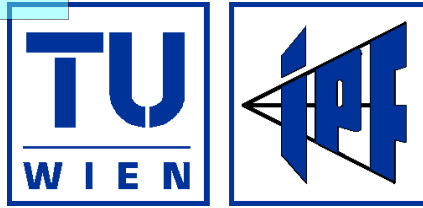


Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DISSERTATION

Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten
bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Jansa
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (E122)
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von

Dipl.-Ing. Alexander Haring
Matr.Nr.: 9725184
Arbeitergasse 50/20
A-1050 Wien

Wien, im Oktober 2007

.....

Diese Arbeit ist im Rahmen des Christian-Doppler-Labors „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ entstanden.

This work was developed within the scope of the Christian Doppler Laboratory for „Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing“ .

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen Dank aussprechen, die zum Entstehen dieser Arbeit – sei es direkt oder indirekt – beigetragen haben.

Mein Dank gilt allen voran meinem Doktorvater Prof. Josef Jansa, der mir während dieser Zeit sowohl fachliche als auch moralische Unterstützung hat zukommen lassen und mir in den schwierigen Phasen hilfsbereit mit Rat, Geduld und Zuversicht zur Seite stand.

Ich danke Prof. Wolfgang Niemeier für die Übernahme des Koreferats.

Dr. Christian Briese, Dr. Helmut Kager, Prof. Norbert Pfeifer sowie Dr. Camillo Ressler möchte ich für die zahlreichen interessanten Diskussionen danken, die meine Arbeit bereicherten.

Prof. Norbert Pfeifer gebührt außerdem besonderer Dank dafür, dass er mich vor allem in der Endphase des Verfassens mit konstruktiven Kommentaren, Ideen und wertvollen Hinweisen unterstützt hat.

Bei Institutsvorstand Prof. Wolfgang Wagner und allen Institutskollegen möchte ich mich für die ausgezeichneten Rahmenbedingungen am Institut bedanken, unter denen ich meine Doktorarbeit durchführen konnte.

Dr. Gerald Forkert danke ich für seine Unterstützung im Rahmen des Christian-Doppler-Labors und für die Bereitstellung der Aufnahmedaten der Fa. Geodata IT.

Posthum möchte ich mich zutiefst bei Prof. Karl Kraus bedanken, der mich schon während meines Diplomstudiums gefördert und zur Promotion ermutigt hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, ohne deren kontinuierliche Unterstützung mein Diplomstudium und somit diese Doktorarbeit nicht möglich gewesen wären.

Kurzfassung

Aufgrund des steigenden Bedarfs an 3D-Geoinformation im städtischen Bereich (für diverse Anwendungsgebiete wie z.B. Lärmschutz, Stadtplanung, Denkmalschutz, Katastrophenschutz, Einsatzplanung) gewinnt der Aufbau von digitalen 3D-Stadtmodellen zunehmend an Bedeutung. Je nach Anwendung ist eine mehr oder weniger detaillierte geometrische Modellierung des urbanen Raumes (Gebäude, Infrastruktureinrichtungen, Straßenraum) erforderlich, wobei in manchen Fällen auch eine Photo-Textur für das Modell verlangt wird.

Die für die Modellierung der Dachlandschaften notwendige Datenerfassung lässt sich mit Hilfe von flugzeuggetragenen Aufnahmeplattformen (*Airborne Laser Scanning*, Luftbildphotogrammetrie) ökonomisch durchführen. Für die großräumige Datenerfassung des Straßenraums und der straßenseitigen Fassadenlandschaft im innerstädtischen Raum ist man jedoch auf terrestrische Aufnahmesysteme angewiesen, die zwecks Wirtschaftlichkeit fahrzeuggestützte Plattformen darstellen. Solche Aufnahmeplattformen verfügen in der Regel zum einen über Sensoren zur eigentlichen Aufnahmedatenerfassung (z.B. Kamera, terrestrischer Laserscanner, Videokamera) und zum anderen über Navigationssensoren (satellitengestütztes Positionierungssystem (GPS), Inertialsystem, Neigungssensoren, Odometer), mit deren Hilfe der Bezug der aufgenommenen Daten zu einem übergeordneten Referenz-Koordinatensystem hergestellt wird (dieser Vorgang wird als „Sensororientierung“ oder „Georeferenzierung“ bezeichnet). Bei den meisten solcher bestehenden Aufnahmesysteme spielt die satellitengestützte Positionierung für die Georeferenzierung eine zentrale Rolle. Aufgrund der problematischen Eigenschaften dieses Verfahrens in dichtverbauten, innerstädtischen Gebieten (Abschattungen, Mehrwegeeffekte) kann dabei jedoch nicht immer eine zuverlässige Georeferenzierung gewährleistet werden, vor allem dann, wenn es zu längeren Signalausfällen kommt.

In dieser Arbeit werden Strategien für die Georeferenzierung von terrestrischen Laserscanner- und Bilddaten entwickelt, die von einer mobilen Plattform aus im urbanen Raum erfasst worden sind. Dies erfolgt mit dem Ziel, eine allzu starke Stützung der Georeferenzierung auf ein satellitenbasiertes Positionierungssystem zu vermeiden. Weiters soll auf ein teures inertiales Navigationssystem (INS) verzichtet werden können. Neben der Verlässlichkeit des Verfahrens wird dabei Hauptaugenmerk auf die geometrische Genauigkeit des Ergebnisses gelegt; deshalb sind Methoden erforderlich, die Angaben über die erzielten Genauigkeiten mitliefern.

Zunächst wird auf Probleme, die im Zuge der Kalibrierung einer solchen Aufnahmeplattform zu lösen sind, eingegangen. Dabei wird sowohl die Kalibrierung der einzelnen Sensoren als auch die Kalibrierung des Gesamtsystems behandelt. Anschließend folgt ein Abschnitt über die Orientierung von terrestrischen Laserscanner-Punktwolken mittels 3D-Matching, wobei eine bestehende Methode zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung adaptiert bzw. erweitert und anschließend anhand von Testdatensätzen evaluiert wird.

Danach werden die im Zuge der Arbeit entwickelten Strategien für die Georeferenzierung präsentiert, bei denen Verfahren wie 3D-Matching von Punktwolken, Linienphotogrammetrie sowie merkmalsbasierte Bildzuordnung zum Einsatz kommen, und anhand von praktischen Bei-

spielen näher erläutert. Dabei werden die erzielten Ergebnisse kritisch beurteilt. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf noch offene Forschungsfragen.

Abstract

Due to the fact that there is an growing demand for 3D geographic information in urban areas (for various fields of application such as noise protection, urban planning, monument conservation, disaster control, operation planning), the generation of digital 3D city models is gaining more and more importance. Depending on the application, a more or less detailed geometric modelling of urban space (buildings, infrastructure facilities, street space) and sometimes also a photo-realistic texture for the model is required.

Data acquisition necessary for the modelling of the roof-scapes can be carried out economically by means of airborne platforms (airborne laser scanning, aerial photogrammetry). For large-scale data acquisition of street space and street-facing façades within inner-city areas, however, terrestrial acquisition systems are essential that are – for economical reasons – vehicle-based platforms. Such acquisition platforms are typically equipped both with sensors for actual data acquisition (e.g. camera, terrestrial laser scanner, video camera) and sensors for navigation (satellite-based positioning system (GPS), inertial system, inclination sensors, odometer), with the help of which the acquired data is referred to a superior reference coordinate system (this process is termed „sensor orientation“ or „georeferencing“). In case of most of the existing acquisition systems, the satellite-based positioning plays a central role in georeferencing. Due to the problematic characteristics of this technique in high-density, inner-city areas (signal shadowing, multi-path effects), however, a reliable georeferencing can not always be ensured, especially in cases of longer signal outages.

In this work, strategies for the georeferencing of terrestrial laser scanner and image data, which have been acquired in urban space by a mobile platform, are developed. This is done with the intention to avoid a too strong dependency of georeferencing on a satellite-based positioning system. Furthermore, an expensive inertial navigation system (INS) shall not be necessary. In addition to the reliability of the procedure, the main focus is set on geometric accuracy of the result; hence, methods are required that provide information also about the achieved accuracies.

At first, problems are addressed, which have to be solved in the course of calibrating such a data acquisition platform. This involves calibration of both the individual sensors and the entire system. Subsequently, a section about orientation of terrestrial laser scanner point clouds using 3D matching follows: there, an existing method is firstly adapted in order to accomplish the solution of the given task, and then evaluated based on test data sets.

Afterwards, the strategies for georeferencing developed in the scope of this work are presented, where methods such as 3D matching of point clouds, line photogrammetry and feature-based image matching are used, and explained on the basis of practical examples. The achieved results are discussed critically. The thesis concludes with a summary and an outlook on still open research topics.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Bestehende <i>Mobile Mapping</i> Systeme	2
1.3	Aufgabenstellung	5
1.4	Wissenschaftliche Beiträge	7
1.5	Aufbau der Arbeit	7
2	Aufnahmesystem	8
2.1	Das System <i>CityGRID Scanner</i>	8
2.2	Betriebsmodi zur Datenerfassung	9
3	Systemkalibrierung	12
3.1	Kalibrierung terrestrischer Laserscanner-Systeme	12
3.2	Kamerakalibrierung	13
3.2.1	Kameramodell	13
3.2.2	Zur Stabilität der inneren Orientierung bei handelsüblichen Digitalkameras	15
3.3	Relative Orientierung der Systemsensoren	24
3.3.1	Bestimmung des GPS-Antennen-Offset	25
3.3.2	Bestimmung der <i>Mounting Calibration</i>	25

4	Georeferenzierung	30
4.1	Begriffsdefinition und Stand der Technik	30
4.2	Orientierung von TLS-Daten mittels 3D-Matching	32
4.2.1	ICP-Algorithmus	32
4.2.2	Datenvorverarbeitung	42
4.2.3	Für Mobile Mapping adaptierter ICP-Algorithmus	53
4.2.4	Evaluierung des adaptierten ICP-Algorithmus	62
4.3	Georeferenzierung bei der Aufnahme des Straßenraumes	77
4.3.1	Relative Orientierung	77
4.3.2	Absolute Orientierung	80
4.4	Georeferenzierung bei der dynamischen Fassadenaufnahme	85
4.4.1	Automatische relative Orientierung von Bildsequenzen	85
4.4.2	Georeferenzierung einer relativ orientierten Bildsequenz mit Hilfe von satellitengestützten Positions- und Inclinometerbeobachtungen	88
4.5	Georeferenzierung bei der detaillierten Fassadenaufnahme	92
4.6	Zusammenfassung	94
5	Beispiele	95
5.1	Beispiel 1: Experiment am Gang des Instituts	95
5.1.1	Versuchsanordnung	95
5.1.2	Orientierung	96
5.1.3	Ergebnisse	97
5.1.4	Zusammenfassung	98
5.2	Beispiel 2: Klagenfurter Ring	98
5.2.1	Aufnahmedaten	99
5.2.2	Relative Orientierung	100
5.2.3	Absolute Orientierung	103
5.3	Beispiel 3: Nationaltheater Zagreb	111
5.3.1	Aufnahmedaten	111
5.3.2	Relative Orientierung der Scans	113
5.3.3	Relative Orientierung der Photos	113
5.3.4	Ermittlung des Maßstabsfaktors	114

6 Zusammenfassung und Ausblick	119
Literaturverzeichnis	122
A Parametrisierung der Drehmatrix	129
A.1 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\alpha\zeta\kappa$	129
A.2 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\omega\varphi\kappa$	130
A.3 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\varrho\nu\gamma$	130
B Ergänzungen – Bereich „Kalibrierung“	132
B.1 Ergebnisse der Kamerakalibrierungen	132
B.1.1 Canon EOS 1Ds	132
B.1.2 Nikon D70	134
B.1.3 Nikon D200	135
C Ergänzungen – Bereich „Georeferenzierung“	137
C.1 Normalvektor-Abschätzung	137
C.2 Bestimmung der Transformationsparameter beim ICP-Algorithmus durch Mini- mierung der Punkt-zu-Ebene-Fehlerfunktion	142
C.2.1 Lösung für zwei Punktwolken mittels Linearisierung des Problems	142
C.2.2 Verallgemeinerung auf $N \geq 3$ Punktwolken	144
C.2.3 Partielle Ableitungen der zusätzlichen Beobachtungsgleichungen	146
C.2.4 Ableitungen der Gesamt- nach den Korrektur-Transformationsparametern	147
C.3 Bestimmung von $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ ohne explizite Kenntnis von \mathbf{v}	151
C.4 Vergleich von ICP-verwandten Algorithmen	151
C.4.1 Vom Benutzer wählbare Parameter	151
C.4.2 Für die Evaluierung verwendete Parameterwerte	154
C.4.3 Bestimmung einer ausgleichenden Drehzylinderfläche durch Datenpunkte	155

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Aufgrund des steigenden Bedarfs an 3D-Geoinformation im städtischen Bereich beginnen immer mehr Stadtverwaltungen mit dem Aufbau eines digitalen 3D-Stadtmodells (z.B. [DORFFNER und ZÖCHLING 2003]). Während für einige Anwendungen ein relativ grobes Modell durchaus ausreicht (z.B. Lärmschutz), ist für andere ein höherer Detaillierungsgrad erforderlich bzw. wünschenswert (z.B. Stadtplanung, Denkmalschutz, Katastrophenschutz, Einsatzplanung). In letzteren Fällen erwartet man zumindest einen Detaillierungsgrad LoD3 („Level of Detail“ der Stufe 3) gemäß der Einteilung der Arbeitsgruppe Special Interest Group 3D (vgl. [GRÖGER et al. 2005]), was einem geometrisch komplexen Gebäudemodell mit detaillierter Fassadendarstellung entspricht. Die Genauigkeit soll jener bestehender kommunaler Bestandspläne entsprechen. Je nach Anwendung wird zusätzlich noch eine Texturierung des Modells gefordert.

