden beispielsweise von Kersten u. a. (2005) und Schulz und Ingensand (2004) durchgeführt. Böhler u. a. (2003) geben für verschiedene Laserscanning-Instrumente eine Distanzkorrektur für unterschiedliche Oberflächenmaterialien an.

Die Form des zu vermessenden Objekts kann sich ebenfalls negativ auf die Messung auswirken. Durch die Strahldivergenz eines Lasers trifft der Messstrahl flächenhaft auf das Objekt, als Folge können insbesondere im Bereich von Kanten und Ecken Fehler bei der Distanzmessung entstehen. Eine große Strahldivergenz führt zu einer großen Reflexionsfläche am Objekt. Bei Ecken oder Kanten wird der Messstrahl von den einzelnen Flächen unterschiedlich zurückgeworfen, die gemessene Distanz wird für Innenecken kürzer und für Außenecken länger. Das Ergebnis sind ausgerundete Ecken mit Abweichungen, die größer als 2 cm sein können und somit die Messgenauigkeit der Instrumente übersteigen. Auch Mehrwegeeffekte an Ecken können die Messung negativ beeinflussen (Runne u. a., 2001).

Ebenfalls kann der Einfallswinkel des Messstrahls zu fehlerhaften Distanzmessungen führen. Die Standardabweichung einer gemessenen Distanz zu einer ebenen Fläche wächst mit größerem Einfallswinkel des Laserstrahls (Ingensand, 2006). Weitere Einflussgrößen, die sich auf die Distanzmessung auswirken können, sind die Polarisierung des Lichts, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Oberflächen (Reshetuyuk, 2006).

Methodische Fehler

Methodische Fehler werden nicht durch das Instrument, Objekt oder Umgebung verursacht, sondern entstehen durch die Art der Datenaufnahme und den angewandten Verfahren zur Bearbeitung der Messdaten. Nach Staiger (2005) wird die Qualität der Scandaten auch durch die Punktdichte am Objekt, der Anzahl der Standpunkte und der Zahl der verwendeten Verknüpfungspunkte sowie die Messentfernung zum Objekt beeinflusst. Werden bei der Datenaufnahme bereits Fehler gemacht, so ist unter Umständen die resultierende Punktwolke für eine weitere Auswertung wertlos. Durch Abschattungen können wichtige Bereiche eines Objekts nicht erfasst worden sein oder eine Verknüpfung der einzelnen Standpunkte ist mangels identischer Punkte nicht durchführbar. Auch kann die Detektion von Zielmarken fehlerhaft sein, beispielsweise durch eine ungenaue Bestimmung des Mittelpunkts einer kugelförmigen Zielmarke aus den gemessenen Punktdaten (Kersten u. a., 2004).

2.3 Einsatz von Laserscanning

Terrestrische Laserscanner werden heute für viele verschiedene Anwendungen eingesetzt. Ein entscheidender Vorteil des Verfahrens ist die *direkte Messung* metrischer Koordinaten in 3D von einem Standpunkt aus. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, die sich durch eine hohe Punktdichte am Objekt auszeichnet. Das Verfahren erfasst die Objekte im Sichtfeld des Laserscanners *berührungslos*, *schnell* und *vollständig*. Die Kombination dieser Eigenschaften in einem einzigen Gerät bietet einen Vorteil gegenüber anderen Messmethoden, der entscheidend für die schnelle Verbreitung und für die breite Akzeptanz der Geräte gewesen ist. Terrestrische Laserscanner werden oftmals *statisch* betrieben, das Messinstrument befindet sich während der Messung an einem festen Standort. Durch die schnelle Messung können Laserscanner aber auch *kinematisch* betrieben werden, die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt hierbei nur in eine Richtung, gleichzeitig wird das Instrument fortbewegt. Die beiden Verfahren werden in den folgenden Unterabschnitten näher erläutert.

2.3.1 Statisches terrestrisches Laserscanning

Werden mit einem Laserscanner statische Messungen durchgeführt, so bleibt das Gerät während der Messung, die nur wenige Sekunden aber auch mehrere Minuten dauern kann, auf einem Standpunkt stehen. Jedoch sind in der Regel mehrere Gerätestandpunkte erforderlich, um ein Objekt von allen Seiten zu erfassen. Die Messdaten von den verschiedenen Standpunkten müssen in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert werden, in der Photogrammetrie wird dieser Vorgang als *Orientierung* bezeichnet. Im Bereich des Laserscannings wird diese Aufgabe üblicherweise *Registrierung* genannt.

Die Messpunkte werden entsprechend einer definierten Transformationsvorschrift in ein übergeordnetes Bezugssystem transformiert. Dies kann beispielsweise ein lokales, durch den Laserscanner definiertes System, ein objekt- oder projektbezogenes Koordinatensystem oder auch ein amtliches Festpunktfeld in Gauß-Krüger oder UTM Koordinaten sein. Eine Transformation der im lokalen Scannerkoordinatensystem gemessenen Punkte $\mathbf{x}_L = (x_L, y_L, z_L)^T$ in einen Punkt $\mathbf{x}_G = (x_G, y_G, z_G)^T$ eines übergeordneten Systems kann über eine Verkettung von Transformationsmatrizen erfolgen. Eine mögliche Transformationskette lautet:

$$\mathbf{x}_G = \mathbf{H}_{P-G} \cdot \mathbf{H}_{S-P} \cdot \mathbf{x}_L \quad (2.4)$$

Die Transformationsmatrizen $\mathbf{H}_{P-G}$ und $\mathbf{H}_{S-P}$ definieren in diesem Beispiel die Transformationsvorschrift von einem projektbezogenen in ein übergeordnetes globales System bzw. von einem lokalen Scannersystem in ein projektbezogenes System. Eine detaillierte Erläuterung über die Zusammensetzung der Transformationsmatrizen erfolgt in Kapitel 3.1.1.

Terrestrische Laserscanner werden üblicherweise beliebig im Raum platziert, oder in Analogie zur Stationierung von Tachymetern *frei stationiert*. Eine Horizontierung der Instrumente ist nicht erforderlich. Eine Stationierung auf einem bekannten Punkt ist unüblich, da zum einen mit einem Laserscanner die Richtung zu einem Anschlusspunkt nur umständlich festgelegt werden kann. Zum anderen können die wenigsten Scanner exakt auf einem vermarkten Punkt aufgestellt werden, da die Lage des Nullpunktes der Instrumente in der Regel nicht bekannt ist. Dies bedeutet, dass bei der Registrierung zweier Standpunkte zueinander sechs Freiheitsgrade, drei Rotationen und drei Translationen, zu bestimmen sind. Dies kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Die Registrierung der Scandaten mittels identischer Pass- und Verknüpfungspunkte ist üblich. In

der Regel werden spezielle Zielmarken von jedem Standpunkt aus erfasst, in den Scans identifiziert und für die Berechnung der Transformationsparameter verwendet. Bei einer ausreichenden Anzahl an identischen Punkten und einer guten geometrischen Anordnung liefert dieses Verfahren sehr genaue und zuverlässige Ergebnisse. Entscheidender Nachteil ist jedoch der erhöhte Zeitaufwand bei der Datenerfassung, die Zielmarken müssen im Objektraum verteilt, in allen Standpunkten identifiziert und meistens in einer hohen Auflösung separat gescannt werden. Die Abbildung 2.8 zeigt schematisch den typischen Ablauf eines Laserscanning Projekts.

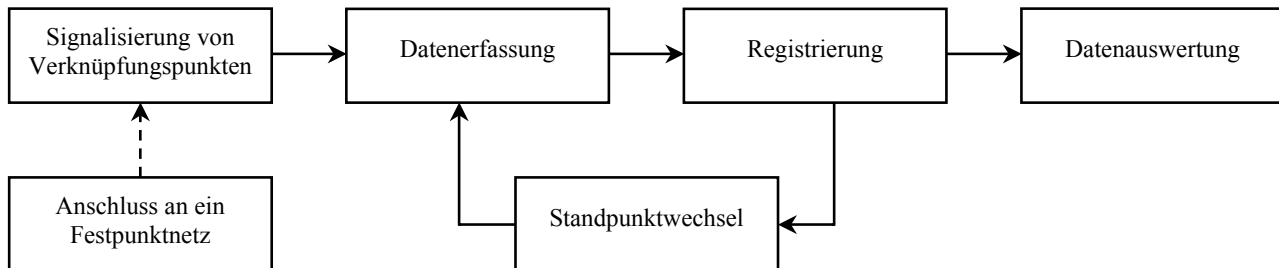


Abb. 2.8: Typischer Ablauf eines Laserscanning Projekts.

2.3.2 Kinematisches terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning wird aber auch mehr und mehr kinematisch eingesetzt. Kutterer (2007) unterscheidet in zwei Varianten des kinematischen Laserscannings, zum einen die Erfassung bewegter Objekte von einem festen Standpunkt aus und zum anderen die Erfassung ruhender Objekte mit einem bewegten Laserscanner. Unter dem Aspekt der Registrierung von Scandaten fällt die erste Variante auch unter die statische Erfassung, da die sich in diesem Fall die Position des Messinstruments nicht ändert. Für den Fall des bewegten Scanners wird das Instrument auf einer beweglichen Plattform (z.B. Auto, Handwagen, Eisenbahn) montiert und die Messdaten kontinuierlich während der (definierten) Fortbewegung des Instruments erfasst. Der Scanner wird als sogenannter *pushbroom-Sensor* betrieben. Die Messsysteme sind in diesem Fall auch unter dem englischen Stichwort *Mobile Mapping Systems* bekannt, außerdem wird der Begriff *Mobiles Laser Scanning* (MLS) verwendet (siehe z. B. Rieger u. a. (2007)).

Bei kinematischen Messungen muss die Position und Orientierung des Scanners streng genommen für jeden einzelnen Messpunkt bestimmt werden. Dies ist nur über externe Sensoren möglich, welche die Orientierungsdaten mit entsprechender Geschwindigkeit und ausreichender Genauigkeit liefern. In der Praxis wird für die Bestimmung der Positionsdaten in der Regel eine inertielle Messeinheit (IMU⁴) mit einem GPS-Empfänger kombiniert. IMU-Systeme sind in der Lage die Positionierungsdaten mit einer sehr hohen Datenrate zu liefern, allerdings verschlechtert sich die Genauigkeit mit zunehmender Messzeit (Drift). Daher werden die Messdaten der IMU in regelmäßigen Abständen mit Hilfe von genauen DGPS⁵-Daten, die auch langfristig eine hohe absolute Genauigkeit aufweisen, korrigiert. Gemessene Neupunkte werden an die aufgezeichneten Standpunktkoordinaten polar angehängt und liegen somit koordinatenmäßig unmittelbar nach der Messung in dem gewünschten Zielsystem vor. Diese Art der Registrierung wird als *direkte Georeferenzierung* bezeichnet. Allerdings sind externe Sensoren mit Kosten und Aufwand verbunden, eine IMU verursacht hohe Kosten und die Synchronisation der Positionierungsdaten und der Messdaten des Laserscanners erfordert zusätzlichen technischen Aufwand.

Ein Vorteil der kinematischen Aufnahme liegt in dem deutlich geringeren Zeitaufwand für die Datenerfassung. Im Gegensatz zu dem statischen Aufnahmeverfahren ist keine zeitaufwändige Registrierung der Scandaten über Passpunkte erforderlich. Die Datenerfassung mittels MLS eröffnet dem Laserscanning weitere Anwendungsgebiete, welche sich von den statischen Anwendungen hinsichtlich der Auswahl der Messobjekte und der erreichbaren Messgenauigkeit abgrenzen. Allerdings setzt ein kinematischer Einsatz voraus, dass die Messobjekte von Fahrwegen aus erreichbar und ausreichend sichtbar sind. Außerdem ist die Aufnahme detaillierter Scans von ausgewählten Bereichen nicht möglich.

Die direkte Georeferenzierung von Lasermesssystemen über externe Sensoren, bestehend aus GPS und IMU, wird bei luftgestützten Systemen standardmäßig verwendet. Auch terrestrische Systeme wurden bereits an externe

⁴IMU (engl.), Abkürzung für Intertial Measurement Unit.

⁵DGPS (engl.), Abkürzung für Differential Global Positioning System.

Sensoren für die Bestimmung von Position und Orientierung gekoppelt. Bei terrestrischen Systemen könnten in naher Zukunft nach einer Einschätzung von Pfeifer und Briese (2007) sogenannte *Low-Cost* Sensoren den Prozess der automatischen Registrierung unterstützen. In den folgenden Abschnitten werden daher MLS-Systeme weiter erläutert.

2.3.3 Systemkomponenten eines MLS Systems

Ein MLS System setzt sich aus einem Laserscanner für die Erfassung von 3D-Daten und einem System für die Ermittlung der aktuellen Positionierungsdaten zusammen. Die Art der zum Einsatz kommenden Systeme für die Datenerfassung wie auch für die Bestimmung der Positionierung können variieren. Bei hohen Anforderungen an das System wird üblicherweise ein GPS/IMU System für die Messung von Positions- und Orientierungsdaten verwendet. Solche Systeme werden bereits seit längerer Zeit im luftgestützten Laserscanning (ALS⁶) oder für andere pushbroom-Sensoren eingesetzt (siehe z. B. Lindenberger (1993); Cramer u. a. (1999)) und bestehen aus einer Kombination eines GPS-Empfängers und einer IMU. GPS und IMU Systeme sind komplementär, ein DGPS liefert die Position mit einer hohen absoluten Genauigkeit, aber mit einer maximalen Datenrate von wenigen Hertz. Eine IMU dagegen liefert relative Positions- und Orientierungsdaten mit einer sehr hohen Frequenz (bis zu mehreren 100 Hertz), jedoch weisen die Systeme einen zeitabhängigen Drift auf. Die Zusammenführung der Messdaten beider Systeme ermöglicht die Bestimmung der Orientierungsdaten mit einer hohen Datenrate und mit einer konstanten absoluten Genauigkeit im unteren Dezimeterbereich (Kukko u. a., 2007; Asai u. a., 2005a; Cramer u. a., 1999). Die Abbildung 2.9 zeigt schematisch die einzelnen Systemkomponenten eines solchen Systems.

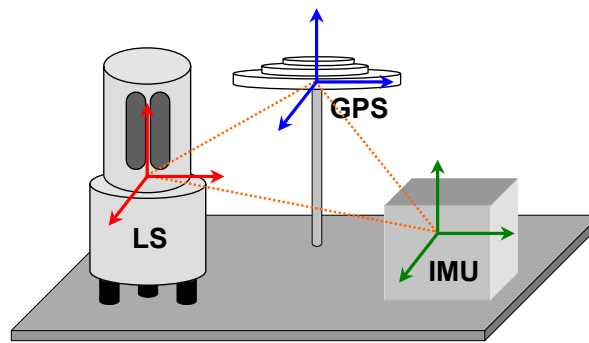


Abb. 2.9: Hauptkomponenten eines MLS-Systems und die entsprechenden Koordinatensysteme.

Die Komponenten eines MLS Systems müssen im Vorfeld kalibriert werden, Offsets und Verdrehungen zwischen den einzelnen Sensoren müssen bestimmt und bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt werden. Außerdem ist eine Synchronisation zwischen den Positionierungsdaten und den dreidimensionalen Messdaten notwendig. Hierzu ist ein präziser Zeitstempel in beiden Datensätzen erforderlich. Im Vergleich zu ALS Systemen können bei MLS Systemen während der Datenerfassung Störungen im GPS-Empfang durch Sichtbeschränkungen zu den Satelliten auftreten, eine mindere Qualität der Positionslösung ist die Folge. Insgesamt gesehen ist der Aufbau eines MLS Systems technisch aufwändig und mit erheblichen Kosten für die zusätzlichen Sensoren, insbesondere für die IMU, verbunden. Im folgenden Kapitel wird eine Auswahl von *Mobilen Mapping Systemen* vorgestellt.

2.3.4 Beispiele für mobile Messsysteme

Die Abbildung 2.10 zeigt mobile Messsysteme, bei denen ein terrestrischer Laserscanner auf eine mobile Plattform, (in den meisten Fällen auf ein Kraftfahrzeug) montiert wurde. Der CityGRID Scanner der „GeoDATA IT GmbH“ (Abb. 2.10 (a)) wird vorwiegend für die Erfassung von Stadtgebieten eingesetzt und zeichnet sich durch eine Messplattform aus, die bis zu 4,2m über den Erdboden ausgefahren werden kann. Dadurch wird die Messung von Häuserfassaden nicht durch parkende Autos oder andere Hindernisse beeinträchtigt. Die Laserscanning Daten werden in einem Stop & Go Modus erfasst und die Registrierung erfolgt über vermessene Passpunkte oder einen ICP⁷-Algorithmus. Im dynamischen Messmodus werden hauptsächlich Bilddaten mit Digitalkameras bei Schrittgeschwindigkeit erfasst, die zusammen mit den Scandaten für die spätere Modellierung

⁶ALS (engl.), Abkürzung für Airborne Laser Scanning.

⁷ICP (engl.), Abkürzung für Iterative Closest Point. Der ICP-Algorithmus wird in Kapitel 3.3.1 erläutert.

eines Stadtmodells genutzt werden (Sevcik und Studnicka, 2004). Aufgrund der Art der Registrierung gehört der CityGRID Scanner nicht zu den mobilen Messsystemen mit direkter Georeferenzierung, aber das System kann als Vorstufe eines mobilen Messsystems angesehen werden, mit dem die Datenerfassung mittels TLS in Stadtgebieten optimiert wurde.



(a) CityGRID Scanner
(entnommen aus Sevcik und Studnicka (2004))



(b) Messfahrzeug des NAIST (entnommen aus Asai u. a. (2005b))



(c) FGI-Roamer
(entnommen aus Kukko u. a. (2007))



(d) Geomobil (entnommen aus Talaya u. a. (2004))



(e) StreetMapper



(f) RAMSYS (Hesse, 2008)

Abb. 2.10: MLS-Systeme mit terrestrischen Laserscannern.

Das „Nara Institute of Science and Technology“ (Japan) hat ein Fahrzeug mit einem Laserscanner (Modell RIEGL LMS-Z360), einem RTK⁸-GPS (NIKON-TRIMBLE LogPakII) und einer IMU (TOKIMEC TISS-5-40) ausgestattet. Das System wird sowohl für eine Datenerfassung im Stop-&-Go als auch im kinematischen Modus verwendet. Dabei werden zuerst hochauflösende statische Aufnahmen gemacht und hinterher Lücken in den Messdaten durch kinematische Scans ergänzt. Für die Registrierung der Daten werden die statischen Scans anhand der gemessenen Orientierungsdaten und einem zusätzlichen Algorithmus zusammengeführt. Die kinematischen Scans werden anschließend in das Modell eingefügt (Asai u. a., 2005b).

Eine Entwicklung des „Finnish Geodetic Institute“ (Finnland) ist der sogenannte ROAMER (Abb. 2.10 (c)), ein mit einem terrestrischen Laserscanner ausgestattetes Messfahrzeug. Der Scanner (Modell FARO LS88) kann auf einer speziellen Plattform auf dem Fahrzeug variabel ausgerichtet werden und so den Messanforderungen angepasst werden. Eine Erfassungsrate von 120 kHz garantiert selbst für Geschwindigkeiten von 70-80 km/h einen Punktabstand von < 1 m in Fahrtrichtung. Für die Positionierung kommt ein GPS/IMU System zum Einsatz, das zusammen mit dem GPS-System im RTK Modus betrieben werden kann. Weitere Einzelheiten können Kukko u. a. (2007) entnommen werden.

Ein ähnliches Messfahrzeug wurde am „Institut Cartografic de Catalunya“ in Barcelona (Spanien) entwickelt. An dem als GeoVAN oder ehemals als Geomobil bezeichnete Fahrzeug sind neben einem Laserscanner auch zwei CCD-Kameras angebracht, welche für Stereoaufnahmen genutzt werden. Die Orientierung der Sensoren erfolgt ebenfalls über ein GPS/IMU System, die Orientierungs- und Laserdaten werden über ein Zeitsignal synchronisiert. Details über das System sind beispielsweise in Talaya u. a. (2004) enthalten.

Das StreetMapper System (Abb. 2.10 (e)) ist eine kommerzielle Entwicklung und ist mit vier terrestrischen Laserscannern (Modelle der Firma RIEGL) sowie einem GPS/IMU System (IGI TERRAControl) ausgestattet. Die Auswertesoftware ist in der Lage die Positions- und Orientierungsdaten auch bei temporär eingeschränkten

⁸RTK (engl.), Abkürzung für ReaT-Time Kinematic.

GPS-Empfang zu bestimmen. Die relative Genauigkeit des Systems liegt bei 25 mm und die absolute Genauigkeit der GPS/IMU-Trajektorie in der Regel zwischen 50 mm und 0,5 m. Das mobile Messsystem wurde in erster Linie für die Erfassung von Straßenoberflächen sowie der unmittelbaren Umgebung entwickelt. Anwendungen des Systems liegen im Bereich der Planung von Schwertransporten, der schnellen Erfassung von Unfallstellen und der Erstellung von Stadtmodellen (Hunter u. a., 2006).

Hesse (2008) stellt einen Prototyp für ein mobiles Messsystem mit dem Namen RAMSYS (RAPID Mapping SYStem) vor, welches auf eine kostenintensive Inertialmesseinheit verzichtet und mit Positionsmessungen eines GPS-Empfängers und den Neigungsdaten eines Inklinometers für die direkte Georeferenzierung auskommt. Die notwendigen Orientierungsdaten werden über einen kinematisch formulierten Kalman-Filter für die Erfassungszeitpunkte des Laserscanners präzisiert.

2.3.5 Hybride Messsysteme

Terrestrische Laserscanner werden häufig mit einem zusätzlichen Bildsensor ausgestattet. Neben der Aufnahme von 3D-Punktwolken ist es möglich mit solchen hybriden Messsystemen auch Bilddaten zu erfassen. Häufig werden die Punktwolken unter Verwendung zusätzlich erfasster Bilddaten eingefärbt. Dabei wird jedem 3D-Messpunkt der entsprechende Farbwert aus den Bilddaten zugeordnet. Es entsteht eine Punktwolke, welche die erfasste Umgebung realistisch wiedergibt. Allerdings wird bei diesem Verfahren viel Information aus den Bildern verworfen, denn die Bilddaten haben in der Regel eine höhere Auflösung als die Scandaten. Liegt eine Triangulation der Punktwolke vor, können die höher aufgelösten Bilddaten für eine Texturierung der Dreiecke verwendet werden. Bild- und Scandaten sind somit komplementär und liefern zusätzliche Informationen für eine auf die Messung folgende Datenauswertung. Becker u. a. (2004) beschreiben beispielsweise ein Softwarepaket, mit dem Laserscanning- und photogrammetrische Daten simultan ausgewertet werden können. Die Abbildungen 2.11 (a) und (b) zeigen jeweils die Originaldaten der einzelnen Datenquellen. Abbildung 2.11 (c) zeigt eine farbige Punktwolke, bei der viel Information aus den Bildern verworfen wurde und in (d) ist eine texturierte Triangulation zu sehen, bei der die hoch aufgelösten Bilddaten auf Dreiecke projiziert wurden, die durch eine Triangulation der Punktwolke entstanden sind.

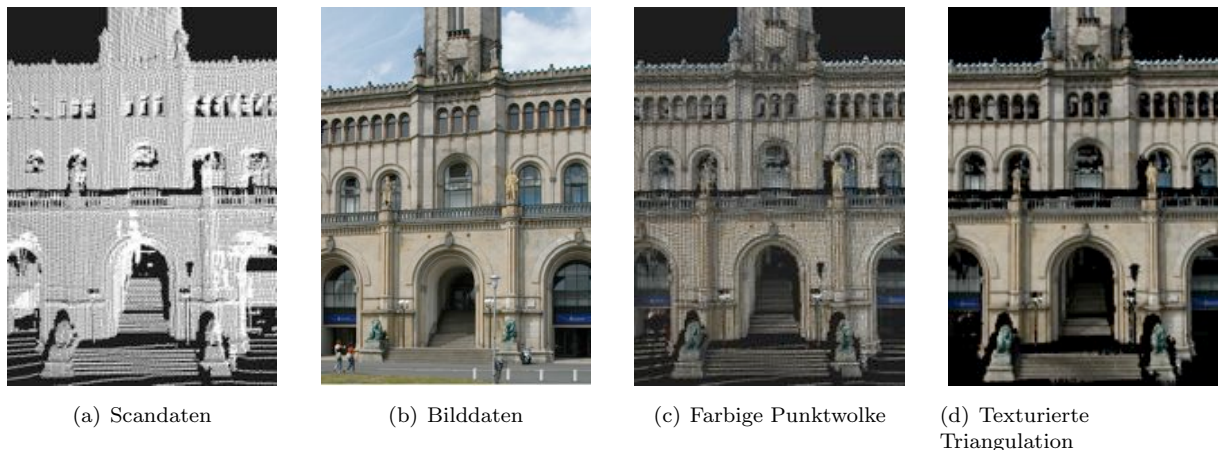


Abb. 2.11: Unterschiedliche Auflösung der Laserscanning- ($0,12^\circ$) (a) und der Bilddaten ($0,03^\circ$) (b) sowie Beispiele für eine Kombination der Daten (c) und (d).

Für die Kombination von Laserscanning- und Bildsensoren existieren verschiedene Konzepte. Die Kamera kann fest in das Gehäuse des Scanners integriert werden, eine handelsübliche Digitalkamera wird zusätzlich (extern) an das Messinstrument montiert oder die Bilder werden unabhängig von dem Standort des Messinstruments getrennt erfasst. Die verschiedenen Techniken haben jeweils Vor- und Nachteile. Bei dem Einsatz von externen Bildsensoren bleibt eine hohe Flexibilität bei der Wahl der Sensoren, eine Anpassung an projektbezogene Erfordernisse hinsichtlich Objektiv und Auflösung des Bildsensors ist einfach möglich. Allerdings müssen die Sensoren immer wieder zueinander kalibriert werden, damit eine korrekte Verknüpfung von Punkt- und Bilddaten erfolgen kann. Konzepte für die Kalibrierung von externen Sensoren für eine kombinierte Nutzung der Daten wurden in einer Publikation von Wendt und Dold (2005) diskutiert. Das Potential der Orientierungsbestimmung unter simultaner Verwendung multisensoraler Bilddaten wird in der Arbeit von Wendt (2008) untersucht und eine zweistufige Methode für die Orientierungsbestimmung vorgestellt.

Im Folgenden wird gezeigt, wie Bilddaten mit den Punktwolken verknüpft werden können. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Bildsensor extern an den Scanner montiert ist und die benötigten Exzentrizitäten zwischen den Sensoren bekannt sind. Die Abbildung 2.12 stellt die Koordinatensysteme von Laserscanner und Kamera dar. Der Ablauf lehnt sich an das von RIEGL verwendete Verfahren an (Riegl, 2006).

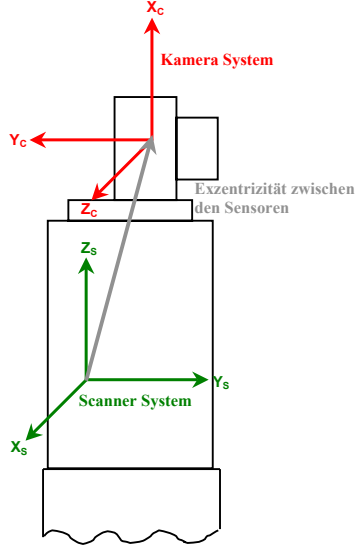


Abb. 2.12: Schematische Darstellung der Koordinatensysteme von Laserscanner und Kamera.

Das Koordinatensystem des Laserscanners wird mit $\mathbf{x}_S$, und das der Kamera mit $\mathbf{x}_C$ bezeichnet. Die Transformation zwischen den beiden Systemen setzt sich aus einer Rotations- und Translationskomponente zusammen. Ein Maßstab ist durch den geeichten Laserscanner definiert, der für das Kamerakoordinatensystem übernommen wird. Die Transformation zwischen den beiden dreidimensionalen Systemen ist über die sogenannte Mounting-Matrix definiert:

$$\mathbf{M}_{Mount} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Für die komplette Abdeckung eines Scans mit Bilddaten sind üblicherweise mehrere Aufnahmen notwendig. Das hybride Messsystem fährt hierzu durch eine Drehung um die Stehachse verschiedene Positionen an, von denen jeweils eine Bildaufnahme gemacht wird. Dies bedeutet, dass zusätzlich zu der Mounting-Matrix noch eine Drehung der Kamera um die z-Achse bei der Berechnung der Transformationsvorschrift zwischen Bild- und Scandaten berücksichtigt werden muss. Die entsprechende Drehmatrix ist durch Gleichung 2.6 definiert.

$$\mathbf{M}_{Camera} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Schließlich ergibt sich die gesamte Transformationskette zwischen einem 3D-Punkt von dem Koordinatensystem des Laserscanners in das dreidimensionale Kamerasystem zu:

$$\mathbf{x}_C = \mathbf{M}_{Mount} \cdot \mathbf{M}_{Camera}^{-1} \cdot \mathbf{x}_S \quad (2.7)$$

In einem letzten Schritt muss noch die Beziehung zwischen den 3D Koordinaten des Kamerakoordinatensystems und dem zweidimensionalen Bildkoordinatensystem hergestellt werden. Für diese Transformation wird ein Modell der Open Source Computer Vision Bibliothek (Intel, 1999-2001) verwendet. Die Beziehung zwischen einem 3D Punkt des Kamerasystems und dessen Projektion ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & c_u \\ 0 & f_v & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

In Gleichung 2.8 bezeichnen u, v, w die bereits entzerrten homogenen Bildkoordinaten, f_u und f_v geben die Brennweite getrennt für die zwei Richtungen des Bildsensors an und c_u und c_v sind die Koordinaten des Bildhauptpunkts. Die unterschiedlichen Brennweiten berücksichtigen bei Bedarf unterschiedliche Pixelgrößen des Sensors in u und v Richtung. Für eine Entzerrung der Bilddaten werden zusätzlich Parameter für die Linsenverzeichnung benötigt. Hierfür müssen die Bildkoordinaten korrigiert werden, die Koordinaten nicht entzerrter Bilder u' und v' berechnen sich wie in Gleichung 2.9 angegeben.

$$\begin{aligned} u' &= u + x f_u (k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2 f_u x y p_1 + p_2 f_u (r^2 + 2 x^2) \\ v' &= v + y f_v (k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2 f_v x y p_2 + p_1 f_v (r^2 + 2 y^2) \end{aligned} \quad (2.9)$$

mit:

$$x = \frac{u - c_u}{f_u}; y = \frac{v - c_v}{f_v}; r^2 = x^2 + y^2 \quad (2.10)$$

Die Parameter k_1 - k_4 stehen für die radialen und p_1 - p_2 für die tangentialen Verzeichnungen. Anhand der genannten Transformationen und der Projektion der Bildpunkte kann auf diese Art jedem 3D Messpunkt ein entsprechender Farbwert aus den Bilddaten zugeordnet werden.

2.3.6 Anwendungen des terrestrischen Laserscannings

Im Bereich des Vermessungswesens hat sich das Laserscanning insbesondere in der Bestandsdokumentation bewährt, die flächenhafte und detailgenaue Erfassung der Umgebung bietet zahlreiche Möglichkeiten für die Verarbeitung und Interpretation der Messdaten. Typische Anwendungsgebiete in diesem Bereich sind die Aufnahme von Bauwerken, insbesondere im Bereich der Denkmalpflege, aber auch die Bauwerksüberwachung und Kollisionsprüfung spielen eine entscheidende Rolle. Durch die in der Regel vollständige Erfassung des Messobjekts kann die Auswertung der Daten auch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen und bei Bedarf sich ändernden Anforderungen angepasst werden. Weitere Anwendungsgebiete liegen im Bereich der Ingenieurvermessung, Architektur, Stadtplanung, Erstellung von detaillierten 3D-Stadtmodellen, aber auch für topographische Aufnahmen und bei der Unfalldokumentation und der Forensik wird Laserscanning häufig eingesetzt. Beispiele für die häufigsten Anwendungen können an dieser Stelle nur exemplarisch genannt werden.

Das Laserscanning im Bereich der Bauaufnahme kommt oftmals bei Objekten zum Einsatz, bei denen keine CAD-Zeichnungen vorliegen und ein geplantes Bauvorhaben eine Bestandsaufnahme erfordert (siehe z. B. Weber (2002); Broser (2007)). In der Ingenieurgeodäsie eignen sich die 3D-Daten für Deformationsmessungen beispielsweise bei Talsperren (Eling und Kutterer, 2006) oder Schleusen (Schäfer, 2004). Anstelle der Messung und Überprüfung einzelner Kontrollpunkte ermöglicht das Laserscanning eine flächenhafte Analyse der Oberflächen. Auch komplette Industrieanlagen werden oftmals mittels Laserscanning erfasst, ein großer Vorteil ist hierbei das schnelle und berührungslose Aufmaß wodurch Betriebsabläufe bei der Messung kaum beeinträchtigt werden. Simulationen oder die Planung für den Einbau von neuen Bauteilen können direkt anhand der erfassten 3D-Daten oder eines abgeleiteten Modells erfolgen und mögliche Kollisionen werden bereits im Vorfeld vermieden (Wagner und Hasse, 2004).

Barber u. a. (2005) schlagen für den Denkmalschutz Richtlinien für die Abwicklung eines Projekts mittels terrestrischem Laserscanning vor. Standardisierte Datenformate vereinfachen einen Austausch von Projekten sowie eine einheitliche Archivierung von Daten. Lichti und Gordon (2004) nennen mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen, die das Potential des terrestrischen Laserscannings für die Aufnahme von Kulturdenkmäler diskutieren und Ergebnisse präsentieren.

Auch für forstwirtschaftliche Anwendungen ist das terrestrische Laserscanning interessant, Bäume und deren Ausmaße können automatisch aus den Daten extrahiert werden (Pfeifer u. a., 2004; Bienert u. a., 2007). Des Weiteren kann das Laserscanning für topographische Aufnahmen (Hönniger und Kersten, 2005) oder auch im Bereich der Forensik (Köstner, 2007) eingesetzt werden.

Das kinematische terrestrische Laserscanning wird häufig für die Erfassung kompletter Straßenzüge eingesetzt. Das Anwendungsfeld ist eng mit einem Forschungsgebiet der Robotik verbunden. Autonom fahrende Roboter werden mit 3D-Laserscannern (meist preisgünstige Industriescanner der Fa. SICK⁹) ausgestattet und die Messdaten genutzt, um den Roboter entweder innerhalb einer bekannten Umgebung zu orientieren oder anhand der Daten und der bekannten Position des Roboters die Umgebung zu kartieren. Im zweiten Anwendungsfall ist die Position des Roboters in der Regel fehlerbehaftet. Daher müssen für die Kartierung der Umgebung neben den

⁹<http://www.sick.de> (Zugriff im Oktober 2009)

Orientierungsdaten auch die Messdaten der Laserscanner verwendet werden. Das Problem wird als simultanes Lokalisations- und Kartierungsproblem bezeichnet (*SLAM*, *simultaneous localization and mapping*) (Nüchter, 2007; Wulf u. a., 2004). Im Bereich der Stadtmodellierung nutzen Früh und Zakhov (2003) terrestrische Laserscanning Daten für die Aufnahme von Fassaden und verknüpfen die Daten mit luftgestützten Laserscans. Kress-Lorenz u. a. (2004) stellen ein System vor, mit dem aus einer Kombination von 3D- und Bildsensoren Verkehrszeichen erkannt werden. Auch Kombinationen aus statischen und kinematischen Verfahren finden in der Praxis Anwendung. Die Datenerfassung erfolgt in diesem Fall von einer mobilen Plattform aus, z.B. einem Auto, in einem Stop & Go Modus. Gleichzeitig werden die Orientierungsdaten mittels externer Sensoren gemessen (Asai u. a., 2005a).

2.4 Zusammenfassung

Messinstrumente für die dreidimensionale Erfassung von Objekten sind im Bereich der Qualitätskontrolle von industriellen Massengütern verbreitet, die Entwicklung der Geräte wird bereits seit über 20 Jahren vorangetrieben (Blais, 2004). Im Jahr 1998 tauchen 3D-Entfernungsmessinstrumente erstmals im Bereich des Vermessungswesens auf (Jacobs, 2004). Die Instrumente messen in der Regel über ein Laufzeitverfahren mit einem Laserstrahl Entfernungen bis zu mehreren Kilometern und haben sich aufgrund der berührungslosen, sehr schnellen und flächenhaften Messung durchgesetzt. Die Aufnahme von Daten mit solchen Instrumenten wird als „Terrestrisches Laserscanning“ bezeichnet und der Begriff „Laserscanner“ ist für die Bezeichnung der Geräte gebräuchlich. Die Laserscanner werden nach ihrer Bauart in verschiedene Klassen eingeteilt, dabei spielt das Sichtfeld der Scanner sowie die Art der Strahlablenkung eine Rolle.

In diesem Kapitel wurden außerdem die Messeigenschaften diskutiert, welche neben den Parametern der Instrumente wie der Schrittweite oder der Spotgröße des Laserstrahls auch wesentlich von den Reflexionseigenschaften sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Messobjekte abhängen. Verschiedene Fehlerquellen wurden angesprochen, Instrumentenfehler und atmosphärische Fehler können durch eine Kalibrierung der Geräte und durch entsprechende Korrekturterme für die gemessene Distanz eliminiert werden. Objektbezogene und methodische Fehler können dagegen in der Regel nur durch eine geschickte Wahl der Standpunkte und entsprechende Sorgfalt bei der Datenerfassung vermieden werden. Die Beseitigung von Messfehlern ist oftmals nur bei der Auswertung bzw. bei der Interpretation der Messdaten möglich und erfolgt in den meisten Fällen manuell.

Die Datenerfassung mit terrestrischen Laserscannern kann aufgrund der Schnelligkeit einer Einzelmessung sowohl statisch wie auch kinematisch erfolgen. Beide Verfahren bieten je nach Anwendung und Messobjekt Vorteile. Für kinematische Messungen werden zusätzliche Sensoren für die Registrierung der Scandaten benötigt. Verfahren für die Registrierung von Scandaten für statisch erfasste Laserscans werden im folgenden Kapitel ausführlich behandelt.

3 Registrierung von terrestrischen Scandaten

Die vollständige Erfassung von Objekten ist in der Regel sowohl bei statischen als auch kinematischen Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner nur möglich, wenn das Objekt von verschiedenen Blickwinkeln aus aufgenommen wird. Durch einen Wechsel des Standpunktes bzw. durch Fortbewegung können Hindernisse umgangen werden. Die Bestimmung der Transformationsparameter zwischen verschiedenen Standpunkten wird als *Registrierung* bezeichnet. Abbildung 3.1 zeigt schematisch eine mögliche Messanordnung für einen statischen Fall mit mehreren Standpunkten für das Messgerät. Jeder Standpunkt definiert ein lokales Koordinatensystem, bezogen auf die Achsen des Scanners.

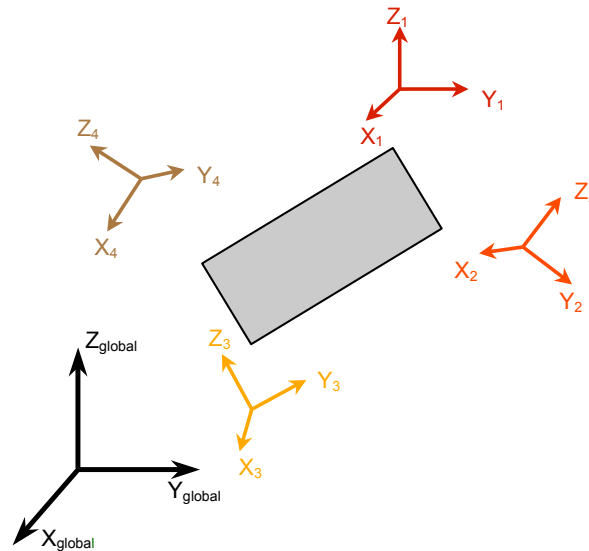


Abb. 3.1: Koordinatensysteme einzelner Standpunkte und globales System.

Die Problematik der Registrierung ist nicht erst seit dem Aufkommen von terrestrischen Laserscannern bekannt. Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema Registrierung wurden bereits kurz nach der Entwicklung entsprechender 3D-Entfernungsmessgeräte veröffentlicht. Ansätze zur automatischen Registrierung von 3D-Datensätzen werden in der Forschung anhaltend diskutiert. Dennoch ist die Registrierung in der Auswertesoftware der Hersteller terrestrischer Laserscanner nur mit manueller Interaktion möglich. Die entwickelten Algorithmen zur Registrierung erlauben bis heute keine zuverlässige und vollautomatische Registrierung verschiedener 3D-Datensätze, welche durch terrestrische Laserscanner erfasst werden. Kern (2003) bezeichnet die automatische Standpunktverknüpfung verschiedener Punktwolken über korrespondierende Objektbereiche als komplex und schließt daraus, dass in der Regel die Auswahl geeigneter Objektbereiche und ihre Identifikation manuell vorzunehmen ist. Auch Rietdorf (2004) sieht im Bereich der vollautomatischen Registrierung von Scandaten noch einen erheblichen Forschungsbedarf hinsichtlich Robustheit und Automatisierbarkeit der bestehenden Ansätze.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Verfahren für die Registrierung von terrestrischen Scandaten diskutiert. Angefangen mit der in der Praxis am häufigsten verwendeten Methode, der Registrierung über identische Punkte, folgen Verfahren für die Registrierung über identische Ebenen sowie eine ausführliche Beschreibung von bestehenden Ansätzen zur Registrierung anhand der Messdaten mit unbekannten Korrespondenzen.

3.1 Registrierung über identische Punkte

In der Praxis erfolgt die Bestimmung der Transformationsvorschrift zwischen verschiedenen Scans üblicherweise mittels identischer Punkte (Pass- bzw. Verknüpfungspunkte), die mit dem Lasermessinstrument von jedem Standpunkt aus in ausreichender Zahl erfasst werden. Für die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade werden die Informationen von drei identischen Punkten benötigt. Die Pass- oder Verknüpfungspunkte werden in der Regel mit Referenzmarken signalisiert, damit sie in dem flächenhaften Scan eines Laserscanners einfach zu erkennen sind. Dabei ist darauf zu achten, dass die Marken sich von der Umgebung abheben und in den Punktwolken gut zu extrahieren sind. Die notwendige Größe der Marken hängt von der Entfernung zum Instrument sowie von der Schrittweite zwischen den einzelnen Messpunkten ab. Je nach Hersteller werden verschiedene Referenzmarken verwendet: Planare Retromarken, zylindrische mit Retrofolie beklebte Marken, Halbkugeln, Kugeln oder einfache

schwarz-weiß-Marken werden zur Signalisierung von Passpunkten verwendet. Abbildung 3.2 zeigt verschiedene Ausführungen von üblichen Referenzmarken.

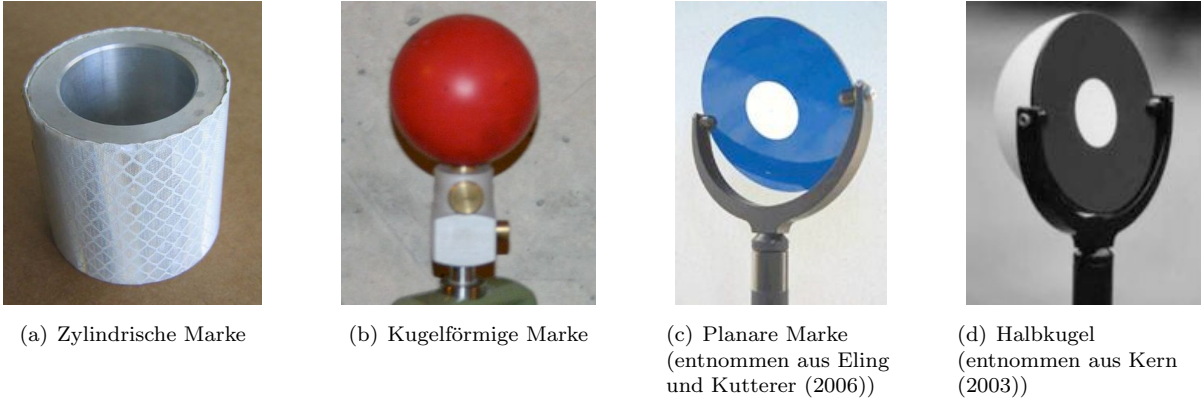


Abb. 3.2: Beispiele für verschiedene Ausführungen von Zielmarken.

Marken dieser Art werden vor dem Scanvorgang im Objektraum möglichst gut verteilt und von den einzelnen Standpunkten in der Regel separat mit hoher Auflösung erfasst. Anschließend werden Korrespondenzen gebildet und die gesuchten Transformationsparameter können berechnet werden. Die Qualität einer Transformationsvorschrift zwischen zwei Standpunkten hängt von der Zahl, der Verteilung und der Messgenauigkeit der verwendeten Passpunkte ab. Die Genauigkeit erhöht sich, falls mehr als die drei notwendigen Passpunkte verwendet werden. Außerdem sollte auf eine gute geometrische Anordnung der Punkte im Objektraum geachtet werden. Der komplette Vorgang der Standpunktverknüpfung ist trotz einer Automatisierung bei der Erkennung der Zielmarken (Bornaz u. a., 2002; Akca, 2003) im Scan und bei der Suche von Korrespondenzen sehr zeitintensiv. Erfahrungen in der Praxis haben gezeigt, dass für die Registrierung ein nicht unerheblicher Zeitbedarf anzusetzen ist, der inklusive dem Ausbringen der Zielmarken die eigentliche Scanzeit mehrfach übersteigt (Jahn u. a., 2004; Sternberg und Braunroth, 2007).

3.1.1 Berechnung der Transformationsparameter

In jedem Aufnahmeort S_i wird durch das Messinstrument ein lokales Koordinatensystem definiert. Aufgabe der Registrierung ist die Bestimmung einer Transformationsvorschrift, welche die relative Beziehung zwischen den Systemen herstellt. Die Euklidische Transformation eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems in ein entsprechendes Zielsystem ist durch sechs Parameter, drei Rotationen und drei Translationen, beschrieben. Auf einen Maßstabsfaktor kann verzichtet werden, dieser ist durch das Lasermessinstrument definiert und somit konstant. Die Transformationsvorschrift zwischen zwei Aufnahmeortpunkten S_1 und S_2 für beliebige korrespondierende Punkte $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^3$ mit $\mathbf{x}_1$ aus S_1 , $\mathbf{x}_2$ aus S_2 kann wie folgt definiert werden:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}'_2 = \mathbf{R}\mathbf{x}_2 + \mathbf{t} \quad (3.1)$$

Hierbei ist $\mathbf{R}$ eine 3×3 Rotationsmatrix, sie enthält die unbekannten Rotationsparameter. Rotationen können mit Euler-Winkel beschrieben werden, aber auch andere Repräsentationsformen, z.B. Quaternionen, sind möglich. Der Vektor $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$ enthält den Translationsanteil der Transformation. Die Beziehung 3.1 kann auch im projektiven Raum $\mathbb{P}^3$ anstelle des euklidischen Raums $\mathbb{R}^3$ formuliert werden. Im projektiven Raum werden sogenannte homogene Koordinaten verwendet, deren Einsatz den Umgang mit räumlichen Beziehungen vereinfacht. Ein Punkt im dreidimensionalen Raum wird in homogenen Koordinaten als ein Vektor in vier Dimensionen repräsentiert, der euklidische Raum wird um einen homogenen Anteil erweitert. Die zusätzliche Komponente entspricht einem Skalierungsfaktor, der frei gewählt werden kann. In der Regel wird für den Faktor der Wert „1“ gewählt. Ein Punkt $x = (x, y, z)^T$ im $\mathbb{R}^3$ entspricht im $\mathbb{P}^3$ der Darstellung $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$. Für die Umrechnung vom $\mathbb{P}^3$ in den $\mathbb{R}^3$ gilt:

$$\begin{aligned} x &= x_1/x_4 \\ y &= x_2/x_4 \\ z &= x_3/x_4 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Hat der homogene Anteil den Wert „0“, so ist eine Transformation in den $\mathbb{R}^3$ nicht möglich. Homogene Koordinaten mit $x_4 = 0$ stellen Punkte im Unendlichen dar (Hartley und Zissermann, 2000). Eine projektive

Transformation im $\mathbb{P}^3$, entsprechend der Transformationsvorschrift 3.1, ist eine lineare Transformation von Punkten mit homogenen Koordinaten, die wie folgt formuliert wird:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}'_2 = \mathbf{H}\mathbf{x}_2 \quad (3.3)$$

$\mathbf{H}$ ist eine 4×4 Transformationsmatrix, welche den Rotations- und Translationsanteil enthält und wie folgt aufgebaut ist:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Für die Bestimmung der unbekannten Parameter $\mathbf{R}$ und $\mathbf{t}$ werden korrespondierende Merkmalspaare aus den Standpunkten S_1 und S_2 herangezogen, aus denen die Lage und Orientierung der Messdaten bestimmt wird. Zu solchen Merkmalen gehören beispielsweise identische Punkte, Geraden, Ebenen und auch geometrische Körper wie Kegel, Zylinder oder Kugeln. Die Merkmale sind je nach Objekt mehr oder weniger für die Translations- bzw. Rotationsbestimmung geeignet. Im Folgenden wird zunächst die Berechnung der Transformationsparameter aus identischen Punkten betrachtet, die bereits in zahlreichen kommerziellen Softwarepaketen implementiert ist. Ein einziges Punktpaar definiert bei gegebener Rotation bereits die Translation eindeutig, für die Bestimmung der Rotation werden dagegen drei Punktpaare benötigt. Für die Bestimmung der unbekannten Parameter wird häufig der quadratische Abstand der Punkte minimiert.

$$E = \sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_{1i} - \mathbf{x}'_{2i})^2 = \sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_{1i} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_{2i})^2 = \sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_{1i} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}_{2i} - \mathbf{t})^2 \quad (3.5)$$

Ein vor allem in der Geodäsie angewandtes Verfahren für eine ausgleichende Parameterbestimmung ist die „Methode der kleinsten Quadrate“, die auch unter den Namen „Schätzung nach der L2-Norm“ oder „Fehlerquadratmethode“ bekannt ist. Die Methode der kleinsten Quadrate wurde nach heutiger Auffassung von C. F. Gauß etwa 1797 entwickelt (Niemeier, 2001). Ein Nachteil der Methode ist, dass für nichtlineare Beobachtungsgleichungen eine Lösung nur iterativ und mit geeigneten Startwerten gefunden wird.

3.1.2 Transformationsbestimmung mit Euler-Winkeln nach der L2-Norm

Gemäß dem Minimumsprinzip der Schätzung nach der L2-Norm wird der quadratische Fehler E aus Gleichung 3.5 minimiert. Hierzu wird ein lineares funktionales Modell (Gauß-Markov) der Form

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \quad (3.6)$$

aufgestellt. $\mathbf{l}$ bezeichnet den Beobachtungsvektor, $\mathbf{v}$ den Verbesserungsvektor ($\mathbf{v}^T \mathbf{v} = E$), $\mathbf{A}$ die Koeffizienten- oder Funktionalmatrix und der Lösungsvektor $\hat{\mathbf{x}}$ enthält die Schätzwerte der zu bestimmenden Parameter. Die Bestimmung des Lösungsvektors ergibt sich aus der Minimierung der Verbesserungsquadrate $\mathbf{v}^T \mathbf{v} \rightarrow \min$, indem die 1. Ableitung der Funktion zu Null gesetzt wird. Es ergibt sich folgende Berechnungsformel (für die Herleitung siehe z.B. Niemeier (2001)):

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (3.7)$$

Bei nichtlinearen Beziehungen zwischen den Messgrößen und den unbekannten Parametern ist eine Linearisierung erforderlich. In diesem Fall entspricht der Beobachtungsvektor einer Funktion von den unbekannten Parametern, für eine Lösung sind daher Näherungswerte erforderlich. Eine Euklidische Transformation (Gleichung 3.1) ist durch die Winkelfunktionen in der Rotationsmatrix nichtlinear. Explizit lautet die räumliche Drehmatrix nach Kraus (1997), welche die drei Drehwinkel ω , ϕ und κ um die drei Koordinatenachsen verwendet:

$$\begin{aligned} R_{\omega\phi\kappa} &= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Für die Bestimmung der Rotationswinkel ω , ϕ und κ sowie des Translationsvektors $\mathbf{t}^T = (t_x, t_y, t_z)$ werden jeweils für die Koordinaten x , y und z eines Punktes Beobachtungsgleichungen aufgestellt, welche sich direkt aus den Transformationsvorschriften der Gleichungen 3.1 oder 3.3 ableiten lassen:

$$\begin{aligned} f_x &= x_1 = r_{11} \cdot x_2 + r_{12} \cdot y_2 + r_{13} \cdot z_2 + t_x \\ f_y &= y_1 = r_{21} \cdot x_2 + r_{22} \cdot y_2 + r_{23} \cdot z_2 + t_y \\ f_z &= z_1 = r_{31} \cdot x_2 + r_{32} \cdot y_2 + r_{33} \cdot z_2 + t_z \end{aligned} \quad (3.9)$$

Für die Bestimmung der sechs unbekannten Parameter werden mindestens sechs unabhängige Gleichungen zur Lösung benötigt. Es ist zu beachten, dass zwei einzelne Punkte zwar sechs Gleichungen liefern, aber aufgrund von redundanten Informationen keine Lösung berechnet werden kann. Die Normalgleichungsmatrix $A^T A$ hat in diesem Fall einen Rangdefekt und kann nicht invertiert werden. Für eine erfolgreiche Bestimmung der Parameter sind drei Punkte erforderlich, die nicht auf einer Geraden oder auf einem Kreis liegen. Aufgrund der Nichtlinearität der Gleichungen wird die Funktionalmatrix $\mathbf{A}$ durch einen Stapel an partiellen Ableitungen der Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten gebildet:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial \omega} & \frac{\partial f_x}{\partial \phi} & \frac{\partial f_x}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_x}{\partial t_x} & \frac{\partial f_x}{\partial t_y} & \frac{\partial f_x}{\partial t_z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial \omega} & \frac{\partial f_y}{\partial \phi} & \frac{\partial f_y}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_y}{\partial t_x} & \frac{\partial f_y}{\partial t_y} & \frac{\partial f_y}{\partial t_z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial \omega} & \frac{\partial f_z}{\partial \phi} & \frac{\partial f_z}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_z}{\partial t_x} & \frac{\partial f_z}{\partial t_y} & \frac{\partial f_z}{\partial t_z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Da die Matrix $\mathbf{A}$ die unbekannten Parameter enthält, sind Näherungswerte für die Berechnung der Transformationsparameter erforderlich und aufgrund der Linearisierung erfolgt die Lösung des Gleichungssystems iterativ. Die Schätzwerte für den Lösungsvektor werden solange verbessert, bis die Abweichungen der Berechnungsproben unter einem definierten Schwellwert liegen. Die Genauigkeit der Beobachtungen sowie die Qualität der berechneten Transformationsvorschrift lässt sich an den folgenden Größen ablesen, wobei bei der Berechnung des Varianzfaktors n die Anzahl der Beobachtungsgleichungen und u die Anzahl der unbekannten Parameter (hier gleich sechs) angibt:

$$\text{Restklaffungen:} \quad \mathbf{v} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}$$

$$\text{Varianzfaktor:} \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n-u}$$

$$\text{Mittlere Klaffung eines 3D-Punktes:} \quad \sqrt{3} \cdot \hat{\sigma}_0$$

Ein großer Vorteil der Methode der kleinsten Quadrate ist, dass auf einfache Art und Weise einzelne Gleichungen gewichtet und somit Genauigkeiten der Beobachtungen berücksichtigt werden können. Allerdings können bei der Verwendung von Euler-Winkel auch Probleme auftreten. Verschiedene Winkelsätze für ω , ϕ und κ führen aufgrund der Periodizität von $\sin$ und $\cos$ zu der selben räumlichen Drehmatrix (vgl. Gleichung 3.8). Auch kann eine Singularität auftreten, sofern die Achse der ersten Drehung und die der dritten Drehung zusammenfallen. In diesem Fall ist nur noch die Summe aus dem ersten und dritten Drehwinkel ausschlaggebend. Das Auftreten dieser Singularität (fehlender Freiheitsgrad) wird auch als *Gimbal Lock* bezeichnet.

3.1.3 Transformationsbestimmung mit Quaternionen

Alternativ zu den Euler-Winkeln kann eine Rotation auch durch Quaternionen dargestellt werden. Die Quaternionen sind eine Erweiterung der komplexen Zahlen und wurden 1843 von Sir William Rowan Hamilton (1809 - 1865) eingeführt (Dam u. a., 1998). Für Quaternionen werden hier Symbole mit einem darüber stehenden Punkt verwendet. Ein Quaternion wird eindeutig durch eine komplexe Zahl der Form $\hat{\mathbf{q}} = s + iv_x + jv_y + kv_z$ definiert. Üblich ist die Schreibweise als vierdimensionaler Vektor $\hat{\mathbf{q}} = (\mathbf{v}, s)$, bestehend aus einem reellen dreidimensionalen Vektor $\mathbf{v}$ und einer skalaren reellen Zahl s . Eine Umwandlung von Vektoren und Skalaren in die Darstellung der Quaternionen erfolgt, indem die jeweils fehlenden Komponenten zu Null gesetzt werden. Die grundlegenden Rechenregeln für Quaternionen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

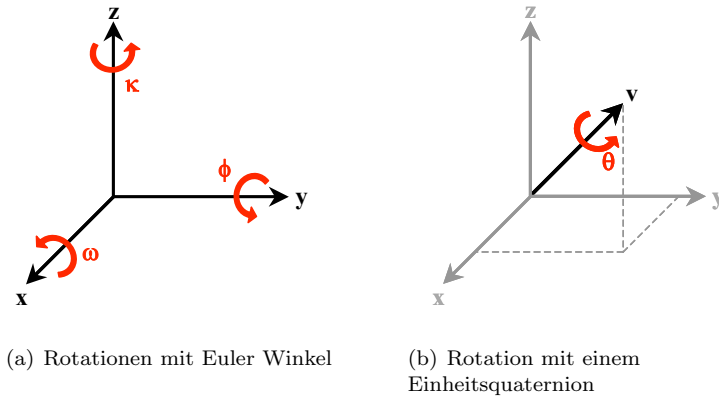
Bei Einheitsquaternionen ist nach den Rechenregeln in Tabelle 3.1 die Inverse gleich der Konjugierten des Quaternions und es ist $\langle \hat{\mathbf{q}}^*, \hat{\mathbf{q}} \rangle = |\hat{\mathbf{q}}|^2 = 1$. Einheitsquaternionen lassen sich eindeutig einer Rotation zuordnen und sind daher von besonderem Interesse. Eine Rotation um die drei Achsen eines kartesischen Koordinatensystems entspricht, ausgedrückt in Quaternionen, einer einzigen Rotation um die Achse $\mathbf{v}$ mit dem Winkel Θ , das Quaternion hat die Form:

$$\hat{\mathbf{q}} = \left(\sin \frac{\Theta}{2} \cdot \mathbf{v}, \cos \frac{\Theta}{2} \right) \quad (3.11)$$

Addition:	$\dot{\mathbf{q}}_1 + \dot{\mathbf{q}}_2 = (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2, s_1 + s_2)$
Multiplikation:	$\dot{\mathbf{q}}_1 \star \dot{\mathbf{q}}_2 = (s_1 \mathbf{v}_2 + s_2 \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2, s_1 s_2 - \langle \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2 \rangle)$
Betrag:	$ \dot{\mathbf{q}} = \sqrt{ \mathbf{v} ^2 + s^2}$
Konjugierte:	$\dot{\mathbf{q}}^* = (-\mathbf{v}, s)$
Inverse:	$\dot{\mathbf{q}}^{-1} = \dot{\mathbf{q}}^* / \dot{\mathbf{q}} ^2$

Tabelle 3.1: Rechenregeln für Quaternionen

Abbildung 3.3 veranschaulicht die Drehungen eines Rotationsquaternion im Vergleich zu Drehungen um Euler-Winkel in einem kartesischen Koordinatensystem. Die Hintereinanderausführung von Drehungen entspricht einer Multiplikation der jeweiligen Rotationsquaternionen.