Während Geometrie und Textur der Dachlandschaft sehr gut durch flugzeuggetragenes Laser-scanning ([KAARTINEN et al. 2005]) und Luftbildphotogrammetrie ([ROTTENSTEINER 2001]) erfasst werden können, sind für die detaillierte Erfassung von Straßenraum und straßenseitiger Fassadenlandschaft hingegen terrestrische Aufnahmemethoden notwendig, da sich für solche Bereiche der erforderliche Detaillierungsgrad von konventionellen flugzeuggetragenen Plattformen aus nicht erzielen lässt.¹ Der Einsatz von hubschraubergetragenem Laserscanning erlaubt deutlich niedrigere Flughöhen und liefert eine weitaus höhere Punktdichte (bis zu 100 Punkte pro m^2). Auch *vertikale* Oberflächen lassen sich damit detailliert erfassen. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für die 3D-Aufnahme isoliert stehender großer Bauwerke wie z.B. Sehenswürdigkeiten, archäologischer Ausgrabungsstätten oder Industrieanlagen ([BEWAG 2007]). Im dicht verbauten Stadtgebiet stößt es jedoch aufgrund von Scan-Abschattungen bzw. aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen rasch an seine Grenzen. Die terrestrische Erfassung

¹Die Firma *Pictometry* [PICTOMETRY 2007] führt Befliegungen von Städten aus wenigen hundert Metern Höhe durch, wobei Schrägwinkel-Aufnahmen bis zu ca. 40° durchgeführt werden können. Allerdings ist in diesem Fall eine ausreichend genaue Georeferenzierung mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

größerer Gebiete ist mit ökonomisch vertretbarem Aufwand nur mit Hilfe von fahrzeuggestützten, mobilen Aufnahmesystemen möglich. Solche Systeme werden auch als *Mobile Mapping* Systeme bezeichnet ([LI 1997]).

1.2 Bestehende *Mobile Mapping* Systeme

Ein *Mobile Mapping*² System ist i.A. mit mehreren verschiedenen Sensoren ausgestattet (Multi-sensorsystem), wobei es üblicherweise zum einen über Sensoren zur Bestimmung der Fahrzeug-Trajektorie (z.B. GPS, IMU, Odometer, Inklinometer – im folgenden als „Navigationssensoren“ bezeichnet) und zum anderen über Sensoren zur Objekterfassung (z.B. Kamera, Laserscanner, Videokamera – im folgenden als „Aufnahmesensoren“ bezeichnet) verfügt ([LI 1997]). Die meisten existierenden Systeme wurden in erster Linie für die kinematische Erfassung von Verkehrswegen (Autobahnen, Freilandstraßen, Gleisanlagen) konzipiert. Die Bestandsaufnahme erfolgt dabei meistens mit Hilfe zweier stereoskopisch angeordneter Videokameras (Basis quer zur Fahrtrichtung); d.h. Fahrbahnrande, Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen und andere im Straßenraum vorhandene Objekte lassen sich mittels photogrammetrischer Auswertung geometrisch rekonstruieren. Für die Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie bzw. die Georeferenzierung der Daten wird in der Regel – wie bei flugzeuggetragenen Plattformen – eine Kombination aus satellitengestützter Positionsbestimmung (Global Positioning System GPS) und einem Inertialsystem (Inertial Navigation System INS) eingesetzt. Da es besonders in urbanen, dicht verbauten Gebieten aufgrund von Abschattungen häufig zu Ausfällen und aufgrund von Mehrwegeeffekten zu groben Positionsfehlern kommen kann, werden zusätzliche Sensoren wie z.B. ein Odometer zur Unterstützung ins System integriert. Gemeinsam mit dem INS, das im Vergleich zu GPS eine deutlich höhere Messfrequenz aufweist, lassen sich diese groben Fehler korrigieren und GPS-Ausfälle überbrücken, sofern diese von nicht allzu langer Dauer sind, da die Sensoren des INS über längere Zeiträume zum Driften neigen. Die gemeinsame Auswertung der von den Navigationssensoren gelieferten Daten erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Kalman-Filters ([KALMAN 1960]). Speziell bei Systemen zur Erfassung von Verkehrswegen, bei denen die Befahrung normalerweise im Fließverkehr erfolgt, ist eine präzise Synchronisation von Aufnahme- und Navigationssensoren besonders wichtig. Als Referenz wird dabei meist das GPS-Zeitsignal verwendet.

Im folgenden werden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einige bestehende *Mobile Mapping* Systeme angeführt:

Zunächst folgen – in chronologischer Reihenfolge der entsprechenden Publikationen – einige Systeme, die in erster Linie auf die Erfassung von Verkehrswegen und der umgebenden Infrastruktureinrichtungen spezialisiert sind.

²Der Begriff *Mobile Mapping* dient - vor allem im englischsprachigen Raum - oft auch als Überbegriff für alle auf einer beweglichen Plattform befindlichen Aufnahmesysteme und umfasst somit auch flugzeuggetragene Systeme. Weiters findet dieser Begriff auch in der Telekartographie in Zusammenhang mit mobilen Kartendiensten für Mobiltelefon oder PDA (Personal Digital Assistant) Verwendung. In dieser Arbeit wird unter einem *Mobile Mapping* System jedoch ausschließlich ein auf einem Landfahrzeug eingerichtetes Aufnahmesystem verstanden.

Das an der Universität Calgary zur Straßendokumentation und GIS-Datenerfassung entwickelte System VISAT ([EL-SHEIMY 1996]) verfügt über 2 GPS-Empfänger, wobei eine davon als Referenzstation verwendet wird (**Differential GPS**). Weitere Komponenten zur Bestimmung der Fahrzeugtrajektorie sind ein inertiales Navigationssystem und ein Anti-Blockier-System (**ABS**). Das Aufnahmesystem besteht aus insgesamt 8 Schwarzweiß-CCD-Kameras und einer Farb-S-VHS-Kamera. Das ABS fungiert als Odometer und steuert das Auslösen der Kameras in konstanten Weg-Intervallen. Die relative Genauigkeit (photogrammetrische Triangulation) beträgt ± 1 dm, die absolute Genauigkeit ± 3 dm.

In [BENNING und AUSSEMS 1998] wird das System CDSS (**Car-Driven Survey System**) präsentiert, welches zur Erstellung digitaler, topographischer Karten großen Maßstabs entwickelt wurde. Zur Positionsbestimmung kommt ebenfalls DGPS zum Einsatz. INS ist keines vorhanden, dafür stehen Radsensoren sowie ein Barometer zur Verfügung. Als Aufnahmesensoren dienen 2 Videokameras, mit denen stereoskopische Videosequenzen (1Hz) erzeugt werden. Im Rahmen der Testphase wurden Befahrungen auf Autobahnen, Freilandstraßen, aber auch im innerstädtischen Bereich durchgeführt. Die relative Lagegenauigkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugpositionen liegt im dm-Bereich, die absolute Lagegenauigkeit des Systems schwankt – abhängig von GPS-Abschattungen – zwischen $\pm < 1$ m (innerstädtisch) und ± 3 m (Autobahn). Die Höhengenaugigkeit ist um den Faktor 1.5 bis 2.0 schlechter.

An der Universität der Bundeswehr München wurden das System KiSS (**Kinematic Survey System**, [STERNBERG et al. 2001]) und später MoSES (**Mobiles Straßen-Erfassungs-System**, [GRÄFE 2003]) entwickelt. Zur Bestimmung der Trajektorie nutzen beide Systeme eine Kombination aus DGPS, INS und Odometer sowie Barometer und Inklinometer als zusätzliche Sensoren. Im Falle von MoSES steht zu diesem Zweck das System Applanix POS/LV 420 zur Verfügung ([GRÄFE et al. 2001]). Als Aufnahmesensoren dienen Videokameras und 2 CCD-Kameras in Stereoanordnung. Beim System MoSES wurden zusätzlich 2 Profil-Laserscanner integriert. Für beide Systeme wird die relative Genauigkeit (photogrammetrische Stereoauswertung) mit $\pm < 1$ dm, die absolute Genauigkeit (Trajektorie) mit etwa ± 3 dm bis ± 4 dm angegeben, sofern die GPS-Ausfälle nicht länger als wenige Minuten andauern.

Im System Photobus ([GONTRAN et al. 2003]) werden 2 in Fahrtrichtung angeordnete RTK-GPS-Empfänger (**Real Time Kinematic**, i.e. Echtzeit-GPS) und ein INS zur Trajektorienbestimmung verwendet. Mit Hilfe einer auf der linken Seite des Fahrzeuges vertikal nach unten ausgerichteten Videokamera lässt sich die Straßenachse georeferenzieren. Eine weitere Videokamera, die horizontal nach rechts ausgerichtet ist, erlaubt die monoskopische Aufnahme von Verkehrszeichen: Die Dicke der Pfosten, die als einheitlich angenommen wird, wird im Bild auf eine bestimmte Anzahl von Pixels abgebildet. Durch Vergleich mit der Aufnahme eines Kalibrierfeldes lässt sich somit die Entfernung bestimmen. Als Genauigkeiten für die 2D-Lagekoordinaten des Verkehrszeichen werden ± 2 dm bis ± 4 dm genannt.

In [KIM et al. 2006] wird ein System zur Aufnahme der Straßeninfrastruktur vorgestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf die Positionsbestimmung, Detektion und Identifizierung von Verkehrszeichen gelegt wird. Die Georeferenzierung basiert dabei ebenfalls auf der Kombination

GPS/INS, die Aufnahme erfolgt mittels stereoskopisch angeordneter CCD-Kameras.

Bei dem in [BÄUMKER und LUDWIG 2007] beschriebenen System „eagle eyes technologies“ wird eine Kombination aus INS, RTK-GPS und zwei an den Hinterrädern angebrachten Odometern zur direkten Georeferenzierung verwendet. Die Aufnahme des Verkehrsweges erfolgt durch 2-4 hochauflösende Kameras, wobei die beiden Hauptkameras eine große Basis auf dem Dach des Fahrzeuges bilden. Zur Dokumentation der Fahrt dienen 2 Videokameras. Die Synchronisation der Sensoren erfolgt durch einen Navigationsrechner. Die Standardabweichungen der Objektkoordinaten werden im Falle der Auflösbarkeit der Mehrdeutigkeiten bei der GPS-Auswertung mit <0.1 m bzw. andernfalls mit 0.1% des seit dem Signalverlust zurückgelegten Weges angegeben.

Mit den bisher genannten Systemen ist die dreidimensionale Aufnahme und Modellierung von Gebäudefassaden nur beschränkt bzw. gar nicht möglich. Es folgen nun – wiederum in chronologischer Reihenfolge – einige Systeme, die für diese Aufgabe besser geeignet sind.

Das System Geomobil ([TALAYA et al. 2004]) wurde zur Erfassung geographischer Daten mit kartographischer Genauigkeit entwickelt. Dabei kommt ebenfalls das Prinzip der direkten Georeferenzierung zum Einsatz. Neben GPS und INS stehen auch Radsensoren zur Verfügung. Zwei CCD-Kameras in stereoskopischer Anordnung sowie ein im Profilmodus arbeitender terrestrischer Laserscanner dienen als Aufnahmesensoren. Bei einer Testaufnahme im Stadtgebiet wurden – im Falle guten GPS-Empfanges – Abweichungen von einigen dm zwischen der georeferenzierten Laserpunktwolke und einem Stadtplan (Maßstab 1:1000) festgestellt.

Ein System, welches mit 3 Profil-Scannern und 6 Zeilenkameras arbeitet, wird in [ZHAO und SHIBASAKI 2004] vorgestellt. Zur Bestimmung der Trajektorie stehen GPS, ein INS und ein Odometer zur Verfügung. Für jede Scan- und Bildzeile werden die aus dem GPS/INS-System erhaltenen Parameter linear interpoliert. In einem Testgebiet in Tokyo wurden Fehler der direkten Georeferenzierung, die aufgrund von GPS-Abschattungen und Mehrwegeeffekten aufgetreten waren, mit Hilfe eines bestehenden DOM (**D**igitales **O**berflächen-**M**odell) der Erdoberfläche korrigiert.

In [ASAI et al. 2005] wird ein System präsentiert, das zur 3D-Modellierung urbaner Gebiete entwickelt wurde. Zur Datenerfassung wird ein terrestrischer Laserscanner verwendet. Die Georeferenzierung erfolgt mittels RTK-GPS und INS. Das System kann im Stop-and-go-Modus (mehrere 3D-Scans bei jeweils stehendem Fahrzeug) sowie im kontinuierlichen Scan-Modus (Zeilenscans bei langsamer Fahrt) betrieben werden. Für die Datenerfassung wird folgende Vorgangsweise vorgeschlagen: Zunächst werden mehrere Stop-and-go-Scans durchgeführt und diese mit Hilfe einer auf dem ICP-Algorithmus (*Iterative Closest Point*, [BESL und MCKAY 1992]) basierenden Methode orientiert, wobei jeweils die vom GPS/INS-System gelieferten Orientierungsparameter (3D-Position und 3 Drehwinkel) als Startwerte verwendet werden. Anschließend wird in jenen Bereichen, wo es Datenlücken aufgrund von Scan-Abschattungen gibt, eine neuerliche Aufnahme im kontinuierlichen Modus durchgeführt. Die Genauigkeit des GPS/INS-Systems wird für die Lagekoordinaten mit jeweils ± 3 cm und für die Höhe mit ± 4

cm angegeben, die Genauigkeit für die Drehwinkel *roll* und *pitch* mit jeweils $\pm 0.5^\circ$ sowie für *yaw* mit $\pm 2.0^\circ$.

Das System StreetMapper ([KREMER und HUNTER 2007]) besteht aus 4 Zeilenscannern (Riegl LMS-Q120), die auf dem Fahrzeug so montiert sind, dass 2 vertikale Profile (links hinten und rechts hinten) und 2 horizontale Profile (hinten schräg nach oben und hinten schräg nach unten) aufgenommen werden können. Zur visuellen Interpretation der Laserscannerpunktvolke wird eine oder mehrere Videokameras verwendet. Die Georeferenzierung erfolgt mittels GPS, INS sowie einem zusätzlichen Geschwindigkeitssensor. Als relative Genauigkeit wird 2.5 cm, als absolute Genauigkeit je nach GPS-Empfang zwischen 3 cm und 0.5 m angegeben.

Während sich die bisher genannten Systeme bei der Georeferenzierung auf satellitengestützte Positionsbestimmung stützen, wurde an der University of California in Berkeley eine Methode zur 3D-Stadtmodellierung entwickelt, bei der das mobile Aufnahmesystem ohne jegliche Navigationssensoren arbeitet ([FRÜH 2001]; [FRÜH und ZAKHOR 2004]). Zur Datenerfassung werden ein horizontal und ein vertikal angeordneter Profil-Laserscanner sowie eine Digitalkamera eingesetzt. Für die Georeferenzierung werden zunächst die aufeinanderfolgenden horizontale Profile sukzessive relativ zueinander orientiert. Daraus ergibt sich eine erste Schätzung für die Trajektorie, die aufgrund der ungünstigen Fehlerfortpflanzung noch deutlich von der Realität abweicht. Mittels MCL (Monte-Carlo Lokalisierung, [FOX et al. 1999]), einer aus der Robotik stammenden Methode, wird anschließend die Trajektorie auf Basis eines georeferenzierten Luftbildes oder eines DOM korrigiert, wobei Merkmale (Kanten) sowohl aus den Scans als auch aus den Referenzdaten extrahiert und einander zugeordnet werden. Mit dieser Methode lassen sich große Stadtgebiete auf schnelle Weise (im Fließverkehr) erfassen, und anschließend vollautomatisch georeferenzieren, modellieren, texturieren und visualisieren. Die erzielbaren Genauigkeiten hängen u.a. von Auflösung und Genauigkeit der Referenzdaten aus der Luft ab. Jedoch wurde bei der Entwicklung dieser Methode Hauptaugenmerk auf Geschwindigkeit, Vollautomatisierung, und visuell ansprechende photorealistische Ergebnisse gelegt. Schließlich ist hervorzuheben, dass diese Methode die erwähnten Referenzdaten aus der Luft voraussetzt, weshalb sie nur eingeschränkt anwendbar ist.

Weiters gibt es noch zahlreiche *Mobile Mapping* Systeme, die auf autonom agierenden Robotern basieren. Auf diese wird jedoch nicht eingegangen, da sie zur Zeit noch auf Anwendungen im extremen Nahbereich (z.B. Erfassung von Innenräumen) beschränkt sind.

1.3 Aufgabenstellung

Bei den im vorigen Abschnitt erwähnten GPS-gestützten mobilen Aufnahmesystemen ist die für die Georeferenzierung erzielbare Genauigkeit in hohem Maße von der Anzahl der empfangenen Satellitensignale sowie von der (zeitlich variierenden) geometrischen Konfiguration der Satelliten abhängig. Letztere ist in engen Häuserschluchten, wie sie im innerstädtischen Raum oft vorkommen, i.A. bei weitem nicht so gut wie in Freilandgebieten. Hinzu kommen noch –

wie bereits erwähnt – grobe Fehler aufgrund von Mehrwegausbreitungen der Signale, die nicht immer von den anderen Navigationssensoren aufgedeckt und korrigiert werden können. Die erzielbare Genauigkeit ist somit stark orts- und zeitabhängig – im Falle eines 3D-Stadtmodells wäre eine entsprechend inhomogene Qualitätssituation des Resultats die Folge. Dasselbe Problem kann allerdings ebenso bei der Georeferenzierung auf Basis von bestehendem Luftbildmaterial oder eines aus Flugzeug-Laserscanner-Daten abgeleiteten DOM auftreten, nämlich dann, wenn diese Referenzdaten aus mehreren Quellen unterschiedlicher Qualität stammen oder teilweise nicht hinreichend aktuell sind. Abgesehen davon ist es mit den erwähnten *Mobile Mapping* Systemen nicht möglich, eine mit der Bestandsvermessung vergleichbare absolute Genauigkeit (d.h. einige cm) im dichtverbauten, innerstädtischen Gebiet zu gewährleisten.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung von Methoden zur Orientierung von terrestrischen Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten dreidimensionalen Erfassung des Straßenraums sowie der straßenseitigen Gebäudefassaden im urbanen Raum.

Als Aufnahmesystem steht die seit einigen Jahren in Entwicklung befindliche mobile Plattform *CityGRID Scanner* ([FORKERT et al. 2005]) der Firma Geodata IT zur Verfügung, welche zur Zeit aus einem terrestrischen Laserscanner der Firma Riegl ([RIEGL 2007]), 2 hochauflösenden Digitalkameras, und einem GPS-Empfänger besteht. Das System kann sowohl im Stop-and-go-Modus als auch im dynamischen Modus eingesetzt werden (nähere Details zum System folgen in Kapitel 2).

Im Rahmen der Arbeit sind die beiden folgenden Aufgabenbereiche zu lösen:

- Kalibrierung des Systems
- Georeferenzierung

Die Georeferenzierung soll sich dabei nicht auf GPS allein stützen, um die zuvor erwähnten Probleme im innerstädtischen Gebiet zu vermeiden. Nur dort, wo solche Beobachtungen zuverlässig vorhanden sind, sollen diese genutzt werden. Ansonsten wird Passinformation aus einem Bestandsplan verwendet, welcher in städtischen Gebieten in der Regel verfügbar ist. Jedenfalls wird Hauptaugenmerk auf die geometrische Genauigkeit des Ergebnisses gelegt. Daher ist es notwendig, dass die zur Georeferenzierung angewandten Methoden Angaben über die erzielten Genauigkeiten mitliefern. Aus Qualitätsgründen wird keine vollautomatische Methode angestrebt, jedoch soll ein möglichst hoher Automatisierungsgrad bei der Georeferenzierung erreicht werden. Modellierung und Aufbereitung des Resultats für eine ansprechende Visualisierung werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

1.4 Wissenschaftliche Beiträge

Diese Arbeit enthält u.a. wissenschaftliche Beiträge zu den folgenden Bereichen:

- Untersuchung der Stabilität digitaler Consumer-Kameras hinsichtlich ihrer inneren Orientierung (Abschnitt 3.2.2)
- Genauigkeitsuntersuchungen hinsichtlich Systemkalibrierung (Mounting Calibration; Abschnitt 3.3.2)
- Adaption des ICP-Algorithmus (Iterative-Closest-Point-Algorithmus) für Aufgaben des Mobile Mapping (Abschnitt 4.2.3)
- Entwicklung einer Metrik zum Vergleich der Ergebnisse, die von verschiedenen Algorithmen zur relativen Orientierung von 3D-Punktwolken geliefert werden, sowie Evaluierung dieser Algorithmen für unterschiedliche Datensätze (Abschnitt 4.2.4)
- Beschaffung von Näherungswerten für den ICP-Algorithmus mit Hilfe relativ zueinander orientierter Bildsequenzen (Abschnitt 4.5)

1.5 Aufbau der Arbeit

Zunächst wird in Kapitel 2 das für diese Arbeit verfügbare mobile Aufnahmesystem sowie dessen Betriebsmodi beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3 auf die Problematik der Systemkalibrierung eingegangen. Kapitel 4 befasst sich mit der Georeferenzierung und bildet den Schwerpunkt der Arbeit. Der erste Abschnitt beinhaltet allgemein die Orientierung von TLS-Daten durch 3D-Scan-Matching; in den beiden nachfolgenden Abschnitten werden spezifische Strategien für die Georeferenzierung der Aufnahmedaten des Mobile-Mapping-Systems angegeben. Als praktischer Teil der Arbeit werden in Kapitel 5 drei Beispiele präsentiert: das erste hat den Charakter eines Experiments, welches am Institut unter vereinfachten Bedingungen durchgeführt wurde; das zweite stammt aus einem typischen kommerziellen Projekt, in welchem dieselbe Methodik wie beim zuvor erwähnten Experiment unter praxisnahen Bedingungen evaluiert wird; das dritte Beispiel ist Teil eines zu Testzwecken durchgeführten Projekts, bei welchem eine weitere Methode untersucht wird. Die Arbeit endet mit Kapitel 6, welches eine Zusammenfassung und einen Ausblick beinhaltet.

Kapitel 2

Aufnahmesystem

2.1 Das System *CityGRID Scanner*

Die mobile Multisensorplattform *CityGRID Scanner* (Abb. 2.1) wurde von der Firma Geodata IT zur fahrzeuggestützten 3D-Aufnahme von urbanen Bereichen entwickelt. Sie besteht aus einem terrestrischen Laserscanner RIEGL LMS-Z420i ([RIEGL 2007]), zwei Digitalkameras des Typs Canon EOS 1Ds ([CANON 2007]) sowie einem GPS-Empfänger.

Die Plattform befindet sich auf einem dreh- und ausfahrbaren Turm, der Aufnahmen aus einer Höhe von ca. 4 m über der Fahrbahn ermöglicht. Somit können Sichtbehinderungen, wie sie z.B. durch parkende Fahrzeuge auftreten, deutlich reduziert werden.



Abbildung 2.1: CityGRID Scanner (aus [FORKERT et al. 2005])

Der Laserscanner arbeitet in einem Entfernungsbereich von 2 bis 800 m und weist eine Distanzmessgenauigkeit von ± 1 cm auf. Sein Blickfeld beträgt $360^\circ \times 80^\circ$ (siehe Abbildung 2.2).

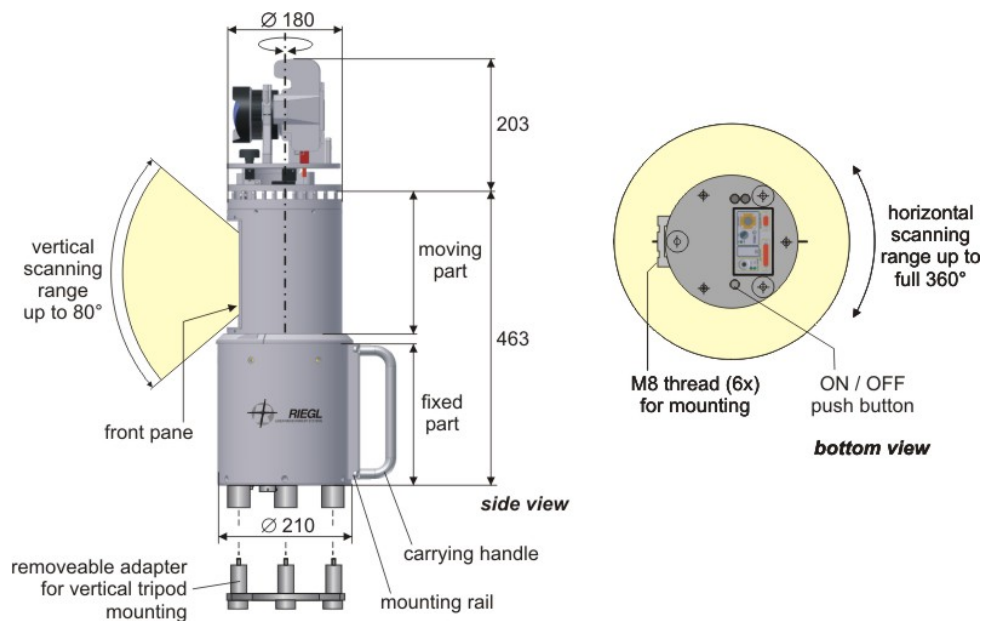


Abbildung 2.2: Das Laserscannersystem Riegl LMS-Z420i mit aufgesetzter Kamera (aus [RIEGL 2007]). Bei den in der Abbildung verwendeten Bezeichnungen „horizontal“ und „vertikal“ geht man von der Standardaufstellung aus: Bei dieser wird ein geodätisches Stativ verwendet, die Scanner-Achse näherungsweise in Lotrichtung ausgerichtet, und die Kamera mit Hilfe eines von der Firma Riegl gefertigten Aufsatzes direkt über dem Scanner befestigt. Der vertikale Scan-Bereich erfolgt über optomechanische Ablenkung (rotierender bzw. oszillierender Polygon-Spiegel) und beträgt 80°. Der horizontale Scan-Bereich umfasst volle 360° und wird durch Drehung des Scannerkopfs (beweglicher Teil) um die Scanner-Achse erzielt. Die Abmessungen sind in [mm] angegeben.

Um zu gewährleisten, dass alle Gebäude in ihrer vertikalen Ausdehnung vollständig in den Aufnahmebereich fallen, wurde der Laserscanner in liegender Stellung (d.h. mit *horizontaler* Achse) auf der Plattform angebracht (siehe vergrößerte Darstellung in Abb. 2.1 rechts). Auch die beiden Kameras sind bei diesem System vertikal so angeordnet, dass in einem Bildpaar die Fassade von der Gebäudeunterkante bis zur Traufe abgebildet werden kann (in der Regel werden 14mm-Objektive verwendet).

Die Sensoren sind relativ zueinander kalibriert sowie zeitlich synchronisiert.

2.2 Betriebsmodi zur Datenerfassung

Abhängig von der Aufgabenstellung kann das System in verschiedenen Betriebsmodi eingesetzt werden (Abb. 2.3).

Die Aufnahmemodi (a) bis (c) dienen zur Erfassung der Fassade. Bei (a) und (b) liegt die Scanner-Achse annähernd *parallel* zur Fahrtrichtung.