**Abb. 3.3:** Rotationen in einem kartesischen Koordinatensystem.

Die Berechnung der Unbekannten einer Transformationsvorschrift ist mit Hilfe der Quaternionen über eine geschlossene Lösung möglich (Sansò, 1973; Horn, 1987). Die Berechnung der Transformationsparameter kann in eine Bestimmung der Rotations- und Translationsparameter aufgespalten werden. Eine Rotation kann mittels einer zweifachen Quaternionenmultiplikation berechnet werden, es gilt folgende Beziehung:

$$\mathbf{R} \mathbf{x} = \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\mathbf{x}} \star \dot{\mathbf{q}}^* = (\overline{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q}) \dot{\mathbf{x}} \quad (3.12)$$

Dabei sind $\overline{\mathbf{Q}}$ und $\mathbf{Q}$ die zu $\dot{\mathbf{q}}$ korrespondierenden 4×4 Matrizen. Die gesuchte Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ ist eine 3×3 Untermatrix von $\overline{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q}$ und entspricht der klassischen Rodriguez-Matrix (Sansò, 1973):

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} s^2 + v_x^2 - v_y^2 - v_z^2 & -2s v_z + 2v_x v_y & 2s v_y + 2v_x v_z \\ 2s v_z + 2v_y v_x & s^2 - v_x^2 + v_y^2 - v_z^2 & -2s v_x + 2v_y v_z \\ -2s v_y + 2v_x v_z & 2s v_x + 2v_y v_z & s^2 - v_x^2 - v_y^2 + v_z^2 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Für die Bestimmung der Rotationsparameter über identische Punkte wird der folgende quadratische Fehler minimiert:

$$E = \sum_{i=1}^n (\bar{\mathbf{x}}_{1,i} - \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{2,i})^2 \quad (3.14)$$

Die Punkte $\bar{\mathbf{x}}_{1,i}$ und $\bar{\mathbf{x}}_{2,i}$ sind um den Schwerpunkt reduziert und lassen sich wie folgt berechnen:

$$\bar{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}} \quad \text{mit: } \bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \quad (3.15)$$

Der Fehler E aus der Gleichung 3.14 für die Rotation wird minimal, wenn die Summe der Skalarprodukte zwischen den Punkten aus S_1 und den rotierten Punkten aus S_2 maximal wird (vgl. Anhang A):

$$\sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle \quad (3.16)$$

Ausgedrückt mit Quaternionen (vgl. Gleichung 3.12) ergibt sich:

$$\sum_{i=1}^n \langle \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{1,i}, \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{2,i} \star \dot{\mathbf{q}}^* \rangle \quad (3.17)$$

Die im Anhang A ausgeführten Umformungen liefern für Gleichung 3.17 die folgende Beziehung:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \left(\sum_i \mathbf{N}_i \right) \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{N} \dot{\mathbf{q}} \quad (3.18)$$

Die Matrix $\mathbf{N}$ enthält Summen von Produkten der Koordinaten $\bar{\mathbf{x}}_{1,i}$ und $\bar{\mathbf{x}}_{2,i}$. Die mit $S_{xx}, S_{xy}, \dots, S_{zz}$ bezeichneten Summen lassen sich wie folgt berechnen:

$$\mathbf{S}_{xx} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_{1,i} \bar{x}_{2,i}, \quad \mathbf{S}_{xy} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_{1,i} \bar{y}_{2,i}, \quad \dots, \quad \mathbf{S}_{zz} = \sum_{i=1}^n \bar{z}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \quad (3.19)$$

Schließlich ergibt sich $\mathbf{N}$ aus dem Ergebnis der Quaternionenmultiplikation aus Gleichung 3.17 zu:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{xz} + S_{zx} & -S_{yz} + S_{zy} \\ S_{yx} + S_{xy} & -S_{xx} + S_{yy} - S_{zz} & S_{yz} + S_{zy} & S_{xz} - S_{zx} \\ S_{zx} + S_{xz} & S_{zy} + S_{yz} & -S_{xx} - S_{yy} + S_{zz} & -S_{xy} + S_{yx} \\ S_{zy} - S_{yz} & -S_{zx} + S_{xz} & S_{yx} - S_{xy} & S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Für die Bestimmung der Rotation, welche die Gleichung 3.14 minimiert, muss das Quaternion $\dot{\mathbf{q}}$ berechnet werden, welches die Gleichung 3.18 unter der Bedingung $|\dot{\mathbf{q}}| = 1$ maximiert. Dies ist der Fall für den zum größten Eigenwert der Matrix $\mathbf{N}$ gehörenden Eigenvektor. Über die charakteristische Gleichung $\det(\mathbf{N} - \lambda \mathbf{I}) = 0$ können die Eigenwerte berechnet werden. Ist der größte Eigenwert λ_m gefunden, kann der zugehörige Eigenvektor berechnet werden. Aus dem resultierenden Einheitsquaternion $\dot{\mathbf{q}}$ wird die gesuchte Rotationsmatrix aus Gleichung 3.13 berechnet.

Die Parameter für die Translation ergeben sich bei bekannter Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ aus der Differenz zwischen den Schwerpunkten:

$$\mathbf{t} = \bar{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{x}}_2 \quad (3.21)$$

Die Verwendung von Quaternionen für die Berechnung der Transformationsparameter hat den entscheidenden Vorteil, dass die Lösung ohne Näherungswerte und nicht-iterativ berechnet werden kann.

3.1.4 Transformationsbestimmung über eine Singulärwertzerlegung

Eine weitere Methode für die Bestimmung von Transformationsparameter aus korrespondierenden Punkten, die ebenfalls ohne Näherungswerte auskommt, basiert auf einer Singulärwertzerlegung¹⁰ und ist in Arun u. a. (1987) oder Umeyama (1991) beschrieben. Es wird wiederum der quadratische Fehler E (siehe Gleichung 3.5) minimiert und wie bei den Einheitsquaternionen die Berechnung der Transformationsparameter nach Rotations- und Translationsanteil aufgeteilt. In Arun u. a. (1987) wird gezeigt, dass die Maximierung der Summe in Gleichung 3.16 einer Maximierung der *Spur* ($\mathbf{R}\mathbf{H}$) entspricht, wobei $\mathbf{R}$ die optimale Rotationsmatrix und $\mathbf{H}$ eine Korrelationsmatrix ist und sich wie folgt aus den schwerpunktsreduzierten Koordinaten berechnet:

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{2,i} \bar{x}_{1,i}^T) \quad (3.22)$$

¹⁰Die Singulärwertzerlegung wird häufig abgekürzt mit SVD (engl., für Singular Value Decomposition) und ist ein spezielles Produkt dreier Matrizen.

Ist $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ die Singulärwertzerlegung der Korrelationsmatrix, dann ergibt sich die optimale Rotationsmatrix zu:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T, \quad \text{wenn:} \quad \det(\mathbf{R}) = 1 \quad (3.23)$$

Für degenerierte Fälle, zum Beispiel für koplanare und kollineare Punkte oder für verrauschte Daten, kann der Wert der Determinante $\det(\mathbf{R})$ ungleich 1 sein. Die Rotationsmatrix kann in diesen Fällen für koplanare Punkte dennoch ermittelt werden. Für den Wert -1 der Determinante wurde anstelle der Rotation eine Spiegelung berechnet, die aber eindeutig in eine Rotationsmatrix überführt werden kann (Arun u. a., 1987). Die Translationsparameter ergeben sich wiederum aus der Differenz zwischen den Schwerpunkten (vgl. Gleichung 3.21).

3.1.5 Diskussion

Für die Registrierung von Laserscandaten über bekannte Punktkorrespondenzen existieren verschiedene Algorithmen. Eggert u. a. (1997) vergleichen Algorithmen für die geschlossene (ohne Näherungswerte) Berechnung der Transformationsparameter hinsichtlich Genauigkeit, Stabilität (auch für degenerierte Fälle) und Rechenzeit. Dabei war kein Algorithmus in allen Kriterien den anderen überlegen. Für praktische Anwendungen sind in den verschiedenen Verfahren keine Unterschiede erkennbar. Die Transformationsbestimmung über eine L2-Norm benötigt zwar Näherungswerte und ist nur iterativ möglich, gilt aber bei einer entsprechenden Gewichtung der Beobachtungen als äußerst robust und genau.

3.2 Registrierung über identische Ebenen

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 3.1 vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Transformationsvorschrift zwischen zwei Standpunkten sollen nun anstelle von Punktmerkmalen korrespondierende Ebenen verwendet werden. Für die Bestimmung der Transformationsparameter mittels identischer Ebenen bietet sich wiederum die Anwendung der projektiven Geometrie an. Im euklidischen Raum ist eine Ebene über die Hesse-Normal-Form gemäß Gleichung 4.1 definiert. Wird die Ebene durch eine Umformung mit den Gleichungen 3.2 mit homogenen Koordinaten ausgedrückt, so ergibt sich folgende Ebenengleichung im projektiven Raum:

$$\begin{aligned} a \cdot \frac{x_1}{x_4} + b \cdot \frac{x_2}{x_4} + c \cdot \frac{x_3}{x_4} + d &= 0 \\ a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_4 &= 0 \\ \pi_1 \cdot x_1 + \pi_2 \cdot x_2 + \pi_3 \cdot x_3 + \pi_4 \cdot x_4 &= 0 \\ \langle \pi^T, \mathbf{x} \rangle &= 0 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Mit der bekannten Transformationsmatrix $\mathbf{H}$ aus Gleichung 3.4 gilt für Ebenengleichungen im projektiven Raum die folgende Transformationsvorschrift (Hartley und Zissermann, 2000):

$$\pi' = \mathbf{H}^{-T} \pi \quad (3.25)$$

Die unbekannten Transformationsparameter $\mathbf{R}$ und $\mathbf{t}$ aus der Matrix $\mathbf{H}$ können über Ausgleichung mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Hierfür muss die invers transponierte Matrix $\mathbf{H}^{-T}$ gebildet und aufgrund der Nichtlinearität die Funktionalmatrix über die Ableitungen der Beobachtungsgleichungen aufgestellt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Bei der Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate können für die Bestimmung der Transformationsparameter in einer Ausgleichung sowohl identische Punkte wie auch identische Ebenen verwendet werden. Die Funktionalmatrix kann aus den unterschiedlichen Beobachtungsgleichungen aufgebaut werden. Enthält die Funktionalmatrix genügend Gleichungen aus einer Mischung an korrespondierenden Merkmalspaaren, kann das in der Regel überbestimmte Gleichungssystem mit der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden. Diese Methode ist allerdings für eine automatische Bestimmung der Transformationsparameter wenig geeignet, da für die Ermittlung der Lösung Näherungswerte erforderlich sind und diese nur iterativ ermittelt werden können. Algorithmen für eine automatische Registrierung müssen i.d.R. zahlreiche Kombinationen identischer Ebenen berücksichtigen und dementsprechend oft die Transformationsparameter berechnen.

Es existieren geschlossene Lösungen für die Bestimmung der Transformation, eine Auswahl wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert. Dabei wird die Transformation in eine getrennte Bestimmung von Rotation und Translation zerlegt.

3.2.1 Bestimmung der Rotation

Für die Bestimmung der Rotationskomponente reichen die Normalenvektoren von zwei korrespondierenden Ebenenpaaren aus. Jedes Vektorpaar liefert zwei Freiheitsgrade, die Bestimmung der Rotationsmatrix erfordert aber nur drei Freiheitsgrade, eine Bedingung ist redundant. Liegen jeweils zwei extrahierte Ebenen aus einem Laser-scan S_1 und S_2 vor und sind die Paarungen der Normalenvektoren $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$ und $(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2)$ gegeben, so lässt sich die gesuchte Rotation korrekt ermitteln, sofern die Normalenvektoren exakt zusammen passen. Üblicherweise sind die Winkel $\angle(\mathbf{n}_1, \mathbf{m}_1)$ und $\angle(\mathbf{n}_2, \mathbf{m}_2)$ zwischen den Normalenvektoren in S_1 und S_2 aber unterschiedlich, so dass die Vektorpaare sich nicht exakt zur Deckung bringen lassen. Je nach dem angewandten Verfahren zur Bestimmung der Rotationskomponente werden die Residuen unterschiedlich verteilt.

Vektoroperationen

Ein geometrischer Ansatz für die Rotationsbestimmung anhand von Vektoroperationen wurde von Grimson und Lozano-Perez (1984) vorgestellt. Jede Rotation kann durch eine Rotationsachse und einem Rotationswinkel um diese Achse repräsentiert werden. Die Bestimmung der Rotationsachse $\mathbf{r}$ erfolgt über die Eigenschaft, dass der Winkel zwischen $\mathbf{r}$ und einem Vektor nach der Rotation unverändert bleibt. Die Rotationsachse $\mathbf{r}$ ist mit einer Mehrdeutigkeit von 180° gegeben durch:

$$\mathbf{r} = \frac{(\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) \times (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)}{\|(\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_2) \times (\mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2)\|} \quad (3.26)$$

Für die Berechnung des Rotationswinkels wird ein Ebenenpaar $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$ benötigt. Wird bei einer Transformation der Vektor $\mathbf{n}_2$ um einen bestimmten Winkel um die Rotationsachse $\mathbf{r}$ gedreht, so ergibt sich der Vektor $\mathbf{n}'_2$, der im Idealfall mit dem Vektor $\mathbf{n}_1$ identisch ist, und es gilt die Beziehung:

$$\mathbf{n}_1 \approx \mathbf{n}'_2 = \cos \theta \cdot \mathbf{n}_2 + (1 - \cos \theta) \langle \mathbf{r}, \mathbf{n}_2 \rangle \cdot \mathbf{r} + \sin \theta (\mathbf{r} \times \mathbf{n}_2) \quad (3.27)$$

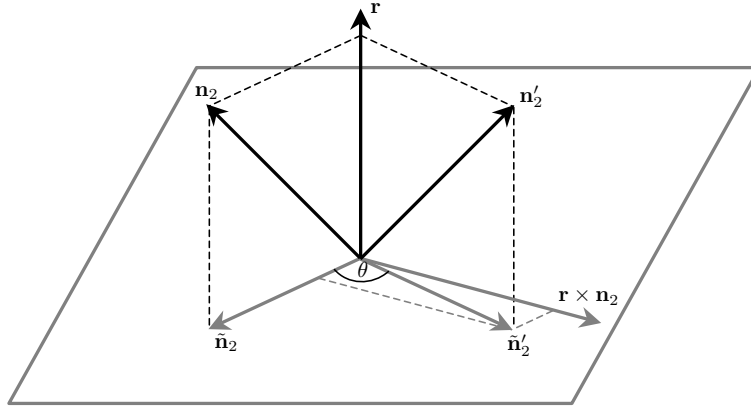


Abb. 3.4: Bestimmung des Rotationswinkels über Vektoroperationen.

Die Ableitung der Beziehung 3.27 gelingt anhand der Abbildung 3.4. Seien $\tilde{\mathbf{n}}'_2$ und $\tilde{\mathbf{n}}_2$ die Projektionen der Vektoren $\mathbf{n}'_2$ bzw. $\mathbf{n}_2$ auf die durch die Rotationsachse $\mathbf{r}$ definierten Ebene, so gelten die Beziehungen:

$$\mathbf{n}_2 = \tilde{\mathbf{n}}_2 + \langle \mathbf{r}, \mathbf{n}_2 \rangle \cdot \mathbf{r} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{n}'_2 = \tilde{\mathbf{n}}'_2 + \langle \mathbf{r}, \mathbf{n}'_2 \rangle \cdot \mathbf{r} = \tilde{\mathbf{n}}'_2 + \langle \mathbf{r}, \mathbf{n}_2 \rangle \cdot \mathbf{r} \quad (3.29)$$

$$\tilde{\mathbf{n}}'_2 = \tilde{\mathbf{n}}_2 \cdot \cos \theta + (\mathbf{r} \times \mathbf{n}_2) \cdot \sin \theta \quad (3.30)$$

Wird die Gleichung 3.28 nach $\tilde{\mathbf{n}}_2$ umgestellt und in Gleichung 3.30, und diese wiederum in Gleichung 3.29 eingesetzt, so ergibt sich die Gleichung 3.27. Der Rotationswinkel θ berechnet sich schließlich aus Umformungen der Gleichung 3.27 unter Verwendung der Beziehung $\langle \mathbf{n}_1, \mathbf{r} \rangle = \langle \mathbf{n}_2, \mathbf{r} \rangle$ zu:

$$\cos \theta = \frac{\langle \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_1 \rangle - \langle \mathbf{n}_2, \mathbf{r} \rangle \langle \mathbf{n}_1, \mathbf{r} \rangle}{1 - \langle \mathbf{n}_2, \mathbf{r} \rangle \langle \mathbf{n}_1, \mathbf{r} \rangle} \quad (3.31)$$

$$\sin \theta = \frac{\langle \mathbf{r} \times \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_1 \rangle}{1 - \langle \mathbf{n}_2, \mathbf{r} \rangle \langle \mathbf{n}_1, \mathbf{r} \rangle} \quad (3.32)$$

Werden die Elemente der Rotationsachse $\mathbf{r}$ mit r_x , r_y und r_z bezeichnet, so berechnet sich schließlich die gesuchte Rotationsmatrix zu:

$$\mathbf{R} = \cos \theta \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (1 - \cos \theta) \begin{pmatrix} r_x^2 & r_x r_y & r_x r_z \\ r_y r_x & r_y^2 & r_y r_z \\ r_z r_x & r_z r_y & r_z^2 \end{pmatrix} + \sin \theta \begin{pmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

Liegen für die Bestimmung der Rotationskomponente mehr als zwei Merkmalspaare vor, so können Rotationsachse und -winkel aus allen Kombinationen berechnet und jeweils gemittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der Mehrdeutigkeit in der Bestimmung der Rotationsachse zwei Lösungen, $(\mathbf{r}, \theta)$ und $(-\mathbf{r}, -\theta)$ auftreten können. In der Praxis kann immer die gleiche Lösung gewählt werden, indem durch eine einfache Konvention die Rotationsachse immer in die gleiche Richtung weist. Außerdem kann die Rotationsachse nur bestimmt werden, sofern die Vektoren nicht parallel sind und die Differenz der Merkmalspaare ungleich Null ist. Die Berechnung der Rotationsachse ist symmetrisch, während bei der Winkelbestimmung nur ein korrespondierendes Merkmalspaar $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$ verwendet wird. Daher werden bei unterschiedlichen Winkeln zwischen $\angle(\mathbf{n}_1, \mathbf{m}_1)$ und $\angle(\mathbf{n}_2, \mathbf{m}_2)$ die Vektoren $\mathbf{n}_1$ und $\mathbf{n}_2$ exakt aufeinander abgebildet, aber nicht $\mathbf{m}_1$ und $\mathbf{m}_2$ (Brenner u. a., 2008).

Orthonormalmatrizen

Eine andere Methode, mit der die Rotationskomponente aus mindestens zwei Paaren von korrespondierenden Vektoren berechnet werden kann, wurde von Horn (1987) vorgestellt. Das Verfahren ist auch in der Nahbereichsphotogrammetrie gebräuchlich, um Näherungswerte für eine Transformationsvorschrift zu erlangen und ist in ähnlicher Form beispielsweise in Luhmann (2003) beschrieben. Aus zwei nicht parallelen Vektoren $(\mathbf{n}_1, \mathbf{m}_1)$ eines Standpunkts wird wie folgt ein kartesisches Koordinatensystem $\{\mathbf{u}_1, \mathbf{v}_1, \mathbf{w}_1\}$ konstruiert:

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{n}_1 \quad (3.34)$$

$$\mathbf{v}_1 = \frac{\mathbf{m}_1 - \langle \mathbf{m}_1, \mathbf{u}_1 \rangle \mathbf{u}_1}{\|\mathbf{m}_1 - \langle \mathbf{m}_1, \mathbf{u}_1 \rangle \mathbf{u}_1\|} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{w}_1 = \mathbf{u}_1 \times \mathbf{v}_1 \quad (3.36)$$

Analog ergibt sich ein weiteres System $\{\mathbf{u}_2, \mathbf{v}_2, \mathbf{w}_2\}$ aus dem korrespondierenden Vektorpaar des zweiten Standpunkts $(\mathbf{n}_2, \mathbf{m}_2)$. Setzen sich die Spalten der Matrizen $\mathbf{M}_1 = (\mathbf{u}_1 \ \mathbf{v}_1 \ \mathbf{w}_1)$ und $\mathbf{M}_2 = (\mathbf{u}_2 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{w}_2)$ aus den Vektoren der Systeme zusammen, so ergibt sich die gesuchte Rotationsmatrix zu:

$$\mathbf{R} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^T \quad (3.37)$$

Da die Matrizen $\mathbf{M}_1$ und $\mathbf{M}_2$ orthonormal sind, ist auch die Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ orthonormal. Auch bei diesem Verfahren werden die Vektoren $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$ exakt aufeinander abgebildet und die Residuen verbleiben bei dem Merkmalspaar $(\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2)$. Allerdings kann durch eine einfache Änderung der Fehler gleichmäßig auf beide Merkmalspaare verteilt werden, indem anstelle von Gleichung 3.34 der Bisektor

$$\mathbf{u}_1 = \frac{\mathbf{n}_1 + \mathbf{m}_1}{\|\mathbf{n}_1 + \mathbf{m}_1\|} \quad (3.38)$$

verwendet wird (Brenner u. a., 2008). Auch bei diesem Verfahren kann, sofern mehr als zwei Merkmalspaare vorliegen, die Rotation aus allen möglichen Kombinationen berechnet und die Ergebnisse gemittelt werden.

Quaternionen

Liegen mehr als zwei Merkmalspaare vor, so kann die optimale Rotation über Quaternionen bestimmt werden (Sansò, 1973; Horn, 1987). Analog zu den Ausführungen in Kapitel 3.1.3 wird der quadratische Fehler

$$E = \sum_{i=1}^n (\mathbf{n}_{1,i} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{n}_{2,i})^2 \quad (3.39)$$

minimiert, indem die Summe über das Skalarprodukt $\sum_i \langle \mathbf{n}_{1,i}, \mathbf{R} \mathbf{n}_{2,i} \rangle$ maximiert wird. Das Quaternion, welches die Fehlerquadratsumme minimiert, berechnet sich aus dem zum größten Eigenwert der Matrix $\mathbf{N}$ (vgl. Gl. 3.20) gehörendem Eigenvektor und die gesuchte Rotationsmatrix ergibt sich wiederum aus der Rodriguez-Matrix (Gl. 3.13). Sind lediglich zwei Merkmalspaare vorhanden, so ist das Ergebnis identisch zu der Bisektor-Variante der aus den Orthonormalmatrizen berechneten Rotation (Gl. 3.37).

Bewertung der Verfahren zur Bestimmung der Rotationskomponente

Die vorgestellten Verfahren liefern in Abhängigkeit der Anzahl von Ebenenpaaren unterschiedliche Ergebnisse. Für einen Vergleich der Verfahren wurden die TLS-Messdaten zweier Standpunkte in ebene Regionen segmentiert. Dabei wurde ein automatisches Bereichswachstumsverfahren eingesetzt, welches in Kapitel 4 vorgestellt wird. Aus den ermittelten Regionen wurde ein Satz von 26 identischen Ebenen manuell extrahiert und die verschiedenen Arten zur Berechnung der Rotation auf den erzeugten Datensatz angewandt. Während bei der Rotationsbestimmung über Quaternionen alle Ebenenpaare in die Optimierungsaufgabe eingehen, wurden bei den anderen beiden Verfahren mögliche Kombinationen gebildet und die Ergebnisse gemittelt. Paarungen mit einem Winkel zwischen den Normalenvektoren kleiner als 5° wurden verworfen, um ungünstige Konstellationen zu vermeiden. Von den 325 (26 über 2) möglichen Kombinationen wurden durch dieses Kriterium 115 Paarungen aussortiert.

Die Differenz zwischen den Normalenvektoren der Paare stimmt für die verwendeten Korrespondenzen im Mittel auf $0,26^\circ$ überein, die maximale Abweichung beträgt $1,60^\circ$. In einem weiteren Test wurde für die Berechnung der Rotationsparameter die minimale Anzahl von zwei Ebenenpaaren verwendet, die in einem Winkel von $89,59^\circ$ zueinander stehen und somit für die Rotationsbestimmung gut geeignet sind. Die Differenz zwischen den Normalenvektoren der Paare aus den beiden Scans beträgt in diesem Fall $0,09^\circ$. Neben der Genauigkeit ist auch die benötigte Rechenzeit für die Rotationsbestimmung von Bedeutung, da bei automatischen Suchverfahren die Berechnungen sehr oft durchgeführt werden müssen. Die Tabelle 3.2 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der Verfahren.

	Quaternionen	Vektoroperationen	Orthonormalmatrizen
26 Merkmalspaare			
$\Delta\omega$ (SOLL-IST)	$0,0075^\circ$	$-0,0174^\circ$	$0,0659^\circ$
$\Delta\phi$ (SOLL-IST)	$-0,0820^\circ$	$0,5489^\circ$	$0,6178^\circ$
$\Delta\kappa$ (SOLL-IST)	$-0,0117^\circ$	$-1,1369^\circ$	$-0,0296^\circ$
Rechenzeit*	14,089 s	57,62 s	162,937 s
2 Merkmalspaare			
$\Delta\omega$ (SOLL-IST)	$0,1781^\circ$	$0,2006^\circ$	$0,1781^\circ$
$\Delta\phi$ (SOLL-IST)	$-0,2049^\circ$	$-0,1400^\circ$	$-0,2049^\circ$
$\Delta\kappa$ (SOLL-IST)	$-0,0453^\circ$	$-3,3512^\circ$	$-0,0453^\circ$
Rechenzeit*	2,042 s	0,781 s	0,891 s

Tabelle 3.2: Vergleich von Verfahren für die Bestimmung der Rotation aus identischen Ebenen. Die Referenzwerte wurden mit einem ICP-Algorithmus (Implementierung der GEOMAGIC STUDIO Software) ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass wie erwartet die Optimierungsstrategie mittels Quaternionen bei überbestimmten Problemen die genauesten Werte für die gesuchten Rotationswinkel liefert. Auch die erforderliche Rechenzeit ist in diesem Fall kleiner als bei den anderen Methoden, da nicht explizit alle Kombinationen gebildet und ein Mittelwert berechnet werden muss. Für die minimale Anzahl an Ebenenpaaren sind jedoch bezüglich der Rechenzeit die anderen Methoden überlegen und das Verfahren mittels Orthonormalmatrizen liefert mit der beschriebenen Modifikation auch ein zu der Rotationsbestimmung mittels Quaternionen identisches Ergebnis.

*Die angegebenen Rechenzeiten beinhalten 100 000 Wiederholungen der jeweiligen Berechnung und wurden mit einem Intel Pentium 4 Prozessor mit 2,40 GHz und 1 GB RAM ermittelt.

3.2.2 Bestimmung der Translation

Für die Bestimmung der Translation $\mathbf{t} = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$ sind mindestens drei korrespondierende Ebenenpaare erforderlich, die einen dreidimensionalen Raum aufspannen müssen, damit die Verschiebung in allen drei Raumrichtungen definiert ist. Für die Berechnung der drei unbekannten Parameter wird davon ausgegangen, dass nach einer Rotation des zu registrierenden Scans S_2 die korrespondierenden Ebenen einen bis auf den durch die Messung verursachten Fehler identischen Normalenvektor haben. Für einen rotierten Normalenvektor $\mathbf{n}'_2$ gilt unter der Annahme einer fehlerfreien Rotation:

$$\mathbf{n}'_2 = \mathbf{n}_1 = \mathbf{n} = (n_x \ n_y \ n_z)^T \quad (3.40)$$

Die Gleichungen für zwei korrespondierende Ebenen mit identischem Normalenvektor können somit wie folgt geschrieben werden:

$$n_x x + n_y y + n_z z + d_1 = 0 \quad (3.41)$$

$$n_x(x - \Delta x) + n_y(y - \Delta y) + n_z(z - \Delta z) + d_2 = 0 \quad (3.42)$$

Aus den Gleichungen 3.41 und 3.42 kann der Vektor $\mathbf{x} = (x \ y \ z)^T$ durch Gleichsetzen eliminiert werden. Es ergibt sich die Gleichung $\langle \mathbf{n}, \mathbf{t} \rangle = d_2 - d_1$. Sind zwei weitere Ebenenpaare bekannt, welche die Gleichungen $\langle \mathbf{m}, \mathbf{t} \rangle = e_2 - e_1$ und $\langle \mathbf{p}, \mathbf{t} \rangle = f_2 - f_1$ liefern, so kann aus dem resultierenden Gleichungssystem der Form $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{l}$ die unbekannte Translation bestimmt werden:

$$\begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z \\ m_x & m_y & m_z \\ p_x & p_y & p_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_2 - d_1 \\ e_2 - e_1 \\ f_2 - f_1 \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Sind mehr als drei Ebenenpaare verfügbar, so berechnet sich ein Schätzwert für die Translation über ein Ausgleichungsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate zu:

$$\hat{\mathbf{t}} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l} \quad (3.44)$$

3.3 Registrierung anhand der Messdaten mit unbekannten Korrespondenzen

Verfahren für die Registrierung ohne künstliche Zielmarken und ohne externe Sensoren ermitteln über spezielle Algorithmen die Orientierung zwischen überlappenden Datensätzen anhand der Messdaten selbst. In diesem Zusammenhang wird auch von *datengetriebenen Verfahren* gesprochen. Es existieren zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten, welche sich mit der automatischen Registrierung von Punktwolken befassen. Die Verfahren zur Registrierung von Punktwolken setzen sich üblicherweise aus verschiedenen Komponenten zusammen:

1. Merkmalsextraktion
2. Aufbau eines Suchraums
3. Auswahl und Berechnung möglicher Transformationen anhand eines Suchverfahrens
4. Verifikation der berechneten Transformationsparameter.

Bei der Merkmalsextraktion werden Informationen aus den Daten gewonnen, welche für eine folgende Zuordnung verwendet werden. Dies sind charakteristische Merkmale der Daten, die nach Möglichkeit in verschiedenen Scans identifiziert werden können. Der Aufbau des Suchraums liefert mögliche Kombinationen an Merkmalen, aus denen sich letztendlich die gesuchten Transformationsparameter berechnen lassen. Das anschließende Suchverfahren entscheidet, welche Kombinationen aus dem Suchraum gewählt und bei einem Testverfahren für die Ermittlung der optimalen Transformationsvorschrift teilnehmen. Im Verifikationsschritt wird schließlich die Güte der berechneten Transformation ermittelt und entschieden, ob diese als korrekt akzeptiert wird.

Die Methoden zur automatischen Registrierung sind häufig in zwei getrennte Verfahren unterteilt, einer Grob- und einer anschließenden Feinregistrierung. Bei der Grobregistrierung werden die Parameter der Rotation lediglich auf wenige Grad genau sowie die Translation nur ungenau ermittelt, während bei der Feinregistrierung eine exakte Bestimmung der Transformationsparameter vorgenommen wird (Campbell und Flynn, 2001). Einen Überblick über verschiedene Methoden zur Registrierung von 3D-Entfernungsdaten geben beispielsweise Salvi u. a. (2007), Matabosch u. a. (2006), Mian u. a. (2005), Gruen und Akca (2005) sowie Rusinkiewicz und Levoy (2001). Verschiedene Methoden zur Registrierung von Scandaten werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt und kurz erläutert. Zahlreiche Verfahren stammen aus dem *Computer Vision* Bereich und wurden

bislang ausschließlich auf Daten angewandt, welche von Nahbereichsscanner erfasst wurden. Die aufgenommenen Daten zeichnen sich durch große Überlappungsbereiche aus, die Differenz zwischen den Transformationsparametern zweier Standpunkte ist gering und i.d.R. wird in den Scans nicht mehr als ein Objekt erfasst. Oftmals ist in diesen Fällen auch keine Grobregistrierung der Daten erforderlich, da eine grobe Orientierung des Aufnahmegeräts oder des Objekts von der Messanordnung her bekannt ist. Daten terrestrischer Laserscanner weisen im Gegensatz zu den Nahbereichsscannern üblicherweise eine geringere Überlappung und längere Basislinien zwischen den einzelnen Standpunkten auf, eine Grobregistrierung ist in den meisten Fällen zwingend erforderlich. Einige Verfahren für die Registrierung aus dem Computer Vision Bereich wurden inzwischen an terrestrische Laserscannerdaten aus dem mittleren und weiten Entfernungsbereich adaptiert.

Ziel der Grobregistrierung ist es, beliebig im Raum platzierte Scans paarweise zueinander zu orientieren. Vollautomatische, robuste und universelle Verfahren für die grobe Registrierung von Punktwolken existieren noch nicht. Die automatische Bestimmung von geeigneten Startwerten für eine folgende Feinregistrierung wird wissenschaftlich anhaltend diskutiert. Die Verfahren für die Registrierung von 3D-Punktclouds sind seit dem Aufkommen von Sensoren zur 3D-Datenerfassung ein Thema. Publierte Verfahren zur Grobregistrierung lassen sich weiter unterteilen in *lokale*, *globale* und *merkmalbasierte* Verfahren, wie in Abbildung 3.5 dargestellt ist.

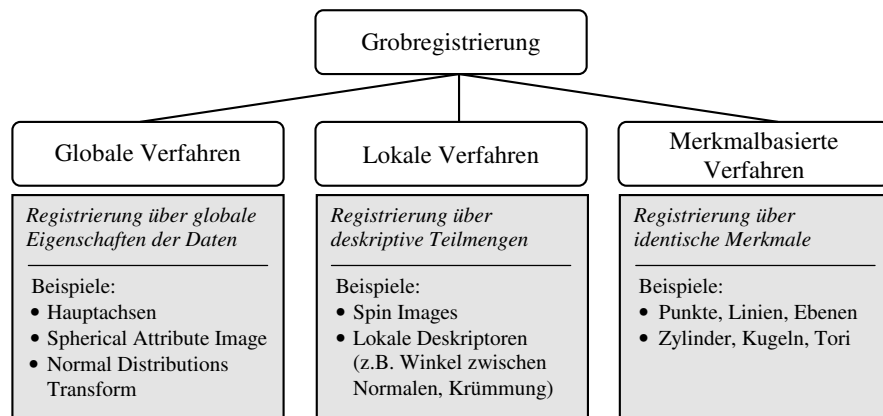


Abb. 3.5: Gruppierung der Verfahren zur Grobregistrierung von 3D-Punktwolken

Das Ziel der Feinregistrierung ist die Ermittlung einer möglichst genauen Transformationsvorschrift zwischen zwei oder mehreren Datensätzen. Verfahren für die Feinregistrierung benötigen in der Regel mehr oder weniger exakte Startwerte und sind iterativ. Ausgehend von einer groben Registrierung werden die Transformationsparameter nach und nach verbessert, indem eine Zielfunktion minimiert wird. Üblicherweise werden die Abstände zwischen korrespondierenden Punkten, zwischen Punkten und Flächen oder zwischen Oberflächen minimiert. Aufgrund der erforderlichen Suche nach benachbarten Objekten und der Iterationen ist die Feinregistrierung ein zeitintensiver Prozess.

Im Folgenden wird zunächst auf Verfahren für die Feinregistrierung eingegangen, die in jedem Fall durchgeführt wird und somit stets zweiter Schritt einer Registrierung ist. Anschließend erfolgt eine Beschreibung verschiedener Methoden für die vorangestellte Grobregistrierung.

3.3.1 Iterative Closest Point Algorithmus und Varianten für die Feinregistrierung

Der bekannteste Algorithmus für die Registrierung von 3D-Punktwolken ist der *Iterative Closest Point (ICP)* - Algorithmus, welcher von Besl und McKay (1992) und in ähnlicher Form von Chen und Medioni (1991) vorgestellt wurde. Der Algorithmus von Chen und Medioni wird auch als die *Methode von Chen* (Salvi u. a., 2007; Matabosch u. a., 2006) bezeichnet. Beide Methoden sind für die Feinregistrierung geeignet und richten iterativ zwei Punktwolken aneinander aus. Dabei werden abwechselnd Korrespondenzen in den Datensätzen gesucht und die Transformationsparameter berechnet. Der Algorithmus kann auf verschiedene Repräsentationen geometrischer Daten angewendet werden, sofern die Definition einer Abstandsfunktion zu einem Punkt möglich ist. Für die Optimierung werden allerdings gute Startwerte für die gesuchten Transformationsparameter benötigt, damit der Algorithmus nicht in ein lokales Minimum konvergiert. Der ICP-Algorithmus und dessen Varianten sind die gebräuchlichsten Methoden für die Feinregistrierung von Entfernungsdaten, der Algorithmus wird für alle Arten an Daten, aus dem Nahbereich wie auch von terrestrischen Laserscannerdaten, genutzt. Die Tabelle

3.3 gibt eine Übersicht verschiedener Varianten des ICP-Algorithmus und eine Auswahl weiterer Verfahren für die Feinregistrierung.

Verfahren	Kurzbeschreibung	Publikationen
Punkt-Punkt Korrespondenzen	Der ICP-Algorithmus wird auf Punkt-Punkt Korrespondenzen angewandt. Zahlreiche Varianten des Algorithmus optimieren die Suche nach benachbarten Punkte, erweitern den Konvergenzradius oder detektieren Ausreißer in den Messdaten.	Besl und McKay (1992)
		Godin u. a. (1994)
		Zhang (1994)
		Benjemaa und Schmitt (1997)
		Johnson und Kang (1997)
		Kapoutsis u. a. (1999)
		Trucco u. a. (1999)
		Greenspan und Godin (2001)
		Rusinkiewicz und Levoy (2001)
		Jost und Hügli (2002)
		Sharp u. a. (2002)
		Zinßer u. a. (2003)
Punkt-Fläche Korrespondenzen	Ein Feinregistrierung erfolgt nach der Methode von Chen oder dem ICP-Algorithmus, indem Korrespondenzen zwischen einem Punkt und einer Fläche gebildet werden.	Bae (2006)
		Chen und Medioni (1991)
		Dorai u. a. (1994)
		Gagnon u. a. (1994)
		Park und Subbarao (2003)
Least Squares Matching	Die Feinregistrierung erfolgt über die Minimierung von Abstandsquadraten zwischen Oberflächen oder auch zwischen Kurven.	Matabosch u. a. (2006)
		Akca (2004)
		Akca und Gruen (2005a)
Signed Distance Fields	Die Methode arbeitet ebenfalls iterativ und registriert Oberflächendaten.	Gruen und Akca (2005)
		Masuda (2001)
		Masuda (2002)

Tabelle 3.3: Übersicht über verschiedene Verfahren für die Feinregistrierung.

Punkt-Punkt und Punkt-Fläche Korrespondenzen

Im Folgenden wird der Ablauf des ICP-Algorithmus für korrespondierende Punkte beschrieben. Über eine Abstandsfunktion werden aus den Punktwolken P_1 und P_2 jeweils die zueinander am nächsten gelegene Punkte ermittelt. Mit den so erhaltenen Punktkorrespondenzen wird eine Transformationsvorschrift ermittelt und diese auf die zu registrierende Punktwolke angewandt. Anschließend werden erneut anhand der Abstandsfunktion neue Korrespondenzen berechnet. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Der Algorithmus setzt voraus, dass die Punktmenge P_2 eine Teilmenge von P_1 ist. Formal werden folgende vier Schritte wiederholt:

1. Ermittlung benachbarter Punktpaare aus P_1 und P_2
2. Berechnung der Transformationsvorschrift $(\mathbf{R}, \mathbf{t})$
3. Transformation der zu registrierenden Punktwolke
4. Überprüfung auf Konvergenz. Abbruch bei Erreichen des Konvergenzkriteriums.

Übliche Abbruchkriterien werden über einen Schwellwert aus dem Fehler der letzten Iterationen und über eine maximale Anzahl an Iterationen definiert. Der Algorithmus ist wie bereits erwähnt nicht nur für eine Registrierung von Punktdaten zu Punktdaten geeignet, er lässt sich auch auf andere Repräsentationen geometrischer Daten anwenden. Voraussetzung ist eine Definition der Abstandsfunktion, z. B. für den

- Abstand d zwischen einem Punkt $\mathbf{p}$ und einer Menge von Punkten $\mathbf{q}_i \in Q$ (vgl. Abb. 3.6 (a)):

$$d(\mathbf{p}, Q) = \min_{\mathbf{q}_i \in Q} d(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i) = \min_{\mathbf{q}_i \in Q} |\mathbf{p} - \mathbf{q}_i|$$

- Abstand d zwischen einem Punkt $\mathbf{p}$ und einer Menge von Linien $\mathbf{l}_i \in L$ (vgl. Abb. 3.6 (b)):

$$d(\mathbf{p}, L) = \min_{\mathbf{l}_i \in L} d(\mathbf{p}, \mathbf{l}_i) = \min_{\mathbf{l}_i \in L} \left(\min_{u+v=1} |u\mathbf{r}_1 + v\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}| \right)$$

- Abstand d zwischen einem Punkt $\mathbf{p}$ und einer Menge von Flächen $\mathbf{t}_i \in T$ (vgl. Abb. 3.6 (c)):

$$d(\mathbf{p}, T) = \min_{\mathbf{t}_i \in T} d(\mathbf{p}, \mathbf{t}_i) = \min_{\mathbf{t}_i \in T} \left(\min_{u+v+w=1} |u \mathbf{r}_1 + v \mathbf{r}_2 + w \mathbf{r}_3 - \mathbf{p}| \right)$$

- Abstand eines Punktes zu einer impliziten oder parametrisierten Kurve oder Fläche. Die direkte Berechnung dieser Abstände ist nicht möglich, sondern erfolgt über Näherungsverfahren (z. B. über das *Newtonsche Iterationsverfahren*).

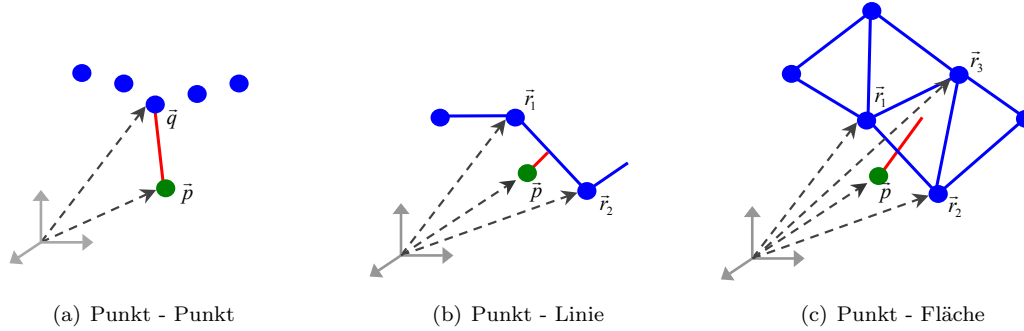


Abb. 3.6: Möglichkeiten zur Definition einer Abstandsfunktion für den ICP-Algorithmus

Bei der Registrierung von Punktdaten ist die Bildung von Punkt-Punkt Korrespondenzen verbreitet. In diesem Fall werden über eine Nachbarschaftssuche die nächsten Punkte ermittelt und entsprechende Korrespondenzen gebildet. Problematisch hierbei ist, dass scannende Messsysteme von verschiedenen Standpunkten aus nicht die gleichen Punkte erfassen. Es werden also Punkte zugeordnet werden, die in Wirklichkeit nicht übereinstimmen. Bei dicht erfassten Punktwolken kann dieser Aspekt vernachlässigt werden, aber bei größeren Abständen zwischen den Messpunkten oder stark variierenden Erfassungsdichten zwischen den einzelnen Standpunkten führen solche Zuordnungen zu Fehlern in der Registrierung. Daher werden häufig auch Korrespondenzen zwischen Punkten und lokalen Flächen gebildet. Liegen die Daten beider Standpunkte als Punktdaten vor, werden üblicherweise tangentielle Ebenen für die Punkte des zu registrierenden Datensatzes berechnet, und die jeweils minimalen Abstände zwischen Punkt und Tangentialebene berechnet (vgl. Abbildung 3.7).

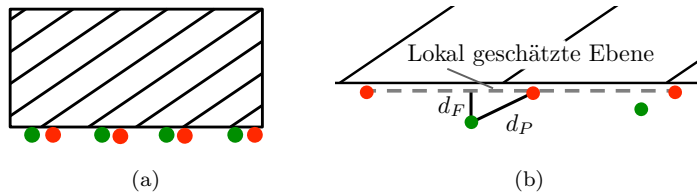


Abb. 3.7: Berechnung eines Distanzmaßes für den ICP-Algorithmus. (a) Bei der Vermessung eines Objekts von verschiedenen Standpunkten aus werden in der Regel nicht die gleichen Punkte erfasst. (b) Bei der Bildung von Korrespondenzen kann als Distanzmaß sowohl der Abstand zum nächsten Punkt d_P als auch der Abstand zu einer lokalen Fläche d_F verwendet werden.

Mittlerweile existieren zahlreiche Varianten des ICP-Algorithmus hinsichtlich der Auswahl von Punkten, der Suche nach Korrespondenzen und deren Gewichtung, der Registrierung von sich nur teilweise überlappenden Punktwolken sowie der Optimierung des Algorithmus. Zhang (1994) beschleunigt die Suche nach Korrespondenzen indem die Daten in einem kd-Baum¹¹ abgelegt werden und der veränderte Algorithmus kommt auch mit möglichen Verdeckungen zwischen den Datensätzen zurecht. Eine ebenfalls verbesserte Suche nach den nächsten Punkten über eine *Z-Buffer* Technik schlagen Benjemaa und Schmitt (1997) vor. Johnson und Kang (1997) nutzen ebenfalls einen kd-Baum als Datenstruktur, nutzen aber Farbwerte der Punkte um Korrespondenzen zu wählen. Kapoutsis u. a. (1999) erstellen ein Voronoi-Diagramm aus den Punkten und haben somit über einen Index schnellen Zugriff auf benachbarte Punkte.

¹¹k-dimensionalen Baum: Eine Datenstruktur zur Speicherung von Punktdaten

Trucco u. a. (1999) stellen einen *Robust ICP (RICP)* Algorithmus vor, der Ausreißer in den Daten detektiert und weit entfernt liegende Punkte ignoriert. Godin u. a. (1994) schränken die Suche nach den nächsten Punkten über ein zusätzliches Attribut für jeden Punkt ein. Hierfür wird der Intensitätswert jeder Messung heran gezogen, kompatible Punkte müssen eine ähnliche Reflektivität aufweisen. Die Methode wird *Iterative Closest Compatible Point (ICCP)* genannt. Eine schnelle Methode für die Ermittlung der nächsten Punkte ist das *Spherical Triangle Constraint Nearest Neighbor*-Verfahren (Greenspan und Godin, 2001), dabei werden die Korrespondenzen über die Iterationen hinweg verfolgt und die neuen Korrespondenzen können über Bedingungen schnell ermittelt werden. Eine Verbesserung der Komplexität des Algorithmus kann auch über die Verwendung von Pyramidenstufen erreicht werden. Hierbei wird zunächst nur eine Teilmenge der Punkte für die Registrierung verwendet, indem im Vorfeld ein *Resampling* durchgeführt wird (Jost und Hügli, 2002; Zinßer u. a., 2003).

Oftmals werden anstelle von Punkt-Punkt Korrespondenzen auch Punkt-Flächen Korrespondenzen gebildet. Dabei wird der in Abbildung 3.7 gezeigte Aspekt berücksichtigt, dass benachbarte Messpunkte aus verschiedenen Standpunkten nicht immer den gleichen Objektpunkt repräsentieren. Somit wird die Berechnung des minimalen Abstands zwischen zwei Merkmalen verbessert. Nachteil ist die etwas aufwändigere Berechnung der Abstände, der Normalenvektor eines Punktes aus P_1 wird mit der Tangentialebene eines Punktes aus P_2 geschnitten und der Abstand ermittelt. Dorai u. a. (1994) verändern den Ansatz von Chen und Medioni (1991), indem sie eine Gewichtsfunktion für die Unsicherheit der berechneten Abstände zwischen Punkt und Tangentialebene einführen. Gagnon u. a. (1994) präsentieren eine optimierte Berechnung der Abstände, indem der Schnittpunkt zwischen Normalenvektor und Ebene durch eine Projektion des Normalenvektors auf ein 2D Gitter bestimmt wird. Ebenfalls eine Projektionstechnik nutzen Park und Subbarao (2003) für eine schnelle Berechnung der Abstände.

Rusinkiewicz und Levoy (2001) geben eine Übersicht und klassifizieren die Varianten anhand ihres Einflusses auf die einzelnen Stufen des Algorithmus. Dabei wird die Auswahl der Punkte, die Suche nach Korrespondenzen, die Gewichtung einzelner Paarungen, das Verwerfen von Paarungen sowie das Fehlermaß und dessen Minimierung berücksichtigt.

Der ICP-Algorithmus ist bereits in zahlreichen kommerziellen Softwarepaketen (z. B. Polyworks von INNOV-METRIC, Cyra Cyclone von LEICA, RiScanPro von RIEGL, Geomagic Studio von GEOMAGIC) implementiert. In der Praxis werden dabei die erforderlichen Näherungswerte aus einer vom Nutzer durchzuführenden manuellen Messung von korrespondierenden Punkten in den zu registrierenden Punktwolken gewonnen.

Least Squares Matching

Eine dem ICP-Algorithmus ähnliche Methode ist das *Least Squares Matching* (LSM). Die Methode geht auf eine Veröffentlichung von Förstner (1982) zurück und wurde später von weiteren Autoren aufgegriffen (Ackermann, 1984; Gruen, 1984; Pertl, 1984). LSM wurde für zahlreiche Anwendungen verwendet, einen kurzen Überblick geben Gruen und Akca (2005). Akca (2004) und Gruen und Akca (2005) verwenden die LSM-Methode für die exakte Bestimmung von Transformationsparameter zwischen zwei oder mehreren 3D-Datensätzen. Dabei wird die Quadratsumme der Abstände zwischen den Datensätzen über ein generalisiertes Gauss-Markoff Modell minimiert. Das vorgestellte Verfahren wird *Least Squares 3D Surface Matching* (LS3D) genannt und ist für die Lösung von Korrespondenzproblemen verschiedenster Art einsetzbar.

Signed Distance Fields

Die Methode der *Signed Distance Fields* arbeitet ebenfalls iterativ, registriert bestehende Oberflächen und wurde von Masuda (2001, 2002) präsentiert. Ausgehend von triangulierten Daten werden zunächst über ein regelmäßiges Gitter Kontrollpunkte gesetzt. Von jedem dieser Punkte wird zu den bestehenden Oberflächen ein sogenanntes *Signed Distance Field (SDF)* berechnet. Dabei handelt es sich um einen Deskriptor, welcher ein Distanzmaß von dem Punkt zu der nächsten Oberfläche angibt. Das SDF besteht aus dem Punkt selbst, dem nächsten Punkt auf der Oberfläche, dem Normalenvektor der Oberfläche sowie dem mit einem Vorzeichen versehenen Abstand zwischen Punkt und Oberfläche. Die Quadrate der SDFs werden minimiert und die Transformationsvorschrift iterativ verbessert.

3.3.2 Globale Verfahren für die Grobregistrierung

Bei den globalen Verfahren wird ein gesamter Datensatz und dessen Charakteristik durch eine Funktion beschrieben. Ein bestimmtes Koordinatensystem wird mit den einzelnen Datensätzen in Verbindung gebracht, welches die enthaltenen Daten bestmöglich repräsentiert. Die Tabelle 3.4 enthält verschiedene globale Verfahren, die für

die Registrierung von Entfernungsdaten publiziert wurden. Im Folgenden werden die einzelnen Verfahren näher beschrieben.

Verfahren	Kurzbeschreibung	Publikationen
Hauptachsen- transformation	Aus einer Punktwolke werden die Hauptachsen über die Eigenvektoren der Kovarianzmatrix ermittelt. Die Transformation lässt sich aus den Hauptachsen bestimmen.	Dorai u. a. (1994)
		Chung u. a. (1998)
		Kim u. a. (2003)
SAI	Das <i>Spherical Attribute Image</i> (auch <i>Simplex Angle Image</i> genannt) stellt eine Repräsentation von Krümmungen dar. Über die Korrelation zweier SAIs kann die Transformationsvorschrift bestimmt werden.	Delingette u. a. (1993)
		Hebert u. a. (1995)
		Higuchi u. a. (1998)
NDT	Die <i>Normal Distributions Transform</i> nutzt eine Verteilungsfunktion der Punktwolke. Über eine Gütefunktion kann die gesuchte Transformation ermittelt werden.	Biber und Straßer (2003)
		Ripperda und Brenner (2005)
		Magnusson u. a. (2007)
Frequenzraum	Rotation und Translation werden im Frequenzraum der Punktwolke bestimmt.	Lucchese u. a. (2002)

Tabelle 3.4: Globale Verfahren für die Grobregistrierung.

Hauptachsentransformation

Die Berechnung der Transformationsparameter mit Hilfe einer Hauptachsentransformation basiert auf den Richtungen der Hauptachsen eines Objekts, die durch 3D-Punkte gegeben sind. Zeigen die Hauptachsen von verschiedenen Punkt-Datensätzen in die gleiche oder ähnliche Richtung, so lässt sich die Transformation zwischen den durch die Hauptachsen aufgespannten Koordinatensysteme berechnen. Voraussetzung für die erfolgreiche Bestimmung der Transformationsparameter zwischen zwei Datensätzen ist allerdings eine ausreichende Ähnlichkeit der Datensätze. Anhand von schwerpunktreduzierten Koordinaten wird eine Kovarianzmatrix für jeden Datensatz berechnet. Die gesuchte Transformationsmatrix wird anschließend durch die Richtungen der Hauptachsen bestimmt. Diese werden über eine Singulärwertzerlegung bzw. über die Berechnung der Eigenvektoren aus den Kovarianzmatrizen abgeleitet. Enthält ein Datensatz n Punkte $\mathbf{x}_i = (x_i \ y_i \ z_i)^T$, $i = 1 \dots n$ mit dem Schwerpunkt $\bar{\mathbf{x}}$ (für die Berechnung des Schwerpunkts s. Gleichung 3.15), so wird die Kovarianzmatrix $\mathbf{Cov}_{(3 \times 3)}$ wie folgt berechnet:

$$\mathbf{Cov} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}) (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}})^T \right) \quad (3.45)$$

Nach der Berechnung der Kovarianzmatrizen $\mathbf{Cov}_1$ und $\mathbf{Cov}_2$ für die beiden Datensätze werden aus den zugehörigen normalisierten Eigenvektoren die Spalten einer Matrix $\mathbf{M}_1$ bzw. $\mathbf{M}_2$ gebildet und die Hauptachsen über eine Singulärwertzerlegung $\mathbf{Cov}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{D} \mathbf{M}_i^T$ bestimmt. Die Rotationsmatrix berechnet sich gemäß Gleichung 3.37. Der Translationsanteil berechnet sich wiederum aus der Differenz des Schwerpunkts aus dem zweiten und dem rotierten Schwerpunkt aus dem ersten Datensatz (siehe Gleichung 3.21).

Dorai u. a. (1994) nutzen die Hauptachsentransformation für die Bestimmung von Schätzwerten für eine Transformation zwischen zwei Punktwolken. Das Ergebnis dient als Startwert für eine folgende Feinregistrierung. Auch Kim u. a. (2003) nutzen die Methode, um Startwerte für eine nachfolgende Feinregistrierung zu bekommen. Eine Verbesserung der Methode schlagen Chung u. a. (1998) vor, indem sie bei der Berechnung der Kovarianzmatrizen eine Gewichtung einführen. Dadurch wird dem Projektionseffekt entgegen gewirkt, der durch die verschiedenen Blickwinkel der Standpunkte entsteht. Für die Gewichtung der einzelnen Messwerte wird der Kehrwert des Winkels zwischen dem Normalenvektor eines gemessenen Punkts und der Messrichtung verwendet.

Die Hauptachsentransformation lässt sich auch für viele Punkte schnell berechnen. Problematisch bei der Ableitung einer Transformationsvorschrift aus den Hauptachsen ist die erforderliche Ähnlichkeit der 3D-Punktwolken. Die Hauptachsen zeigen in beiden Datensätzen zuverlässig nur in gleiche Richtungen, wenn die Form des erfassten Objekts ähnlich ist und genügend Messdaten zur Verfügung stehen. Das Verfahren funktioniert in der Regel bei nur wenig verdrehten und verschobenen Aufnahmen eines einzigen Objekts. Die Anwendungen liegen im Nahbereich für Aufnahmen künstlicher Objekte, z.B. auf einem Drehtisch platziert. Für die Registrierung terrestrischer Laserscannerdaten ist das Verfahren nicht geeignet, die Szenen sind in der Regel zu komplex und der

Überlappungsbereich ist zu gering, was schließlich zu unterschiedlichen Hauptachsen der einzelnen Standpunkten führt. Die berechneten Ergebnisse liegen somit häufig weit von der Referenzlösung entfernt (vgl. Matabosch u. a. (2006)).

SAI - Spherical Attribute Image / Simplex Angle Image

Die Registrierung mittels SAIs beruht auf einer Krümmungsanalyse von der Objektoberfläche und wurde für die Registrierung von Freiformflächen entwickelt. Zunächst wird ein geschlossenes Netz M erstellt, welches möglichst nah an den Messdaten liegt. Hierzu wird um die Messdaten eine tesselierte Kugel gelegt und anschließend das kugelförmige Netz iterativ verformt und verfeinert, bis es die Daten bestmöglich umschließt. Es wird eine Netzstruktur verwendet, bei der jeder Knoten exakt drei benachbarte Knoten hat. Aus diesen Knoten wird ein Maß für die Krümmung, der *Simplex Angle* ermittelt. Im nächsten Schritt wird ein zweites Netz erzeugt, eine Sphäre S , welche exakt die gleiche Anzahl an Knoten wie M hat. Der berechnete *Simplex Angle* aus dem Netz M wird an dem entsprechenden Knoten in der Sphäre S gespeichert. Das Ergebnis ist ein sphärisches Abbild des Objekts, eine Tesselation der Einheitskugel, bei dem jeder Knoten mit dem *Simplex Angle* in Verbindung gebracht werden kann. Die Darstellung wird als *Simplex Angle Image* (Delingette u. a., 1993) oder auch als *Spherical Attribute Image* (Higuchi u. a., 1998) bezeichnet.