Beim dynamischen Modus (a) bewegt sich das Fahrzeug mit langsamer Geschwindigkeit kontinuierlich fort, während von einer Fassade eine Sequenz von Photos aufgenommen wird, die

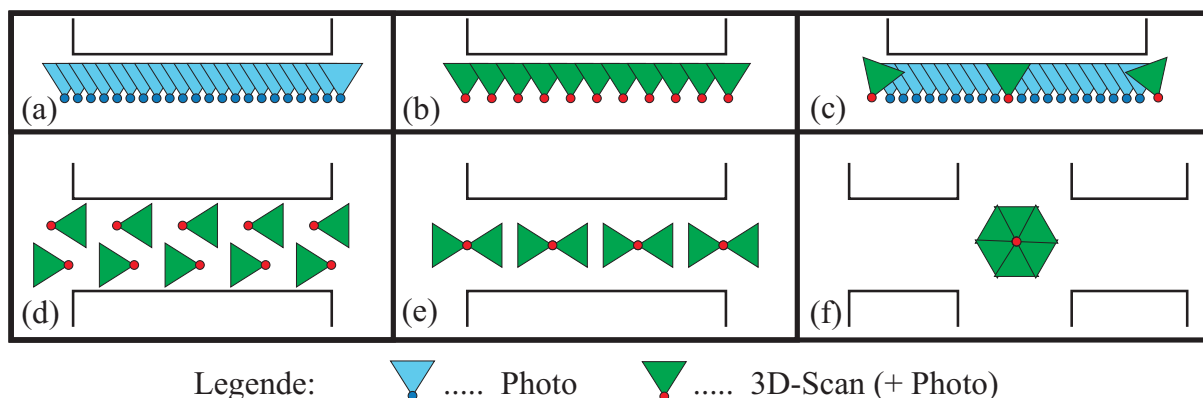


Abbildung 2.3: Verschiedene Betriebsmodi (basierend auf [HARING et al. 2005]). (a) Dynamischer Modus. (b) Stop-and-go-Modus für Fassadenaufnahme. (c) Kombiniertes Modus für Fassadenaufnahme. (d) Stop-and-go-Modus für Straßenraumaufnahme (Hin- und Rückfahrt). (e) Stop-and-go-Modus für Straßenraumaufnahme (einfache Fahrt). (f) Rundum-Modus.

eine 3- bis 5-fache Überlappung (also 66% bis 80%) aufweist. Mit Hilfe dieses Modus, dessen Aufnahmeanordnung mit jener eines Flugstreifens bei einem Bildflug vergleichbar ist, können Fassadenorthophotos zur Texturierung von Stadtmodellen erzeugt werden. Zusätzlich kann der Laserscanner im Zeilen-Modus betrieben werden, sodass *horizontale* Profile der Fassade gewonnen werden können. Dadurch erhält man die Distanz zur Fassadenebene, woraus sich unter Berücksichtigung der maximal möglichen Bildwiederholffrequenz der Kamera und in Abhängigkeit von der Verschlusszeit eine Obergrenze für die zu wählende Fahrtgeschwindigkeit abschätzen lässt. Weiters ermöglichen diese Profile eine Stützung des photogrammetrischen Blocks.

Bei der Fassadenaufnahme im Stop-and-go-Modus (b) werden hingegen 3D-Scans (inklusive Photos) bei jeweils stehendem Fahrzeug durchgeführt. Dieser Modus erlaubt eine besonders detaillierte Erfassung der Fassadengeometrie, ist jedoch verhältnismäßig zeitintensiv.

Die Variante (c) ist eine mögliche Mischform aus den beiden vorhergehenden Modi.

Die Aufnahme des gesamten Straßenraums im Stop-and-go Modus ((d) und (e)) erfolgt durch eine zur Fahrtrichtung *orthogonale*, horizontale Scanner-Achse (wie es in Abb. 2.1 der Fall ist), wobei sich Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Scans¹ von etwa 10 bis 20 m bewährt haben. Um den Straßenraum mit einer einigermaßen homogenen Punktdichte erfassen zu können, ist eine hinreichend große Überlappung benachbarter Scans (zumindest 50%) erforderlich. Die Aufnahme kann mittels Hin- und Rückfahrt durch Scannen des jeweils hinter dem Fahrzeug befindlichen Bereichs erfolgen (Modus (d)). Als Alternative ist auch eine einfache Fahrt möglich, bei der jeder Scan den Bereich sowohl vor als auch hinter dem Fahrzeug abdeckt (Modus (e)); d.h. die Zenitrichtung bildet jeweils den Mittelpunkt des Scan-Bereiches.

Eine Sonderform des Stop-and-go-Modus ist der Rundum-Modus (f). Dabei wird an jeder Fahrzeugposition das gesamte Panorama bis zum Zenit in Form von mehreren Sektoren gescannt

¹Mit „Scan“ ist in dieser Arbeit grundsätzlich ein 3D-Scan gemeint. Andernfalls werden Begriffe wie 2D-Scan, Zeilen-Scan, oder Profil-Scan verwendet.

und photographiert, wobei jedem Sektor eine bestimmte Lage der Scanner-Achse entspricht. Dieser Modus kommt auf größeren Plätzen sowie an Straßenkreuzungen zum Einsatz. In letzterem Fall empfiehlt sich aufgrund der großen Abstände benachbarter Kreuzungen meist die Kombination mit einem anderen Modus.

Kapitel 3

Systemkalibrierung

Unter dem Begriff „Systemkalibrierung“ wird hier sowohl die Kalibrierung der einzelnen Systemsensoren als auch die relative Orientierung (Translation, Rotation) derselben innerhalb der Plattform verstanden.

3.1 Kalibrierung terrestrischer Laserscanner-Systeme

Laserscanner-Systeme werden in der Regel vom Hersteller vorab kalibriert. Die seit einigen Jahren für terrestrische Laserscanner durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen (z.B. [BÖHLER et al. 2003], [INGENSAND et al. 2003]) haben jedoch gezeigt, dass trotz dieser Kalibrierung noch immer systematische Fehler auftreten, die zum Teil den typischen Instrumentenfehlern eines Tachymeters entsprechen. Daher wurden Modelle zur Kalibrierung entwickelt, mit denen diese Rest-Systematiken durch zusätzliche Parameter beschrieben werden können ([GIELSDORF et al. 2004], [LICHTI und FRANKE 2005]). Diese Parameter lassen sich mit Hilfe eines geeigneten stabilen Testfeldes bestimmen. [LICHTI und FRANKE 2005] haben die Kalibrierung ein und desselben Gerätes nach 3 Monaten wiederholt und festgestellt, dass die Werte dieser zusätzlichen Parameter zum Teil signifikanten zeitlichen Änderungen unterliegen. Diese Tatsache konnte später anhand von 10 Selbstkalibrierungsexperimenten, die innerhalb von 13 Monaten durchgeführt worden waren, bestätigt werden ([LICHTI 2007]). [NOTHEGGER und DORNINGER 2007] schlagen vor, mittels ebener Objektbereiche (d.h. ohne Testfeld) die Parameter der Kalibrierfunktion zu bestimmen. Erste Schritte zu einer solchen projektbegleitenden Kalibrierung wurden in [BAE und LICHTI 2007] publiziert.

Der im System *CityGRID Scanner* verwendete Laserscanner RIEGL LMS-Z420i wurde in dieser Arbeit nicht näher auf systematische Fehler untersucht, da diese für die hier betrachtete Aufgabenstellung aufgrund ihrer Größenordnung vernachlässigt werden können.

3.2 Kamerakalibrierung

Der Abbildungsvorgang einer Kamera lässt sich durch ein (geeignetes) Kameramodell beschreiben. Bei der Kamerakalibrierung werden die Parameter dieses Kameramodells bestimmt.

3.2.1 Kameramodell

Das einfachste Kameramodell ist das Lochkameramodell, das einer idealisierten Kamera entspricht. Dabei erfolgt die Projektion der Punkte des 3D-Objektraums auf die Bildebene mittels Zentralprojektion mit dem Projektionszentrum P_0 (siehe Abb. 3.1). Die Position des Projektionszentrum in Bezug zur Bildebene wird durch die Bildkoordinaten (x_0, y_0) des Bildhauptpunkts H (Orthogonalprojektion des Projektionszentrum auf die Bildebene) und die Kamera-konstante c (Normalabstand des Projektionszentrum von der Bildebene) beschrieben. Diese 3 Größen werden als Parameter der inneren Orientierung der Kamera bezeichnet.

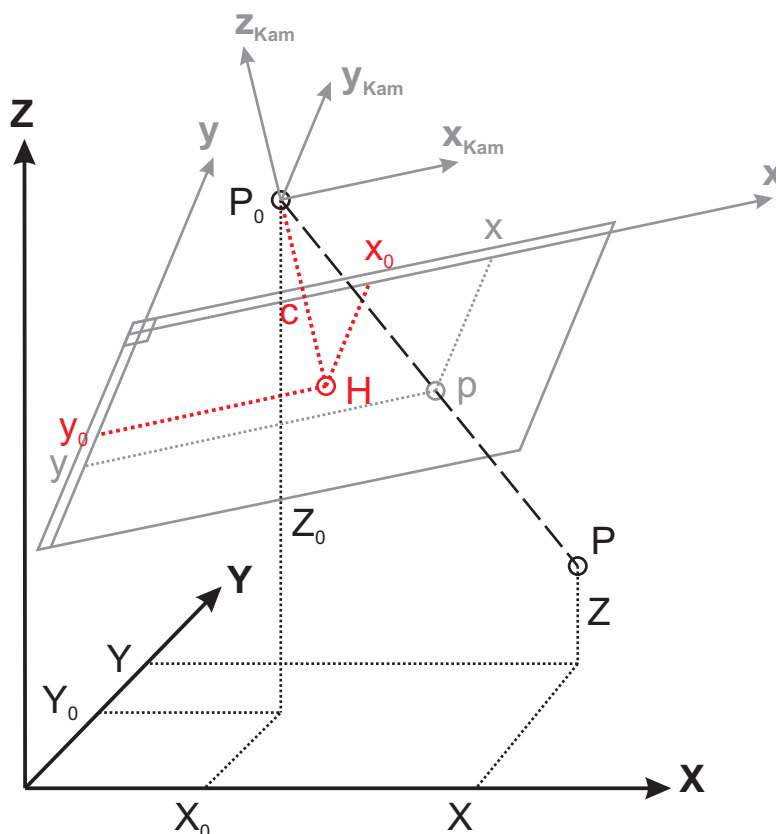


Abbildung 3.1: Zentralprojektion. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems (xy) befindet sich hier im linken oberen Pixel $(0,0)$ des digitalen Bildes; die x -Achse zeigt in Richtung des zunehmenden Spalten-Index, die negative y -Achse in Richtung des zunehmenden Zeilen-Index des Digitalbildes. Die 3 Parameter der inneren Orientierung x_0, y_0 und c geben die Position der Projektionszentrum P_0 bezüglich der Bildebene an; sie werden in der Einheit [pixel] angegeben. Ein Objektpunkt $P(X, Y, Z)$ wird bei diesem Modell mittels eines geraden (d.h. ungekrümmten) Projektionsstrahls auf seinen entsprechenden Bildpunkt $p(x, y)$ abgebildet.

Die Gleichungen der Zentralprojektion lauten mit den Bezeichnungen aus Abb. 3.1:

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} = x_0 - c \cdot \frac{x_{Kam}}{z_{Kam}} \\
 y &= y_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} = y_0 - c \cdot \frac{y_{Kam}}{z_{Kam}}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Die Drehmatrix

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$$

beschreibt die räumliche Stellung des Kamera-Koordinatensystems $(x_{Kam}, y_{Kam}, z_{Kam})$ (bzw. der Bildebene) bezüglich des Objektkoordinatensystems (XYZ) . Die Drehung, die durch 3 voneinander unabhängige Parameter bestimmt ist, sowie die Koordinaten X_0 , Y_0 und Z_0 des Projektionszentrums \mathbf{P}_0 bilden die 6 Parameter der äußeren Orientierung eines Bildes.

Bei obigem Modell werden allerdings die realen physikalischen Eigenschaften der Kamera-Optik (Objektiv-Verzeichnung) sowie mögliche geometrische Unzulänglichkeiten des Sensor-Chips nicht berücksichtigt. Die Abweichung des realen physikalischen Abbildungsprozess von dem idealisierten Modell kann mit Hilfe von zusätzlichen Parametern (*additional parameters*) beschrieben werden. Das am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien entwickelte hybride Ausgleichungssystem ORIENT/ORPHEUS ([KAGER 2000]) verwendet ein mathematisches Modell, bei dem sich die Abweichungen der realen Abbildung von der Zentralprojektion als (von den Bildkoordinaten abhängige) Verschiebung des Hauptpunkts $(dx_0(x, y), dy_0(x, y))$ interpretieren lassen.

Diese Verschiebung setzt sich – für jede der beiden Bildkoordinaten – aus einer Summe von Termen zusammen, von denen jeder ein bestimmtes Phänomen (radiale Verzeichnung, Affinität, etc.) beschreibt und jeweils mit einem Koeffizienten (=entsprechender zusätzlicher Parameter a_i) multipliziert wird. Dessen Wert bestimmt den Einfluss des jeweiligen Terms, d.h.

$$\begin{aligned}
 x_0 &:= x_0 + dx_0(x, y) = x_0 + \sum_{i \in I} (a_i \cdot dx_{0i}(x, y)) \\
 y_0 &:= y_0 + dy_0(x, y) = y_0 + \sum_{i \in I} (a_i \cdot dy_{0i}(x, y))
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

I ist die Menge der im Kameramodell verwendeten zusätzlichen Parameter. Von den zahlreichen zusätzlichen Parametern (ADPARs), die im System ORIENT/ORPHEUS zur Verfügung stehen, sind in Tabelle 3.1 einige wichtige angeführt.

Die in der Tabelle angegebenen Größen x bzw. y sind als (auf den Hauptpunkt) reduzierte und normierte Bildkoordinaten zu verstehen, d.h.

$$\begin{aligned} x &:= \frac{x - x_0}{\rho} \\ y &:= \frac{y - y_0}{\rho} \end{aligned} \tag{3.3}$$

wobei ρ ein konstanter Normierungsradius ist. Außerdem gilt $r^2 = x^2 + y^2$, d.h. r ist der normierte Abstand des Bildpunkts vom Hauptpunkt.

i	$dx_{0i}(x, y)$	$dy_{0i}(x, y)$	Bedeutung
1	0	x	Nicht-Orthogonalität d. Bildkoordinatenachsen
2	0	y	Skalierung der y-Achse
3	$x \cdot (r^2 - 1)$	$y \cdot (r^2 - 1)$	radialsymmetrische Verzeichnung (Grad 3)
4	$x \cdot (r^4 - 1)$	$y \cdot (r^4 - 1)$	radialsymmetrische Verzeichnung (Grad 5)
5	$r^2 + 2 \cdot x^2$	$2 \cdot x \cdot y$	} tangential-asymmetrische Verzeichnung
6	$2 \cdot x \cdot y$	$r^2 + 2 \cdot y^2$	
37	$x \cdot (r^6 - 1)$	$y \cdot (r^6 - 1)$	radialsymmetrische Verzeichnung (Grad 7)
38	$x \cdot (r^8 - 1)$	$y \cdot (r^8 - 1)$	radialsymmetrische Verzeichnung (Grad 9)

Tabelle 3.1: Satz ausgewählter zusätzlicher Parameter im System ORIENT/ORPHEUS

Im Zuge der Bestimmung der Kamerakalibrierungsparameter kann in einem ersten Schritt mittels statistischer Tests bestimmt werden, welche der angesetzten zusätzlichen Parameter sich signifikant von 0 unterscheiden ([KRAUS 1996]). Nur diese sollten für das finale Kameramodell verwendet werden, um eine Überparametrisierung zu vermeiden.

Während früher für analoge Messkameras die Laborkalibrierung mittels Goniometer große Bedeutung hatte, kommen heutzutage für die in der terrestrischen Photogrammetrie verwendeten Digitalkameras vor allem die Testfeldkalibrierung und die Selbstkalibrierung zum Einsatz.

Bei der Testfeldkalibrierung erfolgt die Kamerakalibrierung mit Hilfe eines zuvor (z.B. mit einer Totalstation) eingemessenen Testfeldes, d.h. es stehen Passpunkte zur Verfügung.

Bei der Selbstkalibrierung wird die Kamera hingegen mit Hilfe ihrer eigenen photogrammetrischen Beobachtungen kalibriert, wobei mindestens 3 konvergente Aufnahmen notwendig sind, um den Bildhauptpunkt bestimmen zu können ([BROWN 1971] bzw. [MAAS 1997]). Für die Bestimmung der Kamerakonstante muss mindestens eine Distanz am Objekt bekannt sein.

Aufgrund der geometrischen Instabilität nicht-metrischer Kameras ist die Kalibrierung in gewissen zeitlichen Abständen zu wiederholen. Der folgende Abschnitt befasst sich mit dahingehend durchgeführten Untersuchungen.

3.2.2 Zur Stabilität der inneren Orientierung bei handelsüblichen Digitalkameras

Um Änderungen der inneren Orientierung bei handelsüblichen Digitalkameras zuverlässig feststellen zu können, wurde zur Kamerakalibrierung das im Messkeller des Instituts bestehen-

de 3D-Testfeld verwendet, welches die Dimensionen von ca. $6.4 \text{ m} \times 3.3 \text{ m} \times 5.7 \text{ m}$ (Breite \times Höhe \times Tiefe) hat und dessen Punkte Koordinatengenauigkeiten im Submillimeterbereich aufweisen. Mit Hilfe der Testfeldkalibrierung konnten die Parameter des Kameramodells für jedes einzelne Bild separat bestimmt werden. Da bei einer früheren Arbeit ([KIENAST 2006]) der Verdacht aufgekommen war, dass die Schwerkraft möglicherweise Ursache für Instabilitäten der inneren Orientierung sein könnte (vgl. dazu auch [HAIG et al. 2006]), wurden Aufnahmen mit 4 um jeweils ca. 100^{gon} unterschiedlichen Kantungen (=Drehungen um die Aufnahmeachse) bei annähernd konstanter horizontaler Aufnahmeorientierung untersucht (vgl. Abb. 3.2): $\kappa \approx 0^{\text{gon}}$ („Hochformat – linke Hand oben“), $\kappa \approx 100^{\text{gon}}$ („Querformat aufrecht“), $\kappa \approx 200^{\text{gon}}$ („Hochformat – rechte Hand oben“) und $\kappa \approx 300^{\text{gon}}$ („Querformat verkehrt“). Die Werte für κ gelten im Falle einer $\alpha\zeta\kappa$ -Parametrisierung der Drehwinkel (siehe Anhang A.1).



Abbildung 3.2: Untersuchte Kantungen bei horizontaler Aufnahmeorientierung

Ein solcher Satz von 4 Kalibrierenaufnahmen, die unmittelbar hintereinander ohne Stativ erfolgten, wird im folgenden als „Aufnahmesatz“ bezeichnet. Um etwaige zeitliche Änderungen untersuchen zu können, wurden für diverse Kamera-Objektiv-Kombinationen Kalibrierenserien durchgeführt, die jeweils aus mehreren (zeitlich auseinanderliegenden) Aufnahmesätzen bestehen. Zwischen diesen Sätzen wurde die Kamera geschüttelt.

Die folgenden Kameras bzw. Objektive wurden auf diese Weise untersucht:

- Canon EOS 1Ds (Canon EF 20mm-Objektiv)
- Nikon D70 (14mm-Sigma-Objektiv und 15mm-Nikon-Objektiv)
- Nikon D200 (14mm-Sigma-Objektiv und 15mm-Nikon-Objektiv)

Die Aufnahmen wurden jeweils mit Blitz, kleiner Blende (Blendenzahl $k=22$) und einer kurzen Belichtungszeit ($1/400 \text{ s}$ bis $1/250 \text{ s}$) durchgeführt, um die mit retro-reflektierenden Zielmarken signalisierten Passpunkte des Testfelds automatisiert aus den Bildern extrahieren zu können. Ein Beispiel für eine solche Aufnahme ist in Abb. 3.3 zu sehen.

Für jeden Punkt wurde das Zentrum der Zielmarke nach der in [FÖRSTNER 1991] angegebenen Methode mit Subpixelgenauigkeit automatisch ermittelt: Zu diesem Zweck wird zunächst um die genäherten Bildkoordinaten des Schwerpunkts ein Such-Fenster geeigneter Größe im Grauwertbild (bei RGB-Bildern einer der 3 Kanäle) definiert. Innerhalb dieses Bereichs wird

anschließend für jedes Pixel der Grauwertgradient bestimmt und – falls dieser vom Nullvektor verschieden ist – durch dessen Richtung und die Pixelposition eine Gerade definiert. Der gesuchte Schwerpunkt wird als Schnittpunkt aller dieser Geraden durch Ausgleichung bestimmt, wobei die Gewichte der Geraden proportional zu den Quadraten der Gradientenbeträge gewählt werden. Somit tragen Pixel in homogenen Bereichen kaum etwas zum Ergebnis bei.



Abbildung 3.3: Kalibrieraufnahme ($\kappa \approx 100^{\text{gon}}$) des 3D-Testfeldes im Messkeller des Instituts

Schließlich wurden die Bildkoordinaten der auf diese Weise extrahierten Zielmarken als Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt und die Unbekannten des Kameramodells (innere Orientierung und zusätzliche Parameter) bestimmt.

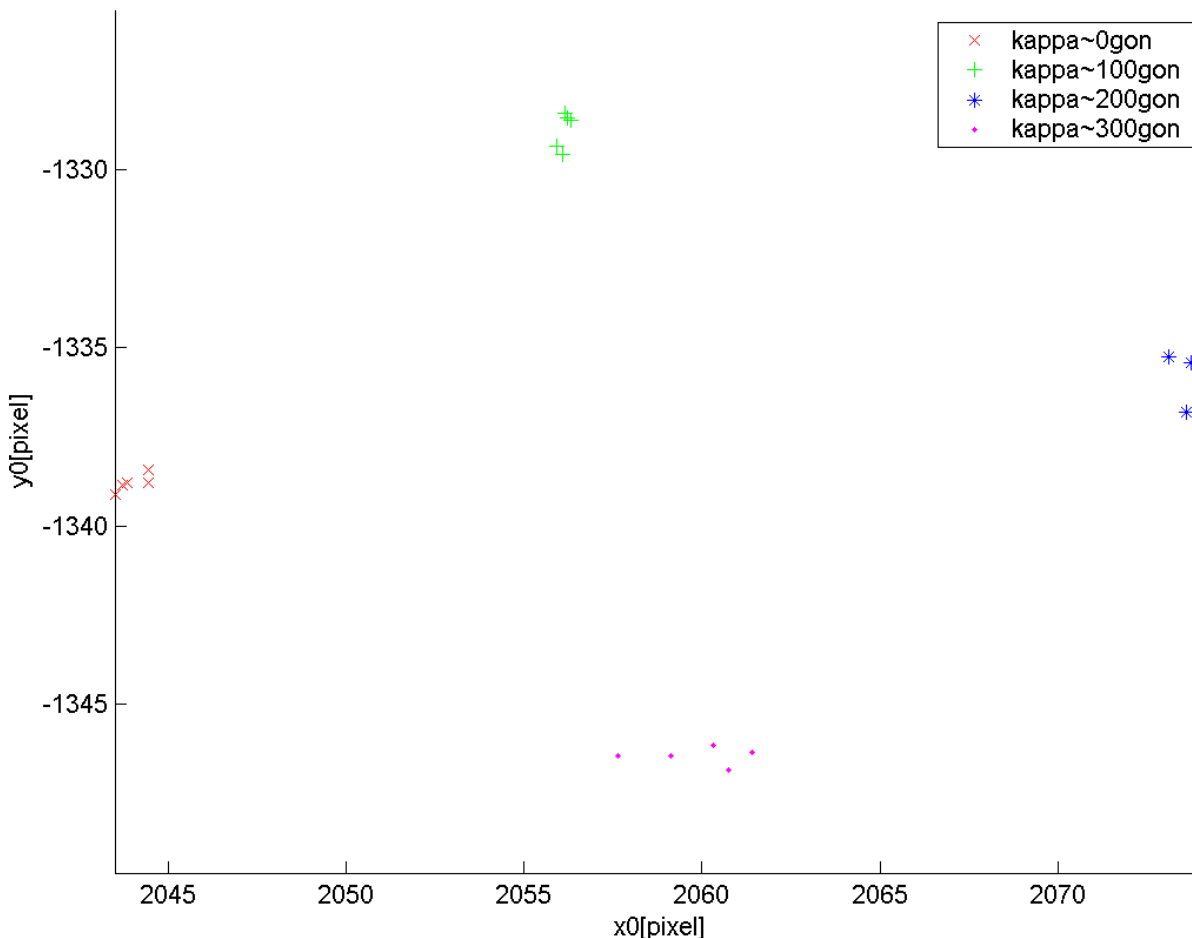
Dabei stellte sich heraus, dass vor allem die Koordinaten des Bildhauptpunktes, die in allen Fällen laut Ausgleichung mit einer Genauigkeit von <1 Pixel bestimmt werden konnten, signifikante Schwankungen aufweisen. Deshalb werden im folgenden nur diese Parameter verglichen. Die detaillierten Ergebnisse, die auch die Werte der Kamerakonstante und der zusätzlichen Parameter enthalten, befinden sich im Anhang B.1.

Canon EOS 1Ds

Für die Canon EOS 1Ds mit 20mm-Objektiv wurden 3 Kalibriererien an verschiedenen Tagen durchgeführt. Die Pixelgröße beträgt jeweils ca. $8.8 \mu\text{m}$.

Die erste Serie (6. Juli) umfasst 5 Aufnahmesätze, die innerhalb von ca. 3 Stunden aufgenommen wurden. Der 4. Satz wurde nach Erwärmung der Kamera durch Sonneneinstrahlung ausgeführt, der 5. Satz nach Abkühlung auf die ursprüngliche Temperatur. Die Abbildung 3.4 zeigt die aus den 20 Einzelaufnahmen jeweils unabhängig voneinander ermittelte Position des Bildhauptpunkts. Man kann einen deutlichen Zusammenhang der Hauptpunktlage mit der

Kantung κ erkennen, wobei die maximale Differenz bei der x-Koordinate ca. 30 Pixel bzw. bei der y-Koordinate ca. 20 Pixel beträgt. Die zeitliche Variation der Hauptpunktlage fällt hingegen für Aufnahmen mit (annähernd) gleicher Kantung trotz Temperaturvariation vergleichsweise gering aus (<5 Pixel). Somit bilden sich vier Cluster im Bildkoordinatenraum.



Kantung κ	$\kappa = 0^{\text{gon}}$	$\kappa = 100^{\text{gon}}$	$\kappa = 200^{\text{gon}}$	$\kappa = 300^{\text{gon}}$
Verschiebungsrichtung	pos. x-Achse	neg. y-Achse	neg. x-Achse	pos. y-Achse
Konsequenz	$x_0 < x_{0_M}$	$y_0 > y_{0_M}$	$x_0 > x_{0_M}$	$y_0 < y_{0_M}$

Tabelle 3.2: Systematische Abweichungen des Bildhauptpunkts (x_0, y_0) gegenüber seiner (berechneten) Mittellage (x_{0_M}, y_{0_M}) bei schwerkraftbedingter Verschiebung des Sensors

Zwecks näherer Untersuchungen wurden ein Monat später zwei weitere Kalibrierserien (9. bzw. 16. August) durchgeführt. Beide bestätigen im wesentlichen die aus der ersten Serie gewonnenen Erkenntnisse. Die Hauptpunktlage variiert auch bei diesen Serien in einem Bereich von ca. 30 Pixel bei der x-Koordinate bzw. ca. 20 Pixel bei der y-Koordinate. Für Aufnahmen mit näherungsweise gleicher Kantung tritt diese Variation wiederum in deutlich geringerem Ausmaß auf. Allerdings ist eine deutliche Verschiebung der x-Koordinatenwerte (durchschnittliche Zunahme um ca. 8 Pixel) zwischen erster und zweiter Serie zu beobachten (Abb. 3.5).