Ein SAI wird für zwei verschiedene Datensätze berechnet, es entstehen die Darstellungen S und S' . Da die SAIs von unterschiedlichen Daten berechnet werden, kann die Anzahl der Knoten der SAIs variieren und wird daher angepasst. Um die Rotation zwischen zwei SAIs zu finden, wird eine Distanzfunktion definiert, welche sich aus der Summe der Quadratdifferenzen der Simplex Angle an den Knoten der einen Sphäre und den Knoten der verdrehten zweiten Sphäre zusammensetzt. Das Minimum der Funktion liefert die gesuchten Rotationswinkel. Dabei kann eine vollständige Suche (Higuchi u. a., 1998), eine grob-zu-fein Strategie (Delingette u. a., 1993) eingesetzt werden oder der Registrierungsprozess wird in zwei Phasen unterteilt (Hebert u. a., 1995). Im letzten Fall wird zuerst tabellarisch eine Datenstruktur aufgebaut, welche mögliche Korrespondenzen enthält. Anschließend erfolgt eine Auswertung der Tabelle, indem die Distanzfunktion auf die Kandidaten angewandt wird. Da eine Transformation des SAIs nicht der Verdrehung der originalen Objekte entspricht, ist noch ein zusätzlicher Rechenschritt nötig. Die Transformationsparameter werden aus identischen Punkten über den Ansatz der Quaternionen berechnet, welche durch die Knoten von S und S' definiert sind.

Bei der Erstellung der Netze muss darauf geachtet werden, dass bestimmte Bedingungen eingehalten werden und das Netz regelmäßig bleibt. Das SAI wird schließlich für die Speicherung von Krümmungen verwendet. Das Verfahren ist an sich robust, der entscheidende Nachteil ist allerdings, dass es lediglich für Objekte anwendbar ist, die topologisch einer Sphäre gleich sind.

Normal Distributions Transform

Ein Verfahren zur Registrierung ohne Verwendung von Zielmarken ist die Methode der Normal Distributions Transform (NDT), welche Biber und Straßer (2003) im Kontext der Robotik für zweidimensionale Daten vorstellen. Sie bietet eine Möglichkeit, Punktwolken aneinander auszurichten. Die Grundidee des Verfahrens ist, die Punkte nicht durch ihre Koordinaten, sondern durch ihre Verteilungsfunktion darzustellen. Hierzu wird ein Scan in ein regelmäßiges Gitter aufgeteilt. Für jede Zelle wird die Verteilung der Punkte durch eine Normalverteilung modelliert. Dazu wird für jede Zelle Mittelwert und Varianz der zugehörigen Punkte berechnet. Diese Darstellung ist die NDT des Scans. Für die Registrierung zweier Scans wird eine zweidimensionale Euklidische Transformation bestimmt. Dazu wird mit Hilfe der NDT eine Gütefunktion in Abhängigkeit der Transformationsparameter definiert. Durch eine Optimierung dieser Funktion ergeben sich die gesuchten Parameter der Transformation.

Ripperda und Brenner (2005) haben das Verfahren der NDT auf terrestrische Laserscanning Daten übertragen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die z-Achse der lokalen Koordinatensysteme einzelner Standpunkte in etwa lotrecht ist. Um mit dem 2D Verfahren der NDT 3D Daten zu registrieren wird aus den Daten eine Höhenschicht ausgeschnitten. Dabei wird angenommen, dass die Horizontalebene näherungsweise bekannt ist. Das Verfahren wird in unterschiedlichen Höhenschichten ausgeführt und somit mehr Informationen aus den 3D Daten genutzt. Für jede Schicht wird die gleiche Gittergröße verwendet. Die Gütefunktion ist in diesem Fall die Summe aller Gütefunktionen.

Die Größe der Zellen spielt für das Ergebnis der Registrierung eine wichtige Rolle. Große Zellen führen zu einer groben Annäherung, kleine berücksichtigen auch Details. Der Nachteil kleiner Zellen ist aber, dass sie bei weit auseinanderliegenden Daten zu keiner Registrierung führen. Wenn keine Zellen überlappen, kann auch keine Optimierung der Transformationsparameter erfolgen. Deshalb wurde eine grob-zu-fein Strategie entwickelt, das

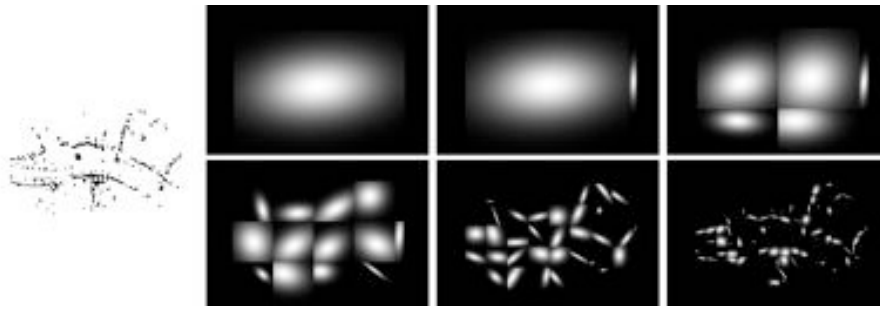


Abb. 3.8: Hörschicht einer Punktvolke und deren Verteilung in verschiedenen Zellgrößen für einen Standpunkt.

Verfahren startet mit großen Zellen und verkleinert diese sukzessive. Abbildung 3.8 zeigt eine Hörschicht mit den zugehörigen NDTs verschiedener Zellgröße. Es erfolgt zunächst eine grobe Annäherung bevor die feinen Strukturen berücksichtigt werden. Die Methode besitzt einen deutlich größeren Konvergenzradius als bisherige Ansätze, die auf der iterativen Bestimmung nächster Nachbarn (ICP) basieren.

Magnusson u. a. (2007) stellen die algorithmische Erweiterung der NDT auf drei Dimensionen vor. Dadurch entfällt die Voraussetzung einer lotrechten z-Achse bei der Registrierung von 3D-Daten. Der Hauptunterschied zwischen der 2D und 3D Registrierung über die NDT liegt in den zusätzlichen Transformationsparametern, die eine Erweiterung der zu definierenden Gütefunktion erfordert.

Registrierung im Frequenzraum

Lucchese u. a. (2002) stellen eine Methode zur paarweisen Registrierung von Scandaten vor, welche im Frequenzraum der Scans abläuft. Die Bestimmung der Rotation erfolgt in zwei Schritten, zuerst wird die Rotationsachse ermittelt und anschließend die Verdrehung um die Achse. Hiefür wird von den Eigenschaften einer Fourier-Transformation Gebrauch gemacht. Der Translationsanteil wird in einem dritten Schritt über eine Phasenkorrelation berechnet. Allerdings muss bei dieser Methode der Überlappungsbereich der beiden Scans bekannt sein.

3.3.3 Lokale Verfahren für die Grobregistrierung

Die lokalen Verfahren nutzen deskriptive Teilmengen der Punktwolken für die Bestimmung einer Transformationsvorschrift. Die Tabelle 3.5 enthält eine Auswahl verschiedener lokaler Verfahren, die für die Registrierung von Entfernungsdaten publiziert wurden. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verfahren näher beschrieben.

Verfahren	Kurzbeschreibung	Publikationen
Spin Images	Ein Spin Image wird von einem Orientierungs- punkt aus gebildet, indem die umliegenden Objektpunkte in ein lokales 2D-Koordinaten- system projiziert werden. Die gesuchte Trans- formation kann man aus den Orientierungs- punkten zugeordneter Spin Images ableiten.	Johnson und Hebert (1997)
		Johnson und Hebert (1999)
		Carmichael u. a. (1999)
		Guarnieri u. a. (2003)
		Huber und Hebert (2003)
		Brusco u. a. (2005)
		Kleinbauer (2006)
Lokale Deskriptoren	Teile von Oberflächen werden durch einfach zu berechnende Deskriptoren repräsentiert. Aus den Zuordnungen kann die Transformation bestimmt werden.	Mian u. a. (2004)
		Mian u. a. (2006a)
		Winkelbach u. a. (2004)
		Winkelbach u. a. (2006)
		Bae und Lichti (2008)

Tabelle 3.5: Lokale Verfahren für die Grobregistrierung.

Spin Images

Spin Images können für die Detektion von Ähnlichkeiten zwischen 3D Oberflächen verwendet werden und wurden von Johnson (1997) vorgestellt. Johnson und Hebert (1997) führen eine Registrierung von

3D-Freiformflächen mit Hilfe von Spin Images durch. Spin Images sind eine 2D Repräsentation einer dreidimensionalen Punktwolke bezogen auf einen Punkt. Zu einem Punkt einer Oberfläche wird mit dessen Nachbarn ein Oberflächennormalenvektor berechnet. Um den Punkt wird senkrecht zu der Tangentialebene ein zylindrisches Koordinatensystem aufgespannt. Punkte in der Nachbarschaft des Aufpunkts werden durch Vernachlässigung des Polarwinkels auf die Tangentialebene projiziert, es entsteht eine sogenannte *Spin Map* (siehe Abbildung 3.9). Schließlich wird ein Raster gebildet und die projizierten Punkte in dieses einsortiert. Die Grauwerte des so erzeugten 2D Bildes (*Spin Image*) ergeben sich aus der Anzahl der Punkte pro Rasterzelle.

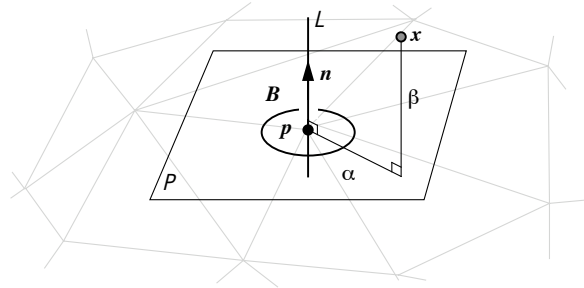


Abb. 3.9: Für die Berechnung der Spin Map Koordinaten α und β wird um einen Punkt p ein zylindrisches Koordinatensystem senkrecht zu einer Tangentialebene P mit dem Normalenvektor $\mathbf{n}$ entlang der Achse L aufgespannt (Abbildung entnommen aus Johnson (1997)).

Die Idee von Johnson und Herbert ist, dass Spin Images von korrespondierenden Punkten ähnlich sind, also stark korrelieren. Angewandt auf die Registrierung bedeutet dies, dass für alle Punkte einer Oberfläche aus einem ersten Datensatz ein Spin Image berechnet wird. Anschließend wird zufällig aus einem zweiten Datensatz ein Punkt ausgewählt und das zugehörige Spin Image berechnet. Dies wird mit allen Spin Images des ersten Datensatzes korreliert. Je größer die Korrelation, umso wahrscheinlicher ist es, dass korrespondierende Punkte vorliegen. Aus den so gewonnenen identischen Punkten wird die Transformationsvorschrift abgeleitet. Die Verifikation der Transformationsparameter erfolgt über den ICP-Algorithmus. Sind die Parameter gut, stimmen viele Punkte überein, wenn nicht, werden nur ähnlich viel übereinstimmende Punkte wie für die nicht registrierten Datensätze gefunden.

Eine Verbesserung des Ansatzes ist in Johnson und Hebert (1999) beschrieben. Durch eine lokale Berechnung der Spin Images ist der Algorithmus gegenüber Störungen und Verdeckungen in den Daten robuster und die Suche nach identischen Spin Images über die Korrelation wurde durch eine Komprimierung der Spin Images effizienter gestaltet. Huber und Hebert (2003) führen automatisch mehrere 3D Datensätze zusammen und nutzen zuerst die Spin Image Methode zur paarweisen Registrierung. Nach diesem ersten Verarbeitungsschritt dürfen auch fehlerhafte Ergebnisse der Registrierung vorliegen, sie werden bei einer globalen Optimierung detektiert und schließlich verworfen. Carmichael u. a. (1999) erweitern den Ansatz der Spin Images, indem sie auch 3D Datensätze mit unterschiedlicher Auflösung zulassen. In diesem Fall findet vor der Berechnung der Spin Images eine Ausdünnung bzw. eine Interpolation in den Datensätzen statt, so dass sie anschließend eine gleiche Punktdichte aufweisen. Im Bereich der Denkmalpflege haben Guarnieri u. a. (2003) Spin Images für die Bestimmung von Näherungswerten einer Registrierung zwischen zwei 3D Oberflächen verwendet. Die exakte Anpassung erfolgt schließlich über ein zweites Verfahren stufenweise unter der Anwendung einer Fourier Transformation und des ICP-Algorithmus.

Brusco u. a. (2005) erweitern den Ansatz der Spin Images durch die Hinzunahme von Intensitäts- bzw. Bilddaten. In diesem Zusammenhang wird der Begriff *Textured Spin Images* eingeführt. Hierbei wird die Summe von Helligkeitswerten mehrerer Kanäle in den Rasterzellen eines Spin Image abgespeichert. Ein Vorteil dabei ist, dass auch symmetrische Objekte registriert werden können, sofern die Textur unterschiedlich ist. Außerdem wird gezeigt, dass Textured Spin Images effizienter sind, da die Größe der Spin Images verkleinert werden kann, ohne eine Verschlechterung der Ergebnisse hinnehmen zu müssen.

Kleinbauer (2006) nutzt in ihrer Arbeit Spin Images zur Verifikation von Punktkorrespondenzen terrestrischer Laserscandaten. Die Spin Images wurden anhand vorhandener Punktkorrespondenzen berechnet und der Einfluss der einzelnen Faktoren, die bei der Generierung der Spin Images eine Rolle spielen, getestet und die optimale Einstellung der relevanten Parameter für verschiedene Datensätze ermittelt. Eine für alle Datensätze gültige, globale Parametereinstellung war in diesem Fall nicht möglich. Die Methode liefert bei Objekten mit

markanten Merkmalen gute Ergebnisse, allerdings konnten Punktkorrespondenzen bei geometrisch einfachen Objekten wie Gebäudefassaden nicht zuverlässig identifiziert werden.

Verwendung von lokalen Deskriptoren

Ein schnelles Verfahren für die paarweise Registrierung von Punktwolken wird in Winkelbach u. a. (2004) und Winkelbach u. a. (2006) vorgestellt. Das Verfahren setzt die Existenz von Oberflächennormalen zu jedem Punkt voraus. Die Transformationsvorschrift wird aus *orientierten* Punktpaaren ermittelt. Hierzu werden zufällig aus dem ersten Datensatz zwei Punkte entnommen und eine 4D Relation berechnet, welche die Distanz zwischen den Punkten, die Winkel der Normalenvektoren zu der Verbindungslinie der zwei Punkte und den Winkel zwischen den Normalenvektoren enthält. Dieser 4D-Vektor ist invariant gegenüber der Rotation und Translation der Punktwolke und wird für die Suche nach Korrespondenzen im zweiten Datensatz verwendet. Die effiziente Suche basiert auf einer Indexierung und liefert Hypothesen für gültige Transformationsvorschriften. Die Verifikation erfolgt über eine Abschätzung der überlappenden Fläche zwischen den Punktwolken mittels einer Monte-Carlo Strategie.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Mian u. a. (2006b), indem aus Punktpaaren und deren Oberflächennormalen lokale 3D Koordinatensysteme erzeugt werden. Diese bilden die Grundlage für einen Tensor dritter Ordnung, eine lokale Beschreibung der Oberfläche. Hierzu wird die Punktwolke zunächst ebenfalls trianguliert. Aus Punktpaaren und Oberflächennormalen werden Basen für Koordinatensysteme unter Distanz- und Winkelbedingungen gebildet, um eine kombinatorische Explosion zu vermeiden. Jede Basis definiert den Ursprung eines kubischen Gitters, welches an den Achsen der Basen ausgerichtet ist. Die triangulierte Oberfläche wird mit dem Gitter verschnitten, indem die entsprechenden Gitterzellen markiert werden. Das Resultat ist ein Tensor, der lokal die Oberfläche über ein charakteristisches Gitter beschreibt. Wurden die Tensoren für alle gültigen Basen und für beide Datensätze berechnet, erfolgt eine Zuordnung der Tensoren über einen linearen Korrelationskoeffizienten. Die Transformationsparameter werden schließlich über eine Basistransformation (Rotation) bzw. aus der Differenz der Ursprungskoordinaten (Translation) abgeleitet. Aus Gründen der Effizienz werden die triangulierten Oberflächen auf ca. 400 Maschen reduziert. Für eine korrekte Zuordnung benötigt das Verfahren etwa 50% Überlappung zwischen den Datensätzen (Mian u. a., 2006b).

3.3.4 Merkmalsbasierte Verfahren für die Grobregistrierung

Im Gegensatz zu den lokalen Verfahren findet bei den merkmalsbasierten Verfahren eine Interpretation der Daten statt. Merkmale werden aus den einzelnen Punktmengen extrahiert, die Bestimmung der Transformationsvorschrift erfolgt über zugeordnete Merkmale. Streng genommen können die merkmalsbasierten Verfahren je nach Ausprägung der Merkmale auch den lokalen oder globalen Verfahren zugeordnet werden. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass in der Regel nur wenige, aber besonders charakteristische Merkmale für eine Zuordnung verwendet werden.

Punktbasierte Verfahren

Gelfand u. a. (2005) präsentieren für die Registrierung von Freiformflächen einen Algorithmus, der nur eine geringe Anzahl an extrahierten Punkten verwendet. Hierzu wird zunächst für jeden Punkt aus den Datensätzen ein lokaler Deskriptor (*Integral Volume Descriptor*) der Oberfläche berechnet. Eine geringe Anzahl (< 40) an charakteristischen Punkten werden aus der Menge ausgewählt, indem Punkte mit einem selten vorkommenden Deskriptor bevorzugt werden. In einem anschließenden Zuordnungsverfahren werden identische Punkte über einen Distanzvergleich identifiziert.

Böhm und Becker (2007) nutzen den Intensitätskanal von terrestrischen Laserscandaten, um punktförmige Merkmale aus den Daten zu extrahieren und nutzen diese für eine paarweise Registrierung. Nach einem Histogramm-Ausgleich des Intensitätskanal verwenden sie den SIFT¹²-Operator (Lowe, 2004), um charakteristische Punkte aus dem Intensitätsbild zu extrahieren. Die Korrespondenzen zwischen zwei Standpunkten werden über das SIFT-Merkmal gebildet, welches auf der Verteilung der lokalen Gradienten basiert und typischerweise durch einen mehrdimensionalen Vektor dargestellt wird. Die Filterung falscher Merkmalspaare erfolgt über ein RANSAC¹³-Verfahren. Dabei werden mehrfach zufällig drei Punktpaare gezogen, die Transformation berechnet und mit den übrigen Merkmalspunkten verifiziert. Die Lösung mit dem größten Konsens liefert die gesuchte Transformationsvorschrift.

¹²SIFT (engl.), Abkürzung für *Scale Invariant Feature Transform*

¹³RANSAC (engl.), Abkürzung für *Random Sample Consensus* vgl. Kapitel 4.2.3

Verfahren	Kurzbeschreibung	Publikationen
Punktbasierte Verfahren	Eindeutige Punktmerkmale werden automatisch aus den Scandaten extrahiert und anschließend Korrespondenzen mit einem Zuordnungsalgorithmus ermittelt.	Gelfand u. a. (2005)
		Böhm und Becker (2007)
		Barnea und Filin (2008)
Linienbasierte Verfahren	Anstelle von punktförmigen Merkmalen werden Linien extrahiert und einander zugeordnet.	Murino u. a. (2001)
		Stamos (2001)
		Wyngaerd und van Gool (2002)
		Allen u. a. (2003)
		Stamos und Leordeanu (2003)
		Chao und Stamos (2005)
Ebenenbasierte Verfahren	Anhand zugeordneter identischer Ebenen wird die Transformationsvorschrift berechnet.	Rietdorf (2004)
		He u. a. (2005)
		von Hansen (2006)
Sonstige geometr. Merkmale	Aus den Daten werden außer Linien oder Ebenen weitere geometrische Primitive extrahiert, die für eine Zuordnung und für die Berechnung der Transformationsvorschrift verwendet werden.	Dijkman und van den Heuvel (2002)
		Rabbani u. a. (2007)
Bildbasierte Registrierung von Scandaten	Die Registrierung von 3D-Scandaten erfolgt über zugehörige Bilddaten. Es werden Merkmale in den Bilddaten detektiert und auf die Scandaten übertragen. Eine Zuordnung liefert wiederum die Transformationsvorschrift.	Wendt (2004)
		Bendels u. a. (2004)
		Al-Manasir und Fraser (2006)
		Barnea und Filin (2007)

Tabelle 3.6: Merkmalsbasierte Verfahren für die Grobregistrierung.

Barnea und Filin (2008) extrahieren charakteristische Punkte aus den Entfernungsdaten eines terrestrischen Laserscanners. Der entwickelte Operator, *Min-Max-Operator* genannt, bezweckt die Detektion von Punkten an Ecken. Der Operator beruht auf Ableitungen erster Ordnung und wird auf eine rasterförmige 2D-Darstellung der Entfernungsdaten angewandt, wodurch eine effiziente Extraktion der charakteristischen Merkmale möglich ist. Die anschließende Zuordnung der Punktmerkmale basiert auf einem kombinatorischen Ansatz, dem das RANSAC-Verfahren zugrunde liegt. Drei Punkttupel werden zufällig ausgewählt, die Transformationsvorschrift abgeleitet, alle Punkte transformiert und die prozentuale Überdeckung anhand ähnlicher Punkte wird berechnet.

Linienbasierte Verfahren

Eine Methode für die Grobregistrierung von Entfernungsdaten basierend auf der Zuordnung von 3D Skeletten schlagen Murino u. a. (2001) vor. Das Verfahren ist für Rohrleitungen geeignet, in diesem Fall wird es auf die Unterwasser-Konstruktion einer Ölplattform angewandt. Es wird ein Algorithmus verwendet, welcher aus den Daten Rohre sowie deren Schnittpunkte extrahiert. Anschließend wird eine Zuordnung durchgeführt, indem korrespondierende Rohre und Schnittpunkte gesucht werden. Hierfür werden zunächst Schnittpunkte zugeordnet, von denen mehr als drei Rohrleitungen abgehen. Anhand der Winkel zwischen den Rohren werden die Paarungen zugeordnet. Dabei wird zu jeder Zuordnung eine Kostenfunktion definiert, welche sich aus der Differenz der Winkel und der Zahl der nicht zugeordneten Rohre eines Schnittpunkts ergibt. In diesem Schritt wird eine vollständige Suche durchgeführt und letztendlich die Zuordnung mit minimalen Kosten gewählt.

Ein Verfahren, welches für die Registrierung von gescannten Gesichtern entwickelt wurde, ist das *Bitangent Curve Matching* (Wyngaerd und van Gool, 2002). Bitangente Kurven werden durch eine Reihe bitangenter Punkte gebildet. Zwei Punkte sind bitangent, wenn sie die gleiche Tangentialebene haben. Solche Ebenen können derart über Oberflächen geschoben werden, dass sie stets zwei Punkte berühren und dabei zwei Spuren, die bitangente Kurven, hinterlassen. Aus den vermaschten und geglätteten Daten werden jeweils ca. 100 Kurven extrahiert. Bei der anschließenden Zuordnung werden die 15 längsten Kurven verwendet. Dabei kommt ein invariantes Merkmal, eine Funktion des Abstands der bitangente Punkte in Abhängigkeit von der Bogenlänge, zum Einsatz. Für die Zuordnung werden die Abstandsfunktionen in kleine Teilstücke zerlegt, Übereinstimmungen werden durch das Verschieben eines Teilstücks aus Scan 1 über ein Teilstück aus Scan 2 ermittelt. Dabei werden beide möglichen Richtungen beachtet, da die Abstandsfunktion in verschiedene Richtungen parametrisiert sein kann. Ist eine Übereinstimmung in der Abstandsfunktion gefunden, so sind über die bitangente Kurven jeweils zwei Anfangs- und Endpunkte aus den Teilstücken bekannt und die Transformationsvorschrift kann aus vier identischen Punkten abgeleitet werden. Es erfolgt eine Verifikation über eine Güte-Funktion, indem ähnlich zu ICP Abstände zwischen beiden Scans ermittelt werden. Nachteilig bei dem Verfahren ist, dass die bitangente Kurven über eine gesamte Oberfläche ermittelt werden und somit

globale Eigenschaften der Datensätze darstellen. Außerdem benötigt die Methode eine große Überlappung der Scans und funktioniert typischerweise nicht für Objekte mit ebenen, zylindrischen oder konischen Regionen.

Extrahierte Linien aus terrestrischen Laserscans werden von Stamos und Leordeanu (2003) für die paarweise Registrierung von terrestrischen Scandaten verwendet. Die Bestimmung der Transformationsvorschrift ist anhand von zwei korrespondierenden Linienpaaren möglich. Um den Suchraum einzuschränken, werden zuerst über einen geometrischen Vergleich der Merkmale mögliche Kandidaten aussortiert. Die Registrierung erfolgt mit den verbleibenden Linienstücken in vier Schritten:

1. Aus *einem* Linienpaar werden Rotation und Translation geschätzt, indem auch der Anfangs- und Endpunkt für die Berechnung der Transformation herangezogen wird. Über eine Gütefunktion (Anzahl der Übereinstimmungen) wird entschieden, ob die geschätzte Transformation akzeptiert wird. Falsche Zuordnungen werden aussortiert. Der erste Schritt wird wiederholt, bis eine Transformationsvorschrift akzeptiert wird.
2. Im zweiten Schritt wird von den verbleibenden Linien ein zweites Paar hinzugezogen und die Translationskomponente neu berechnet, ohne die Anfangs- und Endpunkte zu berücksichtigen. Fällt ein Vergleich mit den in Schritt 1 berechneten Parametern positiv aus, wird das zweite Paar zu der Liste korrespondierender Paare hinzugefügt.
3. In Schritt 3 werden alle Linienstücke transformiert und die Zahl der Übereinstimmungen berechnet. Ist diese Anzahl zu gering, beginnt der Algorithmus erneut mit Schritt 1.
4. Schließlich werden die Transformationsparameter aus allen gültigen Übereinstimmungen neu geschätzt.

Der Ansatz wurde von Chao und Stamos (2005) weiter entwickelt und optimiert. Neben einer schnelleren Berechnung der Transformationsvorschriften wird ein Programm präsentiert, womit ein Anwender gegebenenfalls das korrekte Ergebnis aus mehreren möglichen Lösungen manuell auswählen kann.

Ebenenbasierte Verfahren

Das von He u. a. (2005) vorgestellte Verfahren für die paarweise Registrierung von Scandaten basiert auf extrahierten Ebenen. Es werden sogenannte *Complete Plane Patches* (CPPs) verwendet, dies sind im Vordergrund einer Szene stehende Ebenen. Korrespondierende Ebenen werden über eine beschränkte Baumsuche (Grimson und Lozano-Pérez, 1987) ermittelt, als Bedingungen werden die Fläche, die Winkel zwischen den Normalenvektoren der extrahierten Ebenen sowie die euklidischen Abstände zwischen den Schwerpunkten verwendet. Da für die Bestimmung der Translation die Schwerpunkte zugeordneter Ebenen verwendet werden, reichen zwei korrespondierende Ebenen für die Ermittlung der Transformationsvorschrift aus. Dies setzt allerdings voraus, dass auch die Begrenzungen der Ebenen ähnlich sind.

In dem beschriebenen Verfahren von von Hansen (2006) werden ebenfalls segmentierte Ebenen sowie deren Schwerpunkte für die Registrierung von terrestrischen Laserscandaten genutzt. Unter der Bedingung in etwa lotrecht erfasster Scans, reicht für die Berechnung der unbekannten Transformationsparameter ein identisches Ebenenpaar aus. Nach einer Segmentierung der Scandaten in kleine Flächenstücke und einer anschließenden Gruppierung wird für die Zuordnung eine vollständige Suche verwendet.

Bildbasierte Registrierung von Scandaten

Wendt (2004) führt einen auf Bilddaten basierenden Operator für Punktwolken (*IBPCO - Image Based Point Cloud Operator*) ein. Ausgehend von hoch auflösenden Bilddaten, welche in Bezug auf die erfassten 3D Punktdaten orientiert sind, werden charakteristische Merkmale aus den Bilddaten extrahiert. Anschließend wird die 3D Position der Merkmale sowie eine lokale Ebene anhand umgebender 3D Punkte bestimmt. Mit diesen Informationen wird für die Merkmale jeweils eine lokale Orthophoto berechnet. Eine Zuordnung der erzeugten Orthobilder mittels einer Korrelationstechnik liefert schließlich die gesuchten Transformationsparameter. Das Verfahren setzt voraus, dass die Bilddaten für eine Zuordnung ausreichende Textur enthalten.

Bendels u. a. (2004) kombinieren ebenfalls Bild- und Punktdaten für die Registrierung von Entfernungsdaten. Allerdings liegen hier keine gesondert erfassten Bilddaten vor, sondern jedem 3D Punkt ist exakt ein Bildpunkt zugeordnet. Auch hier wird davon ausgegangen, dass sich Merkmale aus Bilddaten zuverlässiger als in den 3D Entfernungsdaten zuordnen lassen. Mit SIFT-Verfahren werden aus den Bilddaten Merkmale extrahiert. Die SIFT Merkmale setzen sich aus einem deskriptiven Vektor mit 128 Elementen zusammen, anhand dessen mögliche Punktkorrespondenzen gebildet werden. Eine Verifikation der Zuordnungen erfolgt mit einem RANSAC-Verfahren und der Hinzunahme umgebender 3D Punkte. Barnea und Filin (2007) sowie

Wang und Brenner (2008) nutzen ebenfalls den SIFT-Operator, um aus Bilddaten Merkmale zu extrahieren, allerdings mit dem Unterschied, dass zu jedem Entfernungsdatensatz mehrere Bildaufnahmen von einer dem Entfernungsmessinstrument aufgesetzten Kamera vorhanden sind. Die Bilddaten haben eine höhere Auflösung als die Scandaten, der SIFT-Operator wird auf jedes Einzelbild angewandt. Die berechneten Merkmale werden in einem kd-Baum abgespeichert, wodurch eine effiziente Suche nach Korrespondenzen möglich ist. Schließlich werden die Laserscanner Daten mit den Bildmerkmalen verknüpft, indem den Merkmalen entsprechende 3D-Koordinaten zugewiesen werden.

Ein ausschließlich auf den Bilddaten basierendes Verfahren für die Registrierung terrestrischer Laserscans stellen Al-Manasir und Fraser (2006) vor. Ausgehend von einer bekannten relativen Orientierung zwischen dem Entfernungs- und Bildsensor, werden die Ergebnisse einer Bildorientierung auf die Entfernungsdaten übertragen. Werden kodierte Zielmarken bei der Erfassung der Bilder verwendet, ist eine automatische Registrierung möglich. Ansonsten werden Korrespondenzen in den Bilddaten manuell ermittelt. Für die Orientierung des Bildverbandes wird das Softwarepaket *Australis* (Fraser und Edmundson, 2000) verwendet. Ein Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit, zusätzliche Bildaufnahmen für die Orientierung einzubinden. Dadurch können notwendige Überlappungen in den Bilddaten einfach erzeugt werden und eine Orientierung weiter entfernter Scannerstandpunkte ist über die Verknüpfung der zusätzlich erfassten Bilddaten möglich.

3.4 Simultane Registrierung mehrerer Standpunkte

In den voranstehenden Abschnitten wurden verschiedene Verfahren für die paarweise Registrierung von Entfernungsdaten vorgestellt. Mehrere Standpunkte können miteinander verknüpft werden, indem die Orientierungen der einzelnen Standpunkte inkrementell zusammengefügt werden. Allerdings akkumulieren sich bei dieser Technik die Fehler fortlaufend und nach einigen Standpunkten können erhebliche Abweichungen der Messwerte von den Soll-Koordinaten auftreten, im Vermessungswesen wird dieser Effekt als Schlussfehler bezeichnet. Die Abweichungen sind in den Messdaten besonders deutlich zu erkennen, wenn die Messungen in einem Ring erfolgen und die erste und letzte Messung sich überlappen. Um die kumulierte Abweichung am Ende einer Messkette oder eines Rings zu vermeiden, ist eine simultane Registrierung mehrerer Standpunkte erforderlich. In der Literatur wird auch oftmals von dem Problem einer globalen Registrierung gesprochen. Dabei werden mögliche Abweichungen zwischen den einzelnen Standpunkten gleichmäßig verteilt.

Zur Lösung dieses Problems wird im Vermessungswesen eine Netzausgleichung berechnet, alle Beobachtungen und unbekannten Parameter gehen in ein Ausgleichungsmodell ein und die bestmögliche Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate wird ermittelt. Dieser Ansatz kann auch auf eine globale Registrierung von Laserscanningdaten übertragen werden, sofern anstelle der Messpunkte extrahierte Merkmale verwendet werden, aus denen sich eine Transformationsvorschrift ableiten lässt. Werden für die Registrierung der Laserscandaten identische Punkte verwendet, so ist eine simultane Registrierung aller Standpunkte über ein entsprechendes Ausgleichungsmodell möglich (vgl. Kapitel 3.1). Die Software RiScanPro von RIEGL bietet beispielsweise ein Modul, mit dem eine simultane Registrierung mehrerer Standpunkte durchgeführt werden kann. Dabei können für die Ausgleichung neben den Verknüpfungspunkten auch Ebenengleichungen verwendet werden. Hierfür müssen korrespondierende Ebenen in den verschiedenen Scans manuell über die Auswahl entsprechender Messpunkte definiert werden (Riegl, 2006). Eine globale Registrierung anhand extrahierter Merkmale aus terrestrischen Laserscanning Daten ist auch mit den vorgeschlagenen Methoden von Rabbani u. a. (2007); Akca und Gruen (2005b) möglich.

Im Computer Vision Bereich werden ebenfalls Verfahren für eine globale Registrierung diskutiert. In der Regel wird hier ebenfalls eine Optimierungsaufgabe gelöst und wie bei einem ICP-Algorithmus unter der Verwendung aller Messpunkte die Distanz zwischen überlappenden Datensätzen minimiert. Die Verfahren schöpfen damit das Potential der redundanten Messdaten voll aus und erreichen so zumindest theoretisch eine höhere Genauigkeit für die globale Registrierung. Beispiele für Algorithmen dieser Art sind in Neugebauer (1997); Williams und Bennamoun (2001); Huber und Hebert (2003); Matabosch u. a. (2006) gegeben.

3.5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Für die vollständige Aufnahme eines Messobjekts mit einem entfernungsgebenden Sensor sind aufgrund von Sichtbeschränkungen in der Regel mehrere Messungen von verschiedenen Standpunkten aus erforderlich. Die Orientierung der dreidimensionalen Messdaten wird Registrierung genannt. Die ersten Verfahren für die Registrierung von Entfernungsdaten wurden unmittelbar nach dem Aufkommen der optischen 3D-Sensoren entwickelt. Im Computer Vision Bereich sind Musterprojektionssysteme und triangulierende Scanner für den Nahbereich verbreitet. Mit den Geräten kann die Oberflächengeometrie einzelner Objekte schnell und

mit einer hohen Dichte erfasst werden. Dementsprechend liegen die Anwendungen in diesem Bereich in der industriellen Qualitäts- und Fertigungskontrolle, der Medizin, dem Reverse Engineering sowie in der Erfassung von Kunstgegenständen.

Mit der Verbreitung von terrestrischen Laserscannern im mittleren und weiten Entfernungsbereich werden mehr und mehr große Objekte wie Fabrikanlagen, Gebäude oder Straßenzüge dreidimensional erfasst. Die einzelnen Standpunkte liegen im Gegensatz zu den Anwendungen aus dem Computer Vision Bereich mehrere Meter auseinander, die Überlappung der Daten ist geringer und die Messdaten enthalten aufgrund von Verkehr, Fußgängern oder anderen störenden Objekten zahlreiche unerwünschte Messungen. Daher sind die für Nahbereichsscanner entwickelten Verfahren nur bedingt für die Registrierung terrestrischer Laserscannerdaten geeignet. In der Praxis wird die Registrierung von Laserscandaten häufig mittels künstlicher Verknüpfungspunkte durchgeführt, welche im Sichtbereich der Scanner verteilt und von jedem Standpunkt aus erfasst werden müssen. Dies erfordert einen manuellen Eingriff und einen zusätzlichen Zeitaufwand während der Messungen.

Rein datengetriebene Lösungen für das Orientierungsproblem wurden in zahlreichen Varianten vorgestellt. Die Ansätze lassen sich in Verfahren für Grob- und Feinregistrierung aufteilen. Viele Methoden wurden für Daten von Nahbereichsscannern entwickelt und sind daher nur bedingt für die Registrierung terrestrischer Daten geeignet. Einige Methoden für die Grobregistrierung, hauptsächlich merkmals- und bildbasierte Verfahren wurden an die Daten terrestrischer Laserscanner angepasst. Für die Feinregistrierung hat sich der ICP-Algorithmus durchgesetzt, zahlreiche Varianten wurden in den 90er Jahren entwickelt, die auch erfolgreich auf terrestrische Laserscannerdaten angewendet wurden.

Im folgenden Kapitel wird zunächst ein entwickeltes Verfahren für die automatische Segmentierung von Laserscans in ebene Regionen erläutert. Die Registrierung von TLS-Daten erfolgt schließlich anhand der extrahierten Ebenen über Zuordnungsverfahren. Dabei wird im weiteren Verlauf der Arbeit eine Unterscheidung in ikonische (nicht-symbolische) und symbolische Verfahren getroffen. Eine ikonische Zuordnung basiert auf zahlreichen Vergleichen einer einfach abzuleitenden Information, symbolische Zuordnungsverfahren nutzen dagegen eine Interpretation der Information und verfolgen eine Optimierungsstrategie. Abhängig von der Zuordnungsstrategie ist gegebenenfalls eine Extraktion von Merkmalen aus den segmentierten Scandaten erforderlich. Für die Plausibilitätsprüfung werden Varianten an Fitnessfunktionen vorgestellt und Ergebnisse der Verfahren präsentiert.

4 Segmentierung von terrestrischen Laserscandaten

Die Aufgabe der Segmentierung von TLS-Daten ist es, die Punkte in disjunkte Teilmengen aufzuteilen, welche bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen. Dabei werden die zusammengehörigen Punkte eines Datensatzes mit einem Label gekennzeichnet. Das Ergebnis wird als Segmentierung bezeichnet und zeigt die Zerlegung eines Datensatzes in verschiedene Bestandteile. Zahlreiche Segmentierungsalgorithmen wurden für 2D-Bilddaten entwickelt und später auch auf 2.5D-Tiefenbilder angewendet. In den letzten Jahren wurden manche Algorithmen erweitert und für eine Segmentierung von 3D-Daten angepasst. Im Zusammenhang mit terrestrischen Laserscandaten ist eine flächenhafte Segmentierung, z. B. in ebene Regionen, besonders interessant, da die Scanner ihre Umgebung in vorgegebenen Schrittweiten regelmäßig abtasten und somit Objektoberflächen mit sehr vielen Messpunkten erfassen. Im Gegensatz hierzu ist die Extraktion von Kanten aus den TLS-Daten eher problematisch, da diese in den Daten oftmals nicht eindeutig zu erkennen sind. Zum einen werden Kanten bei der automatischen Messung nicht gezielt angemessen und zum anderen werden Kanten durch die von der Spotgröße des Laserstrahls verursachten Kanteneffekte nur ungenau erfasst (siehe Kapitel 2.2). Dieses Kapitel befasst sich daher insbesondere mit der regionenbasierten Segmentierung, bestehende Ansätze werden erläutert und ein neu entwickeltes Verfahren für die Ebenensegmentierung von terrestrischen Laserscandaten vorgestellt. Außerdem wird die Verwendung von extrahierten Ebenen und deren Eigenschaften für eine datengetriebene Registrierung motiviert. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Grundlagen für eine Ebenenschätzung aus dreidimensionalen Punktdaten behandelt.

4.1 Ebenenschätzung aus Punktdaten

Eine Ebene ist durch drei Punkte im Raum eindeutig definiert, die Bestimmung einer Ebenengleichung aus mehr als drei Punkten kann über eine Ausgleichung erfolgen. Das Ziel der Ebenenschätzung ist es, aus einer Punktmenge P mit den Punkten $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, $i = 1 \dots n$ eine ausgleichende Ebene der Form

$$\langle \mathbf{n}, \mathbf{x} \rangle + d = a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 \quad (4.1)$$

zu berechnen. Die Ebene ist über den normierten Normalenvektor $\mathbf{n} = (a, b, c)^T$, $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ und den kürzesten Abstand d zwischen der Ebene und dem Koordinatenursprung gegeben. Die Darstellung der Ebene in der *Hesse-Normalenform* (HNF) $\langle \mathbf{n}, \mathbf{x} \rangle + d = 0$ lehnt sich in dieser Arbeit an die Schreibweise von Drixler (1993) an. Üblich ist auch die Darstellung der HNF mit der Bedingung $d \geq 0$, allerdings wird diese Bedingung vielfach nicht gestellt, daher gibt es zwei Varianten einer Ebene in der Hesse-Normalform (Merziger und Wirth, 1993).

Bei der Ebenenschätzung wird eine Ebene bestimmt, welche sich bestmöglichst den Messpunkten anpasst (vgl. Abbildung 4.1). Zu diesem Zweck müssen geeignete Schätzwerte für die Parameter a , b , c und d gefunden werden, für welche die Abstände aller Punkte zu der Ebene minimiert werden.

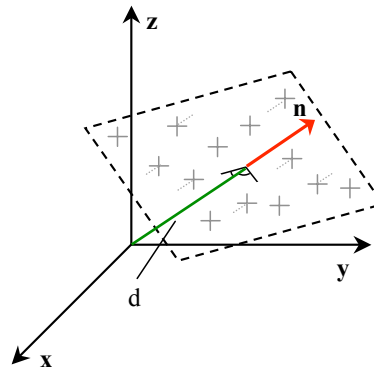


Abb. 4.1: Ausgleichende Ebene definiert durch Punkte im Raum.

Wird das Problem im Sinne der Ausgleichungsrechnung formuliert, müssen aufgrund der Überbestimmung Verbesserungen an die gemessenen Punktkoordinaten angebracht werden. Es ergibt sich für jeden Messpunkt $\mathbf{x}_i$ die Gleichung:

$$a \cdot (x_i + v_{xi}) + b \cdot (y_i + v_{yi}) + c \cdot (z_i + v_{zi}) + d = 0 \quad (4.2)$$

Damit sich bei der Lösung des Ausgleichungsproblems nicht die triviale Lösung $a = b = c = d = 0$ ergibt, muss zusätzlich eine Bedingung für die Parameter a , b , c und d formuliert werden. Bei der Segmentierung von luftgestützten Laserscanning Daten in ebene Regionen wird für die Ebenenschätzung üblicherweise die Bedingungsgleichung $c = -1$ eingeführt. Dadurch können keine Ebenen parallel zur z -Achse ($c = 0$) geschätzt werden, was auch nicht erforderlich ist, wenn die Daten in Form einer z -Matrix vorliegen. Somit ergibt sich ein funktionales Modell, in dem die z -Koordinate als Funktion $z = f(x, y)$ dargestellt wird. Mit der Ausgleichung wird allerdings nicht der orthogonale Abstand der Punkte zur Ebene, sondern der Abstand parallel zur z -Achse minimiert (Brenner, 2000). Eine andere Möglichkeit eine Bedingung vorzugeben ist durch die Gleichung $d = 1$ gegeben (Feddema und Little, 1997). In diesem Fall können dreidimensionale Punkte für die Berechnung der ausgleichenden Ebenen genutzt werden und die Schätzung senkrecht stehender Ebenen ist möglich. Allerdings dürfen die Ebenen durch die gewählte Bedingung nicht durch den Ursprung gehen ($d = 0$). Es ergibt sich eine Ebenengleichung der Form $f(x, y, z) = ax + by + cz + 1 = 0$. Der unbekannte Normalenvektor der Ebene kann aus $n > 3$ Messpunkten durch eine Minimierung der Quadratsumme $S = \sum_{i=1}^n (f(x, y, z))^2$ berechnet werden. Nach der Aufstellung des Verbesserungsgleichungssystems ergibt sich ein Schätzwert für die unbekannten Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate zu $\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{l} = \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{n}$ (vgl. Gleichung 3.7), mit:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i z_i \\ \sum_i x_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i z_i \\ \sum_i x_i z_i & \sum_i y_i z_i & \sum_i z_i^2 \end{pmatrix} \quad ; \quad \mathbf{n} = \begin{pmatrix} -\sum_i x_i \\ -\sum_i y_i \\ -\sum_i z_i \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Nach der Berechnung der Parameter lässt sich die HNF der Ebenengleichung über eine Normierung der Parameter a , b und c berechnen. Allerdings wird, wie Kampmann und Renner (2004) aufzeigen, bei diesem nicht-iterativen Verfahren zur Ebenenschätzung nicht die ideale L2-Lösung ermittelt.

Eine exakte Methode zur Lösung des Problems lässt sich über das Verfahren der orthogonalen Regression ermitteln, indem die Quadratsumme der orthogonalen Abstände minimiert wird (Duda und Hart, 1973). Aus der Ebenengleichung 4.1 wird der unbekannte Abstand d vom Ursprung durch eine Reduktion der Koordinaten um den Schwerpunkt $\bar{\mathbf{x}}$ eliminiert. Eine ausgleichende Ebene hat somit den Abstand Null vom Ursprung. Der Normalenvektor der ausgleichenden Ebene ergibt sich aus dem zum kleinsten Eigenwert λ_{min} gehörenden Eigenvektor $\mathbf{v}_{min}$ der Matrix

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \sum_i (x_i - \bar{x})^2 & \sum_i ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})) & \sum_i ((x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})) \\ \sum_i ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})) & \sum_i (y_i - \bar{y})^2 & \sum_i ((y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})) \\ \sum_i ((x_i - \bar{x})(z_i - \bar{z})) & \sum_i ((y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})) & \sum_i (z_i - \bar{z})^2 \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Der eliminierte Abstandsparameter d ergibt sich aus einem Koeffizientenvergleich zwischen der Ebenengleichung $ax + by + cz + d = 0$ und aus der um den Schwerpunkt reduzierten Gleichung $a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z} = 0$ zu

$$d = -\frac{1}{n} \left(\sum_i x_i \cdot a + \sum_i y_i \cdot b + \sum_i z_i \cdot c \right). \quad (4.5)$$

Der kleinste Eigenwert λ_{min} entspricht der Quadratsumme der Abstände der Messpunkte von der Ebene. Die Qualität der Ebenenschätzung, welche durch den Varianzfaktor angegeben wird, berechnet sich aus n Messpunkten wie folgt:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\lambda_{min}}{n-3} \quad (4.6)$$

Ein gleichwertiges Ergebnis ist auch mit der Methode der kleinsten Quadrate möglich, sofern die Bedingungsgleichung $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ für die Unbekannten eingeführt wird. Allerdings ist dann das Modell nicht mehr linear und die Lösung ist nur noch über eine Linearisierung der Beobachtungsgleichungen und iterativ mit Näherungswerten möglich. Wird die Bedingungsgleichung auch als Beobachtungsgleichung betrachtet, sollte ihr ein wesentlich größeres Gewicht (z.B. 10^6) als den restlichen Beobachtungsgleichungen gegeben werden (Kampmann und Renner, 2004).

Orientierung von geschätzten Ebenen

Ebene Regionen werden von Laserscannern auch von unterschiedlichen Standpunkten aus stets von der gleichen Seite erfasst und die Orientierung muss für die spätere Zuordnung in allen Standpunkten identisch sein (vgl. Abbildung 4.2). Bei der Schätzung einer Ebene über eine Eigenwertzerlegung kann aber durch die frei wählbare Orientierung der Eigenvektoren auch die Orientierung identischer Ebenen in verschiedenen Scans unterschiedlich sein. Eine gleiche Orientierung wird hergestellt, indem der Normalenvektor der Ebene so gewählt wird, dass er

immer in Richtung des Scanners zeigt. Dies kann gegebenenfalls durch eine Multiplikation der Ebenengleichung mit dem Wert -1 erreicht werden.

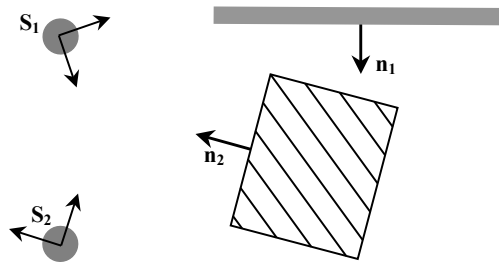


Abb. 4.2: Normalenvektoren von Ebenen müssen von allen Standpunkten aus gesehen in die gleiche Richtung weisen.

4.2 Regionenbasierte Segmentierung

Das Ziel einer regionenbasierten Segmentierung ist die Gruppierung von Bereichen, die ein definiertes Homogenitätskriterium erfüllen. Aus formaler Sicht ist die Repräsentation einer Fläche durch die Region, die sie im Bild einnimmt, äquivalent zur Angabe ihrer geschlossenen Kontur (Jiang und Bunke, 1997). Damit stehen grundsätzlich zwei Verfahren für eine flächenhafte Segmentierung zur Verfügung, die *Bestimmung der Konturlinien* über die Detektion von Änderungen oder die *Extraktion von homogenen Regionen*. In der Praxis werden Verfahren für die Bestimmung von homogenen Regionen gegenüber Kantenextraktionsverfahren vorgezogen, da extrahierte Konturen oftmals Lücken aufweisen. Horowitz und Pavlidis (1974) geben eine abstrakte Formulierung für die notwendigen Bedingungen einer regionenbasierten Segmentierung an, die von zahlreichen anderen Autoren in ähnlicher Form übernommen wurde:

1. $\cup_{i=1}^n R_i = R$.
2. $R_i \cap R_j = \emptyset$, $i \neq j$.
3. $P(R_i) = \text{TRUE}$, $i = 1, 2, \dots, n$.
4. $P(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}$, $i \neq j$, falls R_i und R_j benachbart sind.

In Worten wird gefordert, dass die Vereinigung aller R_i die Gesamtregion R ergibt (1.), die Regionen sich nicht überlappen (2.), ein logisches Prädikat P (Homogenitätskriterium) erfüllt ist (3.) und zwei benachbarte Regionen nicht das gleiche Prädikat erfüllen (4.). Die letzte Bedingung sorgt dafür, dass Regionen maximaler Größe entstehen. Oftmals wird an zweiter Stelle der genannten Bedingungen zusätzlich die Bedingung

- 2a. R_i , $i = 1, 2, \dots, n$ ist zusammenhängend

gefordert (Jiang und Bunke, 1997; Böhm, 2005).

Die Segmentierung von 2.5D Tiefenbildern ist ein intensiv behandeltes Thema, Hoover u. a. (1996) stellen eine Methode für die Evaluation von segmentierten Tiefenbildern vor und bewerten umfassend den damaligen Stand der Segmentierung in ebene Regionen. Inzwischen wurden basierend auf den bekannten Ansätzen abgewandelte Algorithmen vorgestellt, die auch teilweise mit 3D Daten umgehen könnten. Nachfolgend werden die bekanntesten Ansätze zur Segmentierung angesprochen.

4.2.1 Split-and-Merge

Split-and-Merge Algorithmen laufen in zwei Schritten ab, zuerst erfolgt eine Aufteilung des zu segmentierenden Datensatzes in viele Teilregionen, die in einem zweiten Schritt unter der Berücksichtigung eines Homogenitätskriteriums und der Nachbarschaften miteinander verschmolzen werden. Dabei ist die Art der Aufspaltung der Daten von entscheidender Bedeutung. Üblicherweise wird solange nach festen Regeln unterteilt, bis jede Region das Homogenitätskriterium erfüllt. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass die Unterteilung nicht entlang der natürlichen Grenzen in den Daten erfolgt. Diese können aber detektiert werden, sofern die gebildeten Teilregionen hinreichend klein sind.

Das Verfahren von von Hansen u. a. (2006) für die Segmentierung von terrestrischen Laserscanning Daten in ebene Regionen kann als ein Algorithmus dieser Klasse betrachtet werden. Zuerst wird der Raum einer Punktwolke in einzelne Volumenelemente fester Größe unterteilt. Nach der robusten Berechnung von lokalen Ebenen aus den innerhalb eines Voxels gelegenen Punkten werden benachbarte Ebenen mit ähnlicher Orientierung gruppiert.

4.2.2 Hough-Transformation

Dieses aus der Bildverarbeitung bekannte Verfahren kann für die Erkennung von geometrischen Objekten verwendet werden. Voraussetzung bei der Hough-Transformation ist eine Parametrisierung des zu erkennenden geometrischen Objekts. Bilddaten oder Laserscans werden in den sogenannten Hough-Raum transformiert. Dieser wird durch ein Koordinatensystem dargestellt, welches durch die Parameter des parametrisierten Objekts definiert ist. Nach einer Diskretisierung des Hough-Raums werden für jeden Datenpunkt alle möglichen Parametrisierungen in den Hough-Raum eingetragen. Gehören nun mehrere Datenpunkte zu dem gleichen geometrischen Objekt, so entsteht im Hough-Raum an der entsprechenden Stelle ein lokales Maximum und die entsprechenden Parameter des Objekts können direkt abgelesen werden.

Vosselman (1999) nutzt die Hough-Transformation zur Detektion von Ebenen aus luftgestützten 2.5D Laserscanning Daten. Rabbani (2006) erweitert den Ansatz auf 3D und verwendet das Verfahren für die Ebenenextraktion aus terrestrischen Laserscanning Daten. Hierfür wird der normierte Normalenvektor einer Ebene mit sphärischen Koordinaten ausgedrückt.

$$\mathbf{n} = (\cos \theta \sin \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \phi)^T \quad 0 \leq \theta < 2\pi, 0 \leq \phi \leq \pi \quad (4.7)$$

Eine Ebene ist durch den Normalenvektor $\mathbf{n}$ und den kürzesten Abstand zum Ursprung d wie folgt definiert:

$$x \cos \theta \sin \phi + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \phi + d = 0 \quad (4.8)$$

Somit setzt sich der Hough-Raum aus den Variablen θ , ϕ und d zusammen und jeder Punkt $\mathbf{x} = (x_i, y_i, z_i)$, der die Gleichung 4.8 für alle Diskretisierungen ϕ_k , θ_l und d_m erfüllt, wird an entsprechender Stelle in den Hough-Raum eingetragen. Die Peaks im Hough-Raum liefern schließlich die Parameter der Ebenen.

4.2.3 Segmentierung mit dem RANSAC-Algorithmus

Der RANSAC-Algorithmus wurde von Fischler und Bolles (1981) vorgestellt und kann für die Schätzung eines beliebigen Modells aus einer gegebenen Datenmenge verwendet werden. Der RANSAC-Algorithmus läuft im Wesentlichen in vier sich wiederholenden Schritten ab:

1. Zufällige Auswahl von n Punkten, aus denen das Modell bestimmt wird (*Random Sample*). Es wird angenommen, dass die Stichprobe frei von Ausreißern ist.
2. Berechnung des Modells aus den n gewählten Punkten.
3. Ermittlung aller Datenpunkte, die zum Modell passen (*Consensus*). Hierbei muss in der Regel ein Schwellwert definiert werden. Punkte, die nicht zum Modell passen, werden als Ausreißer angesehen.
- 4a. Die Schritte 1-3 werden N mal wiederholt und dabei die Teilmenge ermittelt, welche am meisten Punkte enthält (größter Konsens).
- 4b. Überprüfung der Anzahl der gültigen Punkte. Ist diese größer als ein Schwellwert, bricht der Algorithmus ab, ansonsten erfolgt eine Fortsetzung mit Schritt 1.

Für die Bestimmung des größten Konsens im vierten Schritt gibt es wie beschrieben zwei Varianten. Der Konsens wird für N Modelle berechnet und das Modell mit dem größten Konsens wird als Lösung übernommen (4a). Gegebenenfalls kann zur Beschleunigung des Verfahrens eine bestimmte Mindestanzahl an Punkten gefordert werden, für die der Konsens erfüllt sein muss. In diesem Fall bricht der Algorithmus vorzeitig ab (4b).

Entscheidender Vorteil von RANSAC ist die Robustheit des Algorithmus, Ausreißer in den Daten werden berücksichtigt, ohne dass weitere Annahmen zu treffen sind. Die Zahl der notwendigen Wiederholungen des Algorithmus für das Auffinden des Modells mit einer definierten Wahrscheinlichkeit kann vorab abgeschätzt werden (Fischler und Bolles, 1981). Beispielsweise nutzen Wahl u. a. (2005) den RANSAC-Algorithmus, um aus terrestrischen Laserscanning Daten Ebenen zu extrahieren.

4.2.4 Gruppierung von Abtastzeilen

Dieses Verfahren wurde für die Segmentierung von Tiefenbildern in ebene Regionen von Jiang und Bunke (1992) vorgestellt und ist auch unter dem englischen Begriff *Scan Line Grouping* bekannt. Das Verfahren nutzt die

Eigenschaft aus, dass Punkte, die zu einer Ebene gehören, entlang der Abtastzeile eines Entfernungsmessers eine Gerade bilden. Daher werden in einem ersten Schritt in jeder Scanzeile Geradenstücke extrahiert. Anschließend werden benachbarte Geradenstücke, die ein definiertes Homogenitätskriterium erfüllen, über ein Bereichswachstumsverfahren miteinander verknüpft.

4.2.5 Bereichswachstumsverfahren

Bereichswachstumsverfahren sind auch unter den Begriffen Regionenexpansion oder, angelehnt an die englische Sprache, als *Region Growing* bekannt. Die Idee dieses Verfahrens ist, von einer definierten Saat- oder Kernregion aus zu starten und diese sukzessiv zu erweitern. Dabei werden einer Region nur Datenpunkte hinzugefügt, sofern diese bestimmte Homogenitätskriterien erfüllen. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist, dass gebildete Regionen von vornherein zusammenhängend sind und die Ergebnisse in der Regel eine hohe Qualität aufweisen. Allerdings ist das Verfahren rechenintensiv und die Wahl von geeigneten Saatregionen ist problematisch. Diese sollten zum einen das Homogenitätskriterium erfüllen und zum anderen aber auch möglichst mittig in einem Segment liegen. Formal läuft der Algorithmus für die Segmentierung von n Regionen in folgenden Schritten ab:

1. Wahl einer Saatregion S_0 . Existiert keine Saatregion, so ist die Segmentierung beendet. Ansonsten gilt für die Region R_i : $R_i = S_0$.
2. Erweitere R_i um noch nicht segmentierte benachbarte Datenpunkte, sofern das Homogenitätskriterium erfüllt ist.
3. Kommen im zweiten Schritt keine neuen Punkte mehr hinzu, wird eine neue Saatregion gewählt (Schritt 1).

Ein Bereichswachstumsverfahren für die Ermittlung von ebenen Regionen in terrestrischen Laserscanning Daten ist beispielsweise in der Software Cyclone von LEICA GEOSYSTEMS implementiert. Dabei muss der Nutzer jedoch die Saatregionen definieren und hierfür manuell Punkte auswählen, die zu einer Ebene gehören. Für die Segmentierung von Scandaten einzelner Standpunkte wurde ein neues, vollautomatisches Verfahren entwickelt, welches die regelmäßige Abtastung der Laserscanner für die Suche nach benachbarten Punkten ausnützt. Im folgenden Kapitel folgt zunächst die Beschreibung eines Datenmodells für TLS-Daten bevor auf den entwickelten Algorithmus für die Segmentierung eingegangen wird und Beispiele von segmentierten Laserscandaten gezeigt werden.

4.3 Darstellung der Laserscandaten als Rasterdaten

Durch die regelmäßige Ablenkung des Laserstrahls in vertikale und horizontale Richtung entsteht ein rasterförmiger Scan, der in Abhängigkeit von der gewählten Schrittweite eine bestimmte Anzahl an Messungen enthält. Das in dieser Arbeit verwendete Messinstrument LMS-Z360i der Firma Riegler hat einen Sichtbereich von $360^\circ \times 90^\circ$. Bei einer definierten Schrittweite von beispielsweise 0.12° ergeben sich 3000×750 Messwerte für einen vollständigen Scan, der in einem zweidimensionalen Rasterbild dargestellt werden kann (vgl. Abbildung 2.2). Ein entscheidender Vorteil der Rasterdatenstruktur ist, dass die Nachbarschaften der Messdaten direkt gegeben sind. Dadurch ist eine Speicherung der Daten in einem regelmäßigen Raster möglich, die Messwerte können eindeutig den einzelnen Rasterzellen zugeordnet und abgespeichert werden. Das Prinzip für die Speicherung der terrestrischen Laserscanning Daten ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Die Informationen der gemessenen Laserscandaten, wie beispielsweise die x -, y - oder z -Koordinaten, werden in verschiedenen Bildebenen abgelegt, der Zugriff auf die Daten erfolgt effizient über die Indizes des Bildes. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine solche 2D-Layer Struktur die Anwendung von rasterbasierten Bildverarbeitungsalgorithmen auf die Scandaten ermöglicht. Bisherige Algorithmen, welche für Rasterdaten bestehend aus einem Layer entwickelt wurden, können an die mehrdimensionalen Daten angepasst werden.

Die Speicherung von Entfernungsdaten und Koordinaten in einem Rasterdatenformat mit Fließkommawerten ist bei existierenden Bibliotheken für die Bildverarbeitung üblicherweise nicht möglich. Daher wurde eine entsprechende Bibliothek für das Schreiben und Lesen von Laserscanning Daten in einem Rasterdatenformat mit mehreren Layern entwickelt. Für die Speicherung der Daten wurde auf ein Standard-Bildformat zurück gegriffen, welches die Speicherung von Fließkommawerten erlaubt. Hierfür ist das *Tagged Image File Format (TIFF)* (Adobe, 1992) geeignet. TIFF erlaubt eine flexible Kombination von Daten in verschiedenen Ebenen und zusätzliche Informationen beliebiger Art können über sogenannte Tags ebenfalls in die Bilddatei mit eingefügt werden. Die Datenlayer erhalten je nach Datenart eine ID und können in beliebiger Anordnung in dem Datenmodell gespeichert werden. Die Bibliothek unterstützt durch die Berechnung von Bildpyramiden und durch eine Kachelung der Daten auch sehr große Datensätze und nutzt einen intelligenten Cache-Mechanismus für optimierte Lese- und Schreibzugriffe. Details zu der entwickelten Bibliothek werden in Brenner u. a. (2003) erläutert.

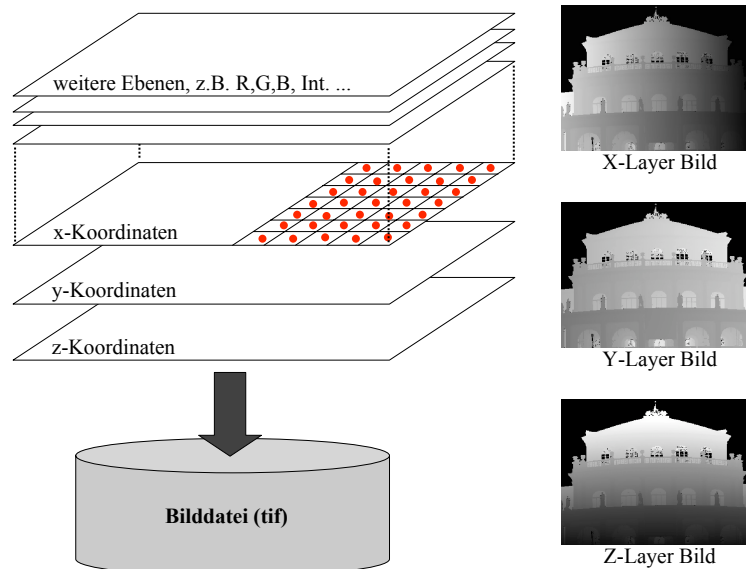


Abb. 4.3: Modell der Datenhaltung in 2D Raster-Bildern. Rechts sind Bilder einzelner Layer dargestellt. In Abhängigkeit der Koordinatenachsen des Scanner-Systems ändern sich die Grauwerte im Bild.

Bei der Abspeicherung von terrestrischen Laserscanning Daten in einer Bildmatrix muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Vertikalwinkel einer Messung in benachbarten Scanspalten zusammen passen. Die Ablenkwinkel werden für jeden Messpunkt von den Instrumenten gemessen. Die Messpunkte sind in dem Rasterdatenmodell bezüglich der gemessenen Winkel benachbart. Aufgrund der erforderlichen Bewegung der Ablenkspiegel kann es allerdings vorkommen, dass die Ablenkwinkel sich nicht konstant ändern oder der Messbereich für verschiedene Scanspalten unterschiedlich ist und somit die Messwerte in benachbarten Rasterzellen unter Umständen Sprünge aufweisen können. Die Folge sind Spaltenverschiebungen in der resultierenden Bildmatrix, die schematisch in der Abbildung 4.4 verdeutlicht sind. Die Rasterzellen enthalten hierbei mögliche Messwerte des Vertikalwinkels, die durch das Raster definierten Nachbarschaften sind bei unterschiedlichen Messwerten in den einzelnen Scanspalten fehlerhaft und müssen somit korrigiert werden.

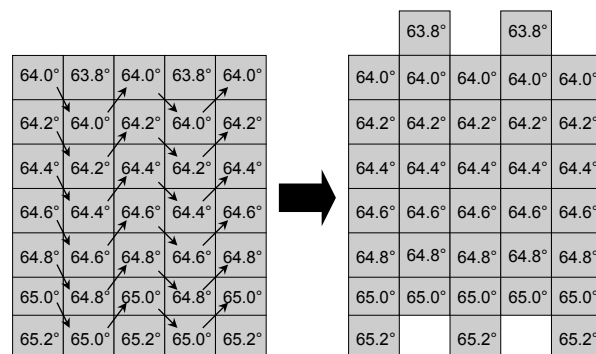


Abb. 4.4: Schematische Darstellung möglicher Vertikalverschiebungen in den Scandaten bei einer rasterförmigen Datenspeicherung. Die Abbildung zeigt mögliche Werte für gemessene Vertikalwinkel einzelner Messpunkte sowie die notwendige Korrektur des Scanrasters.

Abhängig von der Schrittweite der Messung, der Gleichmäßigkeit der Spiegelbewegung und der Synchronisation zwischen Messung und Strahlableitung tritt dieser Effekt stärker oder schwächer auf. Bei rotierenden Spiegel ist die Spiegelbewegung gleichmäßig und die Abweichungen sind üblicherweise gering, während bei oszillierenden Spiegel der Effekt stärker ausgeprägt ist, da aufgrund der sich ständig ändernden Bewegungsrichtung Beschleunigungskräfte auftreten und eine gleichmäßige Bewegung kaum realisierbar ist.

Bei Detailmessungen mit einer geringen Winkelschrittweite und bei oszillierenden Spiegeln kann ein Ausfransen bei den 2D-Darstellungen der Scans beobachtet werden. Ursache hierfür ist eine asynchrone Positionierung des

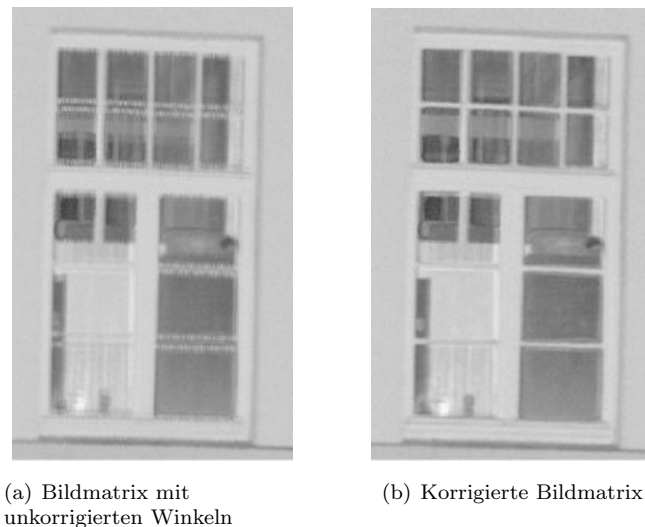


Abb. 4.5: Beispiel für die Notwendigkeit einer Korrektur der Bildmatrix. Dargestellt ist der Intensitätskanal des Laserscanners.

Spiegels zwischen den einzelnen Messspalten. Da aber die Ablenkwinkel und somit die Polarkoordinaten der Messpunkte registriert werden, hat dieser Effekt auf die berechneten 3D-Koordinaten keine negativen Auswirkungen. Um das Ausfransen der 2D-Darstellungen zu verhindern, können die Messdaten entsprechend ihrer Winkelmessungen umsortiert werden. Die Abbildung 4.5 (a) zeigt ein Beispiel für eine Messung mit verschobenen Winkelmessungen zwischen den einzelnen Scanspalten. Die Verschiebungen sind besonders deutlich an den horizontalen Sprossen des dargestellten Fensters zu sehen. Eine korrigierte Bildmatrix mit den umsortierten Vertikalwinkeln zeigt die Abbildung 4.5 (b). Bevor TLS-Daten in dem vorgestellten Datenmodell gespeichert und weiterverarbeitet werden, muss bei einer Messung mit oszillierenden Spiegel zuerst die beschriebene Korrektur erfolgen.

4.4 Segmentierung von TLS-Daten in ebene Regionen

Eine automatische Registrierung von terrestrischen Laserscanning Daten über eine datengetriebene Lösung erfordert die Extraktion von charakteristischen Merkmalen aus den Daten. Voraussetzung für den Erfolg der Verfahren ist eine zuverlässige Zuordnung solcher Merkmale sowie die Möglichkeit der Bestimmung der Transformationsvorschrift aus diesen Merkmalen. In der vorliegenden Arbeit werden insbesondere Ebenen aus den Scandaten extrahiert und für die Bestimmung der Transformationsvorschrift verwendet. Gerade in bebauten Gebieten tauchen ebene Regionen häufig auf, wie zum Beispiel an Fassaden, Gebäuden, Dachflächen, Vorsprüngen oder Türen. Aber auch Straßenoberflächen und Stadtmöbel wie Verkehrsschilder eignen sich für eine Ebenenextraktion und die anschließende Zuordnung.

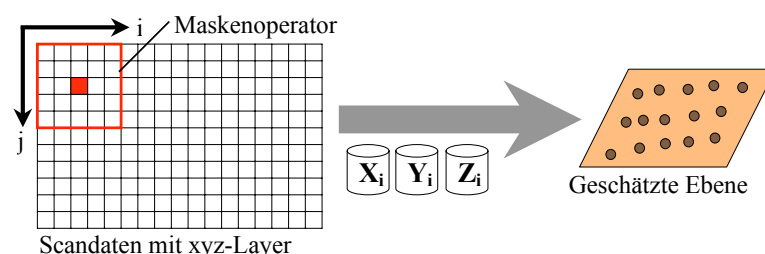


Abb. 4.6: Schematische Darstellung eines Maskenoperators angewandt auf 3D Scandaten.

Durch die gerasterte Datenhaltung können benachbarte Punkte in den Scandaten leicht bestimmt werden. Ähnlich wie in der Bildverarbeitung kann eine Maske auf die gerasterten Daten angewendet werden. Punkte innerhalb einer solchen Maske werden aus den verschiedenen Datenlayern entnommen und bilden auch im Dreidimensionalen in der Regel eine lokale Umgebung. Bestehende Algorithmen der Bild- oder Tiefenbildverarbeitung können in der Form erweitert werden, dass sie nicht mehr auf einen einzigen Datenlayer, sondern auf

mehrere zugreifen. Abbildung 4.6 zeigt schematisch, wie ein derartiger Maskenoperator auf die Laserscandaten angewendet und eine Ebene geschätzt wird.

Dabei muss allerdings beachtet werden, dass im Scanraaster die Punkte lediglich bezüglich der gemessenen Vertikal- und Horizontalwinkel benachbart sind. Häufig sind diese Nachbarschaften auch für den 3D-Raum der kartesischen Koordinaten gültig, aber die Punkte können unter Umständen auch weit entfernt voneinander liegen, falls der Messstrahl eines Laserscanners bei direkt aufeinanderfolgenden Messungen auf verschiedene Objekte trifft. Die Problematik ist in Abbildung 4.7 verdeutlicht.

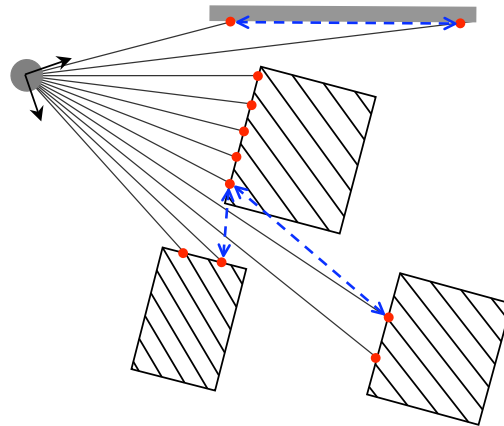


Abb. 4.7: Messpunkte, die im Raster bezüglich der Erfassungswinkel benachbart sind, können räumlich weit auseinander liegen.

Bei der Bestimmung der Nachbarschaften über das Raster kann als zusätzliches Kriterium der euklidische Abstand zwischen den vermeintlich benachbarten Punkten verwendet werden. Ist dieser Abstand zu groß, so kann die Nachbarschaft verworfen werden. Ein Schwellwert für dieses Kriterium kann direkt aus den Messwerten abgeschätzt werden. Für die Extraktion von Ebenen ist der räumliche Abstand der Punkte zweitrangig, da für die Messpunkte jeweils das Homogenitätskriterium erfüllt sein muss und überprüft wird, ob der Punkt auf einer Ebene liegt. Messpunkte von unterschiedlichen Objekten erfüllen dieses Kriterium i.d.R. nicht.

Für die Segmentierung von TLS-Daten anhand des beschriebenen Datenmodells werden zwei Ansätze vorgestellt, zum einen eine *Low-Level*-Segmentierung, die eine sehr schnelle Segmentierung eines Laserscans gemäß eines Split-Verfahrens erlaubt, und zum anderen eine *High-Level*-Segmentierung aus der zusammenhängende Ebenen verschiedener Größe hervorgehen.

4.4.1 Lokal geschätzte Ebenen

Eine sehr schnelle Methode für die Segmentierung von Scandaten ist die Bestimmung lokaler Ebenen. Bei diesem Verfahren wird sequentiell ein Maskenoperator über einen Scandatensatz bewegt und für jede Maskenposition aus den entsprechenden Messpunkten eine Ebene geschätzt. Anhand der Varianz der geschätzten Ebene wird entschieden, ob die Punkte innerhalb der Maske eine planare Region bilden. Das Ergebnis dieser Segmentierung sind zahlreiche lokale Ebenen, von denen benachbarte Ebenen ähnlich orientiert sein können. Das Verfahren ist abhängig von der gewählten Maskengröße sowie von einem Schwellwert der angibt, in welchem Fall eine Ebene akzeptiert wird. Bei den in Abbildung 4.8 gezeigten Segmentierungen wurden unterschiedliche Maskengrößen verwendet und für eine bessere Darstellung die Schrittweite größer als die Maske selbst gewählt, damit Lücken entstehen und die einzelnen Ebenen voneinander unterscheidbar sind.

4.4.2 Ermittlung zusammenhängender Regionen

Für die Extraktion von Ebenen aus den terrestrischen Laserscanning Daten wird ein Bereichswachstumsverfahren verwendet, welches an die 3D-Datenstruktur terrestrischer Laserscanner angepasst wurde. Das Verfahren für die Segmentierung der Scanpunkte in ebene Regionen läuft vollautomatisch in zwei Schritten ab. Nach der Bestimmung geeigneter Saatpunkte werden die dazu passenden Messpunkte sukzessiv ermittelt.

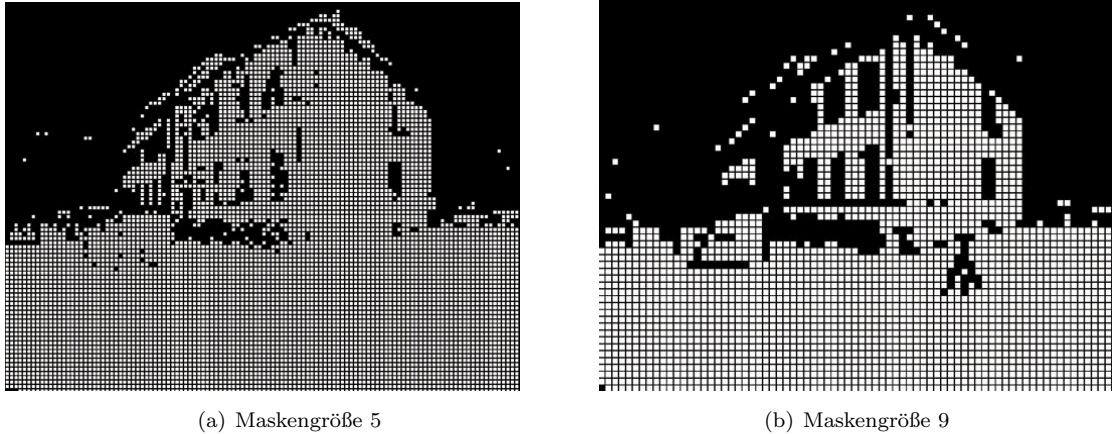


Abb. 4.8: Mit einem Maskenoperator lokal geschätzte Ebenen. Die weißen Quadrate zeigen die Stellen in dem gerasterten Scan, an denen alle 3D-Punkte innerhalb der Maske eine Ebene bilden.

Automatische Wahl der Saatpunkte

Der erste Schritt des Verfahrens ist die automatische Wahl der Saatpunkte für das Bereichswachstumsverfahren. Hierfür wird zu jedem Scanpunkt anhand der benachbarten Punkte eine lokale Ebene geschätzt und anschließend der Abstand der Punkte zu der berechneten Ebene ermittelt. Der RMS¹⁴-Wert der Abstände ist ein Maß dafür, wie gut die Punkte eine Ebene bilden und berechnet sich aus n Punkten mit den Abständen d_i der Punkte zu der geschätzten Ebene wie folgt:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n d_i^2} \quad (4.9)$$

Kleine RMS-Werte zeigen an, dass alle Punkte der lokalen Region nahezu in einer Ebene liegen. Eine solche Region bildet eine geeignete Saatregion für das Bereichswachstumsverfahren. Die RMS-Werte können in einem weiteren Layer in dem Datenmodell abgelegt werden. Bei der Berechnung der lokalen Ebenen ist über die Ebenengleichung auch der Normalenvektor für jeden Messpunkt definiert. Dieser kann ebenfalls in dem Datenmodell abgelegt werden. Die Abbildung 4.9 zeigt den Intensitätskanal eines Laserscans sowie das entsprechende Bild mit den RMS-Werten der Punktabstände zu den lokal geschätzten Ebenen. Dabei weisen helle Grauwerte auf einen hohen RMS-Wert hin.

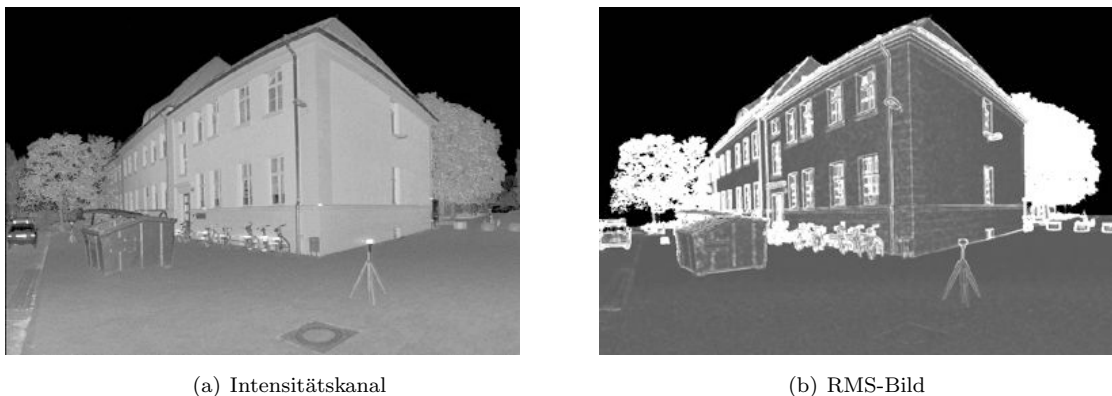


Abb. 4.9: Darstellung RMS-Werte (Maskengröße 5×5).

Es ist deutlich zu sehen, dass bei Vegetation und im Bereich von Kanten die RMS-Werte groß sind und sich diese Bereiche somit nicht als Saatregion eignen. Das Ergebnis lässt sich durch die verwendete Maskengröße beeinflussen, je größer diese gewählt wird, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit bei einem kleinen RMS-Wert

¹⁴RMS (engl.), Abkürzung für Root Mean Square

eine Saatregion zu erhalten, die zu einer großen Region gehört. Für die Ermittlung der Saatregionen wird in der Praxis nicht wie in der Abbildung gezeigt für jeden Pixel ein RMS-Wert berechnet, sondern eine Schrittweite in Maskengröße vorgegeben. Dadurch reduziert sich der Rechenaufwand für die Bestimmung der Saatregionen erheblich.

Bereichswachstum

Die ermittelten RMS-Werte aus dem ersten Schritt werden der Größe nach sortiert und das Wachstumsverfahren mit der Region gestartet, welche die kleinste Abweichung von den entsprechenden Messpunkten aufweist. Noch nicht segmentierte und benachbarte Punkte werden abgefragt und die Region erweitert, sofern das Homogenitätskriterium (Abstand zur Ebene) erfüllt ist. Dieser Vorgang wird ständig für die neu hinzugefügten Messpunkte wiederholt. Während des Wachstums wird die Ebenengleichung regelmäßig mit allen zugehörigen Punkten neu geschätzt. Dadurch stabilisiert sich die Orientierung der Ebene und eine mögliche Schiefelage, verursacht durch das Messrauschen der Punkte innerhalb der Saatregion, wird eliminiert. Enthält eine Region eine gewisse Anzahl an Messpunkten, so kann die zeitintensive Ebenenschätzung seltener wiederholt oder gänzlich ausgelassen werden.

Das Bereichswachstumsverfahren liefert zusammenhängende Regionen und ist auch in der Lage um inhomogene Regionen herum zu wachsen. Wesentlicher Parameter des Verfahrens ist ein Schwellwert für das Homogenitätskriterium, der in Abhängigkeit von dem Messrauschen des Laserscanners und der Rauigkeit der Objektoberfläche gewählt werden sollte. Im Anschluss an die Segmentierung kann das Ergebnis noch gefiltert werden, indem bestimmte Regionen entfernt werden. Als Kriterium für die Filterung kann die Anzahl der zu einer Ebene gehörenden Punkte verwendet werden, die aber aufgrund der Abtastung nicht den geometrisch kleinsten Regionen entspricht.

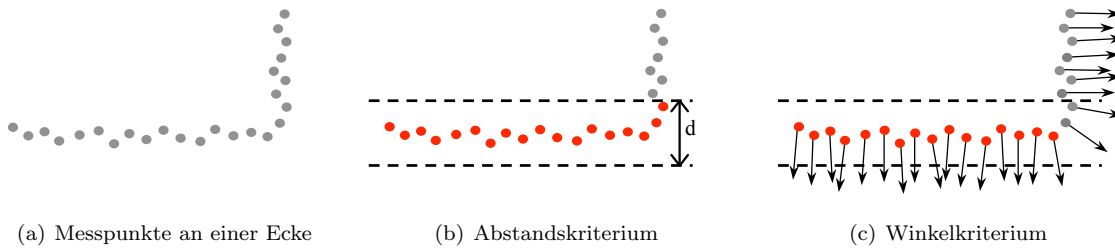


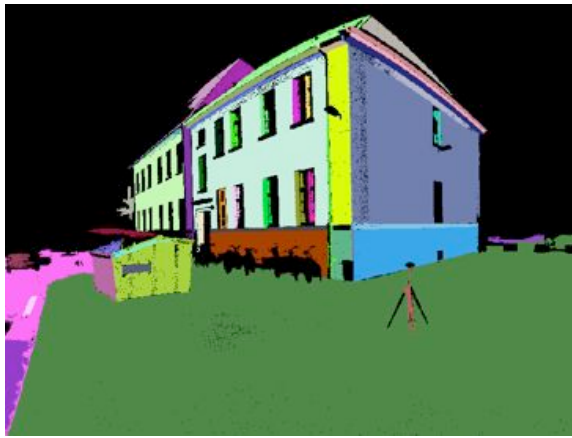
Abb. 4.10: Die schematische Darstellung zeigt die Auswirkung des zusätzlichen Winkelkriteriums bei der Segmentierung der Scandaten.

Neben dem Abstand eines Punktes zu der geschätzten Ebenen können noch weitere Homogenitätskriterien eingeführt werden. Da dieser Ansatz für die Segmentierung die Nachbarschaft anhand benachbarter Winkel ermittelt, kann als zusätzliches Kriterium ein maximal erlaubter Abstand zwischen zwei Punkten eingeführt werden. Allerdings ist hier die Wahl eines geeigneten Schwellwerts schwer wie in Abbildung 4.7 gezeigt wurde. Oftmals wird auch die Kompatibilität von Normalenvektoren als zusätzliches Kriterium verwendet. In diesem Fall muss der zum Messpunkt gehörende Normalenvektor in etwa dem Normalenvektor der Ebene entsprechen. Ein solcher Kompatibilitätstest ist sinnvoll, da Punkte mit unterschiedlichen Normalenvektoren oftmals nicht zu der gleichen Ebene gehören, aber trotzdem das Abstandskriterium erfüllen. Dies ist für viele Punkte an Kanten der Fall, wie in Abbildung 4.10 schematisch dargestellt. Das Kriterium ist erfüllt, sofern der eingeschlossene Winkel kleiner als ein Schwellwert δ ist. Rechnerisch ist der Winkel zwischen zwei Vektoren $\mathbf{n}_1$ und $\mathbf{n}_2$ über das Skalarprodukt definiert:

$$\cos(\angle(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)) = \frac{\langle \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2 \rangle}{\|\mathbf{n}_1\| \cdot \|\mathbf{n}_2\|} \quad (4.10)$$

Abbildung 4.11 zeigt eine Segmentierung ohne und mit der Verwendung des Winkelkriteriums. Für die Segmentierung wurde für die Berechnung der Normalenvektoren eine Maskengröße von 7×7 Pixel und für die Segmentierung ein Distanzschwellwert von $d = 0.04$ m sowie ein Winkelschwellwert von $\delta = 15^\circ$ verwendet. Bei einem Vergleich der Segmentierungsergebnisse ist zu erkennen, dass bei der Verwendung des Winkelkriteriums Punkte auf Kanten keiner Region zugeordnet wurden. Die Auswirkungen auf die Orientierungen der geschätzten Ebenen sind in diesem Beispiel für die Fassaden- und Dachflächen des Gebäudes gering und liegen im Bereich von 0.01° und 0.03° . Unterschiede von ca. 1° weisen dagegen die segmentierten Flächen an dem dargestellten Container (in der Szene links) auf. Bei Verwendung des Winkelkriteriums wurden einzelne Flächen entsprechend

den bestehenden Streben gebildet, während diese bei der ausschließlichen Verwendung des Abstandskriteriums in eine einzige Region mit aufgenommen wurden.



(a) Segmentierung ohne Winkelkriterium



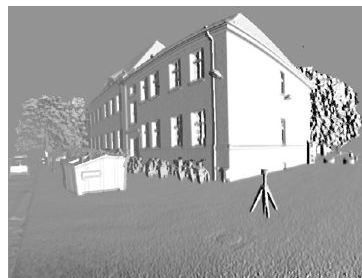
(b) Segmentierung mit Winkelkriterium

Abb. 4.11: Ergebnisse der Segmentierung in ebene Regionen ohne (a) und mit (b) Berücksichtigung der Normalenvektoren.

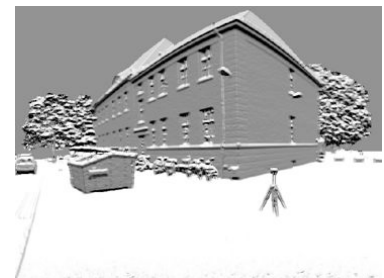
Die Hinzunahme des Winkelkriteriums kann für die Segmentierung von TLS-Daten über das durch die Erfassungswinkel definierte Raster allerdings auch problematisch sein. Die bei der Messung konstanten Winkelinkremente führen zu unterschiedlichen Erfassungsdichten am Objekt. Wird für die Bestimmung eines Normalenvektors für jeden Rasterpunkt ein Maskenoperator auf dem Winkel raster verwendet, so wird dieser zwar durch die lokale Nachbarschaft bestimmt, aber die geometrische Ausdehnung hängt von der Messentfernung ab. Dies führt dazu, dass bei geringen Messabständen auch nur geringe Abstände zwischen den Messpunkten liegen und somit die Richtung der Normalenvektoren unsicher wird. Unterliegen die Messdaten einem Rauschen, so verstärkt sich dieser Effekt. Deutlich zu erkennen ist dies am Beispiel der Abbildung 4.11 (b). Bodenpunkte in unmittelbarer Nähe des Laserscanners wurden bei der Berücksichtigung des Winkelkriteriums nicht der Bodenfläche zugeordnet. Die lokal geschätzten Ebenen weisen stark differierende Normalenvektoren auf. Die entsprechenden Richtungen der Normalenvektoren sind in Abbildung 4.12 dargestellt, die variierenden Richtungen am Boden sind am unteren Bildrand jeweils deutlich zu erkennen.



(a) x-Richtung



(b) y-Richtung



(c) z-Richtung

Abb. 4.12: Darstellung der Richtungen des Normalenvektors. Für die Berechnung der lokalen Ebene wurde die Maskengröße 7×7 gewählt.

Die Berechnung der erforderlichen Normalenvektoren ist rechenintensiv und innerhalb des Winkelrasters nicht unproblematisch. Die Bestimmung der Normalenvektoren der Messpunkte kann verbessert werden, indem die Maskengröße in Abhängigkeit der Messentfernung gewählt wird. Für nahe Entfernungen werden größere Masken verwendet als für weit entfernte Punkte. Für die angestrebte Grobregistrierung von TLS-Daten mittels identischer Ebenen ist die Verwendung des Winkelkriteriums bei der Segmentierung nicht bedeutsam, da die Unterschiede zwischen den Orientierungen der Ebenen gering sind. Im folgenden Abschnitt wird die Bestimmung von charakteristischen Merkmalen aus den segmentierten TLS-Daten beschrieben.

4.5 Extraktion von Merkmalen

Im Anschluss an eine Segmentierung können zu jeder Region noch zusätzliche Attributmerkmale bestimmt werden, die aus den Ergebnissen der Segmentierung und den TLS-Daten abgeleitet werden. Die Merkmale können die später erforderliche Zuordnung von Ebenen bei der Registrierung durch eine Einschränkung des Suchraums erleichtern, indem Korrespondenzen nur aus Ebenen mit ähnlichen Merkmalen gebildet werden. Zum einen bietet es sich an, geometrische Merkmale aus den Daten zu extrahieren, aber auch die Intensität des zurückgeworfenen Laserlichts oder aufgenommene Farbwerte können für das Auffinden von zusammengehörenden Ebenen nützlich sein. Da terrestrische Laserscanner direkt 3D-Koordinaten messen, können die geometrischen Merkmale im 3D-Raum ermittelt werden. Die Merkmale sind somit nicht perspektivisch verzerrt wie es bei Bilddaten der Fall ist, die von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen wurden. Die Abbildung 4.13 zeigt ein Beispiel für die geometrische Extraktion von Merkmalen von zwei verschiedenen Scanpositionen aus. In der zweidimensionalen Darstellung des Scanrasters sind die korrespondierenden Segmente perspektivisch verzerrt, aber durch die vorhandene 3D-Information der Messpunkte kann über eine Transformation eine geometrisch korrekte Darstellung erzeugt werden.

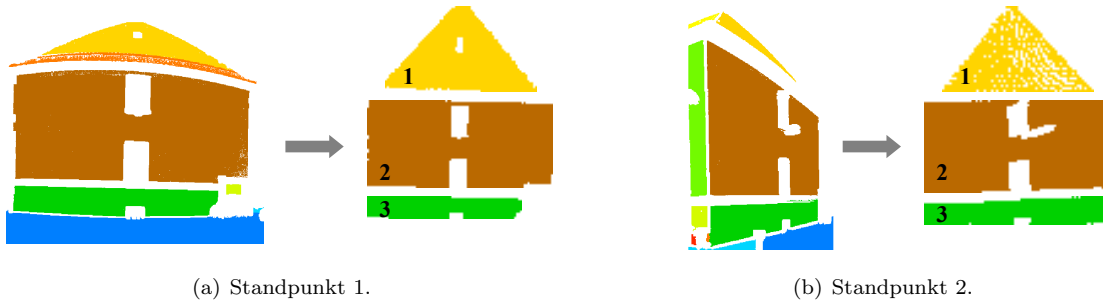


Abb. 4.13: Ergebnis einer Segmentierung und auf die jeweiligen Ebenen projizierten Flächen.

Für die Extraktion geometrischer Merkmale werden das Ergebnis der Segmentierung sowie die Messdaten des Scanners verwendet. Anhand des Label-Bilds einer Segmentierung ist bekannt, welche Messpunkte zu einer Region gehören. Diese werden auf die geschätzte Ebene projiziert und mittels der entsprechenden Ebenengleichung mit einer Basistransformation in ein Koordinatensystem transformiert, so dass eine Koordinatenachse mit dem Normalenvektor der Ebene zusammen fällt. Hierfür wird aus dem Normalenvektor ein lokales Koordinatensystem erzeugt, bei dem zwei Vektoren in der extrahierten Ebene liegen. Das gesuchte Dreibein $(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3)$ berechnet sich beispielsweise zu:

$$\mathbf{b}_1 = \|(n_x, n_y, n_z)^T\|; \mathbf{b}_2 = \left\| \left(1, -\frac{n_x}{n_y}, 0 \right)^T \right\|; \mathbf{b}_3 = \|\mathbf{b}_1 \times \mathbf{b}_2\| \quad (4.11)$$

Ist die y-Komponente des Normalenvektors $n_y = 0$, so muss der Vektor $\mathbf{b}_2$ des Dreibeins anders definiert werden (z. B. $\mathbf{b}_2 = \left\| \left(-\frac{n_y}{n_x}, 1, 0 \right)^T \right\|$). Mit dem Ursprungspunkt $\mathbf{o}$ des Dreibeins lassen sich Punkte des ursprünglichen Koordinatensystems $\mathbf{x}$ in das lokale System der Ebene $\mathbf{x}'$ bzw. umgekehrt wie folgt überführen (siehe z. B. Endl (1985)):

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{B}^T \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{o}) \\ \mathbf{x} &= \mathbf{B} \cdot \mathbf{x}' + \mathbf{o} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Die Matrix $\mathbf{B}$ ergibt sich aus den Vektoren des Dreibeins zu:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{1_x} & b_{2_x} & b_{3_x} \\ b_{1_y} & b_{2_y} & b_{3_y} \\ b_{1_z} & b_{2_z} & b_{3_z} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Nach einer Basistransformation der auf der Ebene liegenden Punkte anhand der Gleichung 4.12 wird eine Koordinate zu Null und es ergeben sich 2D-Koordinaten aus denen Formparameter für die Regionen berechnet werden. Es bietet sich an, aus den Punkten eine konvexe Hülle zu berechnen. Eine konvexe Hülle eines geometrischen Objekts ist das kleinste konvexe Polygon, welches die Punktmenge einschließt. Es existieren verschiedene Algorithmen für die Berechnung einer konvexen Hülle, der bekannteste ist wohl der Graham-Scan-Algorithmus (Graham, 1972). In dieser Arbeit wird die Hülle mit Hilfe von monotonen Ketten berechnet, der Algorithmus wurde von Andrew (1979) vorgestellt. Beide Algorithmen haben eine Laufzeit von $O(n \log n)$. Für die Berech-

nung der konvexen Hülle wird die Punktmenge in eine obere und untere Menge aufgeteilt. Der Algorithmus berechnet die zur jeweiligen Menge gehörende obere und untere Hülle einer monotonen Kette von Punkten. Nach einer Sortierung der Punkte nach ihren x- und y-Koordinaten benötigt der Algorithmus nur noch die Zeit $O(n)$, um die Hülle zu berechnen, aus der schließlich verschiedene Formparameter abgeleitet werden.

Umfang der konvexen Hülle

Ein Schätzwert für den Umfang der Fläche wird aus der Summe der Kantenlängen des Polyeders der konvexen Hülle anhand der Formel 4.14 berechnet. Dabei bezeichnen die Koordinaten (x_i, y_i) die Punkte der Hülle.

$$U = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \quad (4.14)$$

Umschließendes Rechteck

Ebenfalls aus der konvexen Hülle wird ein umschließendes Rechteck berechnet, indem zuerst die längste Kante der Hülle gesucht wird. Diese Kante bestimmt die Orientierung des Rechtecks, die Größe ergibt sich aus einer Transformation der Knoten bezogen auf die längste Kante und der anschließenden Bestimmung von Minimal- und Maximalwerten. Ein charakteristisches Merkmal ist das Verhältnis der Rechteckseitenlängen. Allerdings kann diese Methode zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, falls die Lage der längsten Kante in korrespondierenden Flächenelementen an unterschiedlichen Stellen des Objekts liegt. Ein besseres Ergebnis wird erzielt, wenn jeweils das umschließende Rechteck mit dem kleinsten Flächeninhalt gesucht wird. Hierzu wird für jede Kante der konvexen Hülle das umschließende Rechteck berechnet und das mit dem kleinsten Flächeninhalt liefert die gesuchten Seitenlängen.

Flächenberechnung

Bei gegebenen Punktkoordinaten (x_i, y_i) der konvexen Hülle berechnet sich die Fläche des Polygons nach der Gaußschen Flächenformel zu (Gruber, 1998):

$$F = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n ((x_i + x_{i+1}) \cdot (y_i - y_{i+1})) \quad (4.15)$$

Bei dieser Art der Flächenberechnung wird allerdings nicht berücksichtigt, dass z. B. die Fläche einer segmentierten Fassade aufgrund von Fensterflächen Löcher enthalten kann. Dadurch ergibt sich ein Flächeninhalt, der von der segmentierten Fläche abweicht. Bei nicht konvexen Flächenelementen ergibt sich bei der Verwendung der konvexen Hülle als Basis der Flächenberechnung ebenfalls ein fehlerhafter Flächeninhalt. Theoretisch entsteht aber bei korrespondierenden Segmentierungen von verschiedenen Standpunkten aus jeweils ein identischer Fehler.

Eine andere Art der Flächenberechnung erfolgt über die Ermittlung von Flächenelementen für jeden einzelnen Scanpunkt P_S . Die Gesamtfläche ergibt sich aus der Summe der Fläche der Elemente. Die Flächenelemente werden in Abhängigkeit von dem Abtastraster des Scanners in vertikaler und horizontaler Richtung sowie von den Ebenenparametern berechnet. Dies geschieht, indem ausgehend von dem jeweiligen Scanpunkt die vier Eckpunkte P_i des Flächenelements berechnet werden. Diese sind durch die Schrittweite und der zugehörigen Ebenengleichung definiert. Für die Berechnung der Eckpunkte werden die Richtungsvektoren, welche ein Flächenelement eines Scanpunkts definieren, mit der Ebene verschnitten. Die vier Richtungsvektoren berechnen sich aus den möglichen Kombinationen der um die Schrittweite inkrementierten bzw. dekrementierten Polarkoordinaten zu:

$$\begin{aligned} P_{x_i} &= \sin\left(\vartheta \pm \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) \cdot \cos\left(\varphi \pm \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ P_{y_i} &= \sin\left(\vartheta \pm \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) \cdot \sin\left(\varphi \pm \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ P_{z_i} &= \cos\left(\vartheta \pm \frac{\Delta\vartheta}{2}\right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Die gesuchten Eckpunkte P_i des Flächenelements ergeben sich schließlich aus den Schnittpunkten zwischen den Richtungsvektoren und der Ebenengleichung. Schematisch ist das Verfahren in Abbildung 4.14 dargestellt. Für die Berechnung des Flächeninhalts aus dem gegebenen Viereck müssen die berechneten 3D-Eckpunkte wieder mittels einer Basistransformation in ein ebenes Koordinatensystem transformiert werden bevor wiederum die Gaußsche Flächenformel (Gleichung 4.15) angewandt werden kann.

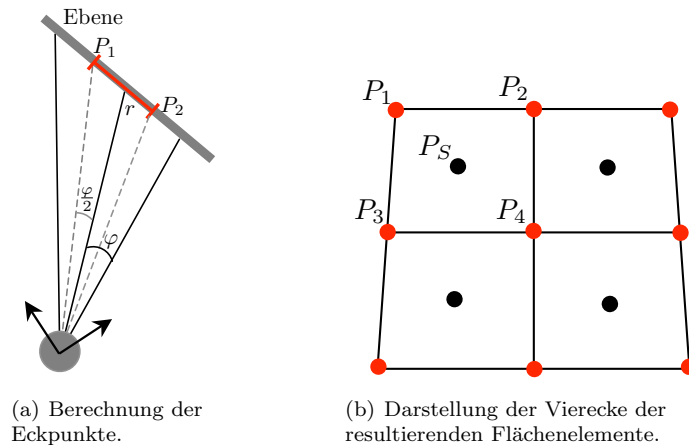


Abb. 4.14: Berechnung des Flächeninhalts einer Region aus einzelnen Flächenelementen anhand der Winkelinkremente eines Scans und der Ebenengleichung.

Mittlerer Intensitätswert

Auch der Intensitätskanal eines terrestrischen Laserscanners kann ein Merkmal für eine extrahierte Region liefern. Die Menge an zurück geworfenem Licht hängt von der Oberfläche des Objekts ab. Unter der Annahme, dass die Oberfläche einer Region über die gesamte Fläche hinweg die gleichen Reflexionseigenschaften aufweist, kann der mittlere Intensitätswert ebenfalls ein charakteristisches Merkmal sein.

Farbwerte

Sofern mit den Scandaten auch Bilddaten erfasst wurden und jedem Scanpunkt ein entsprechender Farbwert zugeordnet ist, so kann auch der Farbwert als Merkmal einer Ebene verwendet werden.

Scan von Standpunkt 1						
	Umfang	BB (L/B)	MBB (L/B)	Fläche (H)	Fläche (E)	Intensität
Ebene 1	28,0	8,5 / 8,5	11,3 / 6,2	39,3	20,7	0,21
Ebene 2	38,8	13,6 / 6,2	13,6 / 6,2	83,6	70,2	0,36
Ebene 3	25,0	11,4 / 1,5	11,4 / 1,5	16,1	15,2	0,34
Boden	43,0	17,2 / 7,9	17,2 / 7,9	99,4	73,7	0,20
Scan von Standpunkt 2						
	Umfang	BB (L/B)	MBB (L/B)	Fläche (H)	Fläche (E)	Intensität
Ebene 1	22,8	9,0 / 5,2	9,0 / 5,2	25,4	18,6	0,22
Ebene 2	37,3	12,9 / 6,2	12,9 / 6,2	78,6	66,1	0,32
Ebene 3	27,9	12,3 / 1,6	12,3 / 1,6	18,7	16,7	0,30
Boden	42,2	20,0 / 4,1	20,0 / 3,1	37,4	30,0	0,19
Abweichungen zwischen Standpunkt 1 und 2						
	Umfang	BB	MBB	Fläche (H)	Fläche (E)	Intensität
Ebene 1	5,15%	13,10%	1,63%	10,71%	3,70%	1,08%
Ebene 2	0,95%	1,32%	1,33%	1,53%	1,50%	3,29%
Ebene 3	2,17%	0,15%	0,29%	3,80%	2,42%	3,74%
Boden	0,36%	19,13%	24,57%	22,65%	21,26%	1,67%

Tabelle 4.1: Kenngrößen extrahierter Merkmale für die drei Ebenen aus Abbildung 4.13 und der Bodenfläche sowie die prozentuale Abweichung der Merkmale voneinander zwischen den Standpunkten. Erläuterung der Spalten: Umfang: Umfang der konvexen Hülle. BB (L/B): Verhältnis zwischen Länge und Breite der Bounding Box orientiert an der längsten Kante der konvexen Hülle. MBB (L/B): Verhältnis zwischen Länge und Breite der Minimum Bounding Box (basierend auf dem kleinsten Flächeninhalt). Fläche (H): Flächeninhalt der konvexen Hülle. Fläche (E): Flächeninhalt als Summe einzelner Flächenelemente. Intensität: Mittlerer Intensitätswert der Region.

Die Tabelle 4.1 enthält exemplarisch die Kenngrößen der extrahierten Merkmale für die in Abbildung 4.13 gezeigten Segmente. Auf der Basis der konvexen Hülle wurde der Umfang, die zwei Varianten der umschließenden

Rechtecke (BB und MBB¹⁵) sowie die Fläche der Hülle berechnet. Ferner enthält die Tabelle die Kenngrößen für die berechnete Fläche als Summe der Fläche der Scanelemente und den mittleren Intensitätswert aller Scanpunkte. Die prozentuale Abweichung der Kenngrößen zwischen den Standpunkten wurde berechnet, indem die Differenz der Werte ins Verhältnis zum Mittelwert der berechneten Kenngrößen gesetzt wurde. Für die umschließenden Rechtecke wurde hierfür das Verhältnis zwischen Breite und Höhe verwendet. Die Merkmale der zu dem Gebäude gehörenden Ebenen 1-3 sind in diesem Fall charakteristisch und eine Zuordnung der Ebenen über ähnliche Werte ist möglich. Allerdings können die Kenngrößen bei lokalen Verdeckungen oder unterschiedlichen Segmentierungsergebnissen erhebliche Abweichungen bei korrespondierenden Ebenen aufweisen. Problematisch ist in jedem Fall die Zuordnung der Bodenfläche über die Merkmale. Diese hat üblicherweise von verschiedenen Standpunkten aus eine unterschiedliche geometrische Ausprägung und kann somit über die Merkmale nicht zuverlässig zugeordnet werden. Weitere Ausführungen zur Merkmalsextraktion finden sich in dem Kapitel 6.2 zur formbasierten Zuordnung von Ebenen.

¹⁵BB und MBB (engl.), Abkürzung für Bounding Box und Minimum Bounding Box

5 Registrierung über ein ikonisches Zuordnungsverfahren

In diesem Kapitel wird ein Ansatz für die Registrierung von TLS-Daten beschrieben, der das sogenannte *Extended Gaussian Image (EGI)* für die Bestimmung der Rotationskomponente nutzt und in Dold (2005) vorgestellt wurde. Die Methode kann gemäß der Einteilung der Verfahren zur Grobregistrierung zu den *globalen Methoden* (siehe Kapitel 3.3.2) gezählt werden, da die Eigenschaften eines gesamten Scans in das Verfahren eingehen. Die Idee des Verfahrens ist, die Scandaten in ebene Regionen zu segmentieren und anschließend die Normalenvektoren der Ebenen in einem EGI aufzutragen. Das EGI bildet die Richtungen der Normalenvektoren sowie weitere Attribute auf einer angenäherten Kugel ab und über einen Vergleich der EGIs von verschiedenen Scanpositionen kann schließlich die Rotationskomponente bestimmt werden. Bevor das Verfahren detailliert beschrieben wird, gibt der nächste Abschnitt eine kurze Einführung in *Extended Gaussian Images*.

5.1 Extended Gaussian Images

Ein EGI ist ein Konstrukt, mit dem die Form einer konvexen Oberfläche eindeutig dargestellt werden kann. Für die Berechnung eines EGIs werden die Normalenvektoren einer Oberfläche benötigt, die aus lokalen Krümmungen der Oberfläche oder auch aus einer Segmentierung abgeleitet werden können. Das EGI wurde von Horn (1984) eingeführt und basiert auf einer Einheitskugel, auf deren Oberfläche Vektoren projiziert werden. Hierfür werden die Vektoren in den Ursprung der Kugel verschoben und mit der gegebenen Richtung der Vektoren lässt sich ein Durchstoßpunkt auf der Kugeloberfläche berechnen. Dadurch ergeben sich an den entsprechenden Stellen Markierungen auf der Kugel, das Ergebnis wird als *Gauß-Kugel* und die entsprechende Abbildung als *Gauß-Bild* (engl. *Gaussian Image, GI*) bezeichnet.

Für die Registrierung von 3D-Datensätzen wird eine Darstellung benötigt, aus der die Transformationsparameter abgeleitet werden können. In diesem Zusammenhang ist eine wichtige Eigenschaft der EGIs, dass ein rotiertes Objekt zu einem EGI führt, welches ebenfalls die entsprechende Rotation aufweist. Wird also die Rotation zwischen zwei EGIs bestimmt, so ist auch die Rotation zwischen den Objekten bekannt. Allerdings hat eine mögliche Translation zwischen zwei Objekten keinen Einfluss auf das resultierende EGI, die Information über eine Translation geht beim Übergang auf das EGI somit verloren. Eine weitere Eigenschaft der EGIs ist, dass sie für konvexe Objekte eindeutig sind, während nicht-konvexe Objekte zu einem identischen EGI führen können. Dies wird anhand der Abbildung 5.1 deutlich. Werden die Normalenvektoren der in 5.1 (a) und (b) dargestellten Flächen der Objekte in ein EGI übertragen, so ergibt sich für beide Objekte ein identisches EGI, das in 5.1 (c) gezeigt ist.

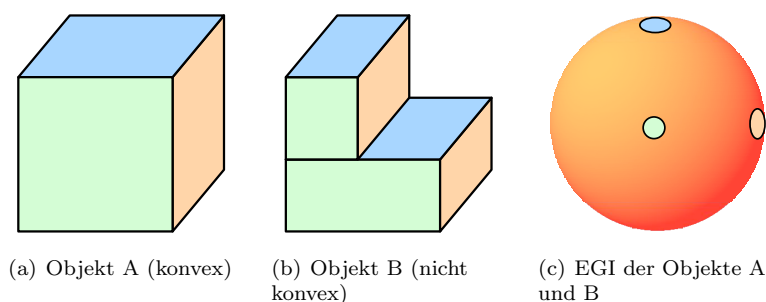


Abb. 5.1: Beispiel für ein EGI zweier Objekte. Die in (a) und (b) gezeigten Objekte führen zu einem identischen EGI (c), da diese nur für nicht-konvexe Objekte eindeutig sind.

Zusätzlich kann bei einem EGI jedem projizierten Vektor ein zusätzliches Attribut oder eine Gewichtung zugewiesen werden. Bei dem Beispiel aus der Abbildung 5.1 kann dies der Flächeninhalt der Quaderseiten sein. Wird diese weitere Information ebenfalls auf dem EGI eingetragen (im gezeigten Beispiel ist dies durch die Größe der projizierten Durchstoßpunkte der Normalenvektoren angedeutet), so kann erkannt werden, dass es sich nicht um zwei gleiche Objekte handelt.

Anstelle einer Kugel wird für die Erzeugung der Abbildung eine Approximation verwendet. Zu diesem Zweck wird die Oberfläche einer Kugel in einzelne Flächenstücke unterteilt (Tesselation). Dazu wird in eine Einheitskugel ein Polytop z. B. ein Ikosaeder, eingepasst, so dass jeder Knoten des Körpers auf der Kugeloberfläche zu liegen kommt. Die einzelnen Flächen des Körpers können weiter unterteilt werden unter der Maßgabe, dass wiederum jeder Knoten auf der Kugeloberfläche zu liegen kommt. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass alle Flächen jeweils die gleiche Form und die gleiche Größe haben. Die Abbildung 5.2 zeigt eine Tesselation der

Kugel in verschiedenen Stufen, beim Übergang zur nächsten Stufe wurden aus jeder Fläche vier Neue gebildet, indem jeweils der Mittelpunkt der drei Kanten einer Fläche als neuer Knoten eingeführt wurde. Je öfter die Flächen unterteilt werden, umso besser ist die Annäherung an eine Kugel. Werden im Zuge der Erstellung eines EGIS Vektoren auf solch eine tesselierte Kugel übertragen, können diese jeweils einem bestimmten Flächenelement zugeordnet werden.

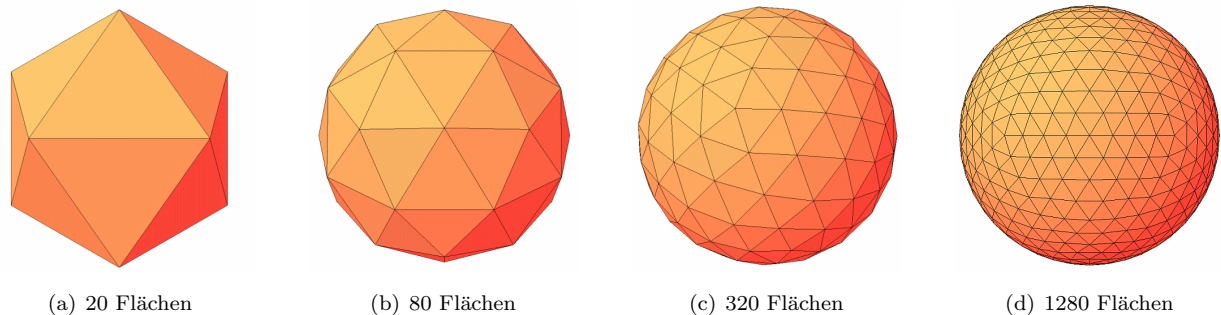


Abb. 5.2: Tessellation einer Kugel in verschiedenen Stufen.

Brou (1984) beschreibt die Verwendung von EGIS für die Bestimmung der Orientierung zwischen Tiefenbildern. Die Erzeugung eines Polytops, die Abbildung der Normalenvektoren von Oberflächen auf eine Gauß-Kugel und ein Verfahren für die Bestimmung der Rotation zwischen zwei Kugeln über ein Korrelationsverfahren werden beschrieben. Anhand einer Monte-Carlo Simulation wurde das Genauigkeitspotenzial der Methode für eine Tessellation der Kugeln in verschiedenen Stufen analysiert. Erweiterungen der Methode für nicht-konvexe Objekte wurden ebenfalls diskutiert.

Makadia u. a. (2006) nutzen EGIS ebenfalls für eine Grobregistrierung von 3D-Punktdaten anhand von Oberflächennormalen. Bei ihrem Ansatz wird allerdings die Gauß-Kugel nach sphärischen Koordinaten unterteilt, was Flächenelemente unterschiedlicher Größe zur Folge hat. Der Vorteil dabei ist, dass dadurch das Gauß-Bild einem rechteckigen Raster entspricht und sich die Korrelation aufgrund dieser Regelmäßigkeit sehr schnell berechnen lässt. Für die Bestimmung der Rotationskomponente wird ein diskreter Suchraum über alle möglichen Rotationswinkel durchlaufen und die Korrelation als eine punktweise Multiplikation im Fourier-Spektrum ausgedrückt. Dadurch wird mittels einer schnellen Fourier-Transformation die Komplexität für die Berechnung eines kompletten Korrelationsraster stark reduziert.

5.2 Methode der Registrierung

Bei der Registrierung von TLS-Daten über EGIS wird bei dem hier vorgestellten Verfahren die Eigenschaft genutzt, dass die Verteilung von Oberflächennormalen in einer erfassten Szene von verschiedenen Standpunkten aus ähnlich ist, sofern die Scans eine hinreichend große Überlappung aufweisen. Mit den EGIS ist eine Repräsentation gegeben, die eine Rotation auf einer tesselierten Kugel abbildet und die Ermittlung der Rotationswinkel zwischen zwei EGIS ermöglicht. Zunächst werden aus den TLS-Daten Oberflächennormalen durch eine lokale Ebenenschätzung oder durch eine Segmentierung mit einem Bereichswachstumsverfahren berechnet.

Werden die Normalenvektoren der Regionen verwendet, so kann auch die berechnete Fläche der Regionen für die folgende Zuordnung genutzt werden. Die Normalenvektoren und gegebenenfalls zusätzliche Attribute von jedem Datensatz werden auf ein EGI aufgetragen. Die gesuchte Rotation wird durch eine Korrelationsfunktion zwischen den EGIS ermittelt. Lokale Extremwertstellen der Korrelationsfunktion werden über ein Suchverfahren für alle möglichen Rotationswinkel ermittelt und deuten auf eine Übereinstimmung der EGIS hin. Durch eine grob-zu-fein Strategie können die Extremwerte schnell ermittelt werden und die Auflösung der ermittelten Rotationswinkel sukzessiv verbessert werden. Die einzelnen Schritte des Verfahrens werden in den folgenden Abschnitten ausführlich erläutert.

5.2.1 Ableitung der EGI aus segmentierten Scandaten

Bei der Verwendung von EGIS für die Registrierung von Scandaten wird für jede Scanposition ein EGI berechnet. Dabei werden die aus einer Segmentierung bekannten Normalenvektoren auf eine tesselierte Kugel aufgetragen, indem jeder Normalenvektor exakt dem Flächenstück auf der Kugel zugeordnet wird, in das der

Vektor zeigt. Es ergibt sich ein EGI, welches die Verteilung der Normalenvektoren der einzelnen Scanpositionen wiedergibt. Die Abbildung 5.3 zeigt ein einzelnes Flächenelement einer tesselierten Kugel sowie einen Vektor $\mathbf{x}'$, der auf ein Oberflächenelement projiziert wurde.

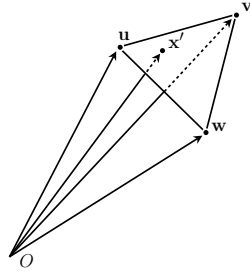


Abb. 5.3: Flächenelement einer tesselierten Kugel.

Bei der Übertragung der Normalenvektoren auf eine tesselierte Kugel muss geprüft werden, ob ein Vektor mit der Richtung $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$ in ein durch die Vektoren $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)^T$, $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)^T$ und $\mathbf{w} = (w_x, w_y, w_z)^T$ aufgespanntes Flächenelement weist. Dies erfolgt durch die Linearkombination:

$$\mathbf{x} = \lambda_1 \cdot \mathbf{u} + \lambda_2 \cdot \mathbf{v} + \lambda_3 \cdot \mathbf{w} \quad (5.1)$$

Die unbekannten Werte λ_i können anhand der bekannten Knoten $\mathbf{u}$, $\mathbf{v}$ und $\mathbf{w}$ einer Tessellationsfläche durch eine Auflösung des Gleichungssystems in Matrizenform wie folgt ermittelt werden:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_x & \mathbf{v}_x & \mathbf{w}_x \\ \mathbf{u}_y & \mathbf{v}_y & \mathbf{w}_y \\ \mathbf{u}_z & \mathbf{v}_z & \mathbf{w}_z \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Ergeben sich für die Werte λ_1 , λ_2 und λ_3 Werte größer gleich Null, so liegt der Vektor $\mathbf{x}$ innerhalb bzw. auf dem Rand des aufgespannten Tetraeders. Auf diese Weise können berechnete Normalenvektoren in ein EGI einsortiert und die Anzahl der Vektoren gespeichert werden, die innerhalb des jeweiligen Flächenelements liegen. Als zusätzliches Attribut wird die Fläche der jeweils geschätzten Ebene abgespeichert. Das Ergebnis ist ein für den Datensatz charakteristisches EGI. Abbildung 5.4 (a) zeigt das zu einer Scanposition zugehörige EGI in der niedrigsten Auflösungsstufe. Die Zahl bzw. die Farbe eines Flächenelements gibt Auskunft darüber, wie viele Normalenvektoren in ein Flächenelement fallen. Eingefärbte Kugeln für weiter verfeinerte Stufen sind in den Abbildungen (b)-(d) gezeigt. Die Farbskala von blau nach rot entspricht dabei der Zahl der projizierten Vektoren pro Flächenelement.