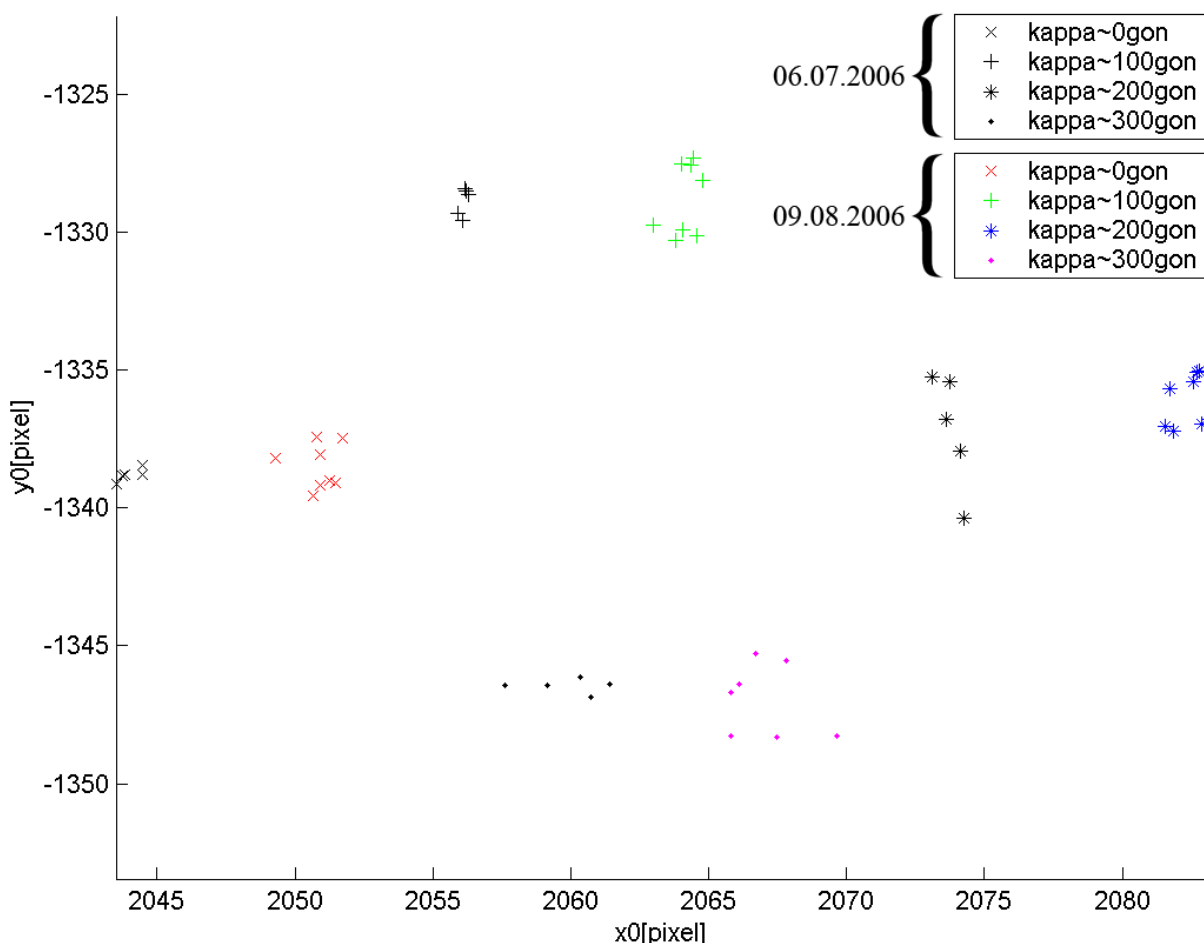


Abbildung 3.5: Lage des Bildhauptpunkts bei der Canon EOS 1Ds mit 20mm-Objektiv am 09.08.2006 im Vergleich zur Kalibrierserie vom 06.07.2006

Die Ursachen für diese systematische Verschiebung zwischen den beiden Serien sind nicht bekannt. Eine mögliche Erklärung könnte die Lagerung der Kamera innerhalb eines Koffers (Kantung $\kappa \approx 200^{\text{gon}}$) während des einen Monats sein – eine längerfristige Verschiebung der

x-Koordinate des Hauptpunkts in positive Richtung wäre gemäß Tabelle 3.2 durchaus denkbar. Allerdings kann diese Hypothese mangels ausreichender Testreihen nicht bestätigt werden.

Die dritte Serie unterscheidet sich nur geringfügig von der zweiten Serie (siehe Anhang B.1).

Nikon D70

Für die Nikon D70 wurden Serien mit sowohl einem 14mm-Sigma-Objektiv als auch einem 15mm-Nikon-Objektiv durchgeführt. Die Pixelgröße beträgt jeweils ca. $7.8 \mu\text{m}$.

Mit dem 14mm-Objektiv wurde lediglich eine Serie aufgenommen (Abb. 3.6). Im Gegensatz zu den Canon-Serien sind in diesem Fall die Koordinaten des Bildhauptpunkts mit der jeweiligen Kantung κ der Aufnahme weit weniger korreliert. Folglich sind keine scharf abgegrenzten Cluster zu erkennen. Die Hauptpunktlage variiert in einem Bereich von ca. 10×12 Pixel.

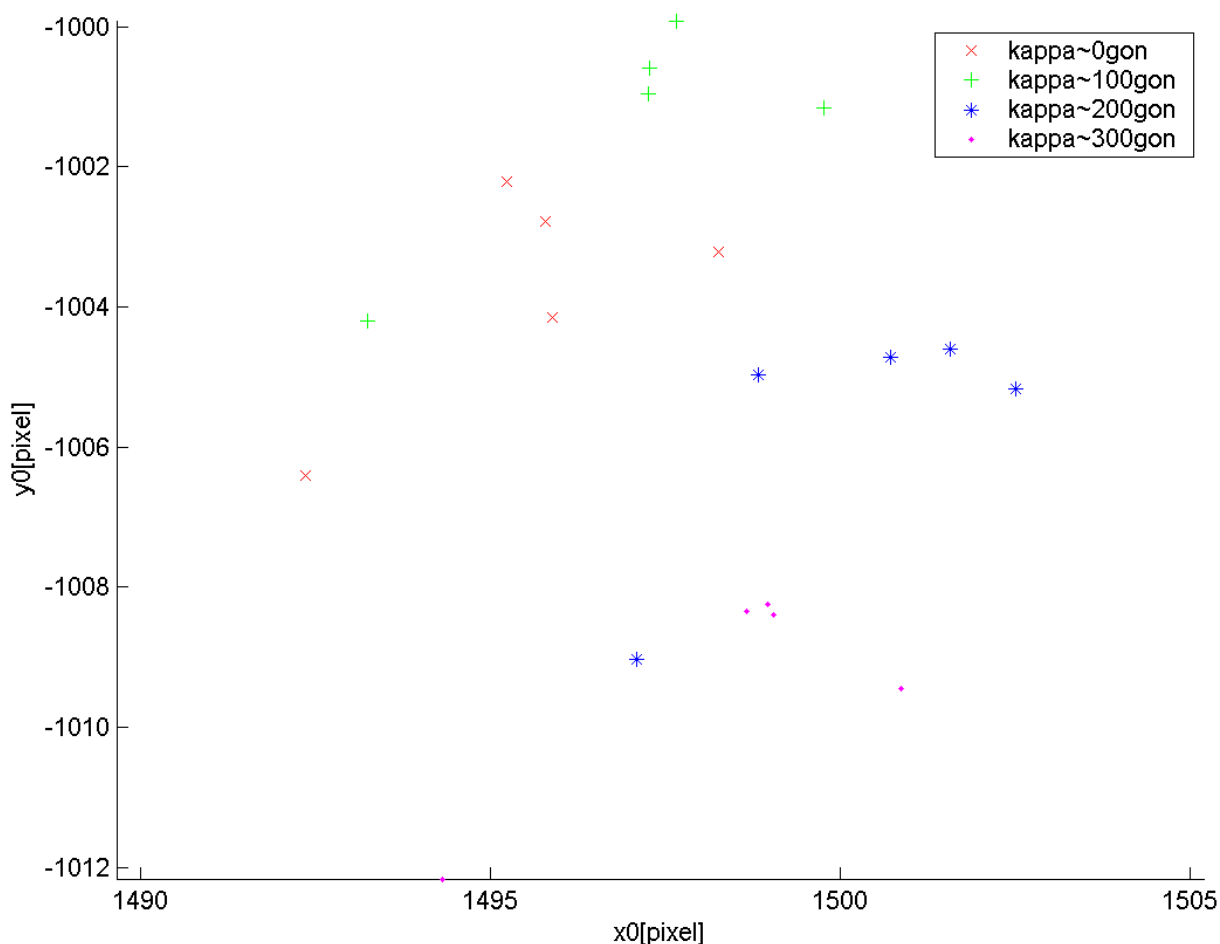


Abbildung 3.6: Lage des Bildhauptpunkts bei der Nikon D70 mit 14mm-Objektiv (06.07.2006)

Mit dem 15mm-Objektiv wurden ebenfalls zwei solche Serien sowie zusätzlich eine Zeitserie mit Stativ durchgeführt.

Die erste Serie (6. Juli) weist eine mit der 14mm-Objektiv-Serie vergleichbare Charakteristik auf (Abb. 3.7). Allerdings weicht die y-Koordinate des Hauptpunkts bei einem Satz von Kantungen

deutlich von den restlichen Werten ab.

Die zweite Serie (16. August) hat ebenfalls ähnliche Eigenschaften. Die Hauptpunktlage variiert innerhalb eines kleineren Fensters, das fast zur Gänze in jenem der ersten Serie liegt.

Unmittelbar vor der zweiten Serie wurde auch eine Aufnahmeserie mit Stativ durchgeführt. Dabei erfolgten sämtliche Aufnahmen mit einer Kantung von $\kappa \approx 100^{\text{gon}}$, wobei diese in Abständen von 2-5 Minuten erfolgten. Das Stativ wurde – jeweils nach einigen Wiederholungsaufnahmen – zweimal umgestellt. Alle 3 Serien sind in Abbildung 3.8 gemeinsam dargestellt. Bei der Stativserie sind die zwei Umstellungen in Form von drei Clusters deutlich zu erkennen. Die Wiederholbarkeit für gleiche Stativaufstellungen ist gegeben, d.h. die Hauptpunktskoordinaten der Wiederholungsaufnahmen unterliegen aus statistischer Sicht keinen signifikanten Änderungen.

Nikon D200

Für die Nikon D200 wurde jeweils eine Serie mit 14mm- und 15mm-Objektiv am 06.07.2006 durchgeführt. Die Pixelgröße beträgt jeweils ca. $6.1 \mu\text{m}$.

Die Ergebnisse sind qualitativ jenen der D70 ähnlich, die Hauptpunktlage variiert in einem Bereich von ca. 21×16 Pixel (14mm-Objektiv) bzw. 15×22 Pixel (15mm-Objektiv). Die entsprechenden graphischen Darstellungen sind in den Abbildungen 3.9 bzw. 3.10 zu sehen.

Schlussfolgerungen

Bei allen untersuchten Kameras konnte festgestellt werden, dass die Parameter der inneren Orientierung – vor allem die Koordinaten des Bildhauptpunkts – i.A. signifikanten Änderungen unterliegen. Mögliche Ursachen sind Instabilitäten der Sensorchip-Montage innerhalb des Kameragehäuse sowie Instabilitäten der Objektivs. Diese können folgende Auswirkungen auf die Hauptpunktkoordinaten haben:

- Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen des Sensor-Chips bzw. des Objektivs (tritt – abgesehen von Wiederholungsmessungen mit Stativ – so gut wie immer auf)
- Abhängigkeit von der Stellung des Sensor-Chips (und somit der Kamera) bezüglich der Lotrichtung
- zeitlich bedingte Änderungen (vor allem über größere Zeiträume)

Das Verrutschen des Sensor-Chips innerhalb des Kameragehäuse bewirkt unter anderem eine Verschiebung des Bildkoordinatensystems (im Vergleich zum Zeitpunkt der Kalibrierung). Im Falle einer Aufnahme wird das eintreffende Licht (Strahlenbündel) somit nicht an der laut Kalibrierung zu erwartenden Position des Sensors registriert. Folglich ändern sich die Koordinaten des Hauptpunkts (so wie sich auch alle anderen etwaig gemessenen Bildkoordinaten

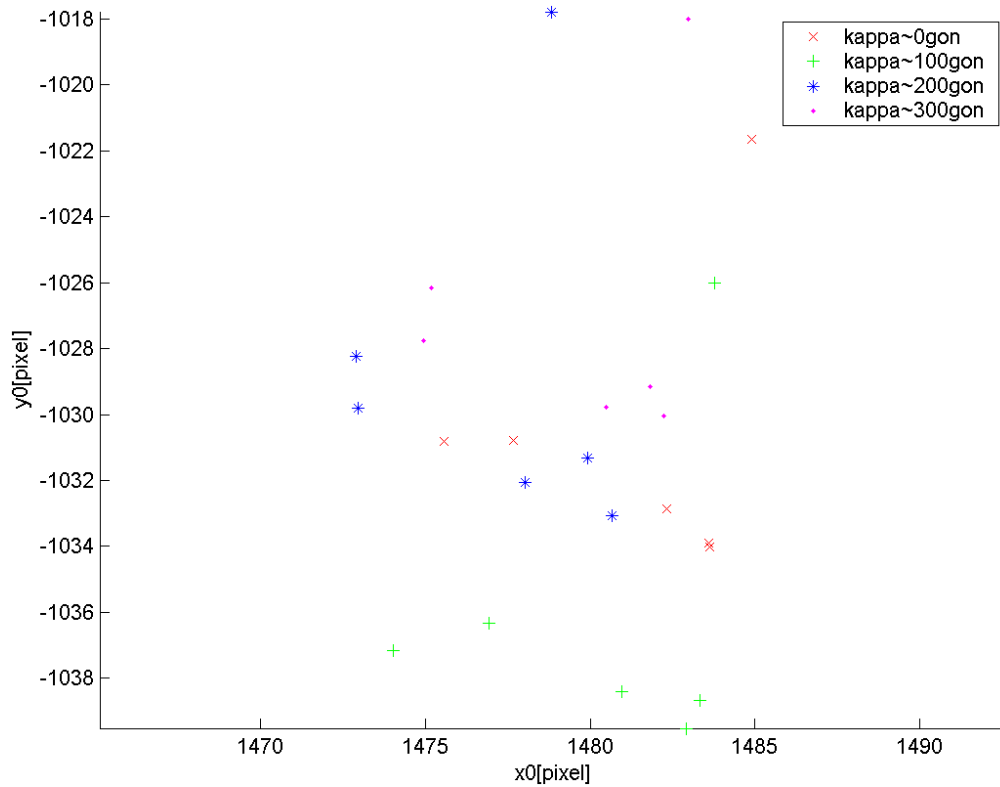


Abbildung 3.7: Lage des Bildhauptpunkts bei der Nikon D70 mit 15mm-Objektiv (06.07.2006)