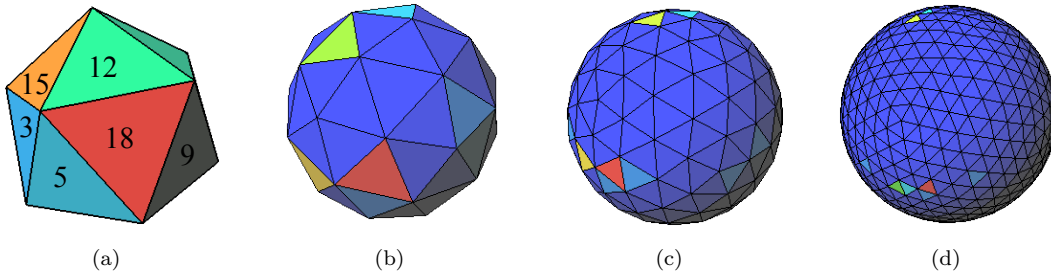


Abb. 5.4: Projizierte Normalenvektoren werden durch Gauß-Kugeln repräsentiert. Die Zahlen in (a) deuten exemplarisch die Anzahl der Vektoren pro Flächenelement an. In (b)-(c) ist die Anzahl in einer Farbskala von blau nach rot codiert.

Bei einer paarweisen Registrierung von Standpunkten müssen die Gauß-Kugeln für den Referenzstandpunkt einmalig für jede Stufe berechnet werden. Für die Bestimmung der Rotationskomponente zwischen zwei Standpunkten wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Suchverfahren über alle möglichen Rotationen verwendet. Dies bedeutet, dass für den zu registrierenden Standpunkt für jedes Tripel an möglichen Rotationswinkel $(\omega, \varphi, \kappa)$ eine Gauß-Kugel aus den entsprechend transformierten Normalenvektoren berechnet werden muss. Dadurch vereinfacht sich der anschließende Vergleich zwischen den Gauß-Kugeln. Aufgrund von Einschränkungen bei

der Aufstellung des Laserscanners ist der Winkelbereich für die Rotationswinkel ω und φ von -90° bis zu $+90^\circ$ eingeschränkt (vgl. Abbildung 5.5).

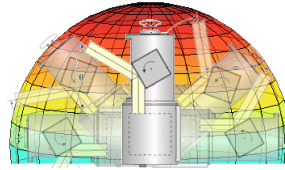


Abb. 5.5: Durch Beschränkungen bei der Aufstellung der Messinstrumente ist der zu durchsuchende Winkelbereich in der Regel auf eine Halbkugel begrenzt.

5.2.2 Korrelation zwischen EGIs

Nach der Berechnung der charakteristischen Gauß-Kugeln für verschiedene Standpunkte werden die am Besten zueinander passenden Kugeln gesucht, ein Maß für die Übereinstimmung ist die Korrelation. Diese wird aus der Anzahl der Normalenvektoren ermittelt, die innerhalb eines Flächenelements liegen. Sei $\mathbf{n}$ ein Vektor, dessen Elemente die Anzahl der auf die jeweiligen Flächenelemente abgebildeten Normalenvektoren enthalten, so berechnet sich der Korrelationswert nach Gleichung 5.3. Der Index S_1 bzw. S_2 bezeichnet den entsprechenden Standpunkt, das hochgestellte l steht für Stufe der tesselierten Kugel. Der berechnete Korrelationswert liegt zwischen 0 und 1, wobei der Wert 0 keine Übereinstimmung anzeigt und der Wert 1 nur bei exakt übereinstimmenden EGIs auftritt.

$$C_l = \frac{\langle \mathbf{n}_{S_1^l}, \mathbf{n}_{S_2^l} \rangle}{\|\mathbf{n}_{S_1^l}\| \cdot \|\mathbf{n}_{S_2^l}\|} \quad (5.3)$$

Die Abbildung 5.6 zeigt den berechneten Korrelationswert für den Rotationswinkel κ , der einer Drehung des Laserscanners um die Stehachse entspricht. Die anderen beiden Winkel ω und φ wurden in diesem Fall mit dem Referenzwert festgehalten. Der Winkel κ wurde mit einer Schrittweite von 1° verändert und jeweils das entsprechende EGI und die Korrelation zu der Referenz berechnet. Die hier verwendeten Scandaten weisen eine große Überlappung auf, Maximalwerte sind in jeder Tessellationsstufe deutlich zu erkennen. Außerdem zeigt die Abbildung die erreichbare Auflösung für die Ermittlung der Rotationswinkel in den einzelnen Stufen. In Stufe 1 ist ein breites Maximum zu erkennen, das mit zunehmender Verfeinerungsstufe schmaler wird und der jeweiligen Zahl der Flächenelemente der Gauß-Kugeln entspricht.

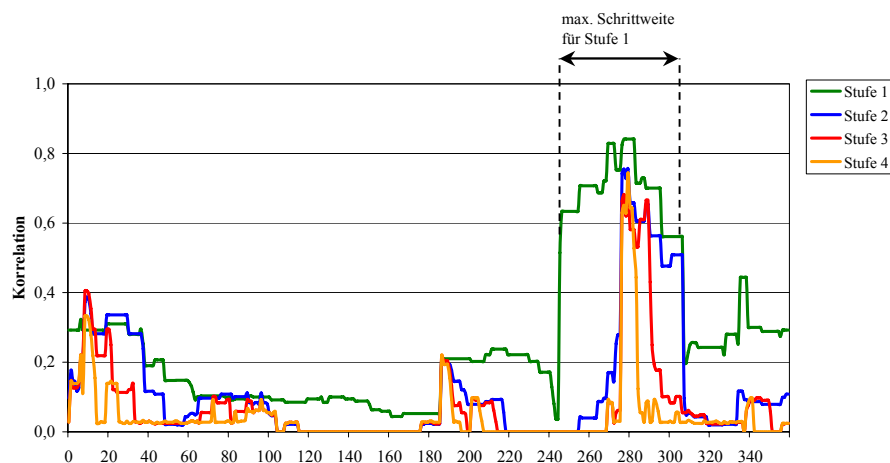


Abb. 5.6: Korrelation für verschiedene Stufen zwischen zwei EGIs in Abhängigkeit eines Rotationwinkels.

Aus der Breite der lokalen Maximalwerte kann auch die maximale Schrittweite der Winkel für das Suchverfahren aus dem Diagramm abgelesen werden. In Stufe 1 kann eine Schrittweite von 30° gewählt werden, was trotz der vollständigen Suche in dem gültigen Winkelbereich zu lediglich $6 \times 6 \times 12 = 432$ Schritten führt.

Liegen neben den Normalenvektoren zusätzliche Attribute vor, so kann die Zuordnung der Gauß-Kugeln dadurch weiter gestützt werden, indem das Maß der Übereinstimmung aus einer Kombination der einzelnen Attribute berechnet wird. In Dold (2005) wurde der Flächeninhalt der Regionen für eine Stützung des Zuordnungsverfahren verwendet. Die Übereinstimmung berechnet sich somit aus dem Mittelwert der Korrelation aus der Anzahl der Vektoren pro Flächenelement und der Summe des Flächeninhalts.

5.2.3 Grob-zu-Fein Strategie des Zuordnungsverfahren

Die erreichbare Genauigkeit für die Bestimmung der Rotationskomponente hängt direkt mit der Auflösung der Gauß-Kugeln zusammen. Je feiner die Stufe der tesselierten Kugeln ist, desto exakter können die Rotationswinkel durch eine Korrelation der Kugeln bestimmt werden. Bei einer groben Auflösung werden Informationen über kleinere Richtungsunterschiede der Normalenvektoren verworfen und eine Zuordnung der Gauß-Kugeln ist dadurch nur ungenau möglich, da zahlreiche Vektoren mit unterschiedlicher Richtung (z. B. in Stufe 1 bis zu 72° bei einem Ikosaeder¹⁶ innerhalb eines Flächenelements liegen können. Mit zunehmender Verfeinerung des Grundkörpers verbessert sich diese Winkelauflösung, allerdings sollte die Verfeinerungsstufe der Gauß-Kugeln nicht die Auflösung der Eingangsdaten übersteigen.

Wie am Ende des vorigen Abschnitts erläutert, setzt sich der Suchraum aus einem diskreten Raum aller möglichen Rotationen zusammen. Die Größe hängt dabei wesentlich von der gewählten Winkelschrittweite ab. Um das Ablaufen des kompletten Suchraums für verfeinerte Stufen zu vermeiden, wird eine grob-zu-fein Strategie angewandt. Dabei wird nach und nach die Stufe l der Verfeinerung erhöht. Eine Suche über den gesamten Winkelbereich erfolgt lediglich in der ersten Stufe. In den folgenden Stufen wird nur noch im Bereich lokal detektierter Maximalwerte gesucht. Hierzu werden die berechneten Korrelationswerte ihrer Größe nach sortiert und nur eine definierte Anzahl n an Lösungen mit den höchsten Korrelationswerten verwendet. Die Schrittweite der Winkel für die Berechnung der Gauß-Kugeln wird verringert, damit eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Rotationskomponenten gewährleistet ist. Der Verfeinerungsschritt wird mehrfach ausgeführt. In der letzten Stufe wird schließlich die Lösung gewählt, welche der besten Korrelation der Kugeln entspricht. Abbildung 5.7 zeigt zusammenfassend das Struktogramm des gesamten Verfahrens.

1	Erzeugen einer tesselierten Kugel in Stufe l Schleife über alle Stufen l	
2		Auftragen der Normalenvektoren und ggf. zusätzlicher Attribute auf die Kugel S_l
3		Definition des Suchraumes R_l für die aktuelle Verfeinerungsstufe der Gauß-Kugel
4		Schleife über den Suchraum (1. Iteration kompletter Suchraum, sonst um Lösungen)
5		Berechne Gauß-Kugel S_2 des zu registrierenden Scan für R_l
6		Berechne Korrelation zwischen Kugeln S_l und S_2 und speichere Ergebnis
7		Wähle n beste Lösungen
8		Abbruch, falls feinste Stufe erreicht ist
9		Gehe zur nächst feineren Stufe
10		Wähle beste Lösung

Abb. 5.7: Struktogramm des Verfahrens.

¹⁶Die 72° ergeben sich im ungünstigsten Fall, wenn zwei Vektoren auf den Eckpunkten eines Flächenelements liegen. (Wird ein Ikosaeder von oben betrachtet, so ist eine fünf-seitige Pyramide sichtbar, ein Kreis wird durch fünf gleich lange Kanten angenähert).

Anstatt am Ende einfach die beste Lösung zu wählen, können auch mehrere Lösungen mit den besten Korrelationswerten in Betracht gezogen werden und in einem zusätzlichen Schritt verifiziert werden. Dies erfordert die Definition einer *Güte-* oder *Fitnessfunktion*, die einen Hinweis auf die korrekte Lösung gibt. Möglichkeiten zur Verifikation von Lösungen werden in Kapitel 6.5 vorgestellt und diskutiert.

5.3 Diskussion

Das Verfahren zur Registrierung von 3D-Punktwolken mittels Extended Gaussian Images ist global und kann auf Daten angewendet werden, bei denen Oberflächennormalen bekannt sind oder berechnet werden können. Eine Extraktion von Merkmalen ist nicht erforderlich, der Algorithmus basiert auf Korrelationsberechnungen zwischen Normalenvektoren von Oberflächen. Wie bei anderen globalen Verfahren ist auch hier ein großer Überlappungsbereich zwischen den zu registrierenden Datensätzen für den Erfolg von Vorteil. Bei dem Verfahren wird die Aufgabe der Zuordnung von verschiedenen ausgerichteten Objekten in ein Zuordnungsproblem zweier Gauß-Kugeln überführt. Dabei geht allerdings die Information einer möglichen Translation zwischen den Objekten verloren und ohne Erweiterungen können nur konvexe Objekte eindeutig zueinander orientiert werden.

Die allgemein zeitlich aufwendige Berechnung von Korrelationswerten wurde durch die Einführung einer grob-zu-fein Strategie optimiert. Eine weitere Verbesserung der Laufzeit kann erreicht werden, indem die Gauß-Kugel des zu registrierenden Scans S_2 nur einmalig und nicht für alle möglichen Rotationswinkel berechnet wird. In diesem Fall muss die beste Orientierung über eine Verdrehung der Gauß-Kugel S_2 ermittelt werden. Nach Brou (1984) führt dies für ein Ikosaedron mit 20 Flächenelementen zu 60 möglichen Rotationen. Jede der 20 Flächen kann mit einer anderen kombiniert werden, die Reihenfolge für den folgenden Vergleich ist durch die Topologie des Ikosaeders gegeben. Schließlich kann die Ausgangsfläche noch um den Schwerpunkt um drei Positionen gedreht werden, wodurch sich die $20 \cdot 3 = 60$ Möglichkeiten ergeben. Im Vergleich zu den 432 Kombinationen an Verdrehungswinkel, die bei dem vorgestellten Verfahren verwendet werden, würde der Test auf Verdrehung der Kugeln zu einer zusätzlichen Zeitersparnis bei der Berechnung führen. Ein Vorteil der aufwendigeren Neuberechnung der Gauß-Kugeln ist jedoch, dass negative Effekte durch die Diskretisierung der Kugel in Flächenelemente vermieden werden. Weisen Normalenvektoren gerade auf die Grenze zwischen zwei Flächen, so liegen diese bei dem nächsten Winkelschritt in einer Fläche und ein Vergleich mit der Referenz führt unter Umständen zu einem besseren Ergebnis. In Kapitel 7 wird das Verfahren auf einen umfangreichen Testdatensatz angewendet und Ergebnisse zur Registrierung der Daten gezeigt.

6 Registrierung über eine symbolische Zuordnung von korrespondierenden Ebenen

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren der Registrierung terrestrischer Scandaten ist die Extraktion und Zuordnung von ebenen Flächen. Die Problematik bei der Bestimmung der Transformationsvorschrift liegt in der Zuordnung korrespondierender Flächen. Dabei kommen Verfahren aus der *Objekterkennung* zur Anwendung, welche Merkmale für eine Zuordnung verwenden. Faugeras und Hebert (1986) nennen zwei notwendige Voraussetzungen, um eine Objekterkennung und Zuordnung in 3D zu bewerkstelligen: Erstens sollten die Merkmale stabil gegenüber Verdeckungen sein und zweitens sollen die Merkmale genügend Informationen für die Berechnung der Transformation enthalten.

Die entwickelten Verfahren für die Registrierung gehen in mehreren Schritten vor. Zunächst werden ebene Flächen aus den Laserscandaten abgeleitet, anschließend werden in den Überlappungsbereichen verschiedener Scans korrespondierende Flächen (Merkmalspaare) ausgewählt, um daraus die Transformationsparameter zwischen zwei Scanpositionen zu bestimmen. Für die Berechnung der Rotations- und Translationskomponente werden wenigstens drei Ebenenpaare benötigt (vgl. Abschnitt 3.2). Abbildung 6.1 zeigt schematisch den Ablauf des entwickelten Registrierungsprozesses.

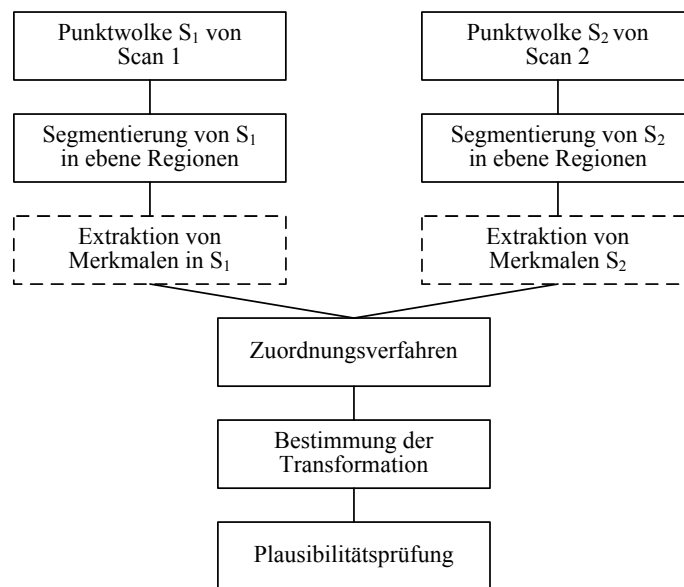


Abb. 6.1: Schematischer Ablauf einer automatischen Registrierung von zwei sich überlappenden Laserscans. Der Schritt der Merkmalsextraktion wird nur für eines der vorgestellten Zuordnungsverfahren verwendet und ist daher gestrichelt dargestellt.

Ebene Flächen sind in städtischen Bereichen und Straßenszenen dominant, Fahrbahnoberflächen, Gehwege, versiegelte Flächen, Hauswände, Dachflächen und auch Schilder können durch ebene Regionen modelliert werden. Segmentierungen von Laserscannerdaten können vollautomatisch und sehr effizient vorgenommen werden. Durch die hohe Anzahl an Messpunkten wird eine hohe Genauigkeit bei der Ebenenschätzung erreicht und die Richtungen der Normalenvektoren sind somit mit einer entsprechenden Genauigkeit bekannt (vgl. Abschnitt 4.4.2). Auch ist eine stabile Ebenenschätzung aus verschiedenen Blickrichtungen problemlos möglich. Werden korrespondierende Ebenen für die Berechnung der Transformationsvorschrift herangezogen, so hat die geometrische Ausprägung der Ebenen keinen Einfluss auf die Genauigkeit. Korrespondierende Ebenen müssen lediglich eine ähnliche Orientierung haben, eine räumliche Ähnlichkeit oder ungleiche Überlappungen haben bei der Berechnung der Transformationsparameter keine negative Auswirkung. Sofern auf geometrische Merkmale verzichtet wird, spielt die Verdeckung von Teilflächen bei von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen Scans also weder für die Bestimmung der Rotation noch für die Bestimmung der Translation eine Rolle.

6.1 Einführung in die Zuordnungsverfahren

Ein Zuordnungsprozess gliedert sich in zwei Phasen, der *Hypothesenbildung* und dem *Verifikationsschritt*. Bei der Hypothesenbildung werden Merkmalspaare ausgewählt, bei denen aufgrund von ähnlichen Merkmalen eine korrekte Zuordnung vermutet wird. Weisen korrespondierende Merkmale jedoch nur eine geringe oder mittlere Übereinstimmung auf, so wird die Hypothesenbildung unsicher. In der Folge erhöht sich die Zahl der zu bildenden Hypothesen und somit die Komplexität des Zuordnungsprozesses erheblich.

Ziel der Zuordnungsverfahren ist die Ableitung einer globalen Transformation, welche die Merkmale aus verschiedenen Datensätzen bestmöglichst zur Deckung bringt. Übertragen auf das Problem zur Bestimmung korrespondierender Ebenen aus terrestrischen Laserscannerdaten bedeutet dies, dass eine Transformation gesucht ist, welche möglichst viele Ebenen zur Deckung bringt. Problematisch ist jedoch immer die Entscheidung, ob eine ermittelte Transformationsvorschrift zu einer Übereinstimmung aller Merkmale führt und somit global gültig ist. Dem Verifikationsschritt muss daher eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 6.2 ein zweidimensionales Beispiel gezeigt, welches nach der Vorlage von Grimson (1990) entstanden ist. Gegeben sind zwei verschiedene Datensätze, in denen jeweils drei Geradenstücke gegeben sind (Abb. 6.2 (a) und 6.2 (b)). Um die Datensätze ineinander zu überführen sollen lediglich die Geradengleichungen und nicht die Endpunkte der Geradenstücke verwendet werden. Wird mittels einer Transformation versucht die beiden Datensätze zur Deckung zu bringen, so finden sich Lösungen mit jeweils zwei übereinstimmenden Geraden (Abb. 6.2 (c)-(e)).

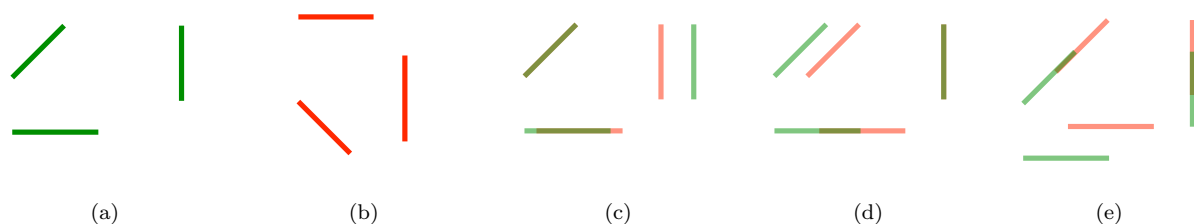


Abb. 6.2: Zwei Datensätze (a) und (b) mit jeweils drei Merkmalen. Mögliche Transformationen (c)-(e), welche die Datensätze lokal zur Deckung bringen.

Es existiert jedoch keine globale Transformationsvorschrift, welche alle drei Geraden der unterschiedlichen Datensätze gleichzeitig zur Deckung bringt. Über lokale Zuordnungen zweier Geraden ergeben sich Lösungen, die jedoch keiner gültigen globalen Lösung entsprechen. Ähnliche Probleme können sich durch Symmetrien in Datensätzen ergeben. Aufgrund dieser Problematik ist ein globaler Verifikationsschritt nach der Hypothesenbildung erforderlich.

Eine Hypothese muss mindestens so viele Korrespondenzen enthalten, wie benötigt werden, um die Transformationsvorschrift eindeutig zu bestimmen. Die Plausibilitätsprüfung der Lösung erfolgt im Verifikationsschritt. Die Hypothese muss also nicht unbedingt alle möglichen Korrespondenzen enthalten. Überlappen sich zwei Datensätze nicht vollständig, so ist in der Regel auch die Anzahl von Korrespondenzen nicht bekannt und es existieren Merkmale, zu denen es keine Korrespondenzen gibt. In diesem Fall kann eine Zuordnung global gültig sein, obwohl nicht alle Merkmale aus dem ersten einem entsprechenden Merkmal aus dem zweiten Datensatz zugeordnet wurden. Dadurch wird der Verifikationsschritt schwierig, da nicht klar definiert ist, wann eine globale Lösung gefunden ist. Ein weiteres Problem bei den Zuordnungsverfahren ist die Bildung von vielversprechenden Hypothesen. Aufgrund der kombinatorischen Vielfalt an Zuordnungen ist es selbst bei einer relativ kleinen Menge an Merkmalen nicht möglich, alle Hypothesen auf ihre Konsistenz hin zu überprüfen. Daher ist in der Regel eine vollständige Suche nicht möglich und es muss eine Vorauswahl an Merkmalen getroffen werden, ohne dabei die korrekte Lösung schon vorab zu verwerfen.

Bei der Registrierung von terrestrischen Scandaten über die Zuordnung identischer Ebenen werden mögliche Hypothesen durch korrespondierende Ebenen gebildet. Aus den gegebenen Ebenengleichungen wird eine Transformationsvorschrift abgeleitet, die anhand eines Verifikationsschrittes auf ihre Plausibilität hin überprüft wird.

6.1.1 Zuordnung korrespondierender Ebenen

Für eine automatische Registrierung von TLS-Daten anhand von identischen Ebenen ist eine Zuordnung von Ebenen erforderlich. Dabei müssen korrespondierende Ebenen hinsichtlich ihrer Begrenzung und relativen

Orientierung im Raum nicht identisch sein. Unterschiedliche Segmentierungen von identischen Flächen aus verschiedenen Blickrichtungen beeinflussen die Berechnung der Transformationsparameter nicht. Die Problematik bei den vorgestellten Verfahren liegt zum einen in der automatischen Zuordnung der korrespondierenden Ebenen und zum anderen darin, dass für die erfolgreiche Bestimmung der Transformationsparameter Ebenenpaare vorliegen müssen, deren Normalenvektorrichtungen möglichst gut im Raum verteilt sind. Die Zuordnung der Ebenen erfolgt automatisch über ein Suchverfahren. Ab einer gewissen Anzahl von extrahierten Ebenen pro Scan muss die Suche eingeschränkt werden, da ansonsten der Suchraum schnell sehr groß wird. Hierzu wird eine Vorauswahl geeigneter Ebenen getroffen, mit denen sich die gesuchte Transformation möglichst gut bestimmen lässt.

Über eine Güte- oder Fitnessfunktion wird schließlich mit einem Verifikationsschritt entschieden, ob die bestimmte Transformation angenommen oder abgelehnt wird. Wesentlich dabei ist wie oben erläutert die Definition einer geeigneten Gütefunktion, korrekte Lösungen müssen zuverlässig akzeptiert und falsche Lösungen verworfen werden.

6.1.2 Auswahl der Merkmalspaare

Werden für die Bestimmung einer Euklidischen Transformationsvorschrift zwischen zwei 3D Datensätze S_1 und S_2 ebene Regionen verwendet, so werden, wie in Abschnitt 3.2 gezeigt wurde, $k \geq 3$ identische Ebenen benötigt, um die Rotation und Translation zu bestimmen. Ist lediglich die Rotationskomponente zu bestimmen, reichen $k = 2$ identische Ebenen aus. Unter der Annahme, dass aus den Datensätzen S_1 bzw. S_2 insgesamt p_1 bzw. p_2 ebene Regionen extrahiert wurden, berechnet sich die Gesamtzahl n der Möglichkeiten die einzelnen Ebenen miteinander zu kombinieren zu:

$$n = \binom{p_1}{k} \cdot \binom{p_2}{k} \cdot k! \quad (6.1)$$

Dabei enthalten die ersten beiden Terme die Anzahl der Möglichkeiten k Ebenen aus der Menge p_1 bzw. p_2 zu ziehen. Der Faktor $k!$ berücksichtigt die Permutationen, die bei einer Zuordnung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Dementsprechend beträgt die asymptotische Komplexität des Algorithmus die Ordnung $O(p_1^3 p_2^3)$ für das Minimum von $k = 3$ identischen Ebenen, die für die Bestimmung der kompletten Transformationsvorschrift benötigt werden. Tabelle 6.1 zeigt exemplarisch die Größe des gesamten Suchraums in Abhängigkeit von der Anzahl extrahierter Ebenen pro Scan und der Zahl k identischer Ebenen.

Ebenen pro Scan	Kombinationsmöglichkeiten			
	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$
$p_1 = p_2$				
10	4 500	86 400	1 058 400	7 620 480
20	72 200	7 797 600	563 376 600	28 844 881 920
30	378 450	98 901 600	18 024 816 600	$2,4370 \cdot 10^{12}$
50	3 001 250	2 304 960 000	$1,2729 \cdot 10^{12}$	$5,3870 \cdot 10^{14}$
80	19 971 200	40 501 593 600	$6,0033 \cdot 10^{13}$	$6,9351 \cdot 10^{16}$

Tabelle 6.1: Anzahl aller möglichen Kombinationen bei der Verwendung von zwei, drei, vier bzw. fünf identischen Ebenen.

Werden für die Berechnung der Transformationsvorschrift mehr Merkmale als erforderlich verwendet, so kann dies von Vorteil sein, da durch die Überbestimmung unmittelbar auch ein Fehlermaß bestimmt werden kann. Dieses gibt einen Hinweis auf die Richtigkeit der Zuordnung. Allerdings scheidet aufgrund der enormen Größe des Suchraums für $k > 3$ eine Hypothesenbildung, welche mehr als das Minimum an identischen Ebenen enthält, von vorne herein aus.

Die Zahl der Kombinationsmöglichkeiten verringert sich jedoch noch um den Faktor 2 für die Anzahl von $k = 3$ identischen Ebenen, wenn die Chiralität¹⁷ berücksichtigt wird, also ein rechtshändig orientiertes Tripel von Normalenvektoren $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_3)$ nicht mit einem linkshändigen Tripel kombiniert wird. Dabei gibt das Vorzeichen der Determinante $\det(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$ darüber Auskunft, ob ein Rechtssystem ($\det(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3) > 0$) oder ein Linkssystem ($\det(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3) < 0$) vorliegt.

Werden aus der Menge p_1 nicht $k = 3$ sondern $k = 4$ Ebenen gezogen, so verringern sich durch die Einschränkung, dass die zu bildenden Korrespondenzen nicht aus einer Mischung von Rechts- und Linkssystemen

¹⁷Chiralität bezeichnet die Eigenschaft einer Transformation, dass durch Drehung das Spiegelbild nicht mit dem Original zur Deckung gebracht werden kann.

bestehen dürfen, ebenfalls die Zahl der gültigen Kombinationen. Für die Berechnung der Determinante aus drei Normalenvektoren der Ebenen ergeben sich aus den vier gezogenen Ebenen wiederum $\binom{4}{3} = 4$ verschiedene Möglichkeiten, d.h. es existieren auch verschiedene Kombinationen für die Chiralität, die durch das Vorzeichen der Determinante ausgedrückt wird. Die Kombinationen ergeben sich aus den Kombinationen von Vorzeichen der vier Möglichkeiten. Insgesamt ergeben sich somit $2^4 = 16$ verschiedene Kombinationen mit den Mengen von Vorzeichen $\{(+, +, +, +), (+, +, +, -), \dots, (-, -, -, -)\}$, welche die Chiralität einer einzigen Ziehung angeben.

Werden nun aus der Menge p_2 ebenfalls $k = 4$ Ebenen gezogen, so müssen anstelle der $4! = 24$ möglichen Permutationen nur diejenigen berücksichtigt werden, welche die gleiche Chiralität aufweisen, die Menge der Vorzeichen muss in beiden Standpunkten für die Kombination der Normalenvektoren identisch sein. Dies ist nur für 1/16 der Kombinationen der Fall und somit verringert sich die Zahl der Kombinationen aus Tabelle 6.1 für $k = 4$ also um den Faktor 16. Ein Vergleich der Größe des Suchraums zwischen $k = 3$ und $k = 4$ Korrespondenzen ergibt, dass es nur für eine geringe Anzahl von Ebenen (z. B. $p_1 = p_2 < 9$) vorteilhaft ist, mehr als nur das Minimum an notwendigen Korrespondenzen zu verwenden. Analog kann die Chiralität auch für $k = 5$ Korrespondenzen berücksichtigt werden, in diesem Fall ergeben sich $\binom{5}{3} = 10$ verschiedene Möglichkeiten die Determinante aus drei Ebenen zu berechnen und entsprechend verringert sich theoretisch der Suchraum um die Anzahl der Kombination von Vorzeichen um den Faktor $2^{10} = 1024$. Auch hier kompensiert die Berücksichtigung der Chiralitäten die erhöhte Zahl an Kombinationsmöglichkeiten nur für eine geringe Anzahl von Ebenen.

Bei einem vollständigen Suchverfahren läuft der Suchalgorithmus alle Möglichkeiten ab und berechnet zu jeder Kombination die Transformationsvorschrift. Die gesuchte Transformation ergibt sich am Ende, indem anhand einer Gütefunktion die am Besten passende ausgewählt wird. Durch die schnell wachsende Größe des Suchraums ist eine vollständige Suche allerdings nur für eine kleine Menge extrahierter Ebenen ($p_1, p_2 < 10$) in angemessener Zeit überhaupt möglich. Eine Möglichkeit die Suche abzukürzen ist die Suche abzubreaken, sobald eine annehmbare Lösung gefunden wurde. Dadurch kann das Durchlaufen aller Möglichkeiten vermieden werden, allerdings wird bei diesem Vorgehen nicht berücksichtigt, dass die korrekte Lösung ungünstig im Suchraum liegen kann und somit erst am Ende der Suche gefunden wird. In der Praxis ist es also unumgänglich den Suchraum einzuschränken. Es muss eine Vorauswahl an Merkmalspaaren erfolgen, damit ein Suchverfahren schnell zum Erfolg führt. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass vielversprechende Merkmalspaare am Anfang der Suche berücksichtigt werden. Eine gängige Methode, die Komplexität eines Suchraums zu verkleinern, ist nur eine Teilmenge des Suchraums zu betrachten. Hierzu können charakteristische Attribute aus den Daten abgeleitet werden. Die Attribute werden selbst oder Beziehungen zwischen den Attributen miteinander verglichen und der Suchbaum auf diese Weise beschnitten (Grimson, 1990). Dabei kann es allerdings vorkommen, dass die korrekte Lösung überhaupt nicht in Betracht gezogen wird, falls sie nicht in der ausgewählten Teilmenge des Suchraums liegt. Dies ist der Fall, sofern aufgrund der verwendeten Attribute und Kriterien Korrespondenzen gebildet werden, die in Wirklichkeit nicht übereinstimmen und somit zu falschen Lösungen führen.

Nach der Auswahl vielversprechender Merkmalspaare ist wie bereits erwähnt der Verifikationsschritt von besonderer Bedeutung. Um zu entscheiden, ob die berechnete Transformation global gültig ist, kommt eine Fitnessfunktion zum Einsatz. Damit nicht alle möglichen Zuordnungen betrachtet werden müssen, bricht die Suche ab, sobald mit dem Verifikationsschritt eine wahrscheinlich korrekte Lösung identifiziert wurde. Dabei wird eine mögliche Fehlinterpretation toleriert, da durch die definierten Abbruchkriterien nicht unbedingt die beste Lösung gefunden wird. Der Abbruch der Suche basierend auf einem Qualitätsmaß ist aber in vielen Fällen erforderlich, um durch eine Einschränkung der vollständigen Suche überhaupt ans Ziel zu kommen (Grimson und Lozano-Pérez, 1987). Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden verschiedene Zuordnungsverfahren basierend auf den segmentierten Ebenen vorgestellt und diskutiert.

6.2 Formbasierte Zuordnung

Bei der formbasierten Zuordnung werden die Korrespondenzen zwischen den Ebenen über einen Vergleich von charakteristischen Merkmalen ermittelt. Ein Vorteil bei TLS-Daten ist die dreidimensionale Aufnahme, wodurch unabhängig vom Aufnahmestandpunkt eine Ableitung von geometrischen Merkmalen möglich ist. In Kapitel 4.5 wurde die Ableitung von verschiedenen Merkmalen beschrieben. Der in diesem Kapitel vorgestellte Algorithmus nutzt die folgenden Merkmale für eine Zuordnung von Ebenen zwischen zwei Standpunkten:

- Die berechnete Fläche einer Region basierend auf Flächenelementen.
- Das kleinste umschließende Rechteck der konvexen Hülle einer Region.

- Den Umfang der konvexen Hülle einer Region.
- Den mittleren Intensitätswert des reflektierten Laserlichts innerhalb einer Region.

Der entscheidende Vorteil einer formbasierten Zuordnung ist die geringe Komplexität bei der Suche nach Korrespondenzen, die basierend auf der Ähnlichkeit der einzelnen Merkmale schnell gebildet werden können. Im Gegenzug muss allerdings der Nachteil in Kauf genommen werden, dass die Bestimmung der Transformationsparameter aus identischen Ebenen nicht mehr nur auf der Orientierung der Ebenen basiert, sondern auch noch auf deren geometrischen Ausprägung. Sind die Merkmale zwischen den Ebenen nicht ähnlich, so werden keine Korrespondenzen gebildet und der Suchraum für die Bestimmung der Transformationsparameter unter Umständen zu sehr eingeschränkt. Als Folge wird die gesuchte Transformationsvorschrift nicht gefunden, obwohl geeignete Ebenenpaare vorliegen.

6.2.1 Ermittlung von korrespondierenden Ebenenpaaren anhand von Merkmalen

Das Zuordnungsverfahren vergleicht alle Ebenen miteinander, bei p_1 extrahierten Ebenen aus S_1 und p_2 extrahierten Ebenen aus S_2 sind in einem ersten Schritt zunächst $p_1 \cdot p_2$ Vergleiche zu bewerkstelligen. Bei jedem Vergleich werden alle m Merkmale auf Übereinstimmung untersucht. Hierzu wird ein Schwellwert verwendet, der die maximale prozentuale Abweichung angibt. Passen die Merkmale zusammen, so wird ein Zähler z erhöht. Der maximale Wert des Zählers entspricht somit der Anzahl der extrahierten Merkmale für ein Ebenenpaar (e_i, e_j) aus S_1 und S_2 . Somit ergibt sich für jede Paarung eine Trefferzahl Z der Merkmale. Die Paarungen werden nach der Zahl der Treffer sortiert, es ergibt sich eine Liste $L = \{Z, (e_i, e_j)\}$, welche die Paarungen aus S_1 und S_2 mit den Trefferzahlen enthält. Im weiteren Verlauf des Zuordnungsverfahrens werden nur die Ebenenpaarungen mit den höchsten Trefferzahlen weiter verwendet. Ergeben sich aber nur wenige Ebenenpaare mit höchster Trefferzahl, so werden auch Paare mit kleinerer Trefferzahl für die weitere Verarbeitung verwendet.

Bodenflächen spielen bei der Zuordnung der geometrischen Merkmale eine besondere Rolle. Eine Bodenfläche kann im Gegensatz zu anderen Flächen wie Fassaden oder vom Boden aus sichtbare Dachflächen in der Regel nicht vollständig von einem Laserscanner erfasst werden. Somit sind keine natürliche Begrenzungslinien für die Merkmalsextraktion vorhanden und eine zuverlässige Zuordnung der Merkmale gelingt nur in seltenen Fällen, da sich die Merkmale erheblich unterscheiden können. Bodenflächen weisen dafür andere Eigenschaften auf, die sich typischerweise von anderen Flächen abheben. Die Bodenflächen werden üblicherweise mit besonders vielen Messpunkten erfasst. Zum einen bilden sie oft die größte zusammenhängende Fläche und zum anderen werden aufgrund des vorgegebenen Winkelrasters beim Scanvorgang besonders viele Punkte in unmittelbarer Nähe des Scanners aufgenommen. Dies sind aufgrund des Aufbaus der Instrumente auf einem Stativ oder auf einer mobilen Plattform in der Regel Bodenpunkte. Diese Eigenschaften werden genutzt, um Bodenflächen in den segmentierten Scandaten heraus zu filtern.

Der Algorithmus für die Detektion von Bodenflächen geht davon aus, dass der größte Anteil an Messpunkten auf den Bodenflächen liegt. In einem Beispiel im Abschnitt 6.3.1 wird gezeigt, dass in einem nach Ebenen segmentierten Scan jeweils ein beachtlicher Teil der Messpunkte auf Flächen liegen, die dem Erdboden zugehören. Daher werden für die Erkennung der Bodenflächen im ersten Schritt alle verfügbaren Normalenvektoren des segmentierten Scans nach ähnlichen Richtungen gruppiert. Hierzu wird ein grober Schwellwert festgelegt (z. B. 5°), der für die Gruppierung die maximale Abweichung zwischen den Richtungsvektoren definiert. Neben der gemittelten Richtung wird außerdem die Zahl der Messpunkte in einer Gruppe gespeichert und diejenige Fläche mit der größten Gesamtzahl an Messpunkten als Bodenfläche angesehen. Der Algorithmus wird auf die zu registrierenden Scans S_1 und S_2 angewandt und schließlich das Paar mit der jeweils größten Fläche einer Liste L zugeführt. Je nach Größe der Fläche wird eine fiktive Trefferzahl für die Zahl übereinstimmender Merkmale gesetzt, die für eine entsprechend hohe Gewichtung der Paarung sorgt. Da terrestrische Laserscanner oftmals lotrecht aufgestellt werden, kann die Richtung zusätzlich mit der Zenitrichtung $\mathbf{r}_Z = (0, 0, 1)$ verglichen werden. Tritt eine Übereinstimmung auf, so wird die Trefferzahl für die Paarung mit den Bodenflächen nochmals erhöht und somit bei der folgenden Ermittlung der Transformationsparameter bevorzugt verwendet.

Ein ähnliches Verfahren für die Ermittlung der Zenitrichtung in bebauten Gebieten wendet für in ebene Regionen segmentierte TLS-Daten von Hansen (2007) an. Ausgehend von der Annahme, dass die Bodenfläche im Vergleich zu den anderen Flächen die Größte ist, wählt der vorgestellte Algorithmus basierend auf lokal extrahierten Ebenen zunächst denjenigen Richtungsvektor aus, der mit der größten Zahl an Normalenvektoren der lokalen Ebenen übereinstimmt. In einer zweiten Stufe werden verbleibende Ebenen in Fassaden klassifiziert, sofern sie in etwa senkrecht zu dem bestimmten Richtungsvektor der Bodenfläche sind. Die Zenitrichtung ergibt sich nun zu einem Vektor, der wiederum senkrecht auf den Fassadenflächen steht.

Das Ergebnis der Zuordnung von Ebenen nach deren Merkmalen ist die nach einer Trefferzahl priorisierte Liste L , die günstige Paarungen von Ebenen für die Bestimmung der Transformationsparameter enthält. Mögliche falsche Paarungen werden bei der folgenden Heuristik bei der Berechnung der Parameter in der Regel verworfen.

6.2.2 Heuristik für die Bestimmung der Transformationsparameter

Der nächste Schritt ist nun die Berechnung der Transformationsvorschrift aus den gegebenen Paarungen. Sofern die Liste zumindest zwei Paarungen enthält, wird zuerst die Rotationskomponente bestimmt. Für die Berechnung der Rotation werden exakt zwei Paare verwendet. Sind d Paare in der Liste vorhanden, so ergeben sich für die Berechnung $\binom{d}{2}$ Möglichkeiten zwei Paare miteinander zu kombinieren. Im Vergleich zu der Größe des Suchraums bei unbekannten Korrespondenzen (vergleiche Formel 6.1 und Tabelle 6.1) führen die Möglichkeiten an Kombinationen in diesem Fall zu einer Suchraumgröße, die in akzeptabler Zeit prozessiert werden kann. Ausgehend von $p_1 = p_2 = 50$ Ebenen in S_1 und S_2 ergibt sich eine maximale Listengröße von $p_1 \cdot p_2 = 50 \cdot 50 = 2500$ Paarungen und somit höchstens $\binom{2500}{2} = 3\,123\,750$ Kombinationsmöglichkeiten. In der Praxis tritt diese Zahl jedoch nicht auf, da in diesem Fall alle extrahierten Merkmale ähnlich sein müssten. Je nach Schärfe der Merkmale und Schwellwert für die Ähnlichkeit verbleiben weit weniger Kombinationen. Für städtische Szenen wurden je nach Schwellwert bei 50 extrahierten Ebenen zwischen 400 und 1000 korrespondierende Paare gebildet, was in etwa zu 80 000 - 500 000 Kombinationen führt.

Über eine Heuristik werden die verbleibenden Kombinationen weiter reduziert. Da nicht jede Kombination für die Berechnung der Rotationsparameter geeignet ist, werden diese gefiltert und ungünstige Kombinationen verworfen. Die folgenden zwei Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein Tupel an Ebenenpaaren für die Berechnung verwendet wird:

1. Für die Bestimmung der Rotationskomponente, dürfen die Vektoren der Paarungen nicht parallel sein, im Idealfall sind die eingeschlossenen Winkel $\angle(\mathbf{n}_i^1, \mathbf{n}_i^2)$ und $\angle(\mathbf{n}_j^1, \mathbf{n}_j^2)$ rechte Winkel. Es wird gefordert:

$$\begin{aligned}\angle(\mathbf{n}_i^1, \mathbf{n}_i^2) &> \delta_1 \\ \angle(\mathbf{n}_j^1, \mathbf{n}_j^2) &> \delta_1\end{aligned}\tag{6.2}$$

2. Der Winkel, den die Normalenvektoren einer Paarung aus jedem Scan einschließen, muss ähnlich sein. Eine Rotation verändert den eingeschlossenen Winkel zwischen zwei Normalenvektoren nicht. Ausgedrückt mit einer Gleichung lautet die Bedingung:

$$\angle(\mathbf{n}_i^1, \mathbf{n}_i^2) \approx \angle(\mathbf{n}_j^1, \mathbf{n}_j^2)\tag{6.3}$$

bzw.

$$(\angle(\mathbf{n}_i^1, \mathbf{n}_i^2) - \angle(\mathbf{n}_j^1, \mathbf{n}_j^2)) < \delta_2\tag{6.4}$$

Der Schwellwert δ_1 für die erste Bedingung sollte nicht zu groß gewählt werden, damit die Berechnung der Rotation nicht von dem Inhalt der Szene abhängig ist. Für eine Registrierung von TLS-Daten wurde für Berechnungen in dieser Arbeit ein Schwellwert von 10° gewählt. Die zweite Bedingung ist für korrekt gebildete Korrespondenzen bei einer vernünftigen Wahl des Schwellwerts δ_2 immer erfüllt. Die Bedingung greift vorwiegend bei Korrespondenzen mit einer geringen Trefferzahl bei der Zuordnung regulierend ein. Die Wahl der Schwellwerte für δ_1 und δ_2 ist weitgehend unkritisch. Die Wahrscheinlichkeit, dass korrekte Paarungen aufgrund der Bedingungen verworfen werden, ist gering.

Nach der Berechnung der Rotation erfolgt eine Verifikation der berechneten Rotationsparameter, indem die Normalenvektoren $\mathbf{n}_j$ rotiert werden. Diese stimmen dann im Idealfall mit den Vektoren $\mathbf{n}_i$ überein. Die Zahl der Übereinstimmungen aus den d Paaren ist ein Indikator für die Güte der Rotationsbestimmung. Ein Schätzwert für die gesuchte Rotation und auch für die Translation ergibt sich schließlich aus allen Paaren ($n \geq 3$), die mit der Lösung der besten Übereinstimmung kompatibel sind. Der Ablauf des gesamten Algorithmus, die Zuordnung der Merkmale und die Heuristik für die Berechnung der Transformationsvorschrift ist im Struktogramm in Abbildung 6.3 wiedergegeben.

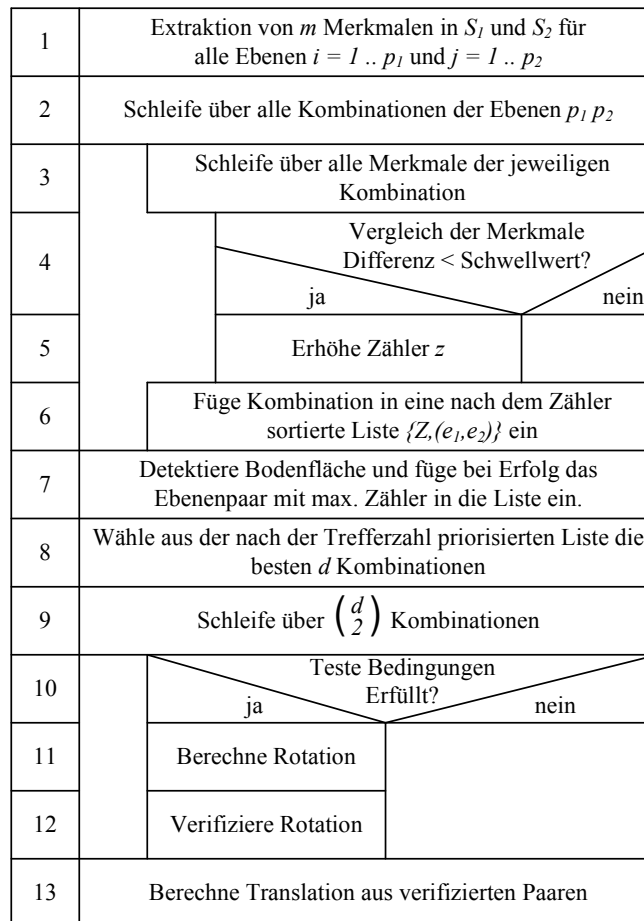


Abb. 6.3: Struktogramm für den Algorithmus der formbasierten Zuordnung.

6.2.3 Bewertung der Merkmale

Voraussetzung für einen Erfolg der formbasierten Zuordnung sind charakteristische Merkmale, die unabhängig vom Aufnahmestandpunkt aus den Daten abgeleitet werden können. Bei den verwendeten geometrischen Merkmalen sind zum einen Verdeckungen, die nur durch eine geschickte Wahl der Standpunkte vermieden werden können, aber auch ein unterschiedliches Sichtfeld des Laserscanners und verschiedene Ergebnisse in der Segmentierung problematisch. Abbildung 6.4 zeigt Beispiele (farblich hervorgehoben) einer Segmentierung, die bei einer formbasierten Zuordnung nicht als ein gültiges Ebenenpaar erkannt werden. Außerdem zeigt das Beispiel die Dominanz der Bodenflächen bei einem gleichwinkligen Scanraster bei der Aufnahme von einem Stativ aus.

Die Beispiele zeigen, dass derartige Merkmale für die Zuordnung korrespondierender Regionen nicht geeignet sind. Dies gilt vor allem für etwas weiter auseinander liegende Standpunkte. Für eine Bewertung für die Güte der Merkmale wurden in insgesamt 25 segmentierten Laserscans einer städtischen Szene manuell über 140 korrespondierende Ebenen identifiziert und die extrahierten Merkmale miteinander verglichen. Aus den ermittelten Korrespondenzen konnten auch jeweils die Transformationsparameter zwischen den Standpunkten berechnet werden, so dass im Fall einer automatischen Bildung der Korrespondenzen anhand von Merkmalen die Scans auch erfolgreich registriert werden können.

Das Histogramm in Abbildung 6.5 (a) zeigt, wie gut die Merkmale korrespondierender Ebenen zusammen passen. Dargestellt sind die in Kapitel 4.5 vorgestellten Merkmale: Aufsummierter Flächeninhalt einzelner Flächenelemente, Flächeninhalt der konvexen Hülle, die Länge der konvexen Hülle, das Verhältnis eines umschließenden Rechtecks (ausgerichtet an der längsten Kante der konvexen Hülle), das kleinste umschließende Rechteck sowie der mittlere Intensitätswert einer Region. Von korrespondierenden Ebenen wurde jeweils die prozentuale Differenz der Merkmale gebildet und diese in Klassen von 0% - 20% eingeteilt. Für einen Vergleich von Merkmalen muss ein Schwellwert für die Übereinstimmung definiert werden, der anhand der Daten des Histogramms abgeschätzt werden kann.

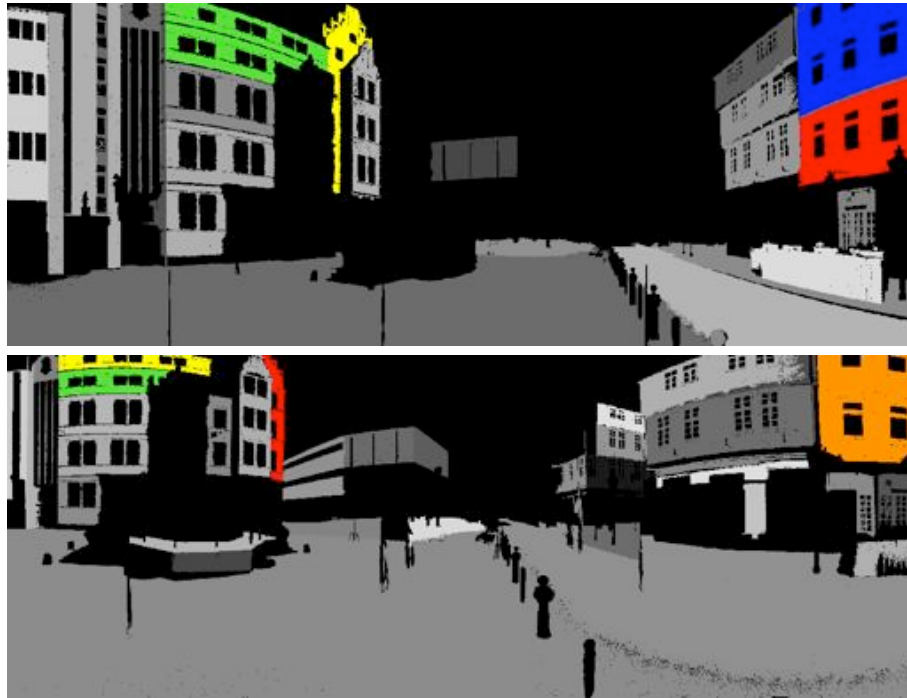


Abb. 6.4: Ausschnitt einer automatischen Segmentierung einer städtischen Szene von zwei Standpunkten aus. Korrespondierende Ebenen können geometrisch verschieden ausgeprägt sein, da Teilflächen bei der Segmentierung unterschiedlich aufgeteilt werden oder Verdeckungen auftreten können (Beispiele sind farblich gekennzeichnet).

Auffällig ist der Intensitätswert, der bei den meisten Korrespondenzen sehr gut übereinstimmt. Dies kann mit der Ähnlichkeit der Oberflächenbeschaffenheit der erfassten Objekte in städtischen Szenen erklärt werden, die einen entscheidenden Einfluss auf die reflektierte Signalstärke hat. Im kumulierten Histogramm (Abbildung 6.5 (b)) wird deutlich, dass die Abweichung der verglichenen Intensitätswerte bei knapp 50% unterhalb von 2.5% liegt und kleiner 10% bei ca. 95% aller verglichenen Werte ist. Von den anderen Merkmalen weisen in etwa 50% eine Abweichung kleiner als 10% auf. Außerdem ist anzumerken, dass bei zahlreichen Paaren die Abweichung von korrespondierenden Merkmalen bei über 20% liegt. Besonders groß ist diese Zahl bei den berechneten Flächeninhalten der Regionen. Da ein Schwellwert für einen Vergleich von Merkmalen von 20% oder größer zu weich für das Auffinden von Korrespondenzen ist, bedeutet dies eine Beschneidung des Suchraums. Obwohl zwei Ebenen ein gültiges Paar bilden und für einen Erfolg bei der Berechnung der Transformationsparameter beitragen würde, wird dieses aufgrund ungleicher Merkmale bei der Suche nicht berücksichtigt.

Die Diagramme in Abbildung 6.6 zeigen die Verteilung der Absolutwerte für die im Zuordnungsalgorithmus verwendeten Merkmale. Für die Erstellung der Grafik wurden die berechneten Werte aller Merkmale in insgesamt

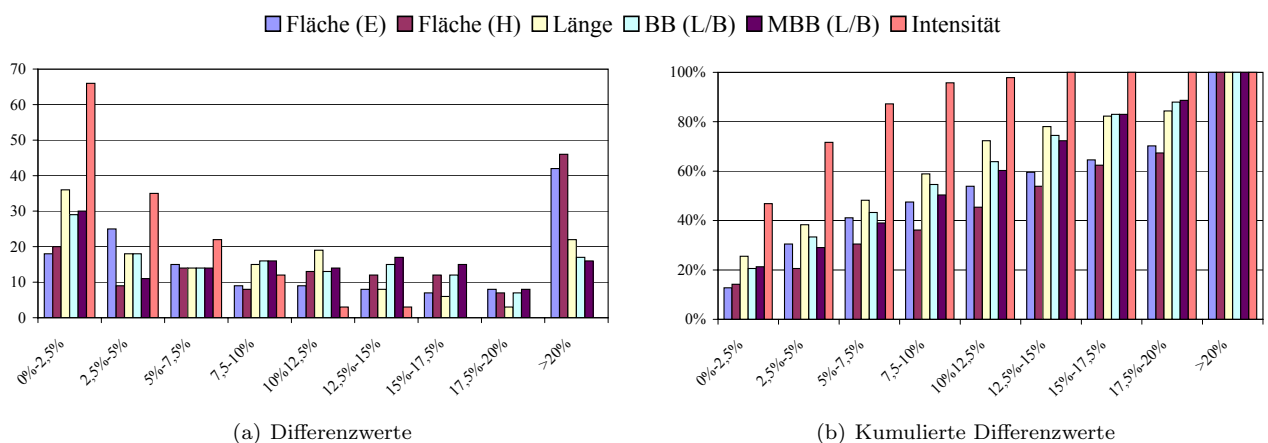


Abb. 6.5: Histogramm für die Differenz zwischen extrahierten Merkmalen.

50 gleichgroße Klassen aufgeteilt und die Werte entsprechend einsortiert. Dabei weisen die Merkmale die in Tabelle 6.2 gelisteten Wertebereiche und Klassenbreiten auf.

	Fläche (E)	Länge	MBB	Intensität
Minimaler Wert:	1,37	1,72	0,0423	0,1581
Maximaler Wert:	903,88	2092,66	0,9999	0,4501
Klassenbreite:	18	40	0,02	0,005

Tabelle 6.2: Wertebereiche der berechneten Absolutwerte der Merkmale.

Die Prozentwerte in den Grafiken zeigen an, wie oft ein Wert innerhalb eines Bereiches vorkommt und geben somit Auskunft über die Verteilung. Aus den Diagrammen in Verbindung mit den Zahlenwerten aus der Tabelle 6.2 lässt sich beispielsweise ablesen, dass vorwiegend kleinere Flächen vorhanden sind oder zahlreiche Intensitätswerte innerhalb eines kleinen Bereichs liegen.

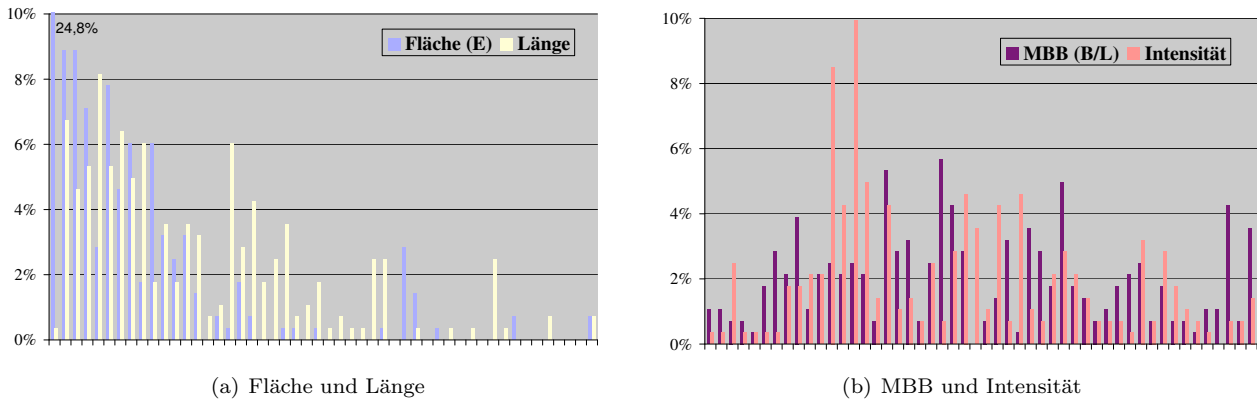


Abb. 6.6: Verteilung der Absolutwerte von berechneten Merkmalen.

Im Vergleich zu dem globalen Zuordnungsverfahren über *Extending Gaussian Images* (vgl. Kapitel 5) kann mit der formbasierten Zuordnung von ebenen Regionen auch die Translationskomponente ermittelt werden. Im folgenden Abschnitt wird ein weiteres Verfahren vorgestellt, welches auf zusätzliche Merkmale verzichtet und eine Zuordnung anhand der Ebenengleichungen durchführt.

6.3 Orientierungsbasierte Zuordnung

Ein anderes Verfahren für die Zuordnung von Ebenen verzichtet auf die geometrischen Merkmale der Regionen und berücksichtigt ausschließlich die Orientierung der segmentierten Ebenen. Dies hat den Vorteil, dass für den Prozess der Transformationsbestimmung auch Merkmalspaare mit unterschiedlicher Ausprägung berücksichtigt werden. Eine Vorauswahl an Merkmalspaaren erfolgt, indem Ebenen gewählt werden, die eine möglichst exakte Bestimmung der Transformationsparameter erlauben. Für Ebenentripel ist dies der Fall, wenn die drei Normalenvektoren der Ebenen senkrecht aufeinander stehen. Mathematisch betrachtet bedeutet dies, dass das Spatprodukt $s = (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c}$ der normierten Normalenvektoren $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ von drei Ebenen annähernd eins ist.

Durch dieses Kriterium wird außerdem der Fehler bei der Translationsberechnung minimiert. Aus der Gleichung $\mathbf{t} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{I}$ (vgl. Abschnitt 3.2) ergibt sich nach dem Varianz-Fortpflanzungs-Gesetz die entsprechende Kovarianzmatrix aus der inversen Normalgleichungsmatrix (Brenner u. a., 2008):

$$\Sigma_{\mathbf{t}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (6.5)$$

Ist $\mathbf{USV}^T$ die Singulärwertzerlegung von $\mathbf{A}$, ergibt sich für die Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \mathbf{V} \mathbf{S}^2 \mathbf{V}^T$ und für die Kovarianzmatrix ergibt sich:

$$\Sigma_{\mathbf{t}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 1/s_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/s_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/s_3^2 \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (6.6)$$

Die Varianz entlang einer beliebigen Koordinatenachse $1 \leq i \leq 3$ und auch die Summe der Varianzen entlang aller Achsen ist begrenzt durch

$$\frac{1}{s_i^2} \leq \frac{1}{s_1^2} + \frac{1}{s_2^2} + \frac{1}{s_3^2} \leq \frac{3}{s_1^2 s_2^2 s_3^2},$$

da $\text{spur}(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) = \text{spur}(\mathbf{A} \mathbf{A}^T) = 3 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2$ ist. Für große Werte von $s_1^2 s_2^2 s_3^2 = \det^2(\mathbf{A})$ ergeben sich also kleine Werte für die Summe der Varianzen und somit auch für die einzelnen Varianzen $1/s_i^2$ entlang einer Koordinatenachse. Es ergibt sich unmittelbar, dass der Fehler minimiert wird, falls $|\det(\mathbf{A})|$ am größten, bzw. der Absolutwert des Spatprodukts am größten ist. Dies ist der Fall, wenn die Normalenvektoren der betrachteten Ebenen senkrecht aufeinander stehen ($s_1 = s_2 = s_3 = 1$).

6.3.1 Auswahl von Kombinationen von Ebenentripeln

Ein Merkmalspaar, aus dem die komplette Transformationsvorschrift berechnet werden kann, besteht bei dieser Zuordnungsmethode aus jeweils drei Ebenen aus den Scandaten S_1 und S_2 . Um eine sinnvolle Auswahl an Merkmalspaaren zu treffen, wird aus jedem Scandatenatz separat für jede mögliche Kombination an Ebenentripeln das Spatprodukt aus den normierten Normalenvektoren der Ebenen berechnet. Stehen die drei Ebenen senkrecht aufeinander, so ergibt sich für das Spatprodukt der Wert $s = 1$, für den Fall dass zwei der drei Ebenen parallel sind ergibt sich der Wert Null. Auch bei diesem Verfahren entstehen zwei Listen L_1 und L_2 , die jeweils ein Tripel an Ebenengleichungen $\{e_i, e_j, e_k\}$ sowie das zugehörige Spatprodukt s enthalten. Nach einer Sortierung der Listen nach absteigenden Wert des Spatprodukts, werden diejenigen Kombinationen verworfen, für die das Spatprodukt unterhalb eines definierten Schwellwert liegt. Dadurch wird die Bildung von Merkmalspaaren vermieden, bei denen aufgrund der geometrischen Anordnung der Ebenen keine oder nur eine ungenaue Bestimmung der Transformationsparameter möglich ist. Der Suchraum wird nun aufgebaut, indem mögliche Zuordnungen an Ebenentripel unter vorrangiger Berücksichtigung großer Werte des Spatprodukts gebildet werden. Für jede gültige Zuordnung wird die Transformationsvorschrift berechnet und anschließend anhand eines Verifikationsschrittes auf Plausibilität überprüft.

Abbildung 6.7 zeigt die Segmentierung zweier Laserscans von verschiedenen Standpunkten aus in ebene Regionen. In dem Beispiel wurden die Ebenen nummeriert und zur besseren Übersicht jeweils die 30 größten¹⁸ Regionen behalten. Typischerweise wurde im Rahmen dieser Arbeit die Segmentierung auf jeweils 50 Ebenen pro Scan begrenzt. Bei dieser Anzahl ist in der Regel eine ausreichende Zahl an identischen Ebenen vorhanden und die Größe des Suchraums und somit die Rechenzeit für eine Registrierung der Scans bleibt in einem akzeptablen Rahmen.

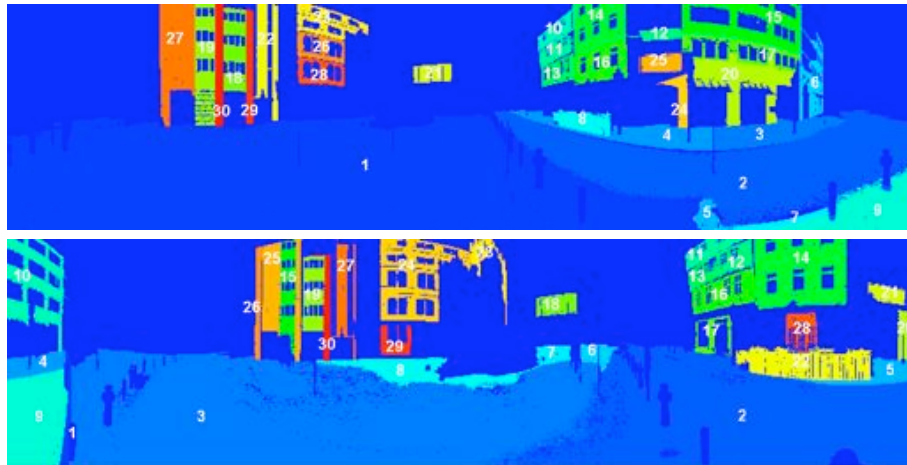


Abb. 6.7: Segmentierung eines Scans S_1 von Standpunkt 1 und eines Scans S_2 von einem anderen Standpunkt aus in ebene Regionen.

Für die Bewertung der Ergebnisse der Segmentierung wurden die bestimmten Ebenengleichungen und die entsprechenden Identifikationsnummern anhand der Referenzlösung miteinander verglichen. Korrespondierende Ebenen wurden somit detektiert und gleichzeitig die Überlappung zwischen den Ebenen berechnet, indem die Zahl der Scanpunkte der Regionen gezählt werden. In der Tabelle 6.3 sind die Korrespondenzen sowie die Überlappung für die größten Ebenen aufgeführt.

¹⁸Die Größe einer Region ist in diesem Fall über die Anzahl an Scanpunkten pro Region definiert.

Ebenen-Nr. in S_1	Ebenen-Nr. in S_2	Überlappung
1	1,2,3,6,8,9	28,7%
2	2,3,9	9,9%
8	22	1,5%
16	14	1,5%
4	2,4,5	2,3%
27	25,26	0,5%
14	14	0,8%
13	16	0,7%

Tabelle 6.3: Korrespondenzen der Ebenen zwischen S_1 und S_2 für die größten Ebenen aus Abb. 6.7.

Das Ergebnis zeigt, dass es für ca. 50% der segmentierten Fläche in S_1 keine Korrespondenz in S_2 gibt, obwohl sich die zwei Standpunkte zu etwa 80% überlappen. Die Differenz ist durch die verworfenen Ebenen (nur 30 wurden behalten) sowie durch Messpunkte, die nicht auf einer Ebene liegen, zu erklären. Das Beispiel zeigt, dass Bodenflächen einen wesentlichen Teil (ca. 40%) des segmentierten Scans ausmachen. Die verbleibenden Regionen haben in Summe einen Anteil von nur ca. 10%. Zwar ist die Überlappung zwischen korrespondierenden Ebenen sehr klein, aber für die Registrierung reichen bereits drei Ebenenpaare aus und eine Überlappung von einem halben Prozent entspricht bei zwei Millionen Punkten pro Scan immerhin noch 10 000 Messpunkten, aus denen eine Ebene geschätzt wird.

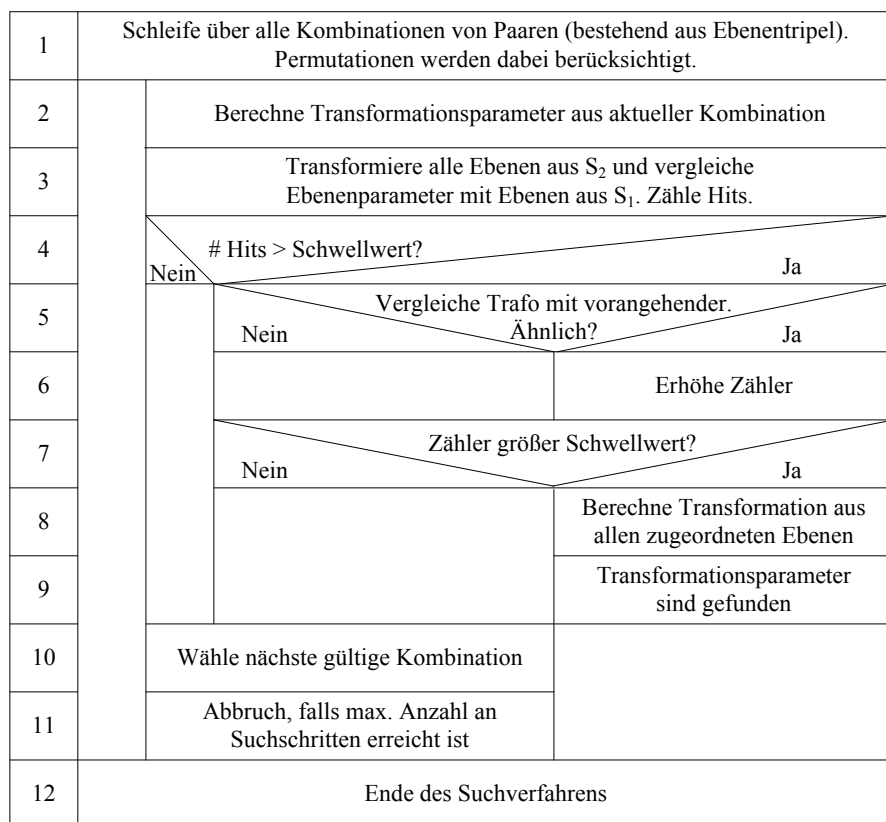


Abb. 6.8: Struktogramm des Suchverfahrens.

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombinationen jeweils drei Ebenen aus den Scans zweier Standpunkte miteinander zu kombinieren, ist eine Strategie für die Wahl von günstigen Paarungen an Ebenentripeln erforderlich. Aus den nach dem Spatprodukt sortierten Listen mit Ebenentripel werden diejenigen Tripel mit dem größten Wert des Spatprodukts zuerst für die Berechnung der Transformationsvorschrift verwendet. Dabei sind aus den Listen L_1 und L_2 nur Kombinationen zugelassen, bei denen das Spatprodukt s_i und s_j der gewählten Tripel einen ähnlichen Wert aufweist. Im Gegensatz zur formbasierten Zuordnung von Ebenen ist hier außer einem ähnlichen Wert des Spatprodukts kein Anhaltspunkt für eine korrekte Korrespondenz der Ebenen gegeben. Daher müssen wie in Abschnitt 6.1.2 erläutert auch noch die Permutationen der Ebenen aus L_2 berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass nach der Bestimmung der Transformation aus jedem getesteten

Merkmalspaar eine Fitnessfunktion für die Bewertung der Güte der Transformation unerlässlich ist, da durch die Berücksichtigung der Permutationen auch falsche Lösungen berechnet werden.

Abbildung 6.8 zeigt ein Struktogramm des Suchverfahrens. Im ersten Schritt werden lediglich Zuordnungen verwendet, welche über das Spatprodukt gebildet wurden und zueinander kompatibel sind. Eine Schleife läuft über alle möglichen Zuordnungen und berücksichtigt die Permutationen. Die folgenden Schritte werden in den nächsten Abschnitten erläutert. Die Stufen drei und vier des Algorithmus reduzieren die Zahl der möglichen Lösungen über eine Fitnessfunktion und die Schritte 5-12 wählen gemäß einer Heuristik eine plausible Transformationsvorschrift aus der Lösungsmenge.

6.3.2 Berechnung eines Fitnesswertes für die Transformationsvorschriften

Die bei diesem Verfahren verwendete Fitnessfunktion transformiert mit den aus dem aktuellen Merkmalspaar berechneten Parametern alle extrahierten Ebenen aus S_2 und vergleicht diese mit den Ebenen aus S_1 . Dabei werden Ebenenpaare mit ähnlichen Parametern gezählt. Zwei Ebenen gelten als ähnlich, wenn sie sowohl einen ähnlichen Normalenvektor $\mathbf{n} = (a, b, c)$ wie auch einen ähnlichen Abstand zum Ursprung d besitzen. Die Transformation des zu registrierenden Scans erfolgt nach Gleichung 3.25. Die Anzahl ähnlicher Ebenen (*Hits*) wird als Maß für die Güte der Transformation verwendet. Die Ähnlichkeit der Normalenvektoren ist über den Winkel zwischen den Vektoren definiert, der sich über das Skalarprodukt berechnen lässt. Die Ähnlichkeit des Abstands zum Ursprung d wird über die Differenz bewertet. Ist der Absolutbetrag der Differenz der Winkel und der Abstände zum Ursprung kleiner als definierte Schwellwerte, gelten die Ebenen als ähnlich. Ausgedrückt in Gleichungen bedeutet dies:

$$\begin{aligned} \arccos(\langle \mathbf{n}_1, \mathbf{n}'_2 \rangle) &\leq \theta \\ |d_1 - d'_2| &\leq \delta \end{aligned} \quad (6.7)$$

Die Vektoren $\mathbf{n}_i$ und die Abstände d_i sind dabei die Parameter der ursprünglichen bzw. der transformierten Ebenengleichung. Der Winkel θ ist der definierte Schwellwert für die Winkeldifferenz und δ der Schwellwert für die Differenz der Distanz. Die Schwellwerte müssen derart gewählt werden, dass bei einem korrekt gewählten Merkmalspaar von Ebenentripeln die Anzahl ähnlicher Ebenen richtig ermittelt werden kann. Liegen die Schwellwerte unterhalb der Genauigkeit der Ebenenextraktion, so werden richtige Lösungen fälschlicherweise verworfen. Sind die Schwellwerte zu groß gewählt, werden auch falsche Lösungen als korrekt bewertet. Geeignete Schwellwerte können empirisch ermittelt werden, hierfür werden sie schrittweise in einem definierten Bereich variiert, und jeweils die Zahl der Hits berechnet. Abbildung 6.9 zeigt die Auswirkung der Schwellwerte auf die Gütefunktion für eine korrekte und falsche Lösung für verschiedene Bereiche der Schwellwerte.

Aus den Grafiken 6.9 (a) und (c) können die unteren Grenzen für die Schwellwerte abgeleitet werden. Für eine Winkeldifferenz der Normalenvektoren von $1,5^\circ$ und für eine Abstandsdifferenz der Distanz zum Ursprung von 0,3 m wird beim Vergleich der Ebenenparameter bereits eine beachtliche Anzahl an Hits erreicht. Die erreichbare Genauigkeit der Transformationsbestimmung aus identischen Ebenen setzt in diesem Beispiel die Grenze. Eine Abschätzung der oberen Grenze wird anhand der Grafiken 6.9 (b) und (d) für die falschen Lösungen vorgenommen. In diesem Beispiel wird eine ähnlich hohe Zahl an Hits selbst für große Schwellwerte nicht erreicht, die Wahl der oberen Grenze ist damit unkritisch.

Theoretisch betrachtet kann sich das Kriterium für die Ähnlichkeit des Parameters d in bestimmten Situationen negativ auf die Suche nach Korrespondenzen auswirken. Liegen die Ebenen weit vom Ursprung des Koordinatensystems, und somit auch vom Standpunkt des Lasermessinstruments, entfernt, können selbst geringe Abweichungen in der Orientierung von zugeordneten Ebenen eine große Auswirkung auf das Ähnlichkeitskriterium $|d_1 - d'_2| \leq \delta$ haben. Abbildung 6.10 verdeutlicht dies anhand einer zweidimensionalen Skizze.

Obwohl die Ebenen 1 und 2' ähnlich zueinander orientiert sind, ist in diesem Fall ein simpler Vergleich des Ebenenparameters d ungünstig. Daher wird ein alternatives Ähnlichkeitsmaß vorgeschlagen, welches die gezeigte Situation umgeht. Anstelle eines einfachen Vergleichs des Parameters d kann der Abstand zwischen den Ebenen als Ähnlichkeitsmaß verwendet werden. Hierfür wird jeweils der Abstand eines Punktes der Ebene (z. B. der Schwerpunkt) zu jeder Ebene anhand folgender Gleichungen berechnet.

$$\begin{aligned} e_1 &= |a_2 \cdot \bar{x}_1 + b_2 \cdot \bar{y}_1 + c_2 \cdot \bar{z}_1 + d_2| \\ e_2 &= |a_1 \cdot \bar{x}_2 + b_1 \cdot \bar{y}_2 + c_1 \cdot \bar{z}_2 + d_1| \end{aligned} \quad (6.8)$$

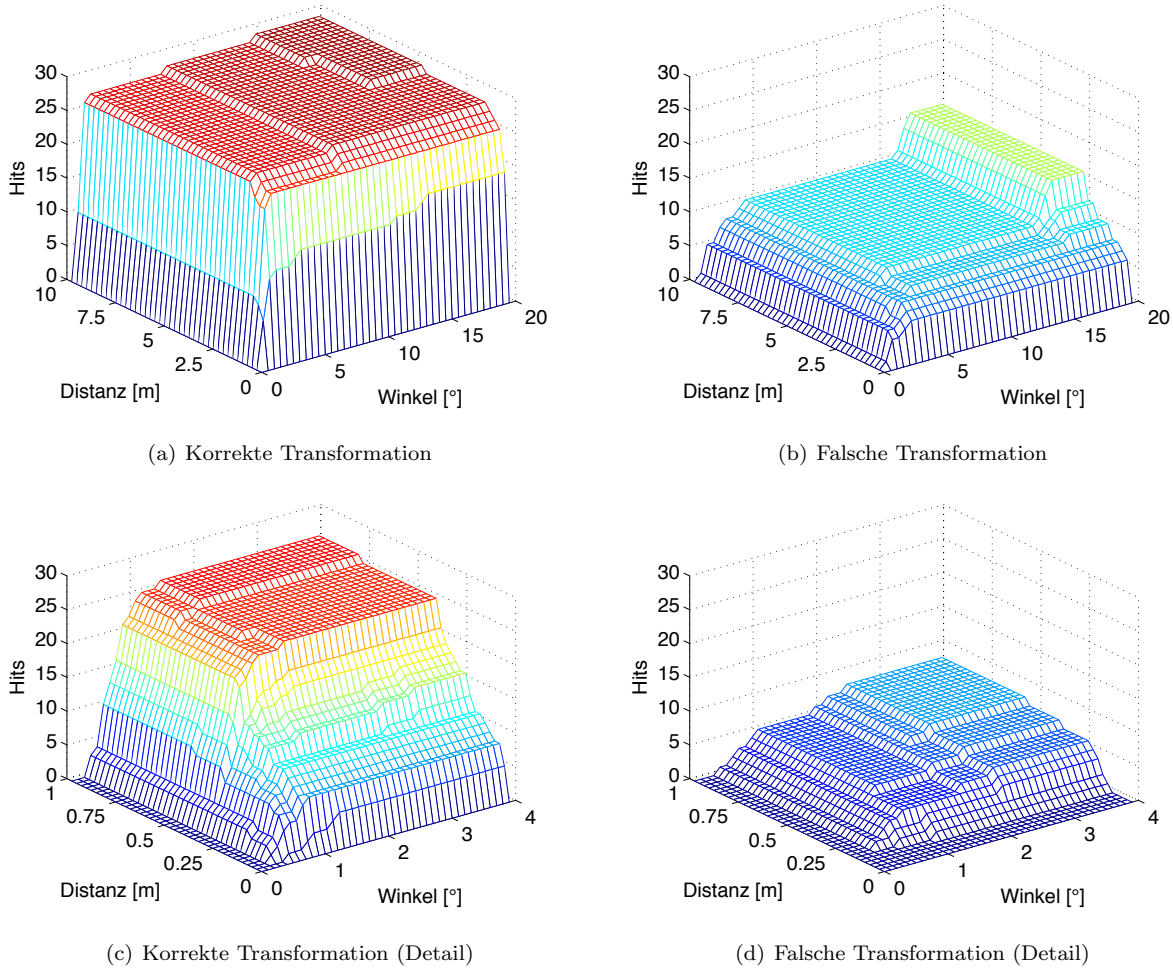


Abb. 6.9: Abhängigkeit der Gütefunktion von den Schwellwerten θ (Differenz der Winkel) und δ (Differenz der Abstände).

Zwei Ebenen gelten wiederum als ähnlich, falls $e_1 + e_2 \leq \delta$ ist. Ein weiterer Vorteil von diesem Vergleichskriterium ist, dass der benötigte Schwellwert mit der Segmentierungsgenauigkeit der Ebenen zusammenhängt und somit direkt angegeben werden kann. Er wird aus der Standardabweichung der Ebenenschätzung abgeleitet.

Praktische Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der einfache Vergleich des Parameters d keinen wesentlichen Nachteil bei dem verwendeten Zuordnungsverfahren mit sich bringt. Dies wird damit begründet, dass mögliche Zuordnungen lokal durch den Messbereich eines Lasermessinstruments eingeschränkt sind. Auch für weiter entfernt gelegene Standpunkte mit kleineren Überlappungsbereichen zwischen den Scans sind keine nennenswerten Unterschiede in den Ergebnissen durch eine Variation der Vergleichskriterien aufgetreten. Da der zusätzliche Rechenaufwand für die Berechnung des Schwerpunkts zu jeder geschätzten Ebene sowie die Berechnung der Abstände vernachlässigbar ist, wird die Verwendung des Abstandskriterium dem einfachen Vergleich des Ebenenparameters d jedoch vorgezogen. Aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchung wurden für Berechnung der Fitnessfunktion Schwellwerte im Bereich von 1.5° - 4.0° für θ und 0.3 m - 1.0 m für δ verwendet.

6.3.3 Heuristik für die Wahl der korrekten Lösung

Für die Auswahl einer Lösung aus den möglichen Kandidaten wird bei diesem Verfahren für die orientierungs-basierte Zuordnung eine Heuristik angewandt. Nach der Berechnung des Fitnesswertes wird zuerst anhand eines Schwellwertes entschieden, ob die berechnete Transformationsvorschrift ein möglicher Kandidat für eine globale Lösung ist. Für diesen Fall wird die Transformationsvorschrift und die Zahl der erreichten Hits gespeichert. Da auch falsche Zuordnungen zu einer Anzahl an Hits führen können, die oberhalb der gesetzten Schwellwertgrenze liegt, wird nicht bereits beim ersten Treffer die Suche abgebrochen, sondern weitere Zuordnungen überprüft bis eine gewisse Anzahl an ähnlichen Lösungen aufgetreten ist. Es wird angenommen, dass im Schnitt Lösungen

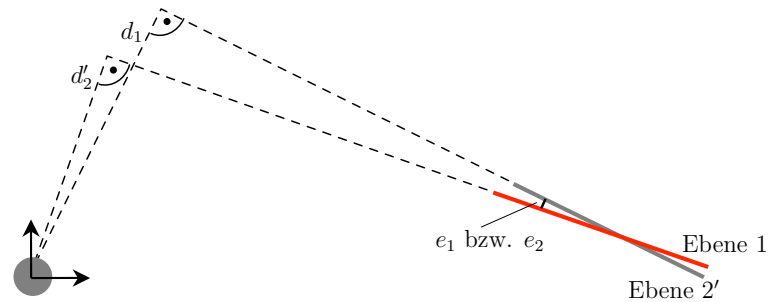


Abb. 6.10: Auswirkung des Ähnlichkeitskriterium für den Abstand d bei korrespondierenden Ebenen in großer Entfernung vom Ursprung.

mit einer hohen Anzahl an Hits öfter auftreten als falsche Lösungen. Beim Durchlaufen der Zuordnungen wird daher ein Zähler für die Zuverlässigkeit der Lösung geführt (vgl. Schritt 6 im Struktogramm des Verfahrens in Abb. 6.8). Das Verfahren bricht schließlich ab, sofern ein vorab festgelegter Schwellwert erreicht ist, der die Anzahl ähnlicher Transformationen angibt. Die als korrekt angesehene Lösung ergibt sich schließlich durch eine vermittelnde Ausgleichung aller kompatiblen Ebenenpaare. Ein zusätzliches Abbruchkriterium ist durch eine maximale Anzahl an Suchschritten definiert, wodurch die maximale Laufzeit des Algorithmus begrenzt ist. Daher muss bei diesem Vorgehen eine korrekte Lösung gefunden werden, bevor die Suche abgebrochen wird. Dies ist in der Regel durch die priorisierte Liste gegeben, bei der günstige Merkmalspaare zuerst betrachtet werden.

Die Wahl der Schwellwerte für die Zahl der Hits und für die Mindestanzahl ähnlicher Lösungen beeinflusst den Abbruch des Suchverfahrens. Dies wird in den Diagrammen der Abbildung 6.11 verdeutlicht, in (a) wurden aus den segmentierten Scandaten mit 30 Ebenen pro Scan anhand des Spatprodukts jeweils 138 Merkmalspaare ausgewählt. Insgesamt führten 53 274 mögliche Zuordnungen durch eine Gruppierung ähnlicher Lösungen zu 361 verschiedenen Transformationsvorschriften. Für jede Lösung wurde die Zahl der Hits mit der Gütefunktion berechnet und entsprechend der Gruppierung gemittelt. Zwar ergeben sich für eine korrekte Zuordnung, welche im Beispiel ganz links dargestellt ist, sowohl die größte Zahl an korrekten Zuordnungen (2 742) als auch die meisten Hits, aber auch ähnliche falsche Lösungen können in beträchtlicher Anzahl zustande kommen. In diesen Fällen muss die Lösung anhand der Fitnessfunktion (Anzahl der Hits) verworfen werden, die ebenfalls in dem Diagramm dargestellt ist und für falsche Transformationsvorschriften einen geringen Wert aufweist.

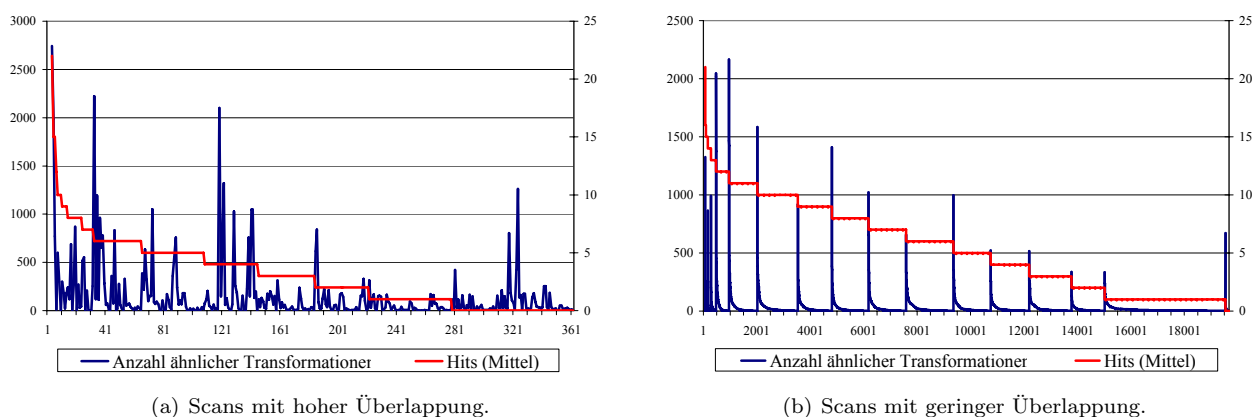


Abb. 6.11: Anzahl mehrfach gefundener, ähnlicher Transformationen und die Zahl entsprechender Hits.

Das Diagramm in Abbildung 6.11 (b) zeigt ein zweites Beispiel, bei dem der Überlappungsbereich der Scans deutlich geringer ist (ca. 50%), und die Merkmalspaare aus jeweils 50 segmentierten Ebenen ausgewählt wurden. Durch die größere Anzahl an Ebenen steigt die Zahl der untersuchten Zuordnungen vor Abbruch des Suchverfahrens auf 464 151 und die Zahl ähnlicher Transformationsvorschriften auf 19 608. Dennoch ist die Zahl der Hits auch bei diesem Beispiel ein stabiles Kriterium für die Detektion der korrekten Lösung, obwohl andere Transformationsvorschriften häufiger auftauchen. Anhäufungen ähnlicher Transformationen, wie sie auch an den Spitzen in den Abbildungen zu sehen sind, können durch Symmetrien in den Daten und den entsprechenden Segmentierungen entstehen. Gerade in Stadtszenen mit regelmäßiger und symmetrischer

Bebauung sind Symmetrien keine Seltenheit. Dadurch ergeben sich bei der Segmentierung der Scandaten viele Ebenen mit ähnlicher Orientierung im Raum, die entsprechend häufig mit anderen Ebenen kombiniert werden.

6.4 Verwendung von Winkelbedingungen für die Zuordnung

Ein weiteres Verfahren für die Bestimmung der relativen Orientierung zwischen den Standpunkten von terrestrischen Laserscans verwendet Winkelbedingungen zwischen den extrahierten Ebenen. Das Verfahren wurde von Brenner und Dold (2007) vorgestellt und umgeht Schwachstellen des Zuordnungsverfahrens basierend auf dem Spatprodukt. Anstatt die Merkmalspaare anhand der Normalenvektoren der Ebenen über eine einzige Kennzahl (Spatprodukt) zu bilden, werden hier die eingeschlossenen Winkel zwischen den Normalenvektoren verwendet. Durch diese Restriktion kann die Zahl der möglichen Kombinationen eingeschränkt werden. Das Ziel des Verfahrens ist es, durch einfache und schnelle Tests eine möglichst hohe Zahl an Merkmalspaaren auszusortieren und dabei korrekte Merkmalspaare in der Lösungsmenge zu belassen. Bei diesem Verfahren erfolgt zunächst keine Bewertung der möglichen Lösungen über eine Güte- oder Fitnessfunktion, stattdessen werden Lösungsgruppen gebildet und die Häufigkeit ähnlicher Lösungen gezählt. Um die Komplexität des Suchraums zu verringern, werden bei diesem Verfahren außerdem die Rotation und die Translation getrennt voneinander bestimmt.

In Kapitel 3.2.1 wurde bereits gezeigt, dass die extrahierten Richtungsvektoren der Ebenen aus dem Segmentierungsschritt sehr genau sind. Bei der Verwendung eines Winkelkriteriums für die Bildung von Merkmalspaaren können somit sehr enge Toleranzen gesetzt werden. Das Histogramm in Abbildung 6.12 zeigt die Differenz zwischen den Winkeln zweier Normalenvektoren für korrespondierende Merkmalspaare. Für diese Untersuchung wurden Korrespondenzen der Ebenen zwischen verschiedenen Scans manuell ermittelt und insgesamt die Differenz der eingeschlossenen Winkel von 328 Merkmalspaaren betrachtet. Bereits deutlich über 50% der Paare weisen eine Differenz kleiner als $0,5^\circ$ auf und für mehr als 90% ist die Differenz kleiner als 1° . Dies deutet darauf hin, dass die Berücksichtigung der Winkel zwischen den Ebenen ein geeignetes Kriterium für die Eingrenzung des Suchraums darstellt.

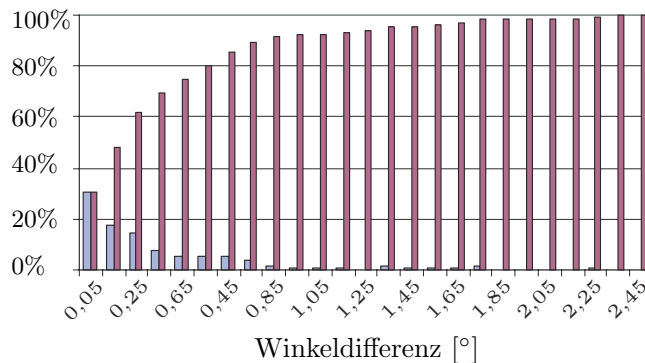


Abb. 6.12: Histogramm und kumuliertes Histogramm für die Differenz zwischen den Normalenvektoren korrespondierender Ebenenpaare.

Rotationsbestimmung

Für die Suche nach der korrekten Orientierung zwischen zwei Laserscans reichen zwei Ebenenpaare aus (siehe Abschnitt 3.2.1), wodurch sich die Anzahl der Kombinationen auf $p_1^2 (p_2 - 1)^2 / 2$ Möglichkeiten (vgl. Gleichung 6.1 für zwei identische Ebenen) reduziert. Bei $p = p_1 = p_2 = 50$ Ebenen pro Scan verbleiben somit 3 001 250 mögliche Kombinationen für die Berechnung der Rotationskomponente. Diese Zahl kann entscheidend reduziert werden, indem nur Kombinationen von Ebenenpaaren betrachtet werden, deren eingeschlossener Winkel zwischen den Normalenvektoren ähnlich ist. Bei diesem Verfahren werden zunächst pro Scan $\binom{p}{2} = 1225$

Winkel berechnet und anschließend anhand ähnlicher Winkel gültige Merkmalspaare gebildet. Durch eine Einteilung der berechneten Winkel des Scans S_2 in Gruppen (z. B. mit einer Abstufung von 1°), wird das Durchlaufen der drei Millionen Kombinationen umgangen. Für ein Ebenenpaar aus S_1 können die Merkmalspartner schnell aus der entsprechenden Gruppe entnommen werden. Für alle gültigen Merkmalspaare werden die entsprechenden Rotationswinkel berechnet. Der Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren (siehe Tabelle 3.2) hat gezeigt, dass bei zwei Merkmalspaaren die Rotationskomponente sehr schnell mittels Vektoroperationen oder Orthonormalmatrizen bestimmt werden kann. Aufgrund der besseren Genauigkeit

in der Bestimmung aller drei Rotationswinkel wird hier das Verfahren der Orthonormalmatrizen verwendet. Die berechneten Rotationen werden wiederum nach ähnlichen Rotationswinkel (ω, ϕ, κ) gruppiert und eine Rangfolge nach der Häufigkeit ähnlicher Rotationen erstellt. Für eine anschließende Verifikation der korrekten Lösung ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die korrekte Transformation der Gruppe mit der größten Anzahl an ähnlichen Transformationen entspricht.

1	Berechnung der eingeschlossenen Winkel zwischen den Normalenvektoren der Ebenen in S_1 und S_2 (je Scan $\binom{P}{2}$ Kombinationen)	
2	Schleife über alle Kombinationen aus S_2	
3		Winkel von S_2 entsprechend des Winkelwerts in Gruppen einteilen
4	Aufbau des Suchraums mit k Merkmalspaare, indem Ebenentupel aus S_1 mit den Tupeln der entsprechenden Winkelgruppe aus S_2 gebildet werden. Schleife über k .	
5		Berechnung der Rotationskomponente aus dem Merkmalspaar
6		Gruppierung der Lösung nach den berechneten Rotationswinkel (ω, ϕ, κ)
7	Anhand der Häufigkeit ähnlicher Lösungen wird eine Rangfolge für mögliche Lösungskandidaten gebildet.	
8	Berechnung der Translation mit dem RANSAC-Algorithmus. Aus den Gruppen der Rotationstupel werden pro Scan zwei gezogen. Schleife über die Ziehungen.	
9		Berechnung der Translation aus vier korrespondierenden Ebenenpaaren mittels einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate.
10		Anwendung einer Fitnessfunktion auf das Ergebnis. Dabei werden Ebenen mit ähnlicher Orientierung gezählt
11	Bildung einer Rangfolge nach den Fitnesswerten. Ende des Verfahrens.	

Abb. 6.13: Struktogramm des Zuordnungsverfahren nach Winkel.

Bestimmung der Translation

Für die Berechnung der Translation werden die für die Bestimmung der Rotationskomponente verwendeten Ebenentupel betrachtet. Hierzu muss zu jedem Tupel eine dritte Ebene hinzugefügt werden. Theoretisch existieren bei k Merkmalspaaren $k \cdot (p_1 - 2) \cdot (p_2 - 2)$ Möglichkeiten ein vollständiges Merkmalspaar zu bilden, allerdings wird diese Zahl durch das Winkelkriterium reduziert.

Anstelle des Hinzufügens einer Ebene zu jedem Tupel, werden bei diesem Verfahren der Einfachheit halber jeweils zwei Ebenentupel miteinander kombiniert und die gesuchte Translation über eine vermittelnde Ausgleichung berechnet (vgl. Kapitel 3.2.2). Da die Zahl der Möglichkeiten zwei Tupel miteinander zu kombinieren ($k \cdot (k - 1) \cdot \frac{1}{2}$) für eine erschöpfende Suche zu hoch ist, wird an dieser Stelle des Verfahrens der RANSAC-Algorithmus angewandt und eine Untermenge an Tupel-Paaren zufällig ausgewählt. Für die Berechnung des Konsens werden entsprechend dem Suchverfahren basierend auf dem Spatprodukt die Zahl an ähnlichen Ebenen bestimmt. Das Struktogramm in Abb. 6.13 zeigt zusammenfassend den Ablauf des Verfahrens.

6.5 Fitnessfunktionen für die Verifikation von Lösungskandidaten

Eine Zuordnung von Ebenen für die Registrierung von Laserscans liefert mehrere Varianten für eine Transformationsvorschrift, aus denen eine Lösung herausgefiltert werden muss. In den vorigen Abschnitten wurden Algorithmen vorgestellt, die im ersten Schritt die Möglichkeiten an Zuordnungen über Bedingungen eingeschränkt haben und die korrekte Lösung über eine Heuristik oder der Bildung einer Rangfolge ermittelt haben. Dabei werden bestimmte Lösungsmengen bevorzugt, aber dennoch liefern die Verfahren verschiedene Lösungsvarianten für die gesuchte Transformationsvorschrift.

Der letzte Schritt ist somit die Verifikation der Lösungskandidaten. Ein übliches Kriterium für die Berechnung eines Fitnesswerts ist die Überlappung zwischen den registrierten Laserscanner Standpunkten. Allerdings ist der Anteil der Überlappung nicht im Vorfeld bekannt und insbesondere bei weiter voneinander entfernten Standpunkten kann die Überlappung für eine falsche Transformationsvorschrift durchaus größer sein als für die korrekte Transformation. Abbildung 6.14 zeigt hierzu ein Beispiel, eine verkippte und verschobene Transformation kann zu einem größeren Überlappungsbereich führen als die korrekte Lösung. Die Aufgabe einer Fitnessfunktion liegt nun darin, über einen berechneten Fitnesswert ein deutliches Indiz für das Vorliegen der korrekten Lösung zu geben. Daher muss die Fitnessfunktion gegenüber falschen Orientierungen möglichst sensibel sein.

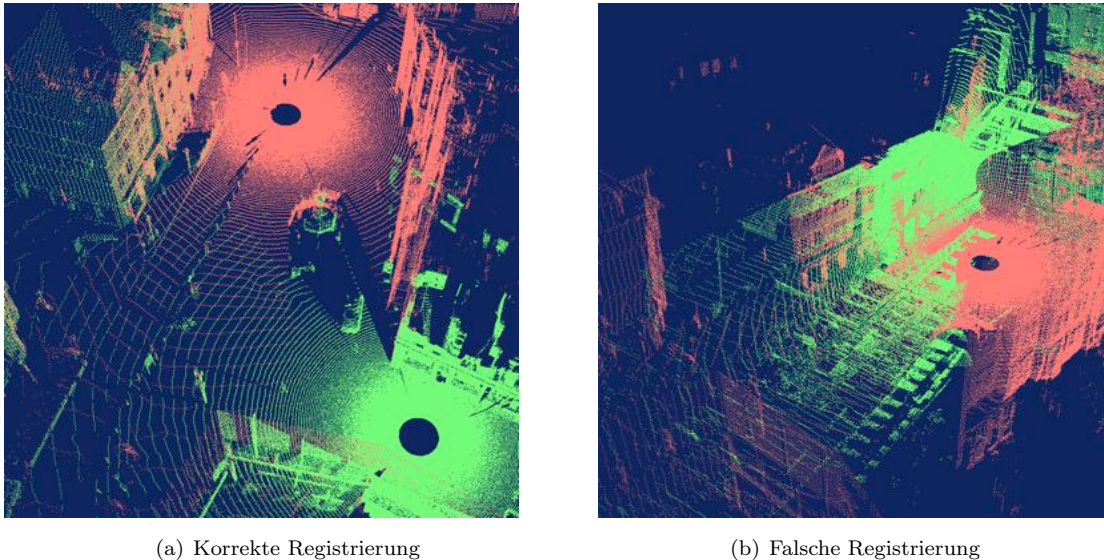


Abb. 6.14: Beispiel für eine falsche Registrierung, die zu einem größeren Überlappungsbereich führen kann als die korrekte Lösung.

Die Berechnung eines Fitnesswerts, welcher auf dem Vergleich extrahierter Ebenen basiert, wurde bereits in Abschnitt 6.3.2 im Zusammenhang mit dem orientierungsbasierten Suchverfahren erläutert. Die Funktion vergleicht die Normalenvektoren und den Abstand vom Ursprung der Ebenen und ist rechentechnisch sehr schnell, da nur wenige Vergleiche durchgeführt werden müssen. Bei p_1 und p_2 extrahierten Ebenen in S_1 und S_2 sind lediglich $p_1 \cdot p_2$ Berechnungen erforderlich. Der Fitnesswert ergibt sich aus dem Anteil ähnlicher Ebenen.

In den nächsten Abschnitten werden nun weitere Fitnessfunktionen beschrieben, welche auf verschiedene Art und Weise die Überlappung zwischen zwei Standpunkten bewerten. Dabei werden Fitnessfunktionen vorgestellt, die auf den Messpunkten selbst basieren und somit mehr Informationen als extrahierte Ebenen aus den aufgenommenen Daten nutzen können.

6.5.1 Kompatible Punkte

Das Ziel dieser Fitnessfunktion ist die Bestimmung der Überlappung zwischen zwei Standpunkten S_1 und S_2 über die Zahl der Scanpunkte, die an ähnlicher Stelle erfasst wurden. Hierzu werden alle Punkte des zu registrierenden Standpunkts S_2 transformiert und ähnliche Punkte gezählt, deren Abstand zueinander kleiner als ein definierter Schwellwert ist. Im Gegensatz zur Fitnessfunktion basierend auf dem Ebenenvergleich sind hier erheblich mehr Berechnungen erforderlich. Allerdings wird hier der Einfluss von großen Regionen besser berücksichtigt, da jeder Messpunkt mit in die Berechnung des Fitnesswerts einfließt und mehrere Punkte nicht zu einer Ebene gruppiert werden.

Damit nicht alle Punkte miteinander verglichen werden müssen, wurde eine Datenstruktur bestehend aus Volumen-Elementen (Voxel) implementiert. Über die Punktwolke wird ein regelmäßiges Raster aus Voxel gelegt und die Punkte anhand ihrer Koordinaten in das entsprechende Voxel einsortiert. Der Aufbau der Datenstruktur ist nur einmalig für den Referenzstandpunkt S_1 erforderlich. Bei der Suche nach ähnlichen Punkten muss S_2 transformiert werden und für jeden Punkt in dem entsprechenden Voxel von S_1 nach einem kompatiblen Punkt gesucht werden. Als Kriterium der Kompatibilität wird der räumliche Abstand der Punkte zueinander verwendet. Bei der Suche muss auch berücksichtigt werden, dass Punkte am Rand eines Voxels

liegen können und sich der nächste Punkte somit in einem benachbarten Voxel befindet. Daher müssen entweder auch die benachbarten Voxel auf kompatible Punkte überprüft werden, oder die Punkte von S_1 werden beim Aufbau der Datenstruktur jeweils auch in alle benachbarte Voxel einsortiert. Die letzte Variante ist jedoch für große Punktmengen nicht geeignet, da sich der Speicherbedarf durch das zusätzliche Ablegen der Punkte in allen 26 benachbarten Voxel erheblich erhöht.

Trotz der Datenstruktur ist der Aufwand für die Berechnung des Fitnesswerts bei mehreren Millionen Punkten groß und kann nicht in vertretbarer Zeit für mehrere Varianten an Transformationsvorschriften durchgeführt werden. Es ist aber möglich, die Voxelstruktur für eine Ausdünnung der Daten zu nutzen. Anstatt mehrere Messpunkte in einem Voxel abzulegen wird jeweils nur ein Mittelwert der Koordinaten gespeichert. Die Voxelgröße definiert den Grad der Ausdünnung. In diesem Fall wird die Datenstruktur auch für S_2 im Vorfeld berechnet und reduziert somit die Zahl der Punkte für die eine Transformation berechnet und ein kompatibler Punkt gesucht werden muss.

Notwendige Parameter für die Fitnessfunktion sind die Größe der Voxel sowie der maximale Abstand zwischen kompatiblen Punkten. Während der erste Parameter bei einer nicht ausgedünnten Datenstruktur lediglich einen Einfluss auf die Laufzeit der Suche und den Speicherbedarf hat, ist der Schwellwert für den maximalen Abstand für den erzielten Wert der Fitnessfunktion relevant. Testreihen haben gezeigt, dass kleinere Voxelgrößen effizienter sind, da dadurch jedes Voxel weniger Punkte enthält und somit die Suche nach kompatiblen Punkten aufgrund der geringeren Zahl an erforderlichen Vergleichen schneller ist. Allerdings sollte dabei die Voxelgröße nicht den Schwellwert für den Abstand δ unterschreiten, damit auch kompatible Punkte in den Voxeln gefunden werden. Für die Festlegung eines geeigneten Abstand-Schwellwerts wurde die Fitnessfunktion auf drei Standpunktkombinationen mit unterschiedlicher Überlappung angewandt und dabei der Schwellwert variiert. Abbildung 6.15 zeigt ein Histogramm der Ergebnisse. Für zu kleine Schwellwerte wird der optimale Fitnesswert nicht erreicht. Ab einer gewissen Größe entspricht der Fitnesswert in etwa der Überlappung und ändert sich nur noch geringfügig. Aufgrund der Untersuchung wurde der Schwellwert auf den Wert $\delta = 0,15m$ festgelegt.

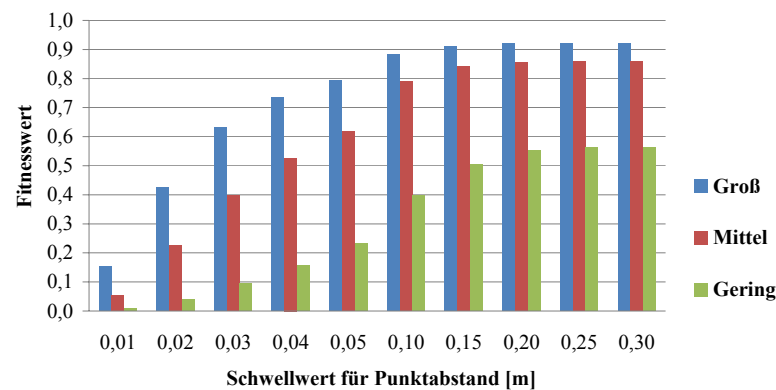


Abb. 6.15: Erreichte Fitnesswerte für kompatible Punkte mit variierendem Distanz-Schwellwert für Scanpositionen mit großer, mittlerer und geringer Überlappung.

6.5.2 Box-basierte Fitnessfunktion

Diese Fitnessfunktion verwendet ebenfalls eine voxel-basierte Datenstruktur für die Ermittlung von kompatiblen Punkten. Um die Datenmenge zu verringern werden hier aber nicht die einzelnen Punktkoordinaten x , y und z gespeichert, sondern lediglich ein binärer Wert der anzeigt, ob ein Voxel belegt ist oder nicht. Da die Repräsentation der Punktwolke durch einfache Boxen erfolgt, wird in diesem Zusammenhang von einer box-basierten Fitnessfunktion gesprochen. Der Flag einer Box wird auf wahr gesetzt, sobald wenigstens ein Punkt innerhalb der Box zu liegen kommt. Bei der Berechnung des Fitnesswerts wird dann für die transformierten Punkte des zu registrierenden Scans lediglich überprüft, ob der Punkt innerhalb einer gültigen Box liegt.

Die Größe einer Box definiert somit den maximal gültigen Punktabstand zwischen zwei Punkten, die als übereinstimmend gezählt werden. Der Vorteil dieser Fitnessfunktion ist, dass bei sinnvollen Boxgrößen (auch hier hat sich der Wert $\delta = 0,15m$ als praktikabel erwiesen) der Speicherbedarf für die Datenstruktur der Referenzpunktwolke geringer ist und für jeden Punkt sehr schnell entschieden wird, ob ein kompatibler Punkt vorliegt oder nicht. Der Nachteil dieser Datenstruktur ist, dass je nach Boxgröße die Referenzdaten stark reduziert werden und Informationen verworfen werden.

6.5.3 Scanraster-basierte Fitnessfunktion

Diese Fitnessfunktion sucht ebenfalls kompatible Punkte zwischen zwei Laserscans für eine gegebene Transformationsvorschrift, nutzt aber direkt die rasterförmige Datenstruktur (4.3). Dadurch entfällt der aufwändige Aufbau einer neuen Datenstruktur für die Referenzpunktwolke. Die Laserscans liegen bereits in der vorgestellten Rasterstruktur vor, die konstante Winkelinkremente zwischen den Messpunkten aufweist.

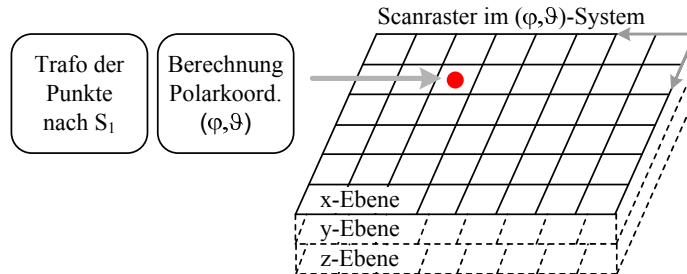


Abb. 6.16: Prinzip des Datenzugriffs auf die gerasterten Scandaten für die Bestimmung der kompatiblen Punkte.

Für die Berechnung des Fitnesswerts wird wieder jeder Messpunkt aus S_2 transformiert und in Polarkoordinaten umgerechnet. Anhand der Polarkoordinaten kann direkt auf die Rasterzelle in S_1 zugegriffen werden, in welcher sich der kompatible Punkt befinden müsste. Ist die Distanz zwischen den zwei Punkten kleiner als ein Schwellwert (auch hier wurde jeweils der Wert $\delta = 0,15m$ verwendet), so gelten die Punkte als korrespondierend und der Fitnesswert wird erhöht.

6.5.4 Kompatible Punkte und Normalenvektoren

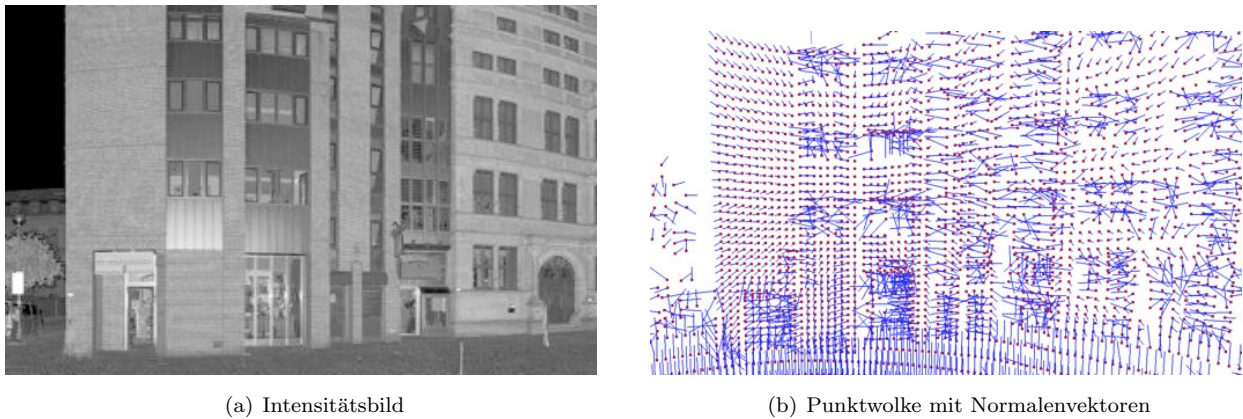
Diese Fitnessfunktion ist eine Erweiterung der Fitnessfunktion basierend auf den kompatiblen Punkten. Als zusätzliches Kriterium für die Suche nach Übereinstimmungen wird die Normalenrichtung der gemessenen Punkte integriert. Die Normalen der Punkte werden durch eine lokale Ebenenschätzung bestimmt, die Nachbarschaften sind durch das Scanraster gegeben. Ein Punkt trägt nur zu dem Fitnesswert bei, wenn sowohl der transformierte Punkt und Normalenvektor ähnlich sind. Für die Berechnung des Fitnesswerts wird wieder die Voxel-Datenstruktur angewendet und zu jedem Punkt ein zusätzlicher Richtungsvektor abgespeichert.

Durch das zusätzliche Kriterium soll der Fitnesswert selektiver werden, da nur noch Messpunkte für den Fitnesswert einen Beitrag leisten, die auf einer Ebene gemessen wurden und somit gut bestimmt sind. Messpunkte an Kanten oder Vegetation haben üblicherweise keinen kompatiblen Normalenvektor. Abbildung 6.17 zeigt den Ausschnitt eines Scans als Intensitätsbild und die zugehörige Punkt wolke (stark ausgedünnt) mit den entsprechenden Richtungsvektoren. Bodenpunkte und Punkte auf den Fassaden weisen über die gesamte Fläche hinweg homogene Normalenrichtungen auf, während die Richtungen bei Vegetationspunkten oder in Fenstern stark streuen. Somit ist diese Funktion ähnlich zu dem Zählen kompatibler Ebenen, allerdings wird die Größe einzelner Ebenen durch das Zählen der Punkte stärker berücksichtigt.

6.6 Integration von Bilddaten in die ebenenbasierte Registrierung

Bei der Registrierung von Laserscanning Daten, welche mit hybriden Sensoren erfasst worden sind, können die zusätzlich erfassten Bilddaten mit in den Prozess der Registrierung einbezogen werden. Sind der Laserscanner und der bildgebende Sensor zueinander kalibriert, so können zu jedem gemessenen Objektpunkt die entsprechenden Bildkoordinaten berechnet werden (siehe Abschnitt 2.3.5). Die Bilddaten können bei der Registrierung von TLS-Daten anhand korrespondierender Ebenen weitere Informationen liefern, die den Prozess der Registrierung verbessern. Ein Konzept für die Integration der Bilddaten wurde in Dold und Brenner (2006) vorgestellt. Insbesondere für die Bestimmung der Translationskomponente sind die zusätzlichen Daten hilfreich. Nach der Bestimmung der Rotationskomponente kann die Translation über eine Korrelation der Bilddaten ermittelt werden und somit auf ein drittes Ebenenpaar für die Berechnung der Transformationsvorschrift verzichtet werden.

Straßenzüge in städtischen Gebieten sind häufig von parallel zueinander stehenden Häuserreihen geprägt. In den Scandaten dominieren somit ebene Regionen, welche zum einen durch die Straßenoberfläche und zum anderen durch die Fassaden der angrenzenden Gebäude gebildet werden. Bei einer Registrierung der Scandaten



(a) Intensitätsbild

(b) Punktwolke mit Normalenvektoren

Abb. 6.17: Intensitätsbild einer Fassade und die ausgedünnte Punktwolke mit lokal geschätzten Richtungsvektoren. Nur in homogenen Bereichen ist i. d. R. eine Übereinstimmung von Messpunkt und Richtungsvektor gegeben.

durch eine Zuordnung von ebenen Regionen ist daher oft das Auffinden korrespondierender Ebenen, die alle drei Raumrichtungen abdecken, problematisch. Die vorwiegend vorhandenen Hauptrichtungen sind in der schematischen Abb. 6.18 durch grüne Pfeile hervorgehoben. Regionen senkrecht zur Straßenachse (in der Abbildung durch einen roten Doppelpfeil angedeutet) sind seltener vorzufinden oder fehlen häufig gänzlich. Dadurch kann die Transformationsvorschrift nicht vollständig aus korrespondierenden Ebenen ermittelt werden, eine Translationskomponente bleibt unbestimmt. Mit Hilfe der Bilddaten ist es möglich, den fehlenden Translationsanteil zu ermitteln.

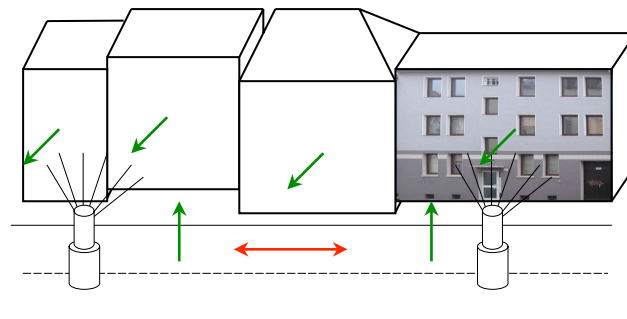


Abb. 6.18: Schematische Darstellung eines Straßenzugs.

Nach der Ermittlung der Rotationskomponente aus wenigstens zwei Paaren korrespondierender Ebenen, werden die zugeordneten ebenen Regionen texturiert und anschließend korreliert. Anhand der bekannten 3D-Information der einzelnen Ebenen werden texturierte Rasterelemente berechnet, welche eine einheitlich geometrische Auflösung haben. Hierfür wird über eine extrahierte Ebene ein umschließendes Rechteck gelegt und in einer definierten Auflösung (z. B. 2 cm) im Objektraum gerastert. Jedem Rasterelement der Ebene wird nun aus den Bilddaten der zugehörige Farbwert zugeordnet. Das Ergebnis sind texturierte, rasterförmige Ebenen, die sowohl 3D-Informationen als auch Bildinformationen in einer einheitlichen Rasterweite enthalten. Die Rasterung ist in Abbildung 6.19 schematisch dargestellt. Die Bilddaten liefern im Vergleich zu den Punktdaten des Laserscanners üblicherweise eine hohe Auflösung für die texturierten Ebenen.

Die so gewonnenen Bilder können mit Standardalgorithmen der Bildverarbeitung bearbeitet werden. Korrespondierende Ebenen werden anschließend derart zueinander verschoben, dass sie bestmöglichst übereinstimmen. Ein Maß für die Übereinstimmung zweier Bilder ist die Korrelation. Anhand der bekannten 3D-Informationen in den Bildern lässt sich aus den korrelierten Bilddaten eine Verschiebung bestimmen. Dabei wird die Translation mit

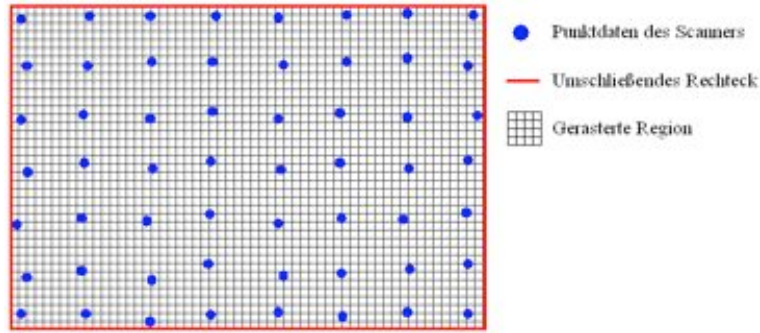


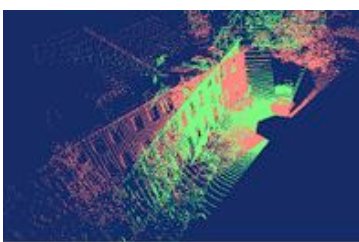
Abb. 6.19: Darstellung der Texturierung des umschließenden Rechtecks einer ebenen Region. Die Rasterung weist üblicherweise eine höhere Auflösung auf als die der Laserscanning Daten.

maximaler Korrelation zwischen den beiden Bildern gesucht. Hierzu wird ein Bild über das andere geschoben und jeweils der Kreuzkorrelationswert ρ nach Formel 6.9 berechnet.

$$\rho = \frac{\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X}) \cdot (Y_{mn} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X})^2 \cdot \sum_m \sum_n (Y_{mn} - \bar{Y})^2}} \quad (6.9)$$

Die Indizes m und n geben die Pixelkoordinaten der Bilder X und Y an, und $\bar{X}$ bzw. $\bar{Y}$ entsprechen jeweils dem mittleren Grauwert der Bilder. Der Kreuzkorrelationswert ρ kann einen Wert zwischen -1 und $+1$ annehmen, wobei -1 eine negative und $+1$ eine positive Entsprechung der Bilder angibt.