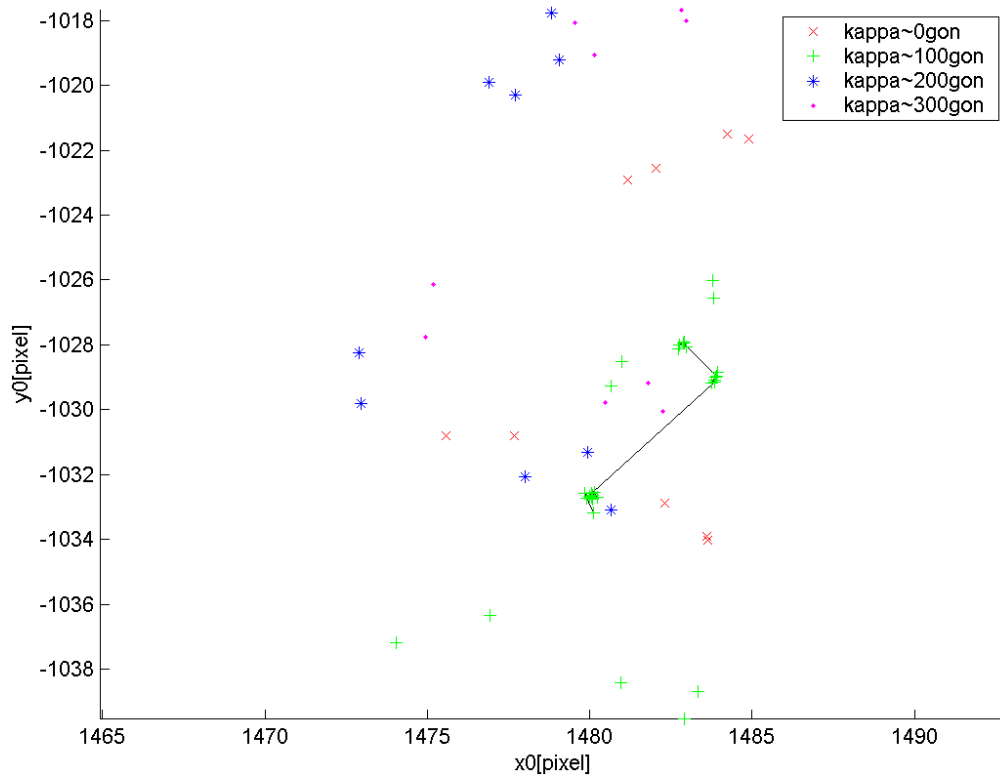


Abbildung 3.8: Lage des Bildhauptpunkts bei der Nikon D70 mit 15mm-Objektiv bei allen durchgeführten Serien vom 06.07.2006 und 16.08.2006. Bei der Statioserie sind die Hauptpunktpositionen der Aufnahmen chronologisch mit Linien verbunden. Der Wertebereich ist nahezu identisch mit jenem von Abb. 3.7.

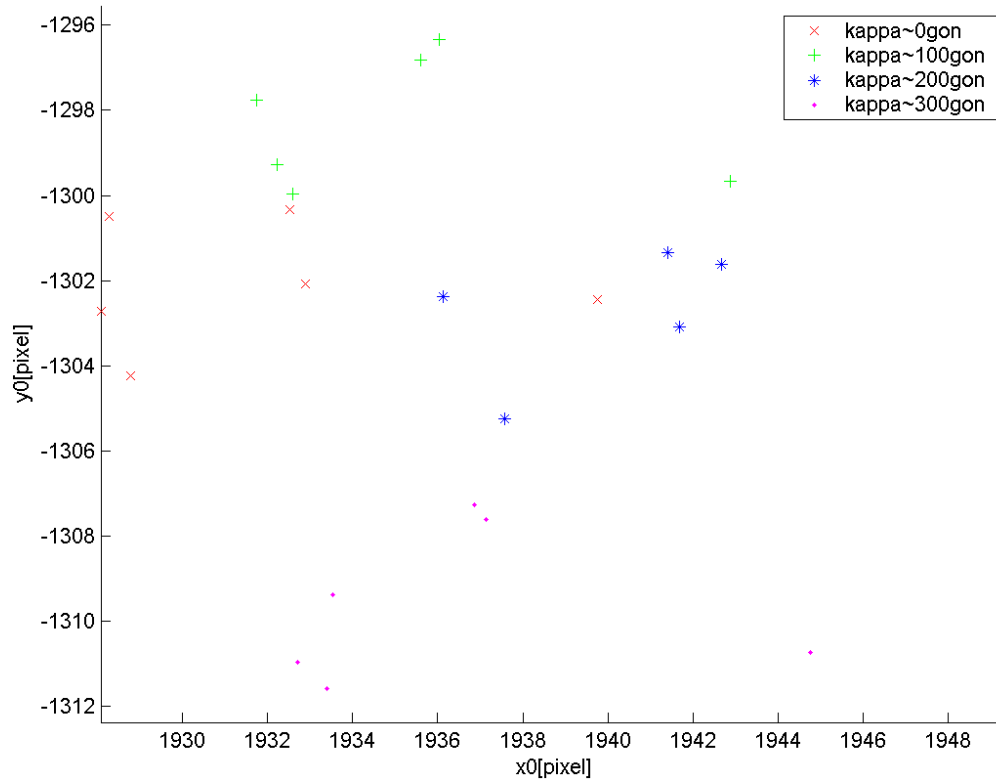


Abbildung 3.9: Lage des Bildhauptpunkts bei der Nikon D200 mit 14mm-Objektiv (06.07.2006)

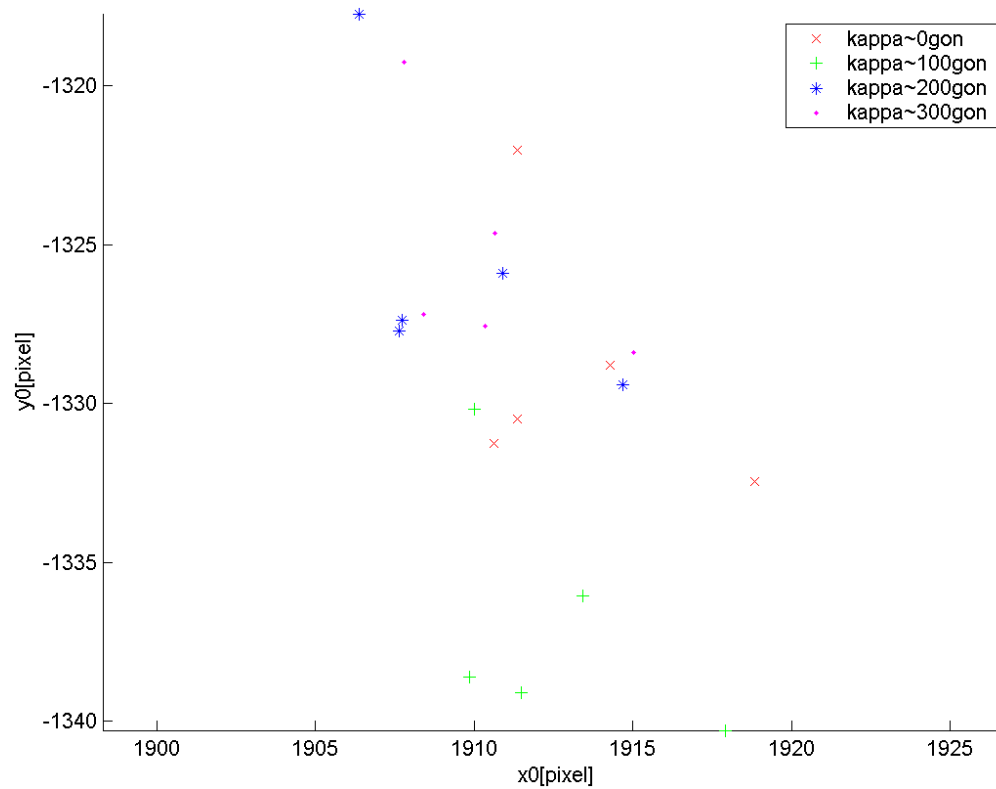


Abbildung 3.10: Lage des Bildhauptpunkts bei der Nikon D200 mit 15mm-Objektiv (06.07.2006)

ändern würden). Werden bei Berechnungen die aus der Kalibrierung ermittelten Koordinaten des Hauptpunkts verwendet, arbeitet man somit mit einem falschen Bezugspunkt. In weiterer Folge erhält man verfälschte reduzierte Bildkoordinaten, was zu einer Verdrehung und Deformation des rekonstruierten Strahlenbündels führt. Ein ähnliches Problem tritt im Falle einer instabilen Objektivbefestigung und der dadurch bewirkten Neigung der optischen Achse durch die Schwerkraft auf.

Grobe Fehler in der inneren Orientierung werden im Rahmen einer Bündelblockausgleichung weitestgehend durch die Parameter der äußeren Orientierung kompensiert ([CLARKE et al. 1998]) und können mitunter gar nicht aufgedeckt werden. Erfolgt eine solche Kompensation nicht, wie das beispielsweise bei Annahme einer konstanten Relativorientierung zu einem anderen Sensor (z.B. Laserscanner – vgl. Abschnitt 2.1) der Fall ist, dann treten aufgrund des nicht korrekt rekonstruierten Strahlenbündels Richtungsfehler auf, die z.B. bei der Texturierung einer Laserscannerpunktwolke deutlich sichtbar sind.

3.3 Relative Orientierung der Systemsensoren

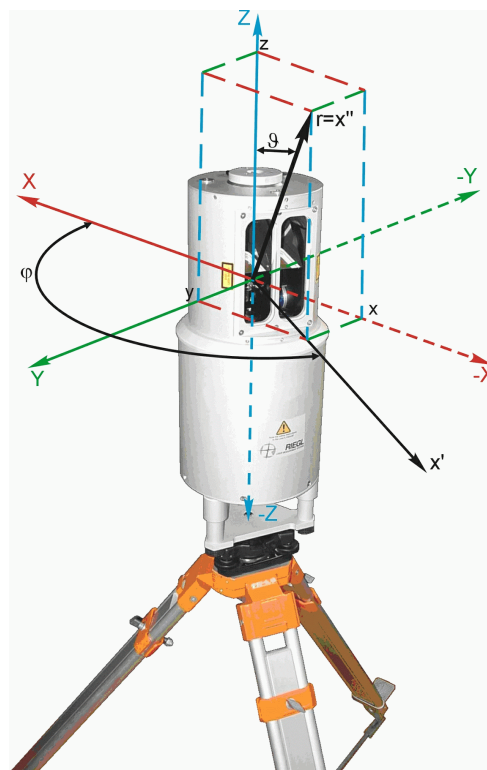


Abbildung 3.11: Sensorkoordinatensystem des Laserscanners Riegl LMS-Z420i (hier auf Stativ mit vertikaler Geräteachse (=z-Achse))

Während sich die beiden vorigen Abschnitte mit der Kalibrierung der einzelnen Sensoren (Laserscanner bzw. Kamera) befasst haben, wird im folgenden das Problem der relativen Orientierung der Systemsensoren zueinander erläutert. Da es sich hierbei eigentlich um die Bestimmung der relativen Orientierungsparameter zwischen den System-Sensoren handelt, könnte

man dieses Problem auch genauso gut zum Aufgabenbereich der Sensororientierung zählen. Da diese relativen Orientierungsparameter hier jedoch als konstant (zumindest innerhalb eines gewissen Zeitraums) angenommen werden, wird deren Bestimmung in dieser Arbeit als Teil der Systemkalibrierung betrachtet.

Im konkreten Fall des *CityGRID Scanner* dient dabei das Koordinatensystem des Laserscanners (siehe Abb. 3.11) als Bezugssystem für die anderen Systemsensoren.

3.3.1 Bestimmung des GPS-Antennen-Offset

Um GPS für die Georeferenzierung der Aufnahmesensoren verwenden zu können, muss die Position des GPS-Antennenzenrum im scannereigenen Koordinatensystem bekannt sein. Die Bestimmung dieser 3 Translationsparameter ist aus photogrammetrischer Sicht nicht weiter interessant. Sie kann – wie beim flugzeuggetragenen Laserscanning üblich – durch Einmessen mittels einer Totalstation erfolgen.