Die Position mit maximaler Korrelation liefert die Verschiebung zwischen einem Paar texturierter Ebenen. Die Verschiebung kann jeweils getrennt aus mehreren Paaren an korrespondierenden Bildern ermittelt werden. Anhand der hinterlegten 3D-Informationen in den texturierten Ebenen wird schließlich ein Korrekturwert für die Translation berechnet. Abbildung 6.20 zeigt ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der Methode. Aufgrund fehlender Information an ebenen Regionen quer zur dargestellten Häuserfassade schlug eine Registrierung über die Zuordnung korrespondierender Ebenen fehl (Abb. 6.20 (b)). Die fehlende Translationskomponente kann jedoch durch die Bestimmung der größten Korrelation zwischen den texturierten Ebenen ermittelt werden (Abb. 6.20 (c)).



(a) Ausgangsdaten



(b) Fehlerhafte Registrierung



(c) Korrekte Registrierung

Abb. 6.20: Beispiel für eine fehlerhafte Registrierung und das Ergebnis nach einer Korrektur über die Einbeziehung von Bilddaten.

Während bei einer allgemeinen Zuordnung von ebenen Regionen die Überlappung der Korrespondenzen keine Rolle spielt, müssen sich bei der Anwendung dieser Methode die korrespondierenden Ebenen überlappen. Je größer die Überlappung ist, desto größer ist auch der resultierende Korrelationskoeffizient zwischen den Ebenen. In den segmentierten Scandaten sind in der Regel sich überlappende Regionen zu finden. Theoretisch wird für die Bestimmung der fehlenden Translationskomponente lediglich ein sich überlappendes Ebenenpaar benötigt, damit das Verfahren angewendet werden kann. Abbildung 6.21 zeigt ein Beispiel für texturierte Ebenen, die für die Bestimmung der Translation für das gezeigte Beispiel verwendet wurden. Die gewählte Auflösung der Bilder im Objektraum beträgt 2 cm pro Pixel.

Für einen Erfolg des Korrelationsverfahrens müssen die Bilddaten genügend Kontrast aufweisen, was bei Fassaden aufgrund der einheitlichen Farbe oftmals nicht der Fall ist. Daher werden Fensterflächen, die un-

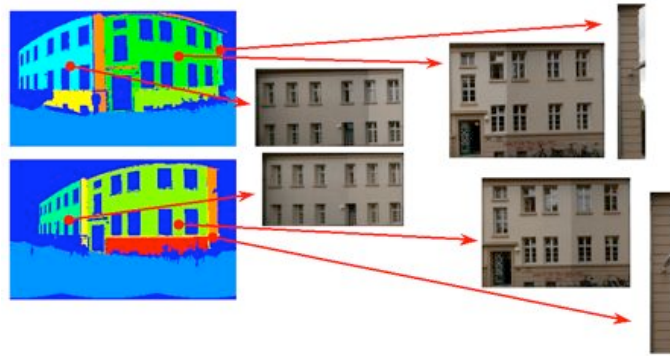


Abb. 6.21: Beispiel für die Segmentierung einer Fassade und texturierte Ebenen mit einheitlicher Auflösung.

ter Umständen nicht in der extrahierten Ebene liegen, ebenfalls in die Berechnung des Korrelationskoeffizienten mit einbezogen. Allerdings kann sich das Ergebnis für die berechnete Translationskomponenten verfälschen, sofern die Fensterflächen nicht in der gleichen Ebene liegen (siehe Abb. 6.22). Die Strahlen von korrespondierenden Punkten stimmen nicht mehr überein und die maximale Korrelation verschiebt sich entsprechend. Die Größe des Fehlers ist abhängig von den Abweichungen von der Ebenen sowie von den Blickwinkeln der Standpunkte.

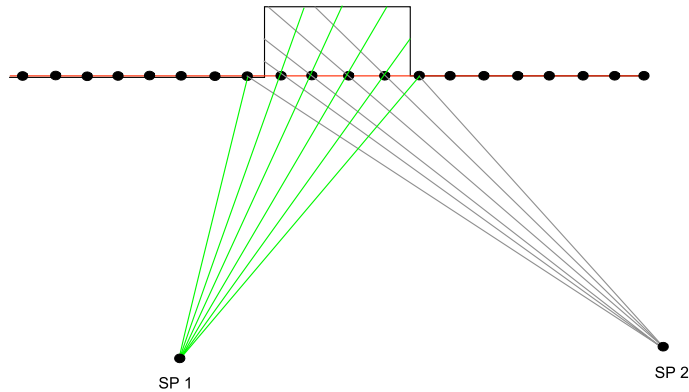


Abb. 6.22: Bei der Texturierung einer Region entstehen Abbildungsfehler, sofern von der Ebene abweichende Flächen texturiert werden.

7 Bewertung der Verfahren und Ergebnisse

Terrestrische Laserscans wurden mit einem Instrument der Firma RIEGL vom Typ LMS Z360i erfasst. Das Messgerät hat einen Messbereich von $360^\circ \times 90^\circ$ und eine maximale Reichweite von 200 m. Für das Instrument gibt es eine Kippvorrichtung, welche eine Neigung des Scankopfes in mehreren Stufen erlaubt, und somit auch Überkopf-Aufnahmen möglich sind. Die Messgenauigkeit einer Einzelmessung liegt bei 12 mm, die Zahl der Messpunkte pro Scan und die Messzeit hängt von der gewählten Winkelschrittweite ab. Üblicherweise werden bei diesem Instrument Messungen mit einer horizontalen und vertikalen Schrittweite von $0,12^\circ$ durchgeführt und somit bei voller Ausschöpfung des Messbereichs 2,25 Millionen (3000×750) Punkte gemessen. Die Messzeit beträgt bei dieser Konfiguration ca. 4 Minuten. In der Praxis werden bei der Erfassung von städtischen Szenen im Mittel knapp 2 Millionen Punkte pro Scan gemessen, für die übrigen Punkte liegen aufgrund fehlender Reflexionsflächen (z. B. bei Messungen in den Himmel) keine Messwerte vor.



Abb. 7.1: Terrestrischer Laserscanner während der Erfassung von Testdaten.

Der Laserscanner wurde für die Erfassung der Messdaten in Kombination mit einer digitalen Spiegelreflexkamera des Typs Nikon D100 mit einem Weitwinkelobjektiv verwendet, so dass der Blickwinkel der Kamera in etwa den vertikalen Messbereich des Scanners abdeckt. Der horizontale Messbereich von 360° wird durch wiederholte Aufnahmen abgedeckt. Die Kamera ist auf dem Scanner stabil montiert und sowohl die innere Orientierung als auch die äußere Orientierung in Bezug auf das Scanner-Koordinatensystem sind vorab bestimmt. Die Abbildung 7.1 zeigt den Laserscanner der Firma Riegl im Einsatz. Anhand der Bilddaten und bekannter Orientierung der Kamera kann somit jedem Messpunkt ein Farbwert aus dem entsprechenden Bild zugeordnet werden. Bei diesem Messsystem erfolgt die Aufnahme der Bilddaten vor oder nach der Messung der Punktdaten, wodurch Scan- und Bilddaten bei Aufnahmen in bewegten Szenen wie beispielsweise im öffentlichen Straßenverkehr oftmals nicht exakt die gleiche Szene wiedergeben. Durch die zusätzlichen Farbwerte lässt sich ein realistisch wirkendes Modell der erfassten Umgebung erzeugen (siehe Abb. 7.2 (b)).

7.1 Beispieldatensatz für die Anwendung der Verfahren

Ein Datensatz bestehend aus 20 Laserscans von der Innenstadt in Hannover („Am Holzmarkt“) wurde erfasst und verwendet, um die vorgestellten Verfahren zu evaluieren. Die Platzierung der Standpunkte ist in Abbildung 7.2 (a) in einer Katasterkarte dargestellt. Von den 20 Scans wurden acht mit gekippten Aufbau erfasst, welche mit einem „a“ gekennzeichnet sind. Die Standpunkte wurden systematisch in einem Abstand von ca. 5 m gewählt, die Überlappung relativ zum ersten Standpunkt nimmt so mit steigender Standpunktnummer ab.

In der Tabelle 7.1 sind die Transformationsparameter aufgelistet, welche mit der Aufnahmesoftware RiScanPro von RIEGL ermittelt wurden. Hierzu wurden zylindrische Retroreflektoren im Aufnahmegebiet verteilt und in jedem Scan separat erfasst. Anhand der gescannten Messpunkte auf der Reflektoroberfläche wird ein Zylindermittelpunkt berechnet und anschließend eine Transformationsvorschrift zwischen den Standpunkten über korrespondierende Punkte berechnet. Die ermittelten Transformationen werden im Vergleich zu den vorgestellten Verfahren als Referenz angesehen, da die in dieser Arbeit vorgestellten Registrierverfahren für eine grobe Registrierung von Scandaten ohne eine Vorgabe von Startwerten entwickelt wurden. Außerdem wurden anhand der Referenzwerte die Überlappungen der Scans berechnet, indem die jeweiligen Punktwolken in das Koordinatensystem des ersten Scans transformiert wurden. Falls ein Punkt im ersten Scan innerhalb eines Abstands von 0,5 m von den transformierten Punkten gefunden wurde, gilt dieser als überlappend. Die Anzahl der Punkte innerhalb dieser Toleranz im Verhältnis zu allen Messpunkten ergibt einen relativen

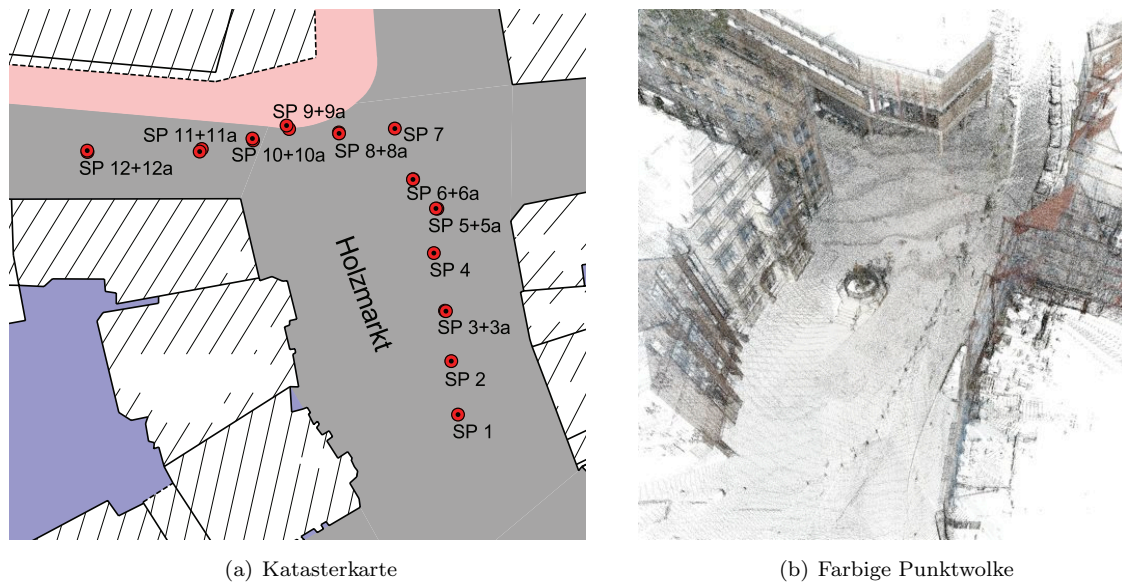


Abb. 7.2: Wahl der Standpunkte und Ansicht der registrierten Punktwolke.

Überlappungswert, welcher jeweils in der letzten Spalte der Tabelle 7.1 in Prozent angegeben ist. Es ist zu beachten, dass der berechnete Wert unter anderem von der Messpunktdichte abhängig ist und daher aufgrund der Abtastung in konstanten Winkeln in der Regel nicht der flächenmäßigen Überlappung entspricht. Dennoch ist der angegebene Wert für die folgenden Untersuchungen aussagekräftig, da auch die Segmentierung der Scandaten auf der Basis der mit äquidistanten Winkeln erfassten Scandaten erfolgt.

Paar	X [m]	Y [m]	Z [m]	ω [°]	ϕ [°]	κ [°]	[%]
01-02	-5,50	0,96	0,02	-1,088	-0,112	51,731	83,1
01-03	-10,69	1,87	0,08	0,551	0,419	57,447	77,7
01-03a	-10,64	1,96	0,05	-25,707	15,540	62,495	73,3
01-04	-16,77	2,53	0,14	1,984	0,481	119,261	68,8
01-05	-21,05	4,24	0,16	-0,692	0,678	-118,535	63,0
01-05a	-21,12	4,11	0,09	40,577	-19,379	-111,274	59,7
01-06	-24,71	2,74	0,29	-0,154	0,276	29,409	50,5
01-06a	-24,71	2,71	0,28	13,897	-1,678	79,449	54,5
01-07	-30,30	2,46	0,30	-0,838	0,063	178,528	50,7
01-08	-31,63	-3,20	0,46	0,836	0,544	166,929	43,6
01-08a	-31,53	-3,22	0,42	8,467	29,713	164,756	45,7
01-09	-33,50	-8,03	0,54	0,001	-0,113	31,594	27,3
01-09a	-33,91	-8,17	0,49	-38,073	-29,496	-56,814	28,8
01-10	-33,48	-11,96	0,58	-1,120	1,491	-106,207	16,2
01-10a	-33,67	-11,97	0,51	-5,763	-46,751	169,994	11,4
01-11	-34,18	-17,32	0,51	0,115	-0,461	-57,484	9,9
01-11a	-34,00	-17,59	0,47	11,362	28,378	-19,364	12,2
01-12	-37,38	-28,76	0,54	0,674	-0,795	169,779	3,6
01-12a	-37,53	-28,72	0,47	-9,712	-45,053	165,549	2,3

Tabelle 7.1: Relative Orientierung (Position und Orientierung) aller Standpunkte bezogen auf den ersten Standpunkt und ein Überlappungswert angegeben in Prozent.

In den folgenden Beispielen für die Registrierung von terrestrischen Laserscans wird die Berechnung der Transformationsparameter mit verschiedenen Kombinationen an Standpunkten durchgeführt. Der systematisch erfasste Datensatz erlaubt die Durchführung mehrerer Tests. Zum einen kann eine sukzessive Registrierung der Scandaten vorgenommen werden, wie es typischerweise bei der Aufnahme mit kommerzieller Auswertesoftware der Fall ist. Zum anderen kann eine Registrierung aller Scans relativ zum ersten Scan erfolgen. Dadurch verringert sich die Überlappung der Scans für weiter entfernte Standpunkte und die Grenzen der Verfahren können aufgezeigt werden.

7.2 Registrierung über Extended Gaussian Images

Das in Kapitel 5 vorgestellte Verfahren für die Registrierung von Scandaten über die Korrelation der *Extended Gaussian Images* verwendet globale Merkmale, welche aus den einzelnen Scans extrahiert werden und anschließend gleichermaßen in die Berechnung der Orientierungsparameter einfließen. Das Verfahren eignet sich insbesondere für die Bestimmung der Verkippung eines Laserscanning-Instruments. In dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Datensatz wurden neben den in etwa horizontal orientierten Laserscans an ausgewählten Standpunkten auch Scans mit einem gekippten Scankopf durchgeführt, um Fassaden vollständig aufnehmen zu können. Dabei wurde die Position beibehalten, aber über eine Veränderung der Orientierungswinkel das Instrument anders ausgerichtet. Die Abbildung 7.3 zeigt ein Beispiel für die Aufnahme von zwei Laserscans mit verschiedenen Ausrichtungen des Instruments. Die Verdrehungswinkel der geänderten Orientierung lassen sich über das Korrelationsverfahren gut bestimmen. Die Überlappung der Scans zueinander ist hoch und eine Translation muss nicht bestimmt werden.

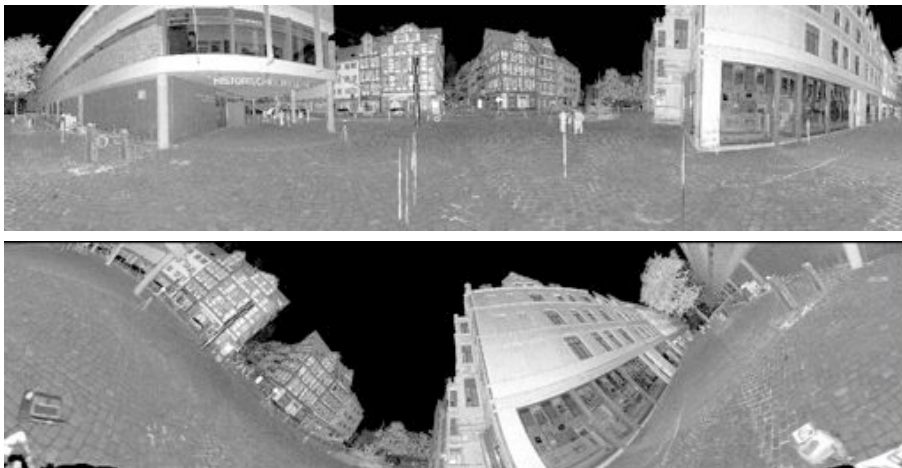


Abb. 7.3: Laserscans der Standpunkte Nr. 10 und 10a des Datensatzes Holzmarkt dargestellt als Intensitätsbild.

Bei einer Berechnung der Orientierungsparameter zwischen horizontalen und gekippten Standpunkten wurde die Registrierung gemäß dem Struktogramm in Abbildung 5.7 (siehe Kapitel 5, Seite 70) durchgeführt. Es wurden pro Standpunkt 50 extrahierte Ebenen verwendet und diese jeweils auf einer Gauß-Kugel abgebildet. Die Zahl der Verfeinerungen der Tessellation der Kugeln wurde zwischen 3 und 5 variiert, wobei jeweils mit einer Tessellation der Stufe eins begonnen wurde. Als Startwert für das Winkelinkrement für die iterative Verdrehung der Kugeln wurde ein Winkel von 15° gewählt. Theoretisch ist auch ein größerer Winkel als Startwert möglich, allerdings werden dann unter Umständen korrekte Lösungen eher übergangen, da andere Lösungen durch Symmetrien in den Scans ebenfalls hohe Korrelationswerte liefern können.

Nach den Berechnungen in den ersten zwei Stufen werden die 15 Lösungen mit den höchsten Korrelationswerten behalten und die Suche im Bereich dieser Lösungen fortgeführt. Mit jeder Verfeinerungsstufe wird die Schrittweite der Winkel halbiert und somit die Auflösung der Orientierungsparameter erhöht. Bei einem Startinkrement von 15° wird somit bei vier Iterationen eine Auflösungsgenauigkeit von knapp unter zwei Grad erreicht. Um die Laufzeit des Verfahrens gering zu halten, wird ab der dritten Verfeinerungsstufe der Lösungsraum begrenzt, indem die Zahl der gespeicherten Lösungskandidaten reduziert wird. Am Ende wird die Lösung mit dem höchsten Korrelationswert ausgewählt. In der Tabelle 7.2 sind neben den Referenzwerten die Ergebnisse des Verfahrens nach drei, vier und fünf Iterationen aufgelistet. Der erste Teil der Tabelle zeigt die Datensätze, bei denen die Scans relativ orientiert wurden, die von einem Standpunkt aus sowohl in horizontaler als auch in gekippter Lage erfasst wurden. Die Laufzeit des Verfahrens beträgt für drei Iterationen etwa 40, für vier 75 und für fünf 140 Sekunden¹⁹.

Je nach gewählter Schrittweite wird die ideale Lösung bereits nach der ersten Iteration gefunden. Dies ist der Fall, wenn die Schrittweite ein Vielfaches des gesuchten Verdrehungswinkels entspricht. Dies ist beispielsweise für die Kombination der Standpunkte 5-5a der Fall. Das Korrelationsverfahren findet aber auch die korrekten Näherungswerte für Winkel, die aufgrund der gewählten Schrittweite nicht mit der Referenzlösung zusammen-

¹⁹Die angegebenen Rechenzeiten beziehen sich auf einen Intel Pentium 4 mit 2.40 GHz und 1 GB RAM.

fallen. Hier erhöht sich die Genauigkeit der Lösung mit steigender Anzahl an Iterationen und somit kleiner werdenden Schrittweiten.

Paar	Referenz			3 Iterationen			4 Iterationen			5 Iterationen		
	ω	ϕ	κ	$\Delta\omega$	$\Delta\phi$	$\Delta\kappa$	$\Delta\omega$	$\Delta\phi$	$\Delta\kappa$	$\Delta\omega$	$\Delta\phi$	$\Delta\kappa$
3-3a	-0,59	30,00	1,46	-0,59	0,00	1,46	-0,59	0,00	-0,42	-0,59	0,00	-0,42
5-5a	0,13	45,17	0,10	0,13	0,17	0,10	-0,13	0,17	0,10	-0,13	0,17	0,10
6-6a	11,36	-8,55	50,72	0,11	-1,05	1,97	0,11	-1,05	0,09	0,11	-0,11	0,09
8-8a	-0,14	-30,06	-0,15	-0,14	-0,06	-0,15	-0,14	-0,06	-0,15	-0,14	-0,06	-0,15
9-9a	-46,16	-7,88	-81,35	0,09	0,87	3,65	0,09	0,87	0,52	0,09	0,87	0,52
10-10a	47,79	8,91	-85,80	0,29	-1,09	-0,80	0,29	-1,09	0,45	0,29	-0,47	-0,17
11-11a	-20,10	23,82	45,21	2,40	1,32	-3,54	0,53	1,32	-1,67	0,53	1,32	-0,73
12-12a	0,12	45,20	0,10	0,12	0,20	0,10	0,12	0,20	0,10	0,12	0,20	0,10
01-02	-1,09	-0,11	51,73	-1,09	-0,11	-0,77	0,79	-0,11	-0,77	-0,15	-0,11	-0,77
01-03	0,55	0,42	57,45	0,55	0,42	1,20	0,55	0,42	-0,68	-0,39	0,42	0,26
01-03a	-25,71	15,54	62,50	0,54	0,54	-1,26	-1,33	-1,33	0,61	-0,40	-0,40	0,61
01-04	1,98	0,48	119,26	-1,77	0,48	-0,74	0,11	0,48	1,13	0,11	-0,46	0,20
01-05	-0,69	0,68	-118,54	-0,69	0,68	1,47	-0,69	0,68	1,47	-0,69	-0,26	0,53
01-05a	40,58	-19,38	-111,28	-0,67	-0,63	-2,53	-2,54	-8,13	-8,16	-2,54	-7,19	-8,16
01-06	-0,15	0,28	29,41	-0,15	0,28	-0,59	-0,15	0,28	1,28	-0,15	0,28	1,28
01-06a	13,90	-1,68	79,45	-1,10	2,07	4,45	-1,10	0,20	0,70	-0,16	0,20	0,70
01-07	-0,84	0,06	178,53	-0,84	0,06	-1,47	-0,84	0,06	2,28	-0,84	0,06	1,34
01-08	0,84	0,54	166,93	-77,91	79,29	-84,32	-79,78	84,92	-86,20	-77,91	85,85	-83,38
01-08a	8,47	29,71	164,76	0,97	-0,29	-0,24	-0,90	-0,29	1,63	-0,90	-0,29	1,63
01-09	0,00	-0,11	31,59	0,00	-0,11	-2,16	0,00	-0,11	1,59	-0,94	-0,11	0,65

Tabelle 7.2: Ergebnisse für die Registrierung von Scandaten nach dem Verfahren der Extended Gaussian Images.

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es auch möglich, die Rotationskomponente zwischen positionsverschobenen Standpunkten zu ermitteln. Hierzu wurden mit der Methode Standpunkte relativ zum Ersten orientiert, die Ergebnisse sind in der Tabelle 7.2 im zweiten Teil dargestellt. Wegen der kleineren Überlappungen zwischen den Scans wurde die Anzahl der verwendeten Ebenenrichtungen, welche auf die Gauß-Kugeln übertragen werden, auf 200 erhöht. Die Erhöhung wirkt sich bei der gewählten Implementierung des Algorithmus jedoch negativ auf die Laufzeit aus. Trotz der Verwendung von globalen Merkmalen ist es mit dem vorgestellten Verfahren möglich, die Orientierungswinkel der Standpunkte 2 bis 9 (mit Ausnahme der Standpunkte 5a und 8) relativ zum ersten Standpunkt zu ermitteln. Die Entfernung zwischen den Standpunkten 1 und 9 beträgt knapp 35 Meter und es liegt eine Überlappung von ca. 30% vor. In vielen Fällen ist das Durchlaufen von fünf Iterationen nicht notwendig, um eine ordentliche grobe Orientierung der Scans zu erhalten. Bei einer anfänglichen Schrittweite von 15° werden nach vier Iterationen bereits Genauigkeiten von besser als 2° erreicht.

Für die Registrierung von TLS-Daten städtischer Szenen eignet sich dieses globale Verfahren gut für die Bestimmung der Orientierung von Standpunkten, die von gleicher Position aus, aber mit veränderter Orientierung, aufgenommen wurden. Dies ist zum Beispiel bei Hybrid-Scannern erforderlich, wenn ein Szene von einem Standpunkt aus mit mehreren Scans erfasst werden muss. Auch kann die Rotationskomponente für weiter auseinander liegende Standpunkte erfolgreich ermittelt werden, allerdings geht bei diesem Verfahren die Information über die Translation zwischen den Standpunkten verloren. Daher ist für die Registrierung von weiter auseinander liegenden Standpunkten eine symbolische Zuordnung von Merkmalen besser geeignet, deren Ergebnisse in den folgenden Kapitel vorgestellt werden.

7.3 Registrierung über eine formbasierte Zuordnung von Ebenen

Im Gegensatz zu dem globalen Verfahren der Registrierung über Extended Gaussian Images werden bei diesem Verfahren lokale Merkmale der Datensätze genutzt. Die Methode wurde detailliert in Abschnitt 6.2 beschrieben. Bei der Anwendung auf den Testdatensatz wurden zunächst die Scans aller Standpunkte in ebene Regionen segmentiert. Dabei kam das auf die Laserscandaten angepasste Bereichswachstumsverfahren zur Anwendung (siehe Kap. 4.4). Bei der Segmentierung der gerasterten Scandaten wurde eine Maskengröße von 7×7 Pixel und ein Distanzschwellwert von 6 cm verwendet, um Rauigkeiten und kleine Unebenheiten auf den Fassaden-, Dach-, Boden- und sonstigen Flächen zu übergehen. Trotz des relativ groß gewählten Distanzschwellwerts weisen die segmentierten Flächen lediglich einen mittleren Fehler von 2,2 cm auf, der sich mit der Vielzahl der verwendeten Scanpunkte pro geschätzter Ebene begründen lässt. Für die jeweils 50 größten Ebenen variiert die Zahl der pro Ebene zugeordneten Scanpunkte zwischen 2665 für die kleinste und 682 157 für die größte Ebene.

Der Zeitaufwand für die Segmentierung eines Scans in ebene Regionen beträgt je nach Standpunkt 14 bis 26 Sekunden²⁰.

Paar	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	$\Delta\omega$ [°]	$\Delta\phi$ [°]	$\Delta\kappa$ [°]
01-02	-0,022	-0,004	0,015	-0,016	0,189	-0,074
02-03	-0,016	-0,178	-0,006	0,008	0,004	-0,032
02-03a	-0,074	0,026	-0,011	0,143	0,024	0,029
03-03a	-0,002	0,006	0,005	-0,006	-0,028	0,027
03-04	0,002	-0,004	0,005	0,121	0,069	0,002
03a-04	0,006	0,001	0,024	0,018	0,025	-0,007
04-05	-0,001	0,001	0,000	-0,028	0,007	-0,001
04-05a	0,028	0,069	-0,034	-0,127	0,373	0,176
05-05a	0,009	0,012	-0,032	0,112	-0,045	-0,035
05-06	-0,012	0,010	0,026	-0,201	-0,230	0,031
05-06a	0,064	0,021	0,022	-0,371	-1,048	-0,166
05a-06	-0,932	-0,503	-0,988	0,028	0,144	-0,935
05a-06a	0,037	-0,151	0,107	0,151	-0,203	0,146
06-06a	-0,069	0,070	-0,007	-0,135	-0,080	-0,001
06-07	-0,045	0,039	-0,012	0,110	0,042	0,048
06a-07	-0,046	-0,053	-0,092	0,294	-0,290	0,197
07-08	0,072	-0,044	0,008	0,147	0,291	-0,106
07-08a	0,003	0,012	-0,025	0,420	0,523	0,225
08-08a	-0,002	0,000	-0,001	-0,024	0,069	-0,010
08-09	0,003	0,001	-0,003	0,082	-0,172	0,078
08-09a	0,021	0,115	0,014	0,633	-0,022	0,174
08a-09	0,003	-0,001	-0,004	-0,030	-0,057	0,018
08a-09a	-0,001	-0,002	-0,010	-0,079	0,033	0,110
09-09a	-0,002	-0,009	-0,007	0,050	0,009	0,021
09-10	0,069	0,091	-0,008	0,426	-0,314	0,072
09-10a	0,033	-0,001	0,000	-0,109	0,460	-0,014
09a-10	0,009	0,001	-0,003	0,084	-0,075	-0,099
09a-10a	-0,028	-0,005	0,046	-0,187	0,395	0,142
10-10a	0,098	-0,002	0,008	-0,032	0,079	0,109
10-11	-0,004	-0,005	-0,085	0,175	0,177	-0,051
10-11a	-0,017	-0,005	-0,078	-0,203	0,058	-0,003
10a-11	0,094	0,011	-0,056	-0,090	0,074	-0,105
10a-11a	0,093	0,023	-0,067	-0,359	0,151	-0,208
11-11a	0,002	0,006	-0,007	0,022	0,316	0,120
11-12	-2,101	3,023	-0,020	0,000	-0,036	-0,442
11-12a	0,133	-0,223	-0,008	-0,015	-0,070	0,187
11a-12	-0,562	-2,354	0,766	-0,193	-0,918	-0,034
11a-12a	-0,027	0,148	0,042	-0,815	-0,264	-0,421
12a-12a	-0,013	-0,013	-0,013	0,030	-0,038	-0,025

Tabelle 7.3: Abweichungen der berechneten Transformationsparameter von den Referenzdaten.

Anschließend erfolgte die Extraktion der Merkmale *Fläche*, *umschließendes Rechteck*, *Umfang der konvexen Hülle* und *mittlerer Intensitätswert* aus den gebildeten Regionen (siehe Kap. 4.5 und 6.2). Da in diesem Schritt aus allen Punkten jeder Region ein Algorithmus zur Berechnung der konvexen Hülle verwendet wird, ist zusätzlicher Rechenaufwand für die Extraktion der Merkmale erforderlich. Im Schnitt dauerte die Berechnung der konvexen Hülle mit dem implementierten Algorithmus für alle 50 ebenen Regionen eines Scans 30 Sekunden. Die anschließende Berechnung der eigentlichen Merkmale dauerte weniger als eine Sekunde. Bei der folgenden Zuordnung der Regionen anhand der Merkmale wurde als Schwellwert für die Ähnlichkeit der Merkmale eine maximale Abweichung von bis zu 5% zugelassen. Weisen bei einer Kombinationen alle vier Merkmale eine größere Abweichung auf, so werden die entsprechenden Ebenen bei der Berechnung der Transformationsparameter nicht weiter betrachtet. Das Zuordnungsverfahren wurde mit den oben genannten Parametern auf alle benachbarten Standpunkte des Testdatensatzes erfolgreich angewandt. Die Abweichungen der bestimmten Transformationsparameter von den Referenzwerten sind in Tabelle 7.3 angegeben. Der Rechenaufwand für das Suchverfahren und die Auswahl der Lösung betrug pro Standpunktpaar weniger als eine Sekunde.

²⁰Die angegebenen Rechenzeiten beziehen sich wiederum auf einen Intel Pentium 4 mit 2.40 GHz und 1 GB RAM.

Das formbasierte Zuordnungsverfahren eignet sich insbesondere für die Registrierung von Scans mit einer hohen Überlappung zwischen den einzelnen Standpunkten. Der Vorteil einer formbasierten Zuordnung liegt in der effizienten Einschränkung des Suchraums, wodurch die Suche nach der besten Lösung nach kurzer Rechenzeit abgeschlossen ist. Insgesamt betrachtet wird allerdings ein Teil der Schnelligkeit durch die erforderliche Merkmalsextraktion im Vorfeld des Zuordnungsverfahrens eingeübt.

Voraussetzung für einen Erfolg des Verfahrens ist die Extraktion charakteristischer Merkmale, was aber auch trotz der 3D-Information in den Messdaten nicht immer möglich ist und dadurch unter Umständen Zuordnungen nicht betrachtet werden, die zur korrekten Lösung führen. Daher müssen die zu registrierenden Standpunkte eine große Überlappung aufweisen, damit die extrahierten Merkmale der Regionen in beiden Standpunkten für eine erfolgreiche Zuordnung ausreichend ähnlich sind. Eine sukzessive Registrierung der Standpunkte war lediglich bis zum nächsten Standpunkt 3 erfolgreich. Für größere Abstände zwischen den Standpunkten war die Berechnung einer korrekten Transformationsvorschrift nicht möglich, eine ausreichende Ähnlichkeit der Merkmale ist in diesen Fällen nicht gegeben und eine korrekte Zuordnung der Regionen nicht möglich. Der Suchraum wird über die verwendeten Merkmale zu stark beschnitten. Somit ist die vorgestellte Registrierung von TLS-Daten mittels einer formbasierten Zuordnung nur für Standpunktpaare geeignet, die weniger als 15 m voneinander entfernt liegen.

7.4 Registrierung über eine orientierungsbasierte Zuordnung

Bei der orientierungsbasierten Zuordnung (siehe Kapitel 6.3) von ebenen Regionen wird der Suchraum weitaus weniger eingeschränkt als bei der formbasierten Zuordnung. Die Begrenzung der Ebenen ist bei diesem Verfahren nicht bedeutsam, jedoch müssen mehr Kombinationen an Ebenen gebildet werden. Der Suchraum mit einer Größe von 1,15 Milliarden Kombinationen wird über die Berechnung des Spatprodukts für Ebenentripel eingegrenzt.

Eine paarweise Registrierung der aufeinander folgenden Standpunkten ist mit vergleichbarem Erfolg und auch vergleichbaren Genauigkeiten gegenüber der formbasierten Zuordnung möglich. Die Rechenzeiten für das Verfahren für die Registrierung der benachbarten Standpunkte betrugen zwischen 0,39 und 114,5 Sekunden. Im Schnitt wurde eine Zeit von 16 Sekunden benötigt. Die unterschiedlichen Rechenzeiten sind mit der Priorisierung bei der Bildung an Kombinationen zu begründen. Ein für die Berechnung günstiges Spatprodukt nahe dem Wert eins kommt nicht so häufig vor wie eines mit niedrigerem Wert. Abbildung 7.4 zeigt ein kumuliertes Histogramm, in dem für drei charakteristische Standpunkte für alle Kombinationen der Wert des Spatsprodukts aufgetragen ist. Lediglich ca. 10% der Kombinationen führen zu einem Spatprodukt mit Werten zwischen 0,95 und 1,0. Je nach aufgenommener Szene liegen 38% bis 65% der Werte unterhalb von 0,05 und sind somit für die Berechnung der Transformationsvorschrift nicht geeignet. Dadurch kann die Lösung bei Vorliegen von Werten des Spatprodukts nahe eins schnell ermittelt werden. Bei ungünstigen Szenen, in denen die Kombinationen der extrahierten Ebenen zu geringen Werten führen, dauert die Berechnung entsprechend länger.

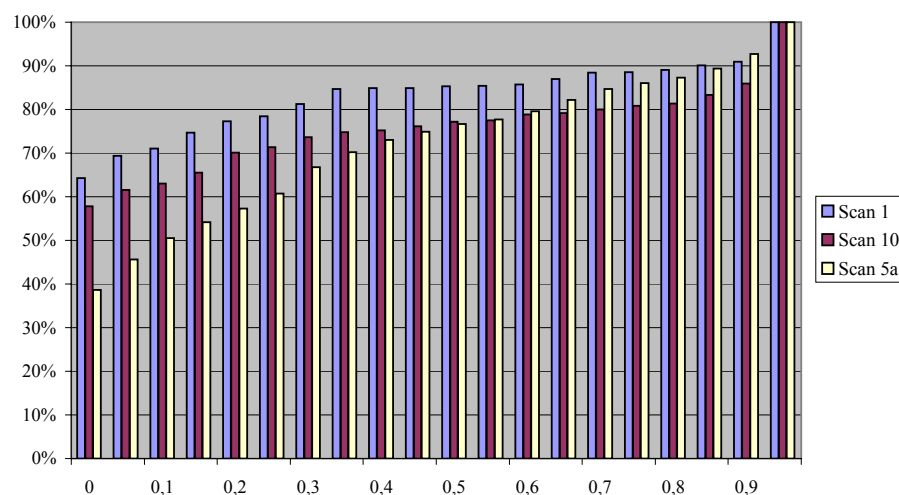


Abb. 7.4: Kumuliertes Diagramm mit den prozentualen Häufigkeiten für den Wert des Spatprodukts für drei unterschiedliche Scans.

In einem weiteren Test wurden die Standpunkte jeweils relativ zum ersten Standpunkt mit dem Verfahren registriert. Hierbei konnten mit dem Verfahren insgesamt 14 Scans (Standpunkte 2 bis 10) erfolgreich registriert werden. In Tabelle 7.4 sind die Abweichungen der ermittelten Transformationsvorschrift zu den Referenzdaten aufgelistet. Mit Zunahme der Entfernung zwischen den zu registrierenden Standpunkten steigt die Rechenzeit für die Registrierung, da aufgrund der geringeren Überlappung weniger Kombinationen zu der korrekten Lösung führen. Bis zum Standpunkt acht betrug die Rechenzeit zum Auffinden der korrekten Lösung im Schnitt 5,6 Sekunden betrug, verlängerte sich jedoch für die folgenden Standpunkte enorm, so dass für alle erfolgreichen Registrierungen eine mittlere Rechenzeit von ca. 50 Sekunden erreicht wurde. Für die registrierten Standpunkte beträgt die kleinste Überlappung zwischen Standpunkt 1 und 10 in etwa 16% und fehlerhaft registrierte Standpunkte weisen eine Überlappung von kleiner als 12% auf. Die Genauigkeit der Registrierung sinkt mit zunehmender Entfernung zwischen den Standpunkten, ist aber mit Abweichungen von kleiner als $0,5^\circ$ in den Orientierungswinkeln, 20 cm in der Lage und 40 cm in der Höhe für eine Grobregistrierung ausreichend. Mit einer Entfernung von ca. 35 m der Standpunkte 1 und 10 können mit diesem Verfahren auch weit auseinander liegende Standpunkte registriert werden.

Paar	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	$\Delta \omega$ [°]	$\Delta \phi$ [°]	$\Delta \kappa$ [°]
01-02	-0,022	-0,033	-0,002	0,132	-0,082	0,050
01-03	0,025	-0,018	0,054	0,089	-0,185	-0,075
01-03a	0,045	-0,043	-0,046	-0,155	-0,122	-0,161
01-04	0,090	-0,039	0,091	-0,080	-0,237	-0,049
01-05	-0,073	-0,006	-0,038	0,039	0,083	0,023
01-05a	-0,143	0,103	-0,008	0,086	-0,389	0,069
01-06	0,052	0,056	0,040	-0,029	-0,307	0,400
01-06a	0,077	0,091	0,013	0,073	-0,006	0,440
01-07	-0,050	-0,035	0,017	-0,145	0,149	0,031
01-08	-0,080	-0,006	0,269	-0,053	-0,502	0,420
01-08a	-0,098	0,154	0,259	-0,196	0,042	-0,469
01-09	-0,163	0,026	0,343	-0,286	-0,052	-0,109
01-09a	-0,076	-0,021	0,398	-0,303	0,487	0,430
01-10	-0,097	-0,006	0,240	-0,420	0,004	-0,258

Tabelle 7.4: Abweichungen der berechneten Transformationsparameter von den Referenzdaten.

Die Anwendung des Verfahrens auf den Testdatensatz führt insgesamt zu einer stabilen und genauen Registrierung. Ein Schwachpunkt des Verfahrens ist die Zahl der zu wählenden Schwellwerte. Allerdings hat sich durch die vorgestellten Analysen in Kapitel 6.3 gezeigt, dass für die meisten Werte ein allgemeingültiger Wert festgelegt und somit global definiert werden kann. Ein jedoch kritisch zu sehender Schwellwert ist die zu erreichende Zahl der Hits für die Heuristik, welche Merkmalspaare als Lösungskandidaten zulässt. Die Höhe des Fitnesswertes korreliert mit der Überlappung der Scandaten, welche aber von vorne herein nicht bekannt ist und auch nicht automatisch ermittelt werden kann. Andererseits kann dieser Wert einfach vorgegeben werden oder aus einem ungefähr angegebenen Wert für den Abstand der zu registrierenden Scanpositionen ermittelt werden. Insgesamt betrachtet ist das vorgestellte orientierungsbasierte Zuordnungsverfahren durch die Priorisierung der Merkmalspaare, der sehr schnell zu berechnenden Fitnessfunktion und der Heuristik für die Wahl einer Lösung gut für die automatische Registrierung von Scandaten geeignet.

7.5 Registrierung mit Ebenen über die Verwendung von Winkelbedingungen

Mit der Verwendung von Winkelbedingungen für die Registrierung (siehe Kapitel 6.4) von Laserscanning Daten kann der Suchraum im Vergleich zum orientierungsbasierten Zuordnungsverfahren effizienter beschnitten werden. Die Kombinationen der ebenen Regionen werden gebildet, indem nur Ebenentripel mit ähnlichem Winkel zwischen den Normalenvektoren der Ebenen zugelassen werden. Ausgehend von den in jeweils 50 ebenen Regionen segmentierten Scandaten des Testdatensatzes wurden die Anzahl der kompatiblen Paare an Ebenentripeln gebildet. Hierfür wurden alle möglichen 1,15 Milliarden Kombinationen für alle Standpunktpaare relativ zum ersten Scan betrachtet. Neben der Anzahl der Tripel mit kompatiblen Winkeln zwischen den Normalenvektoren wurde auch die Zahl der Tripel mit ähnlichem Wert des Spatprodukts ermittelt. Außerdem ist die Anzahl an Tripeln bestimmt worden, welche bei der Berechnung der Transformationsvorschrift aus den Ebenenpaaren zu einem korrekten Ergebnis führt. Dabei wurden die Transformation als korrekt gewertet, sofern die Abweichungen in den Rotationswinkeln kleiner als 5° und in der Translation kleiner als 1 m betragen. Für eine Grobregistrierung der terrestrischen Laserscanningdaten ist eine Näherungslösung in dieser Größenordnung ausreichend. Die Ergebnisse, deren Berechnung pro Standpunktpaar mehrere Stunden in Anspruch nahm, sind

in Tabelle 7.5 gelistet und zeigen, dass die Zahl der in Betracht gezogenen Kombinationen erheblich durch die Verwendung von Winkelbedingungen reduziert werden kann.

Paar	Spatprodukt		Winkelbedingungen		Reduktion f
	# Kandidaten	# Korrekt	# Kandidaten	# Korrekt	
01-02	142 807 791	244 635	1 022 507	42 945	140
01-03	142 306 687	208 970	1 020 667	38 947	139
01-03a	127 692 238	153 111	684 729	20 283	186
01-04	170 295 096	147 045	1 091 474	19 043	156
01-05	173 201 560	55 116	698 353	9 681	248
01-05a	169 549 800	41 353	557 906	4 955	304
01-06	175 359 040	48 721	949 832	8 361	185
01-06a	182 094 680	47 843	1 041 477	8 562	175
01-07	172 971 176	14 776	880 668	3 034	196
01-08	128 319 200	15 576	791 156	2 609	162
01-08a	184 965 720	11 372	840 829	1 048	220
01-09	169 963 815	6 306	605 209	1 125	281
01-09a	190 521 595	11 545	513 071	778	371
01-10	187 286 988	13 372	754 447	1 357	248
01-10a	178 693 216	4 584	438 870	596	407
01-11	142 563 463	4 232	758 084	593	188
01-11a	174 261 522	11 160	653 320	1 572	267
01-12	128 301 600	0	552 271	0	232
01-12a	144 236 400	0	402 779	0	358

Tabelle 7.5: Eingrenzung des Lösungsraumes durch Verwendung von Winkelbedingungen im Vergleich zu der orientierungsbasierten Zuordnung.

Während bei der Verwendung des Spatprodukts der Suchraum im Schnitt auf ca. 162 Millionen möglichen Kombinationen begrenzt wird, führt die Einführung der Winkelbedingungen zu einer Beschneidung des Suchraums im Mittel auf ca. 750 000 mögliche Kombinationen. Dies entspricht einer Reduzierung der Suche um einen Faktor von über 200. Zwar sinkt auch die Anzahl der für korrekt befundenen Transformationsvorschriften, was jedoch mit den weit gesetzten Toleranzen von 5° für die Rotation bzw. 1 m für die Translation zu begründen ist.

Paar	# Komp.	%	# Korrekt	%	Paar	# Komp.	%	# Korrekt	%
01-02	145 202	4,84	8 034	5,53	01-08a	168 050	5,60	2 728	1,62
01-03	147 944	4,93	7 497	5,07	01-09	141 868	4,73	1 651	1,16
01-03a	115 260	3,84	5 566	4,83	01-09a	140 498	4,68	926	0,66
01-04	164 200	5,47	5 852	3,56	01-10	157 464	5,25	2 115	1,34
01-05	145 098	4,83	3 496	2,41	01-10a	113 540	3,78	1 007	0,89
01-05a	121 400	4,04	2 885	2,38	01-11	138 768	4,62	929	0,67
01-06	166 238	5,54	4 218	2,54	01-11a	147 310	4,91	1 642	1,11
01-06a	165 922	5,53	4 414	2,66	01-12	105 978	3,53	2	0,00
01-07	173 934	5,80	2 513	1,44	01-12a	94 758	3,16	148	0,16
01-08	167 550	5,58	2 639	1,58					

Tabelle 7.6: Anzahl an Paaren von Ebenentupel mit kompatiblen Winkel, Prozentsatz bezogen auf alle möglichen Kombinationen, Anzahl der Paarungen, die zu einer korrekten Rotation führen und der Prozentsatz relativ zur Zahl der kompatiblen Paare.

Wird die Berechnung der Transformationsvorschrift gesplittet und zuerst die Rotationskomponente aus zwei korrespondierenden Tupeln an Ebenen bestimmt, verbleiben bei 50 Regionen pro Scan ca. drei Millionen Kombinationen. Bei der Anwendung des Winkelkriteriums verbleiben für den Testdatensatz von den drei Millionen in etwa 140 000 kompatible Kombinationen für jedes Standpunktpaar. Diese Anzahl bleibt, wie Tabelle 7.6 zeigt, für alle Paarungen relativ stabil, im Schnitt entspricht dies 4,8% aller möglichen Kombinationen. Die Anzahl der Kombinationen, welche schließlich auch zu dem korrekten Ergebnis führen, ist jedoch deutlich geringer und sinkt auch deutlich, wenn die Standpunkte weiter auseinander liegen. Für nah beieinander

liegende Standpunkte liefern in etwa 5% der 140 000 Kombinationen eine korrekte Transformation²¹. Für die weit entfernten Standpunkte im Testdatensatz reduziert sich diese Zahl auf fast Null wie die Werte in den letzten beiden Spalten der Tabelle 7.6 zeigen.

Bei der Anwendung des Verfahrens auf den Testdatensatz wurden aus den Ebenentupeln mit kompatiblen Winkeln die Rotationsparameter berechnet. Anschließend wurden mit einer Abstufung von 2° die Ergebnisse nach den Werten der berechneten Rotationswinkel in Gruppen eingeteilt. Nach einer Sortierung der Gruppen nach absteigender Anzahl an einsortierten Lösungen ergibt sich eine priorisierte Liste mit den entsprechenden Lösungsgruppen. Abbildung 7.5 zeigt eine Übersicht der 20 Gruppen mit der höchsten Anzahl an Lösungen für alle Standpunktpaarungen. Dabei entspricht die markierte Gruppe der korrekten Lösung. An den hinterlegten Grauwerten kann die Anzahl der Lösungen pro Gruppe abgelesen werden. Somit wird beispielsweise deutlich, dass bei der Paarung der Standpunkte 1 und 2 in der ersten Gruppe deutlich mehr Lösungen vorhanden sind, als in der Zweiten (8034 zu 1752). Bei anderen Standpunktpaaren, wie zum Beispiel bei 1-6 oder 1-9, ist der Unterschied nicht so deutlich.

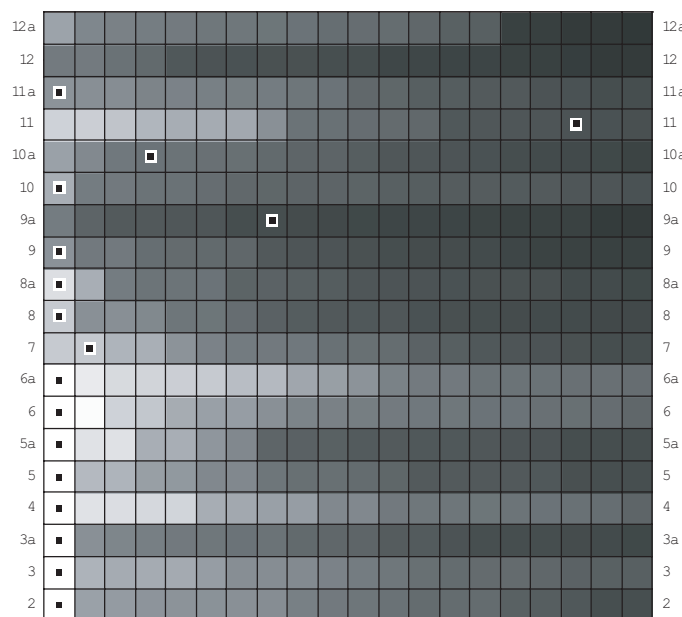


Abb. 7.5: Gruppierung der berechneten Rotationswinkel für alle Standpunktpaare. Die weiße Farbe entspricht einer Zahl von mehr als 3000 und schwarz einer Zahl von null Lösungen. Die markierte Gruppe entspricht der korrekten Lösung (Abbildung aus Brenner und Dold (2007)).

Für die Standpunktpaare 1-2 fortlaufend bis zu 1-6a liegt die korrekte Lösung jeweils in der ersten Gruppe. Die erste Ausnahme bildet die Paarung 1-7, bei der die korrekte Lösung in der zweiten Gruppe liegt. In diesem Fall ist die Anzahl der aufgetauchten Lösungen in den zwei Gruppen mit 2362 und 2332 nahezu identisch. Die Lösungen unterscheiden sich lediglich um eine Drehung um eine Achse um ca. 180° . Ursache für diese zwei Lösungsgruppen ist eine Symmetrie in der Szene, der Standpunkt 7 liegt in etwa mittig auf einer symmetrischen Straßenkreuzung (siehe Abbildung 2(a)). Bei den Standpunkten 1-9a, 1-10a und 1-11 fällt die Lösung ebenfalls nicht in die erste Gruppe, die Überlappung beträgt bei diesen Standpunkten 28,8%, 11,5% und 9,9%. Bei den letzten beiden Standpunkten mit einer Überlappung von weniger als 4% tauchte die korrekte Lösung innerhalb der ersten 100 Gruppen nicht auf. Auch eine manuelle Zuordnung der extrahierten Ebenen war bei diesen Standpunktkombinationen nicht mehr möglich.²²

Die Translation wird berechnet, indem aus den gebildeten Gruppen jeweils zwei Ebenentupel miteinander kombiniert werden. Für die Paarung der Standpunkte 1-2 würden sich somit für die erste Gruppe

²¹Die Zahlen wurden ermittelt, indem gegenüber der bekannten Referenztransformation eine maximale Abweichung von 2° zugelassen wurde.

²²Die in Tabelle 7.1 gezeigten Referenzwerte wurden rechnerisch aus einer Verkettung der Transformationsvorschriften zwischen den einzelnen Standpunkten ermittelt.

$8034 \cdot 8033/2 = 32\,268\,561$ mögliche Kombinationen ergeben. Nach dem Prinzip des RANSAC-Algorithmus werden die Kombinationen jedoch nur aus einer zufälligen Teilmenge gebildet. Für die Ermittlung der erforderlichen Größe der Teilmenge m wurden für die Standpunktkombinationen 1-2 bis 1-10a aus einer Menge von 10 000 Ebenentupeln die Anzahl der korrekten Lösungen bestimmt. Prozentual waren je nach Überlappung der Standpunkte 3% bis 20% der berechneten Transformationsvorschriften korrekt. Nach Fischler und Bolles (1981) kann die Größe der Teilmenge m so festgelegt werden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit p mindestens einmal eine korrekte Lösung berechnet wird. Dabei wird auch die Wahrscheinlichkeit b , eine korrekte Lösung auszuwählen, berücksichtigt. Mit $p = 99\%$ und $b = 3\%$ ergibt sich über $m = \log(1 - p)/\log(1 - b)$ eine Größe der Teilmenge von $m \approx 150$.

Für die berechneten Transformationsvorschriften der gebildeten Teilmengen wurde auch bei diesem Verfahren der sehr schnell zu berechnende Fitnesswert basierend auf kompatiblen Ebenen (vgl. Abschnitt 6.3.2) zwischen den Scans berechnet, um eine priorisierte Liste an Lösungskandidaten zu erhalten. Bei der mehrfachen Durchführung des Algorithmus lagen die korrekten Lösungen für die Standpunktpaarungen 1-2 bis 1-5 an erster Stelle, für weiter entfernte Standpunktpaare (ausgenommen 1-12 und 1-12a) rutschte die korrekte Lösung im schlechtesten Fall an die 53. Stelle. Im Mittel wurde die Lösung an 10. Stelle platziert.

7.6 Vergleich der verschiedenen Fitnessfunktionen

Die in Kapitel 6.5 vorgestellten fünf verschiedenen Fitnessfunktionen für die Bewertung von Lösungskandidaten wurden auf den Testdatensatz angewendet und deren Eigenschaften weitergehend untersucht. Mit der Berechnung *kompatibler Ebenen*, *kompatibler Punkte* und einer Kombination aus *kompatiblen Punkten und Normalenvektoren* stehen insgesamt drei unterschiedliche Gruppen an Fitnessfunktionen für die Bewertung einer ermittelten Transformationsvorschrift zur Verfügung. Das Histogramm in Abbildung 7.6 stellt den berechneten Fitnesswert der verschiedenen Funktionen für alle Standpunktpaare dar. Für die Berechnung des Wertes wurde jeweils die Referenzlösung verwendet. Entsprechend der Überlappung der Scans verhält sich auch der Fitnesswert.

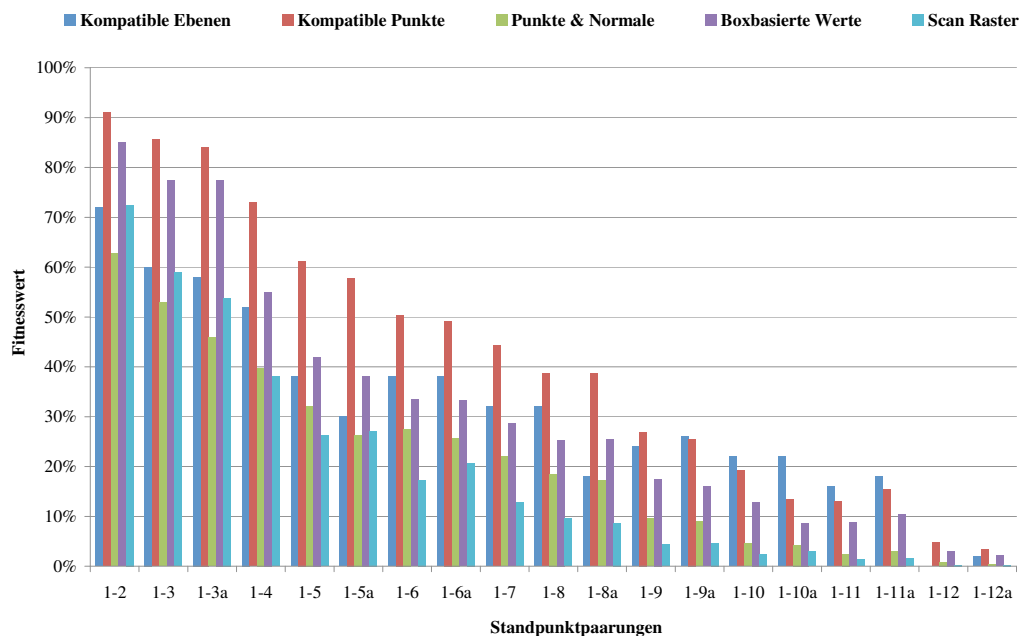


Abb. 7.6: Das Histogramm zeigt für jedes Verfahren die berechneten Fitnesswerte für die Referenzlösung. Es wurden alle Kombinationen zwischen dem ersten und allen anderen Standpunkten berücksichtigt.

Die Fitnessfunktion basierend auf den kompatiblen Ebenen ist aufgrund der begrenzten Anzahl an Ebenen bei der Berechnung des Fitnesswerts sehr schnell und liefert auch sehr gute Ergebnisse bis zu einem gewissen Überlappungsbereich der Scans. Jedoch übersteigt zum Beispiel bei der Standpunktkombination 1-10a der berechnete Wert deutlich den tatsächlichen Überlappungswert der Standpunkte, was auf einen fehlerhaften Fitnesswert schließen lässt. Ursache hierfür ist, dass die Ebenen geometrisch nicht begrenzt sind, bei ähnlicher Orientierung der Ebenen durch Symmetrien können solche Effekte auftreten. Dies wurde auch bei dem Verfah-

ren der winkelbasierten Zuordnung deutlich. In den priorsierten Listen unter Verwendung dieser Fitnessfunktion wurden falsche Lösungen besser als die Korrekte bewertet.

Bei der Fitnesswertberechnung anhand von kompatiblen Punkten wird dagegen der geometrische Ort berücksichtigt und die Funktion liefert Fitnesswerte, welche in etwa der Überlappung des Scans entsprechen. Der Nachteil der langen Berechnungszeit wird durch die scanraster- und box-basierte Fitnessfunktion um den Faktor 5 bzw. 8 verbessert, jedoch werden aufgrund der Vereinfachung auch die idealen Fitnesswerte nicht mehr erreicht (siehe Abb. 7.6). Dabei fällt auf, dass die Werte der scanraster-basierten Funktion deutlich unterhalb der box-basierten Funktion liegen. Dies ist durch die leicht unterschiedlichen Winkelschrittweiten des Scanners erklärbar. Für einen schnellen Zugriff auf den korrespondierenden Scanpunkt wird aber für die Berechnung der entsprechenden Indizes ein konstantes Winkelinkrement angenommen. Dadurch können Zugriffe auf Rasterzellen verursacht werden, die nicht dem richtigen Ort entsprechen. Als Folge wird der Fitnesswert nicht hochgezählt, obwohl unter Umständen ein korrespondierender Wert vorhanden ist. Dieses Problem kann umgangen werden, sofern auch benachbarte Zellen abgefragt werden. Diese würde jedoch wiederum eine Vervielfachung der Laufzeit bedeuten.

Die Fitnessfunktion, welche sowohl kompatible Punkte und deren Normalenrichtungen berücksichtigt, stellt eine Kombination aus den ebenen- und punktbasierten Fitnessfunktionen dar. Sie erzielt aufgrund der zweifachen Bedingung für die Bewertung der Korrespondenz die vergleichsweise geringsten Fitnesswerte.

Neben dem Erreichen eines hohen Fitnesswertes ist ebenfalls entscheidend, wie selektiv die Funktion ist und inwieweit sie in der Lage ist, korrekte und falsche Lösungen voneinander zu unterscheiden. Hierfür wurden die Fitnessfunktionen auch auf die falschen Lösungskandidaten angewendet, welche von den Suchverfahren als Lösungskandidaten vorgeschlagen wurden. Die Grafiken in Abbildung 7.7 zeigen exemplarisch die berechneten Fitnesswerte für die drei verschiedenen Gruppen an Funktionen in Abhängigkeit der Abweichung von der korrekten Lösung für die Standpunktpaarung 1-8. Für die Visualisierung sind die sechs Transformationsparameter in zwei Parameter umgerechnet. Die Translation wird anhand des euklidischen Abstands von der Referenzlösung dargestellt, und die drei Translationswinkel werden als Rotationswinkel des entsprechenden Quaternions dargestellt.

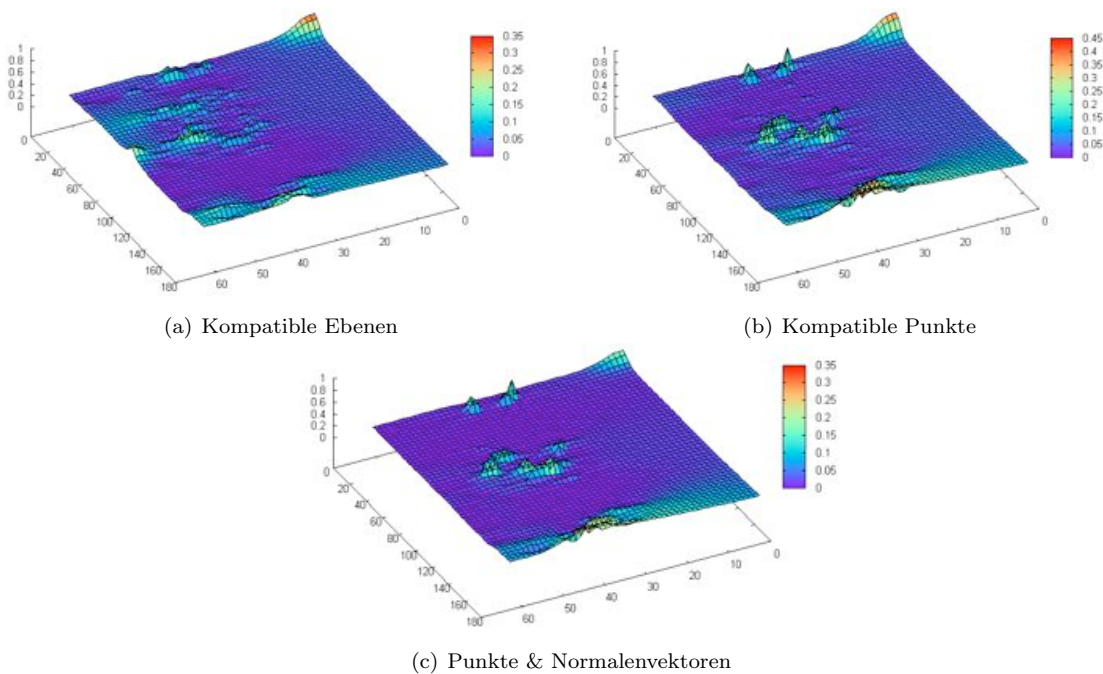


Abb. 7.7: Darstellung der Fitnessfunktionen für verschiedene Lösungskandidaten. Die korrekte Lösung ist an der Stelle (0/0) dargestellt.

Die Ergebnisse der Fitnessfunktionen zeigen für alle drei Gruppen ähnliche Ergebnisse. Bei der korrekten Lösung ist jeweils eine deutliche Spitze zu sehen. Bereiche, in denen in den Abbildungen keine Erhebung zu sehen ist, waren unter den Lösungskandidaten nicht vertreten oder entsprechen einem Fitnesswert nahe Null. Abbildung 7.7 (c) zeigt die große Selektivität der aus Punktdaten und Normalenvektoren kombinierten

Fitnessfunktion. Im Vergleich zu den Abbildungen (a) und (b) ist ein geringeres Rauschen erkennbar, es werden mehr Lösungen mit einem Wert von Null oder nahe Null bewertet. Allerdings bleiben neben der korrekten Lösung weitere Spitzen erhalten. An Symmetriestellen ist gegenüber der sehr schnell berechenbaren Fitnessfunktion basierend auf kompatiblen Ebenen die Selektivität weder bei der punktbasierten noch bei der um die Normalenvektoren erweiterte Fitnessfunktion gegeben. Für andere Standpunktpaarungen ergeben sich ähnliche Verteilungen der Fitnesswerte. Abbildung 7.8 zeigt ein weiteres Beispiel in variierteter Darstellung, bei der die Fitnesswerte in Abhängigkeit vom Fehler in der Translationskomponente für das Standpunktpaar 1-6 dargestellt wird. Die Fitnesswerte der ebenenbasierten Funktion in Abbildung (a) streuen mehr als die Werte der kombinierten Fitnessfunktion (Abb. (b)). Auch hier ist deutlich zu sehen, dass die Fitnessfunktionen basierend auf einem Vergleich der Punktdaten und deren Normalenrichtung bei fehlerhaften Lösungen ebenfalls zu hohen Fitnesswerten führen kann.

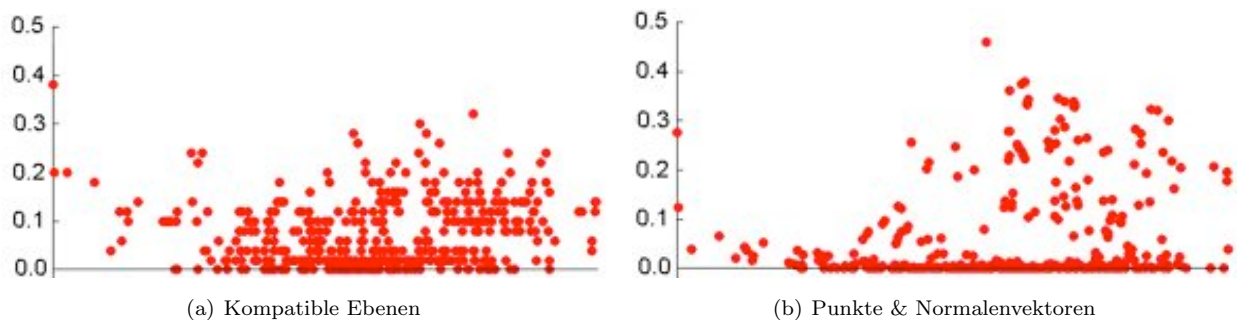


Abb. 7.8: Berechnete Fitnesswerte für Lösungskandidaten der Standpunktpaarung 1-6.

Bei der Verifikation von möglichen Transformationsvorschriften hat keine der implementierten Fitnessfunktionen eine ausreichende Selektivität erreicht, um die korrekten Lösungen von Standpunktpaaren mit einem geringen Überlappungsbereich sicher zu extrahieren. Auch durch die punktbasierten Fitnessfunktionen konnten auftretende Spitzen in den Fitnesswerten bei falschen Lösungen nicht eliminiert werden. Jedoch konnte eine geringere Streuung der Fitnesswerte nachgewiesen werden. Für Standpunktpaarungen mit einer Überlappung von mehr als 55% weisen alle Fitnessfunktionen eine gute Selektivität auf, um die korrekte Transformationsvorschrift aus einer größeren Lösungsmenge herauszufiltern.

8 Diskussion und Ausblick

Die Registrierung von Entfernungsdaten ist im wissenschaftlichen Umfeld bereits lange vor dem dem Aufkommen terrestrischer Laserscanner ein Thema, welches anhaltend diskutiert wird. Die Methoden werden in einer Grob- und eine Feinregistrierung unterteilt. Die Vorstellung ausgewählter Verfahren und die Einteilung in Gruppen gemäß deren Methodik ist ein Bestandteil dieser Arbeit. Dabei hat sich gezeigt, dass für eine Feinregistrierung hauptsächlich der ICP-Algorithmus und Variationen des Algorithmus verwendet werden. Der ICP-Algorithmus ist bereits in mehreren kommerziellen Software-Paketen implementiert und wird erfolgreich für die Registrierung von Entfernungsdaten verwendet. Die Bestimmung von Näherungswerten erfolgt über eine Grobregistrierung der Daten. Verfahren zur Grobregistrierung können in globale, lokale und merkmalsbasierte Verfahren eingeteilt werden. Zahlreiche Verfahren zur Grobregistrierung wurden nicht für die Registrierung von TLS-Daten entwickelt und sind daher nur bedingt für die Registrierung von TLS-Daten geeignet. Die Schwierigkeit bei der automatischen Registrierung von TLS-Daten liegt in der Regel in den großen Abständen zwischen den einzelnen Standpunkten, die zueinander registriert werden müssen.

In der vorliegenden Arbeit sind verschiedene ebenenbasierte Verfahren zu Registrierung von terrestrischen Laserscanning Daten beschrieben. Es erfolgte eine Implementierung der Algorithmen und Ergebnisse wurden anhand eines Beispieldatensatzes aufgezeigt. Die Verfahren zeichnen sich allesamt dadurch aus, dass sie ohne Näherungswerte für die Bestimmung der Transformationsparameter auskommen. Alle Verfahren basieren auf der Segmentierung der TLS-Daten in ebene Regionen.

Grundlage für die Segmentierung ist die Bestimmung einer ausgleichenden Ebene. Verfahren für eine Ebenenschätzung sind beschrieben und im Anschluss sind verschiedene Ansätze für eine regionenbasierte Segmentierung diskutiert worden. Eine schnelle Extraktion von Ebenen aus TLS-Daten ist mit einer Darstellung der dreidimensionalen Laserscandaten als Rasterdaten möglich. Zwei Ansätze für die Segmentierung der Daten in ebene Regionen wurden implementiert, zum einen werden mittels eines Maskenoperators lokale Ebenen extrahiert und zum anderen zusammenhängende Regionen über ein vollautomatisches Bereichswachstumsverfahren erzeugt. Auf der Basis extrahierter Ebenen können charakteristische Merkmale für die jeweilige Region abgeleitet werden, welche für eine anschließende Zuordnung korrespondierender Ebenen verwendet werden. Obwohl die Implementierung des Bereichswachstumsverfahrens optimiert wurde, ist bei der Segmentierung hinsichtlich der Schnelligkeit weiteres Verbesserungspotential zu sehen. Dies kann beispielsweise durch weniger rechenaufwändige Segmentierverfahren wie der Hough-Transformation, RANSAC oder der Gruppierung von Abtastzeilen erreicht werden.

Mit der Registrierung über Extended Gaussian Images ist in der Arbeit ein globales Verfahren beschrieben, bei dem die segmentierten Ebenen in eine alternative Darstellung auf eine tesselierte Einheitskugel überführt werden. Die Bestimmung der drei Rotationswinkel erfolgt über ein Korrelationsverfahren. Mit der Durchführung von mehreren Iterationsschritten wird eine Genauigkeit für die Grobregistrierung von besser als 2° erreicht. Da bei dem Übergang auf die tesselierte Einheitskugel die Translation verloren geht, eignet sich das Verfahren insbesondere für die Verknüpfung von Daten, welche vom gleichen Standpunkt aus, aber mit verkippt aufgestellten Instrument aufgenommen wurden. In diesen Fällen konnten die Rotationswinkel für alle Standpunktpaarungen erfolgreich ermittelt werden. Aber auch für die Registrierung weiter auseinander liegender Standpunkte hat das Verfahren gute Ergebnisse für die Bestimmung der Rotationswinkel gezeigt. Die Laufzeit des Verfahrens kann durch eine Verbesserung der Korrelationsberechnung optimiert werden. Anstelle der Berechnung der Gauß-Kugeln für alle möglichen Rotationswinkel, kann die bestmögliche Rotation über eine Verdrehung der Kugeln berechnet werden. Ferner können die EGIs mit zusätzlichen Attributen versehen werden, welche die Eindeutigkeit der tesselierten Kugeln verbessern. Außerdem ist eine Erweiterung der Methode durch die Berechnung der Translationskomponenten in einem zweiten Schritt denkbar.

In der Arbeit sind außerdem drei Verfahren beschrieben, mit denen eine Registrierung von TLS-Daten über eine symbolische Zuordnung von Ebenen möglich ist. Die formbasierte Zuordnung nutzt extrahierte Merkmale für das Auffinden von korrespondierenden Ebenen aus. Dadurch sind nur wenige Kombinationen an Ebenentripeln zu testen und ein Ergebnis für die Transformationsvorschrift liegt in weniger als einer Sekunde vor, sofern die Merkmale bereits extrahiert sind. Mit den verwendeten Merkmalen (Fläche der Regionen, Umfang und Seitenverhältnis eines umschließenden Rechtecks und mittlerer Intensitätswert) hat sich gezeigt, dass die Merkmale nur hinreichend genau übereinstimmen, sofern die Scans eine hohe Überlappung aufweisen und von einem ähnlichen Standpunkt aus aufgenommen wurden. Bei einem Abstand der Standpunkte von bis zu ca. 10m ist das Verfahren als robust einzustufen, die Verknüpfungsparameter werden im Mittel besser als ein Dezimeter bzw. besser als zwei zehntel Grad genau bestimmt. Für weiter auseinander liegende Standpunkte konnten die Transformationsvorschriften zwischen den Scans mit den verwendeten Merkmalen und der vorgestellten Heuristik für die Auswahl der korrekten Lösung in den meisten Fällen nicht ermittelt werden.

Eine mögliche Erweiterung wäre die Einbeziehung zusätzlicher Merkmale. Hierbei müssten charakteristische Merkmale gefunden werden, die einerseits schnell aus den Daten extrahiert werden können und andererseits invariant gegenüber der unterschiedlichen Blickrichtungen sind. Außerdem wurden durch das verwendete Bereichswachstumsverfahren für die Segmentierung der Scandaten in ebene Regionen möglichst große und zusammenhängende Regionen gebildet. Dies führt zu unterschiedlichen Begrenzungen der Ebenen bei verschiedenen Blickwinkeln und somit zu variierenden Merkmalen. Abhilfe könnte hier neben zusätzlichen Merkmalen ein anderes Segmentierv Verfahren schaffen.

Die orientierungsbasierte Zuordnung gehört ebenfalls zu den symbolischen Verfahren und verzichtet auf die Verwendung extrahierter Merkmale, korrespondierende Ebenen werden über deren Orientierung zugeordnet. Als Maß der Orientierung wird hier das Spatprodukt verwendet. Damit ist die Begrenzung der Ebenen für die Berechnung der Transformationsvorschrift nicht bedeutsam, aber aufgrund der erlaubten Permutationen erhöht sich die Anzahl möglicher Kombinationen drastisch und der resultierende Suchraum kann in akzeptabler Zeit nicht komplett durchlaufen werden. Daher erfolgt eine Priorisierung für das Testen an Kombinationen über den Wert des Spatprodukts. Ebenentripel, die ein Spatprodukt nahe dem Wert eins aufweisen, werden bevorzugt für die Bildung von Kombinat en verwendet. Außerdem bricht das Suchverfahren anhand einer Heuristik für die Wahl der korrekten Lösung gegebenenfalls vorzeitig ab. Im Ergebnis können gegenüber dem Verfahren der formbasierten Zuordnung wesentlich weiter entfernt liegende Standpunkte registriert werden. In den gezeigten Tests war eine Registrierung von TLS-Daten bis zu einer Entfernung von ca. 35 m zwischen den Standpunkten möglich. Die erreichten Genauigkeiten sind mit denen der formbasierten Zuordnung vergleichbar. Voraussetzung für den schnellen Erfolg des Verfahrens sind die Präsenz von Ebenen, welche zu einem Wert des Spatprodukt nahe eins führen. Dadurch ergibt sich eine Abhängigkeit des Verfahrens von dem Inhalt der Szene. Mit kleineren Werten für das Spatprodukt steigt die Anzahl der möglichen Kombinationen und somit die Laufzeit des Verfahrens.

Das dritte symbolische Zuordnungsverfahren verwendet Winkelbedingungen für die Zuordnung der Ebenen. Das Potential für die Einschränkung des Suchraums im Vergleich zu der orientierungsbasierten Suche wurde in einer Untersuchung anhand des Testdatensatzes im Schnitt auf den Faktor 200 beziffert. Da die Normalenrichtungen der extrahierten Ebenen durch die hohe Anzahl an Punkten pro Region sehr genau bestimmt sind, eignen sich die Winkelbedingungen gut für eine effiziente Eingrenzung des Suchraums, ohne dass korrekte Lösungen vorab verworfen werden. Außerdem konnte die Szenenabhängigkeit, welche bei dem orientierungsbasierten Zuordnungsverfahren gegeben ist, eliminiert werden. Über eine separate Berechnung der Rotationskomponente und der anschließenden Anwendung des RANSAC-Verfahrens für die Auswahl an Ebenentupel für die Berechnung der Transformationsvorschrift wurde die Komplexität des Suchraums weiter reduziert. Im Ergebnis liefert das Verfahren ebenfalls eine priorisierte Liste von Lösungskandidaten, die im Vergleich zum orientierungsbasierten Zuordnungsverfahren jedoch bereits im Vorfeld erheblich reduziert wurde. Die korrekte Lösung kann nach Durchlaufen des Algorithmus aus einer Liste von weniger als 100 möglichen Lösungen ausgewählt werden.

Fitnessfunktionen für die Verifikation von Lösungen wurden implementiert und auf den Testdatensatz angewendet. Neben der in den Zuordnungsverfahren verwendeten Fitnessfunktion basierend auf der Zahl ähnlicher Ebenen wurden weitere Funktionen getestet, die anstelle der extrahierten Regionen die erfassten Punktdaten verwenden. Hierzu wurden verschiedene Varianten an punktbasierten Fitnessfunktionen sowie eine kombinierte Funktion, welche Punkte und deren Normalenrichtung berücksichtigt, vorgeschlagen. Die Selektivität der Fitnessfunktionen wurde anhand des Testdatensatzes überprüft. Dabei konnten bis zu einer Überlappung der Scans von bis zu 55% korrekte Lösungen aus einer größeren Lösungsmenge herausgefiltert werden. Für weniger überlappende Scans und bei Symmetrien in der Szene haben jedoch alle Funktionen Schwächen gezeigt. Der Verifikationsschritt kann weiter verbessert werden, indem weitere Kriterien für die Fitnessfunktionen definiert werden. Beispielsweise könnten gezielt einzelne, aber charakteristische Oberflächenbereiche aus den Scandaten für die Verifikation einer Transformationsvorschrift verwendet werden.

Die vorgestellten Verfahren, sowohl das Globale wie auch die Symbolischen, können für die ebenenbasierte Registrierung von TLS-Daten verwendet werden. Alle Verfahren berechnen ohne die Eingabe von Näherungswerten oder anderer Informationen automatisch eine Transformationsvorschrift mit sechs Freiheitsgraden und liefern für eine Grobregistrierung weitaus ausreichende Genauigkeiten. Eine anschließende Feinregistrierung kann mit Standardsoftware durchgeführt werden. Bei der Anwendung eines der Verfahren entfällt die Erfassung zusätzlicher Passpunkte für die Registrierung. Eine automatisierte Erfassung könnte mit Unterstützung der Verfahren ohne externe Sensoren zur Positions- und Orientierungsbestimmung durchgeführt werden.

A Quaternionen

Bei der Bestimmung der Rotationsparameter anhand von Quaternionen aus identischen Punkten wird folgende Fehlnorm minimiert:

$$E = \sum_{i=1}^n (\bar{\mathbf{x}}_{1,i} - \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{x}}_{2,i})^2 \quad (\text{A.1})$$

Umformungen der Gleichung A.1 ergeben:

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \bar{\mathbf{x}}_{1,i} \rangle - 2 \cdot \sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle + \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i}, \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle = \\ &= \sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \bar{\mathbf{x}}_{1,i} \rangle - 2 \cdot \sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle + \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{R}^T \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i}, \mathbf{R}^T \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Aufgrund der Orthogonalitätsbedingung von Rotationsmatrizen ist $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$. Somit enthält nur noch der mittlere Term der Gleichung A.2 die unbekannten Parameter und die Fehlnorm wird minimal, wenn der negative Ausdruck der Gleichung $\sum_{i=1}^n \langle \bar{\mathbf{x}}_{1,i}, \mathbf{R} \bar{\mathbf{x}}_{2,i} \rangle$ maximal wird.

Eine Rotation kann über eine zweifache Quaternionenmultiplikation berechnet werden. Es gilt:

$$\mathbf{R} \mathbf{x} = \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\mathbf{x}} \star \dot{\mathbf{q}}^* \quad (\text{A.3})$$

Werden die Punkte $\bar{\mathbf{x}}$ als Quaternion geschrieben, indem jeweils die fehlende skalare Komponente mit dem Wert Null hinzugefügt wird, muss für die Berechnung der Rotationsparameter also ein Einheitsquaternion $\dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{v}, s)$ gefunden werden, für das die folgende Beziehung maximal wird:

$$\sum_{i=1}^n \langle \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{1,i}, \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{2,i} \star \dot{\mathbf{q}}^* \rangle \quad (\text{A.4})$$

Über die Beziehung $\langle \dot{\mathbf{x}}_1, (\dot{\mathbf{r}} \star \dot{\mathbf{q}}^*) \rangle = \langle \dot{\mathbf{r}}, (\mathbf{x}_1 \star \dot{\mathbf{q}}) \rangle$ lässt sich die Gleichung A.4 umformen zu (Horn, 1987):

$$\sum_{i=1}^n \langle \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{2,i}, \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{1,i} \star \dot{\mathbf{q}} \rangle \quad (\text{A.5})$$

Die Ausführung der Multiplikationen nach den Rechenregeln für die Quaternionenmultiplikation ergibt:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} \star \dot{\bar{\mathbf{x}}}_{2,i} &= \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ s \end{pmatrix} \star \begin{pmatrix} x_{2,i} \\ y_{2,i} \\ z_{2,i} \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} s \begin{pmatrix} x_{2,i} \\ y_{2,i} \\ z_{2,i} \end{pmatrix} + 0 \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_y z_{2,i} - v_z y_{2,i} \\ v_z x_{2,i} - v_x z_{2,i} \\ v_x y_{2,i} - v_y x_{2,i} \end{pmatrix} \\ s 0 - v_x x_{2,i} - v_y y_{2,i} - v_z z_{2,i} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & z_{2,i} & -y_{2,i} & x_{2,i} \\ -z_{2,i} & 0 & x_{2,i} & y_{2,i} \\ y_{2,i} & -x_{2,i} & 0 & z_{2,i} \\ -x_{2,i} & -y_{2,i} & -z_{2,i} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ s \end{pmatrix} = \mathbf{A}_1 \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Analog erhält man für den zweiten Term der Gleichung A.5:

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}}_{1,i} \star \dot{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} 0 & -z_{1,i} & y_{1,i} & x_{1,i} \\ z_{1,i} & 0 & -x_{1,i} & y_{1,i} \\ -y_{1,i} & x_{1,i} & 0 & z_{1,i} \\ -x_{1,i} & -y_{1,i} & -z_{1,i} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ s \end{pmatrix} = \mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{A.7})$$

Die zu maximierende Summe aus Gleichung A.4 ergibt sich nun zu:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \langle \mathbf{A}_1 \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{q}} \rangle = \\
& \sum_{i=1}^n \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{q}} = \\
& \dot{\mathbf{q}}^T \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_2 \right) \dot{\mathbf{q}} = \\
& \dot{\mathbf{q}}^T \left(\sum_i \mathbf{N}_i \right) \dot{\mathbf{q}} = \\
& \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{N} \dot{\mathbf{q}}
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Folglich berechnen sich die Elemente der Matrix $\mathbf{N}$ zu:

$$\begin{aligned}
\mathbf{N}_{11} &= -\sum \bar{z}_{1,i} \bar{z}_{2,i} - \sum \bar{y}_{1,i} \bar{y}_{2,i} + \sum \bar{x}_{1,i} \bar{x}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{12} &= \sum \bar{x}_{1,i} \bar{y}_{2,i} + \sum \bar{y}_{1,i} \bar{x}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{13} &= \sum \bar{x}_{1,i} \bar{z}_{2,i} + \sum \bar{z}_{1,i} \bar{x}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{14} &= -\sum \bar{y}_{1,i} \bar{z}_{2,i} + \sum \bar{z}_{1,i} \bar{y}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{21} &= \sum \bar{y}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{x}_{1,i} \bar{y}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{22} &= -\sum \bar{z}_{1,i} \bar{z}_{2,i} - \sum \bar{x}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{y}_{1,i} \bar{y}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{23} &= \sum \bar{y}_{1,i} \bar{z}_{2,i} + \sum \bar{z}_{1,i} \bar{y}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{24} &= \sum \bar{x}_{1,i} \bar{z}_{2,i} - \sum \bar{z}_{1,i} \bar{x}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{31} &= \sum \bar{z}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{x}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{32} &= \sum \bar{z}_{1,i} \bar{y}_{2,i} + \sum \bar{y}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{33} &= -\sum \bar{y}_{1,i} \bar{y}_{2,i} - \sum \bar{x}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{z}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{34} &= -\sum \bar{x}_{1,i} \bar{y}_{2,i} + \sum \bar{y}_{1,i} \bar{x}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{41} &= \sum \bar{z}_{1,i} \bar{y}_{2,i} - \sum \bar{y}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{42} &= -\sum \bar{z}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{x}_{1,i} \bar{z}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{43} &= \sum \bar{y}_{1,i} \bar{x}_{2,i} - \sum \bar{x}_{1,i} \bar{y}_{2,i} \\
\mathbf{N}_{44} &= \sum \bar{x}_{1,i} \bar{x}_{2,i} + \sum \bar{y}_{1,i} \bar{y}_{2,i} + \sum \bar{z}_{1,i} \bar{z}_{2,i}
\end{aligned} \tag{A.9}$$

Die Summen können mit $S_{xx}, S_{xy}, \dots, S_{zz}$ bezeichnet werden, die Matrix $\mathbf{N}$ ergibt sich somit zu:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{xz} + S_{zx} & -S_{yz} + S_{zy} \\ S_{yx} + S_{xy} & -S_{xx} + S_{yy} - S_{zz} & S_{yz} + S_{zy} & S_{xz} - S_{zx} \\ S_{zx} + S_{xz} & S_{zy} + S_{yz} & -S_{xx} - S_{yy} + S_{zz} & -S_{xy} + S_{yx} \\ S_{zy} - S_{yz} & -S_{zx} + S_{xz} & S_{yx} - S_{xy} & S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} \end{pmatrix} \tag{A.10}$$

Literatur

- Ackermann, F., 1984. Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record* 11 (64), S. 429–439.
- Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning - present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), S. 64–67.
- Adobe, 1992. TIFF - Revision 6.0. Adobe Systems Incorporated, 1585 Charleston Road, P.O.Box 7900, Mountain View, CA 94039-7900, <http://partners.adobe.com>.
- Akca, D., 2004. A new algorithm for 3D surface matching. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Bd. XXXV, B7. Istanbul, S. 960–965.
- Akca, D., Gruen, A., 2005a. Fast correspondence search for 3D surface matching. In: Vosselman, G., Brenner, C. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*. Enschede, the Netherlands, S. 186–191.
- Akca, D., Gruen, A., 2005b. Recent advances in least squares 3D surface matching. In: Gruen, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VII*. Bd. II. Vienna, S. 197–206.
- Akca, D., 2003. Full automatic registration of laser scanner point clouds. In: Gruen, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VI*. Zürich, S. 330–337.
- Al-Manasir, K., Fraser, C. S., 2006. Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. *The Photogrammetric Record* 21 (115), S. 255–268.
- Allen, P., Stamos, I., Troccoli, A., Smith, B., Leordeanu, M., Hsu, Y. C., 2003. 3D modeling of historic sites using range and image data. In: *International Conference of Robotics and Automation*. Taipei, S. 145–150.
- Andrew, A., 1979. Another efficient algorithm for convex hulls in two dimensions. *Information Processing Letters* 9 (5), S. 216–219.
- Arun, K. S., Huang, T. S., Blostein, S. D., 1987. Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 9 (5), S. 698–700.
- Asai, T., Kanbara, M., Yokoya, N., 2005a. 3D modeling of outdoor environments by integrating omnidirectional range and color images. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. Ottawa, Ontario, Canada, S. 447–454.
- Asai, T., Kanbara, M., Yokoya, N., 2005b. 3D Modeling of outdoor scenes by integrating stop-and-go and continuous scanning of rangefinder. In: *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 3D Arch.* ISPRS WG V/4 - Virtual Reality and Computer Animation, Mestre-Venice, Italy, S. CD.
- Bae, K.-H., 2006. Automated registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners. Dissertation, Curtin University of Technology, Department of Spatial Sciences.
- Bae, K.-H., Lichti, D. D., 2008. A method for automated registration of unorganised point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial Laser Scanning"* 63 (1), S. 36–54.
- Bähr, H.-P., 1998. Digitale Bildverarbeitung, 3. Auflage. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. Wichmann Verlag, Kap. Von der realen Welt zum digitalen Bild, S. 15–28.
- Barber, D. M., Mills, J. P., Bryan, P. G., 2005. Maintaining momentum in terrestrial laser scanning: a UK case study. In: Vosselman, G., Brenner, C. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*. Enschede, the Netherlands, S. 126–131.
- Barnea, S., Filin, S., 2007. Registration of terrestrial laser scans via image based features. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Bd. XXXVI, Part 3 / W52. S. 32–37.
- Barnea, S., Filin, S., 2008. Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial Laser Scanning"* 63 (1), S. 19–35.
- Baumann, E., 1998. Vermessungskunde, 6. Auflage. Nr. Band 2. Dümmler.
- Becker, R., Benning, W., Effkemann, C., 2004. 3D Monoplotting, Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 2004 (5), S. 347–355.
- Bendels, G. H., Degener, P., Wahl, R., Körtgen, M., Klein, R., 2004. Image-based registration of 3D-range data using feature surface elements. In: Chrysanthou, Y., Cain, K., Silberman, N., Niccolucci, F. (Hrsg.), *The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*. Eurographics, S. 115–124.
- Benjemaa, R., Schmitt, F., 1997. Fast global registration of 3D sampled surfaces using a multi-Z-buffer technique. In: *International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. IEEE Computer Society, S. 113–120.
- Besl, P. J., McKay, N. D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (2), S. 239–256.

- Biber, P., Straßer, W., 2003. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching. In: *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems*. S. 2743–2748.
- Bienert, A., Scheller, S., Keane, E., Mullooly, G., Mohan, F., 2007. Automatische Erfassung forstinventur-relevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Laserscanning - Modellextraktion, S. 216–225.
- Blais, F., 2004. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging* 13 (1), S. 231–240.
- Böhler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A., 2003. Investigating laser scanner accuracy. In: *Proceedings of the ISPRS CIPA XVIII International Symposium*. Bd. XXXIII-5/C15. Antalya, S. 696–701.
- Böhm, J., 2005. Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, C 583.
- Böhm, J., Becker, S., 2007. Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features. In: *8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*. S. 338–344.
- Bornaz, L., Lingua, A., Rinaudo, F., 2002. A new software for the automatic registration of 3D digital models acquired using laser scanner devices. In: *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*. S. 52–57.
- Brenner, C., 2000. Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Deutsche Geodätische Kommission, C 530.
- Brenner, C., Dold, C., 2007. Automatic relative orientation of terrestrial laser scans using planar structures and angle constraints. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Bd. XXXVI, Part 3. S. 84–89.
- Brenner, C., Dold, C., Jülge, K., 2003. Fusion, interpretation and combination of geodata for the extraction of topographic objects. In: Maas, H.-G., Vosselman, G., Streilein, A. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS workshop: 3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*. Bd. XXXIV, Part 3/W13. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, S. 124–129.
- Brenner, C., Dold, C., Ripperda, N., 2008. Coarse orientation of terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial Laser Scanning"* 63 (1), S. 4–18.
- Broser, J.-M., 2007. Römische Stadtmauer und Zeughaus - ein zeitgemäßes Bauaufmaß. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Objekterfassung mit hybriden Messmethoden, S. 310–317.
- Brou, P., 1984. Using the Gaussian Image to find the orientation of objects. *The International Journal of Robotics Research* 3 (4), S. 89–125.
- Brusco, N., Andreetto, M., Giorgi, A., Cortelazzo, G. M., 2005. 3D registration by textured spin-images. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. S. 262–269.
- Campbell, R. J., Flynn, P. J., 2001. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Comput. Vis. Image Underst.* 81 (2), S. 166–210.
- Carmichael, O., Huber, D., , Hebert, M., 1999. Large data sets and confusing scenes in 3-D surface matching and recognition. In: *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. S. 358–367.
- Chao, C., Stamos, I., 2005. Semi-automatic range to range registration: a feature-based method. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. IEEE Computer Society, Ottawa, Ontario, Canada, S. 254–261.
- Chen, Y., Medioni, G., 1991. Object modeling by registration of multiple range images. In: *International Conference on Robotics and Automation*. S. 2724–2729.
- Chung, D. H., Yun, I. D., Lee, S. U., 1998. Registration of multiple-range views using the reverse-calibration technique. *Pattern Recognition* 31 (4), S. 457–464.
- Cramer, M., Stallmann, D., Haala, N., 1999. Sensor integration and calibration of digital airborne three-line camera systems. In: *Proceedings of the ISPRS WG II/1, Mobile Mapping Technology*. Bd. XXXII-2-5-3/W10. Bangkok, Thailand.
- Dam, E., Koch, M., Lillholm, M., 1998. Quaternions, interpolation and animation. Tech. Rep. Technical Report DIKU-TR-98/5, Department of Computer Science, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark.
- Delingette, H., Hebert, M., Ikeuchi, K., 1993. A spherical representation for the recognition of curved objects. In: *International Conference on Computer Vision*. S. 103–112.
- Dijkman, S., van den Heuvel, F., 2002. Semi automatic registration of laser scanner data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Bd. 34. S. 12–17.

- Dold, C., 2005. Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data. In: Vosselman, G., Brenner, C. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*. Enschede, the Netherlands, S. 180–185.
- Dold, C., Brenner, C., 2006. Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. In: Maas, H.-G., Schneider, D. (Hrsg.), *Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings of the ISPRS Com. V Symposium*. Bd. XXXVI. Dresden, S. 78–83.
- Dorai, C., Weng, J., Jain, A. K., 1994. Optimal registration of multiple range views. In: *12th IAPR International Conference on Pattern Recognition*. Bd. I. Jerusalem, Israel, S. 569–571.
- Drixler, E., 1993. Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum. Bd. Reihe C, Heft Nr. 409. Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Duda, R. O., Hart, P. E., 1973. Pattern classification and scene analysis. John Wiley and Sons, New York.
- Eggert, D., Lorusso, A., Fisher, R., 1997. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications* 9 (5-6), S. 272–290.
- Eling, D., Kutterer, H., 2006. Terrestrisches Laserscanning für die Deformationsanalyse an Talsperren. In: *Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida*. Nr. 1. S. 31–40.
- Endl, K., 1985. Analytische Geometrie und Lineare Algebra II. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Faugeras, O. D., Hebert, M., 1986. The representation, recognition, and locating of 3-D objects. *International Journal of Robotics Research* 5 (3), S. 27–52.
- Feddema, J. T., Little, C. Q., 1997. Rapid world modeling: fitting range data to geometric primitives. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bd. 4. Albuquerque, New Mexico, S. 2807–2812.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM* 24 (6), S. 381–395.
- Förstner, W., 1982. On the geometric precision of digital correlation. In: *Proceedings of the ISPRS Symposium Mathematical Models, Accuracy Aspects and Quality Control*. Bd. XXIV-3. Helsinki, S. 176–189.
- Fraser, C. S., Edmundson, K. L., 2000. Design and implementation of a computational processing system for off-line digital close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 55 (2), S. 94–104.
- Früh, C., Zakhor, A., 2003. Constructing 3D city models by merging aerial and ground views. *IEEE Computer Graphics and Applications Special Issue* (Nov/Dec), S. 52–61.
- Gagnon, H., Soucy, M., Bergevin, R., Laurendeau, D., 1994. Registration of multiple range views for automatic 3-D model building. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. S. 581–586.
- Gelfand, N., Mitra, N. J., Guibas, L. J., Pottmann, H., 2005. Robust global registration. In: Desbrun, M., Pottmann, H. (Hrsg.), *Eurographics Symposium on Geometry Processing 2005*. Eurographics Association, S. 197–206.
- Godin, G., Rioux, M., Baribeau, R., 1994. Three-dimensional registration using range and intensity information. In: *Proceedings of SPIE Videometric III*. Bd. 2350. S. 279–290.
- Graham, R. L., 1972. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set. *Information Processing Letters* 1 (4), S. 132–133.
- Greenspan, M., Godin, G., 2001. A nearest neighbor method for efficient ICP. In: *Proceedings of the Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*. Quebec City, Canada, S. 161–168.
- Grimson, W. E., Lozano-Perez, T., 1984. Model-based recognition and localization from sparse range or tactile data. *The International Journal of Robotics Research* 3 (3), S. 3–35.
- Grimson, W. E. L., 1990. Object recognition by computer. The MIT Press.
- Grimson, W. E. L., Lozano-Pérez, T., 1987. Localizing overlapping parts by searching the interpretation tree. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Bd. 9(4). S. 469–482.
- Gruber, F. J., 1998. Formelsammlung für das Vermessungswesen, 9. Auflage. Dümmler, Bonn.
- Gruen, A., 1984. Adaptive least squares correlation-concept and first results. In: *Intermediate Research Project Report to Heleva Associates*. Inc. Ohio State University, Columbus, S. 1–13.
- Gruen, A., Akca, D., 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59 (3), S. 151–174.
- Guarnieri, A., Guidi, G., Tucci, G., Vettore, A., 2003. Towards automatic modeling for cultural heritage applications. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. XXXIV. S. 176–181.
- von Hansen, W., 2006. Robust automatic marker-free registration of terrestrial scan data. In: Förstner, W., Steffen, R. (Hrsg.), *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision*. Bd. XXXVI. Bonn, Germany, S. 105–110.

- von Hansen, W., 2007. Automatic detection of zenith direction in 3D point clouds of built-up areas. In: Stilla, U., Mayer, H., Rottensteiner, F., Heipke, C., Hinz, S. (Hrsg.), *Photogrammetric Image Analysis (PIA 07)*. Bd. XXXVI, Part 3 / W 49A. S. 93–97.
- von Hansen, W., Michaelsen, E., Thonnessen, U., 2006. Cluster analysis and priority sorting in huge point clouds for building reconstruction. *icpr* 1, S. 23–26.
- Hartley, R., Zissermann, A., 2000. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press.
- He, W., Ma, W., Zha, H., 2005. Automatic registration of range images based on correspondence of complete plane patches. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. Ottawa, Ontario, Canada, S. 470–475.
- Hebert, M., Ikeuchi, K., Delingette, H., 1995. A spherical representation for recognition of free-form surfaces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 (7), S. 681–690.
- Hesse, C., 2008. Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie der Leibniz Universität Hannover, Nr. 268, ISSN 0174-1454.
- Higuchi, K., Hebert, M., Ikeuchi, K., 1998. Building 3D models from unregistered multiple range images. *Systems and Computers in Japan* 29 (6), S. 82–90.
- Hönniger, C., Kersten, T., 2005. Topografische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann, Heidelberg, Kap. Laserscanning, S. 224–231.
- Hoover, A., Jean-Baptiste, G., Jiang, X., Flynn, P. J., Goldgof, H. B. D. B., Bowyer, K., Eggert, D. W., Fitzgibbon, A., Fisher, R. B., 1996. An experimental comparison of range image segmentation algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (7), S. 673–689.
- Horn, B. K. P., 1984. Extended Gaussian Images. In: *Proc. IEEE*. Bd. 72(12) von A.I. Memo No. 740. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, S. 1671–1686.
- Horn, B. K. P., 1987. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Optical Society of America* 4 (4), S. 629–642.
- Horowitz, S. L., Pavlidis, T., 1974. Picture segmentation by a directed split-and-merge procedure. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Pattern Recognition*. S. 424–433.
- Huber, D., Hebert, M., 2003. Fully automatic registration of multiple 3-D data sets. *Image and Vision Computing* 21 (7), S. 637–650.
- Hunter, G., Cox, C., Kremer, J., 2006. Development of a commercial laser scanning mobile mapping system - StreetMapper. In: *Second International Workshop The Future of Remote Sensing*.
- Ingensand, H., 2006. Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In: Kahmen, H., Chrzanowski, A. (Hrsg.), *3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*. Baden, Austria.
- Intel, 1999-2001. Open Source Computer Vision Library. Intel Corporation.
URL <http://developer.intel.com>
- Jacobs, G., 2004. 3D laser scanning: an ultra-fast, high-definition, reflectorless topographic survey. *Professional Surveyor* 24 (5), S. 38–43.
- Jahn, I., Kersten, T., Kinzel, R., 2004. Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann, Heidelberg, Kap. Laserscanning - Anwendungsbeispiele, S. 222–229.
- Jiang, X. Y., Bunke, H., 1992. Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. Technical Report IAM-92-006, Institute of Informatics and Applied Mathematics, University of Bern, Switzerland.
- Jiang, X., Bunke, H., 1997. Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Johnson, A. E., Kang, S. B., 1997. Registration and integration of textured 3-D data. In: *NRC '97: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, S. 234.
- Johnson, A., 1997. Spin-images: a representation for 3-D surface matching. Dissertation, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- Johnson, A., Hebert, M., 1997. Surface registration by matching oriented points. In: *International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*. S. 121–128.
- Johnson, A. E., Hebert, M., 1999. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (5), S. 433–449.
- Jost, T., Hügli, H., 2002. A multi-resolution scheme ICP algorithm for fast shape representation. In: *Proceedings of 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*. S. 540–543.
- Kahmen, H., 1997. Vermessungskunde, 19. Auflage. Walter de Gruyter.

- Kampmann, G., Renner, B., 2004. Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung ausgleichender Ebenen und Geraden. *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 2, S. 56–67.
- Kapoutsis, C., Vavoulidis, C., Pitas, I., 1999. Morphological iterative closest point algorithm. *IEEE Transactions on Image Processing* 8 (11), S. 1644–1646.
- Katzenbeisser, R., 2003. About the calibration of LIDAR sensors. In: *ISPRS Workshop: 3-D Reconstruction from Airborne Laser-Scanner and InSAR data*. Bd. XXXIV, Part 3/W13.
- Kern, F., 2003. Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Braunschweig: Dissertation. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft 19, Braunschweig.
- Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K., Pardo, C. A., 2004. Terrestrial laserscanning system Mensi GS100/GS200 - Accuracy tests, experiences and projects at the Hamburg University of Applied Sciences. In: Maas, H.-G., Schneider, D. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS working group V/1, Panoramic Photogrammetry Workshop*. Bd. XXXIV, Part 5/W16.
- Kersten, T. P., Sternberg, H., Mechelke, K., 2005. Investigations into the accuracy behavior of the terrestrial laser scanning system Mensi GS 100. In: Gruen, Kahmen (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques VII*. Bd. I. S. 122–131.
- Kim, S., Jho, C., Hong, H., 2003. Automatic registration of 3D data sets from unknown viewpoints. In: *Workshop on Frontiers of Computer Vision*. S. 155–159.
- Kleinbauer, R., 2006. Spin Images als Merkmaloperator zur Verifikation von Punktkorrespondenzen. Diplomarbeit Nr. 465, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie.
- Köstner, A., 2007. Römische Stadtmauer und Zeughaus - ein zeitgemäßes Bauaufmaß. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Laserscanning - Anwendungen, S. 270–277.
- Kraus, K., 1997. Photogrammetrie, 6. Auflage. Bd. 1, Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler, Bonn.
- Kress-Lorenz, H., Eckert, G., Schaeffer, M., 2004. 3D-Stadtmodellierung und Verkehrsraumerfassung mit Laservermessungstechnologie. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann, Heidelberg, Kap. Laserscanning - Anwendungsbeispiele, S. 230–237.
- Kukko, A., Andrei, C.-O., Salminen, V.-M., Kaartinen, H., Chen, Y., Rönnholm, P., Hyypä, H., Hyypä, J., Chen, R., Haggrén, H., Kosonen, I., Čapek, K., 2007. Road environment mapping system of the Finnish Geodetic Institute - FGI Roamer. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. S. 241–247.
- Kutterer, H., 2007. Kinematisches terrestrisches Laserscanning - Stand und Potenziale. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Einführung in die Thematik, S. 1–9.
- Lemmens, M., 2007. Terrestrial Laser Scanners. *GIM International* 21 (8), online: <http://www.gim-international.com/issues/>.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., 2004. Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording. In: *FIG Working Week 2004*. Athens.
- Lindenberger, J., 1993. Laser-Profilmessung zur topographischen Geländeaufnahme. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 400.
- Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 (2), S. 91–110.
- Lucchese, L., Doretto, G., Cortelazzo, G., 2002. A frequency domain technique for range data registration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. S. 1468–1484.
- Luhmann, T., 2003. Nahbereichsphotogrammetrie. Bd. Second Edition. Herbert Wichman Verlag.
- Magnusson, M., Lilienthal, A., Duckett, T., 2007. Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT. *Journal of Field Robotics* 24 (10), S. 803–827.
- Makadia, A., Patterson, A., Daniilidis, K., 2006. Fully automatic registration of 3D point clouds. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Bd. 1. S. 1297–1304.
- Masuda, T., 2001. Generation of geometric model by registration and integration of multiple range images. In: *3-D Digital Imaging and Modeling*. S. 254–261.
- Masuda, T., 2002. Registration and integration of multiple range images by matching signed distance fields for object shape modeling. *Computer Vision and Image Understanding* 87, S. 51–65.
- Matabosch, C., Batlle, E., Fofi, D., Salvi, J., 2006. A variant of point-to-plane registration including cycle minimization. In: Förstner, W., Steffen, R. (Hrsg.), *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision*. Bd. XXXVI. Bonn, Germany, S. 61–66.
- Merziger, G., Wirth, T., 1993. Repetitorium der Höheren Mathematik, 2. Auflage. Binomi Verlag.

- Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R., 2005. Automatic correspondence for 3D modeling: an extensive review. *International Journal of Shape Modeling* 11 (2), S. 253–291.
- Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R., 2006a. A novel representation and feature matching algorithm for automatic pairwise registration of range images. *International Journal of Computer Vision (IJCV)* 66 (1), S. 19–40.
- Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R., 2004. Matching tensors for automatic correspondence and registration. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Bd. 3022 von Computer Vision - ECCV 2004. S. 495–505.
- Mian, A. S., Bennamoun, M., Owens, R., 2006b. Three-dimensional model-based object recognition and segmentation in cluttered scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28 (10), S. 1584–1601.
- Murino, V., Ronchetti, L., Castellani, U., Fusiello, A., 2001. Reconstruction of complex environments by robust pre-aligned ICP. *IEEE International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling* 00, S. 187–194.
- Neitzel, F., 2006. Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 131 (3), S. 132–140.
- Neugebauer, P. J., 1997. Reconstruction of real-world objects via simultaneous registration and robust combination of multiple range images. *International Journal of Shape Modeling* Vol. 3 (1&2), S. 71–90.
- Niebuhr, E., 1998. “CALLIDUS“ revolutioniert das Bauwesen. *Der Vermessungsingenieur, Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 6, S. 376.
- Niemeier, W., 2001. Ausgleichungsrechnung. Walter de Gruyter.
- Nüchter, A., 2007. Algorithmen zum Erstellen virtueller 3D-Welten mit mobilen Robotern. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Algorithmen, S. 164–171.
- Park, S.-Y., Subbarao, M., 2003. A fast point-to-tangent plane technique for multi-view registration. In: *3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*. S. 276–283.
- Pertl, A., 1984. Digital image correlation with the analytical plotter Planicomp C-100. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 25 (3B), S. 874–882.
- Pfeifer, N., Briese, C., 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*. Bd. XXXVI, Part 3. S. 311–319.
- Pfeifer, N., Gorte, B., Winterhalder, D., 2004. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Bd. XXXV, Part B5. S. 114–119.
- Rabbani, T., 2006. Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images. Publications on geodesy 62, Netherlands Geodetic Commission, Delft.
- Rabbani, T., Dijkman, S., van den Heuvel, F., Vosselman, G., 2007. An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (6), S. 355–426.
- Reshetnyuk, Y., 2006. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Transport and Economics, Stockholm.
- Rieger, P., Studnicka, N., Ullrich, A., 2007. “Mobile Laser Scanning“ - Anwendungen. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Herstellerforum, S. 340–350.
- Riegl, 2006. Manual for RiSCAN PRO - Version 1.4.1. RIEGL Laser Measurement Systems.
- Rietdorf, A., 2004. Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Ripperda, N., Brenner, C., 2005. Marker-free registration of terrestrial laser scans using the Normal Distribution Transform. In: *3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 3D Arch.* ISPRS WG V/4 - Virtual Reality and Computer Animation, Mestre-Venice, Italy, auf CD.
- Runne, H., Niemeier, W., Kern, F., 2001. Application of laser scanners to determine the geometry of buildings. In: Grün, A., Kahmen, H. (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques V*. Department of Applied and Engineering Geodesy, Institute of Deodesy and Geophysics, Vienna University of Technology, Wien, S. 41–48.
- Rusinkiewicz, S., Levoy, M., 2001. Efficient variants of the ICP algorithm. In: *Proceedings of the Third Intl. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*. S. 142–152.
- Salvi, J., Matabosch, C., Fofi, D., Forest, J., 2007. A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing* 25 (5), S. 578–596.
- Sansò, F., 1973. An exact solution of the roto-translation problem. *Photogrammetria* 29 (6), S. 203–216.

- Schäfer, T., 2004. Deformationsmessung mit Laserscanning am Beispiel eines Schleusentores des Donaukraftwerks Gabčíkovo. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann, Heidelberg, Kap. Laserscanning - Anwendungsbeispiele, S. 246–253.
- Schlemmer, H., 2004. Einführung in die Technologie des Laserscannings. In: *14th International Conference on Engineering Surveying, Tutorial 3*. Zürich.
- Schulz, T., Ingensand, H., 2004. Laserscanning - Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Wichmann Verlag, Kap. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Kapitel: Laserscanning - Genauigkeitsuntersuchungen, S. 90–97.
- Sevcik, C., Studnicka, N., 2004. Documentation of complex facades and city modelling through the combination of Laserscanning and photogrammetry. In: *CIPA, International Workshop on Vision Techniques applied to the Rehabilitation of City Centres*. Lissabon, Portugal.
- Sharp, G., Lee, S., Wehe, D., 2002. ICP registration using invariant features. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Bd. 24. S. 90–102.
- Staiger, R., 2003. Terrestrial laser scanning - technology, systems and applications. In: *2nd FIG Regional Conference*. Marrakech (Morocco), TS 12.3, Online: <http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/program.htm>.
- Staiger, R., 2005. The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). In: *FIG Working Week 2005 and GSDI-8*. Kairo, TS 38.5, auf CD.
- Staiger, R., 2007. Auswahlkriterien für terrestrische Laserscanner. 2. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning 2007, Vortrag.
- Stamos, I., 2001. Geometry and texture recovery of scenes of large scale: integration of range and intensity sensing. Dissertation, Colombia University.
- Stamos, I., Leordeanu, M., 2003. Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale. In: *CVPR*. Madison, WI, S. 555–561.
- Sternberg, H., Braunroth, M., 2007. Vergleichende Untersuchung von Laserscansystemen und deren Auswertesoftware bei der Modellierung eines Umspannwerkes. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007. Herbert Wichmann, Kap. Laserscanning - Modellextraktion, S. 234–243.
- Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W., Baron, A., 2004. Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35 (Part B7)*. S. 990–995.
- Tauber, S., 2005. Untersuchung zur Mess- und Registrierengenauigkeit des Laserscanners Riegl LMS Z360. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Kartographie und Geoinformatik.
- Thiel, K.-H., Wehr, A., 2004. Performance capabilities of laser-scanners - an overview and measurement principle analysis. In: *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. Bd. XXXVI, Part 8/W2. Freiburg, S. 14–18.
- Trucco, E., Fusiello, A., Roberto, V., 1999. Robust motion and correspondences of noisy 3-D point sets with missing data. *Pattern Recognition Letters* 20 (9), S. 889–898.
- Umeyama, S., 1991. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 13 (4), S. 376–380.
- Vosselman, G., 1999. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. In: *IA-PRS*. Bd. 32, Part 3/2W5. S. 87–92.
- Wagner, A., Hasse, S., 2004. 3D-Erfassung und Modellierung des Thermo-Windkanals der Audi AG. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Herbert Wichmann, Heidelberg, Kap. Laserscanning - Anwendungsbeispiele, S. 238–245.
- Wahl, R., Guthe, M., Klein, R., 2005. Identifying planes in point-clouds for efficient hybrid rendering. In: *The 13th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. S. 1–8.
- Wang, Z., Brenner, C., 2008. Geometric feature-point based registration of terrestrial laser data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Bd. XXXVII. Beijing, China.
- Weber, T., 2002. Laser-Scanning zur Erfassung, Modellierung und intelligenten Visualisierung eines historischen Kirchendachstuhls. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2002. Herbert Wichmann, Hüthig Fachverlag, Kap. Photogrammetrie und Laserscanning: Anwendungen für As-Built-Dokumentation und Facility Management, S. 133–140.
- Wehr, A., 2005. Laser scanning and its potential to support 3D panoramic recording. In: Reulke, R., Knauer, U. (Hrsg.), *Panoramic Photogrammetry Workshop*. Bd. XXXVI-5/W8.
- Wendt, A., 2004. On the automation of the registration of point clouds using the metropolis algorithm. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Bd. XXXV, Part B3. Proceedings of the ISPRS working group III/2, Istanbul, S. 106–111.
- Wendt, A., 2008. Objektraumbasierte simultane multi-sensorale Orientierung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und

- GeoInformation, Deutsche Geodätische Kommission, C 613.
- Wendt, A., Dold, C., 2005. Estimation of interior orientation and eccentricity parameters of a hybrid imaging and laser scanning sensor. In: Reulke, R., Knauer, U. (Hrsg.), *Proceedings of the ISPRS working group V/5, Panoramic Photogrammetry Workshop*. Bd. XXXVI-5/W8. S. CD.
- Williams, J., Bennamoun, M., 2001. Simultaneous registration of multiple corresponding point sets. *Computer Vision and Image Understanding* 81 (1), S. 117–142.
- Winkelbach, S., Molkenstruck, S., Wahl, F. M., 2006. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. In: Franke, K., Müller, K.-R., Nickolay, B., Schäfer, R. (Hrsg.), *Pattern Recognition*. 28th DAGM Symposium. Berlin, Germany, S. 718–728.
- Winkelbach, S., Rilk, M., Schönfelder, C., Wahl, F. M., 2004. Fast random sample matching of 3D fragments. In: Rasmussen, C. E., Bülthoff, H. H., Giese, M. A., Schölkopf, B. (Hrsg.), *Pattern Recognition (DAGM)*. S. 129–136.
- Wulf, O., Brenneke, C., Wagner, B., 2004. Colored 2D maps for robot navigation with 3D sensor data. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Bd. 3. Sendai, Japan, S. 2991–2996.
- Wyngaerd, J. V., van Gool, L., 2002. Automatic crude patch registration: toward automatic 3D model building. *Computer Vision and Image Understanding* 87, S. 8–26.
- Zhang, Z., 1994. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision* 13 (2), S. 119–152.
- Zinßer, T., Schmidt, J., Niemann, H., 2003. A refined ICP algorithm for robust 3-D correspondence estimation. In: *IEEE International Conference on Image Processing*. Barcelona, Spain, S. 695–698.

Danksagung

Diese Arbeit ist weitgehend bei meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Institut für Kartographie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover im Rahmen einer von der Volkswagen-Stiftung geförderten Nachwuchsgruppe mit dem Titel „Automatische Verfahren zur Fusion, Reduktion und konsistenten Kombination komplexer heterogener Geoinformation“ entstanden. An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir diese Arbeit ermöglicht und bei deren Fertigstellung geholfen haben.

Dem Leiter der Nachwuchsgruppe und meinem Doktorvater Herrn Dr.-Ing. Claus Brenner sowie der Institutsleiterin Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester gelten mein besonderer Dank. Sie haben mich während meiner Arbeit stets unterstützt, fachlich begleitet und mir die Möglichkeit gegeben, Fachbeiträge auf nationalen und internationalen Kongressen zu präsentieren. Danke für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen aus denen viele Ideen für diese Arbeit entstanden sind. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M.G. Vosselman und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke für das Lesen meiner Arbeit, für die Anregungen und für die Übernahme der Korreferate bedanken.

Ebenfalls gilt mein Dank allen ehemaligen Kollegen am Institut für Kartographie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover. Sie alle haben durch die Gespräche und den ständigen Erfahrungsaustausch zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Namentlich danken möchte ich meinen langjährigen Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Guido von Gösseln und Frau Dipl.-Ing. Birgit Kieler, sie haben mich immer wieder motiviert die Arbeit fertig zu stellen und hilfreiche Ratschläge gegeben. Für das Korrekturlesen der Arbeit und für die vielen Gespräche, die zur Verbesserung der Arbeit beigetragen haben, danke ich besonders Frau Dr.-Ing. Nora Ripperda, ebenfalls eine langjährige Zimmerkollegin.

Außerdem möchte ich meinen Eltern und besonders meiner Frau Marion herzlich danken. Sie haben mich während der gesamten Zeit moralisch unterstützt und mich immer wieder ermuntert, die Arbeit fertig zu stellen.

Lebenslauf

seit Mai 2008	Mitarbeiter der AICON 3D-Systems GmbH in Braunschweig
Jan. 2003 - März 2008	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover
März 2001 - Dez. 2003	Mitarbeiter der TopoSys GmbH in Ravensburg
Jan. 2001	Studienabschluss: Diplom-Ingenieur der Geodäsie und Geoinformatik
Juli 2000 - Jan. 2001	Auslandsaufenthalt in London am Department of Geomatic Engineering, University College London
Febr. 1996 - Juni 2000	Fortsetzung des Studiums an der Universität Stuttgart
April 1995 - Jan. 1996	Ableistung des Grundwehrdienstes
Okt. 1994 - März 1995	Beginn des Studiums der Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Stuttgart
Juni 1994	Schulabschluss: Abitur
Sept. 1985 - Juni 1994	Besuch des Einstein-Gymnasiums in Kehl
Sept. 1981 - Aug. 1985	Besuch der Grundschule in Kehl
22. Dezember 1974	Geboren in Kehl