3.3.2 Bestimmung der *Mounting Calibration*

Die relative Orientierung einer Kamera bezüglich des Laserscanners (im folgenden als *Mounting Calibration* bezeichnet) umfasst 6 Freiheitsgrade (3 Translationsparameter und 3 Rotationsparameter). Die entsprechenden Parameter lassen sich über Punkte bestimmen, die sowohl im Laserscan als auch im entsprechenden Photo identifizierbar sind. Es bietet sich an, für diesen Zweck retro-reflektierende Zielmarken zu verwenden, da diese aufgrund ihrer hohen Reflektivität im Wellenlängenbereich des Scanners (nahes Infrarot) automatisch aus dem Intensitätsbild extrahiert und deren Zentren bestimmt werden können. Da nur eine Relativorientierung zu ermitteln ist, ist es prinzipiell nicht erforderlich, dass die Koordinaten dieser Punkte in einem übergeordneten System bekannt sind. Auf dieselbe Weise lassen sich auch die 6 Freiheitsgrade der zweiten Kamera ermitteln.

Die Bestimmung der Parameter der relativen Orientierung kann beispielsweise unmittelbar vor der eigentlichen Messkampagne an Ort und Stelle mit Hilfe eines temporär eingerichteten 3D-Testfelds erfolgen; es wird keine Totalstation benötigt, da für den Aufbau des Testfeldes die Laserscanner-Messungen selbst herangezogen werden. Es stellt sich nun die Frage, welche Genauigkeiten dabei erzielt werden können.

Um diese Frage zu beantworten, wurden Genauigkeitsuntersuchungen für ein aus dem praktischen Einsatz stammendes Kalibrierprojekt durchgeführt. Dieses Projekt wurde bei einem Nebentrakt des Schlosses Schönbrunn durchgeführt, wobei insgesamt 29 retro-reflektierende kreisförmige Zielmarken der Firma Riegl – über den Bereich verteilt – aufgeklebt wurden (siehe Abb. 3.12). Durch entsprechendes Positionieren des Fahrzeugs wurden drei Scan-Position (bestehend aus jeweils einem Scan und je einem Photo pro Kamera) aufgenommen. Die Scans wurden jeweils über einen Bereich von $120^\circ \times 80^\circ$ mit einer Winkelschrittweite von 0.1° durchgeführt und dauerten jeweils ca. 2 Minuten. Die im jeweiligen Scan sichtbaren Reflektoren konn-

ten mit Hilfe der Aufnahme-Software RiSCAN PRO ([RIEGL 2007]) automatisch per Schwellwertverfahren im entsprechenden Intensitätsbild detektiert werden. Auf anschließende Fein-Scans der Reflektoren (Winkelschrittweite: 0.004°), mittels derer die Positionen der Reflektor-Zentren wesentlich genauer bestimmt werden könnten, wurde aus wirtschaftlichen Überlegungen verzichtet; pro Minute lassen sich erfahrungsgemäß etwa 3 bis 4 Reflektor-Scans durchführen, was in diesem Fall bei insgesamt $29 + 20 + 28 = 77$ notwendigen Fein-Scans (Summe der jeweils im Scan sichtbaren Reflektoren) einen deutlichen zeitlichen Mehraufwand bedeutet hätte.



Abbildung 3.12: Kalibrierprojekt mit einem temporären Testfeld bestehend aus 29 Retro-Reflektormarken. 3 Scan-Positionen wurden aufgenommen, die in dieser Darstellung bereits relativ zueinander orientiert sind. Der Grauwert eines Punktes entspricht seinem jeweiligen Intensitätswert.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die zuvor erwähnten 6 Unbekannten der Mounting Calibration für die „obere“ Kamera (vgl. Abb. 2.1) aus den 3 verfügbaren Scan-Positionen ermittelt. Prinzipiell wäre es zwar möglich, die unbekannt Parameter aus einer einzigen Scan-Position zu bestimmen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die dabei erzielbaren Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten nicht gut genug für die erwähnten Anwendungen sind, da ein temporär erzeugtes Testfeld mehr oder weniger von den örtlichen Gegebenheiten abhängig ist und die geometrische Konfiguration meist bei weitem nicht so günstig ist, wie dies bei einem permanenten Testfeld in der Regel der Fall ist. Ein anderer Grund dafür ist die relativ geringe Redundanz des Ausgleichsproblems bei Verwendung von nur einer Scan-Position: In diesem

Projekt beträgt beispielsweise die Redundanz – je nach Scan-Position – zwischen 27 und 50, während sich bei Verwendung aller 3 Scan-Positionen aufgrund der deutlich höheren Anzahl von Beobachtungen eine Redundanz von 273 erzielen lässt (d.h. Erhöhung um den Faktor 5 bis 10). In letzterem Fall kommt es außerdem zum Schnitt photogrammetrischer Strahlenbündel, die von verschiedenen Scanner-Standpunkten stammen.

Die Abbildung 3.13 zeigt die entsprechenden Photos der „oberen“ Kamera. Die Messungen der Reflektor-Zentren in den Photos konnten – wie bei den Scan-Intensitätsbildern – automatisiert erfolgen, da die Aufnahmen mit Blitz durchgeführt worden waren. Selbstverständlich könnten noch – zusätzlich zu den Reflektoren – natürliche Punkte als Verknüpfungspunkte zwischen den Photos gemessen werden (hier z.B. an Bodenmarkierungen oder Kaminen), insbesondere wenn sich eine gute geometrische Verteilung der Reflektoren nicht realisieren lässt.



Abbildung 3.13: Photos der „oberen“ Kamera an den 3 Scan-Positionen. Im Gegensatz zu Abbildung 2.1 ist die Aufnahmeachse der Kamera in diesem Beispiel nicht nach oben geneigt, sondern annähernd horizontal.

In dieser Untersuchung wurde die Mounting Calibration folgendermaßen beschrieben:

$$\mathbf{x}_{Scan} = \mathbf{R} \cdot (\mathbf{x}_{Kam} - \mathbf{t}) \quad (3.4)$$

Dabei beschreibt \mathbf{x}_{Scan} die Koordinaten eines Punktes im Scanner-Koordinatensystem, \mathbf{x}_{Kam} die Koordinaten desselben Punktes im Kamera-Koordinatensystem, \mathbf{R} die Rotation des Kamera-Koordinatensystems bezüglich des Scanner-Koordinatensystems, und \mathbf{t} die Position des Scanner-Ursprungs bezüglich des Kamera-Koordinatensystems. Da die z-Achse (Aufnahmerichtung) der Kamera in etwa orthogonal auf die z-Achse des Scanner-Systems steht, wird die $\alpha\zeta\kappa$ -Parametrisierung für die Drehwinkel verwendet (vgl. Anhang A.1). Bei Verwendung der Beobachtungen aller 3 Scan-Positionen ergeben sich (nach Eliminieren von 3 fehlerhaften Beobachtungen durch robuste Schätzung) die in Tabelle 3.3 angegebenen Werte bzw. Genauigkeiten für die 6 zu bestimmenden Parameter.

Rotation	Translation
$\alpha = 4.6544 \text{ rad} \pm 0.48 \text{ mrad}$	$t_x = 0.458 \text{ m} \pm 3.3 \text{ mm}$
$\zeta = 1.5716 \text{ rad} \pm 0.42 \text{ mrad}$	$t_y = -0.424 \text{ m} \pm 3.7 \text{ mm}$
$\kappa = 3.1384 \text{ rad} \pm 0.34 \text{ mrad}$	$t_z = 0.170 \text{ m} \pm 2.5 \text{ mm}$

Tabelle 3.3: Durch Ausgleichung ermittelte Werte und Genauigkeitsmaße für die 6 Parameter der Mounting Calibration, basierend auf den Beobachtungen aller 3 Scan-Positionen.

Wie man anhand der Tabelle erkennen kann, lassen sich die Translationskomponenten jeweils auf wenige mm genau bestimmen. Die Genauigkeiten der Drehwinkel liegen zwischen 0.3 und 0.5 mrad (entspricht 3 bis 5 mm auf einer Entfernung von 10 m).

Im Vergleich dazu lassen sich bei Verwendung einer der drei Scan-Positionen jeweils nur Genauigkeiten von ca. 1 cm (Translation) bzw. ca. 1 mrad (Rotation) erzielen, allerdings – wie bereits erwähnt – bei wesentlich geringerer Redundanz und Zuverlässigkeit.

Die eigentlich interessante Frage ist jedoch, mit welchem Genauigkeitsverlust bei einer solchen Kalibrierung im Feld gegenüber einer Kalibrierung mit permanentem Testfeld (höhere Anzahl und bessere Verteilung der Reflektoren, Koordinaten a-priori bekannt) und fein gescannten Reflektoren zu rechnen ist.

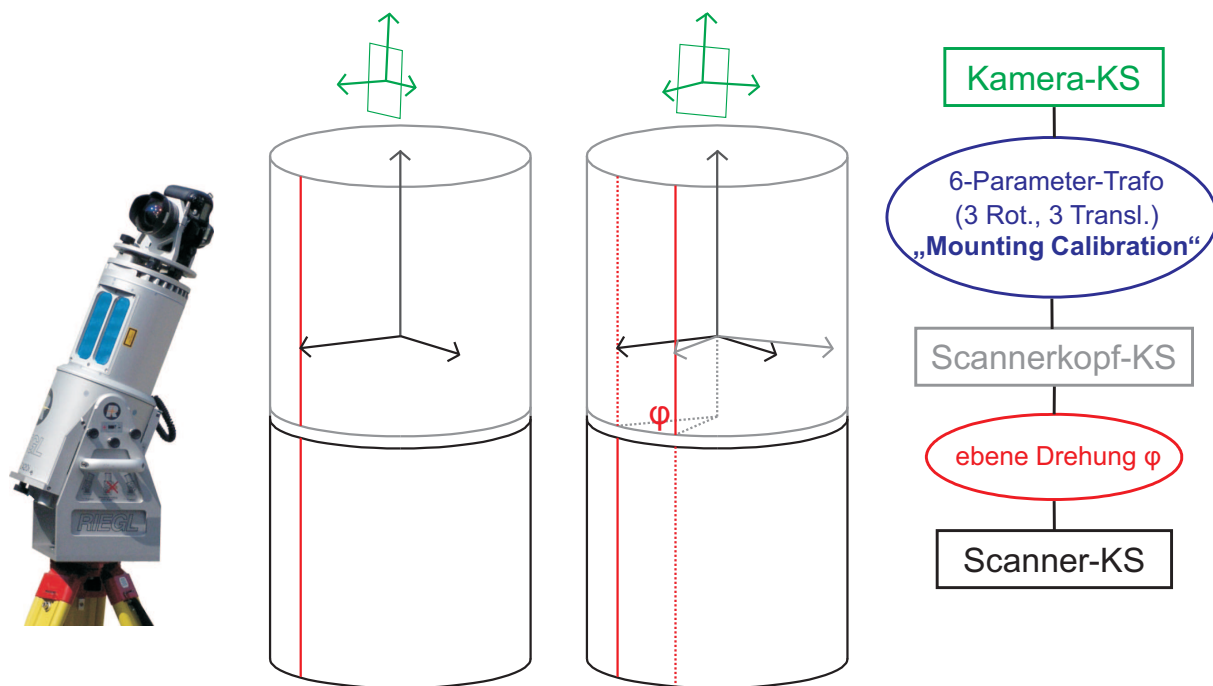


Abbildung 3.14: Relativorientierung des Kamera-Koordinatensystems zum Scanner-Koordinatensystem im Falle einer aufgesetzten Kamera beim Laserscanner Riegl LMS-Z420i. Die 6 Parameter der Mounting Calibration stellen den Bezug zwischen Kamera- und Scannerkopf-Koordinatensystem her; die ebene Drehung des Scannerkopfes (um die Scannerachse) gegenüber seiner Nullstellung (Zeichnung links) wird durch den Winkel φ beschrieben.

Um diese Frage zu klären, wurden die Ergebnisse der Diplomarbeit Kienast ([KIENAST 2006]) als Vergleich herangezogen. In dieser Arbeit wurde – für das gleiche Scanner-Modell und u.a.

für das gleiche Kameramodell – die Mounting Calibration für eine direkt auf dem Scannerkopf montierten Kamera (siehe Abb. 3.14) auf Stabilität untersucht. Die Mounting Calibration und der (vom Laserscanner gemessene) Winkel φ der ebenen Drehung des drehbaren Scannerkopfes bezüglich des unbeweglichen Scanner-Teils stellen gemeinsam die Beziehung zwischen Kamera- und Scannerkoordinatensystem her.

Die Translationskomponenten und die Drehwinkel konnten im permanenten Testfeld jeweils aus einer einzigen Scan-Position (bestehend aus mehreren Photos, die zur Abdeckung des gesamten Panorama an unterschiedlichen Winkeln φ aufgenommen wurden) in allen Messserien auf <1 mm bzw. <0.2 mrad bestimmt werden – d.h. in etwa um eine Größenordnung besser, als dies im Feld aus einer einzigen Scan-Position möglich ist bzw. in etwa um den Faktor 3 bis 4 besser als bei Verwendung aller 3 Scan-Positionen (siehe Werte in Tabelle 3.3).

Schlussfolgerungen

Die Bestimmung der Mounting Calibration mit Hilfe eines temporär eingerichteten Testfeldes aus einer einzigen Scan-Position führte zu merklich schlechteren Genauigkeitsmaßen als im Falle eines permanenten Testfeldes. Ursachen dafür waren die Bestimmung der Koordinaten der Testfeldpunkte aus einem einzigen relativ groben Scan (zudem ohne jegliche Kontrolle) und relativ wenige Testfeldpunkte, die auch bei weitem nicht so günstig verteilt waren wie bei einem permanenten Testfeld. Allerdings ließ sich die Genauigkeit und auch die Zuverlässigkeit durch Verwendung zweier zusätzlicher Scan-Positionen beträchtlich steigern, ohne dass zusätzliche Fein-Scans der Reflektoren durchgeführt werden mussten.

Die Variante mit den 3 Scan-Positionen im temporären Testfeld ist somit ein guter Kompromiss zwischen der schnellen Einzel-Position-Variante im Feld und der deutlich aufwändigeren Variante im permanenten Testfeld, wenn die Genauigkeitsansprüche nicht entsprechend hoch sind.

Bei der projektbegleitenden Kalibrierung, von der in Abschnitt 5.2 Gebrauch gemacht wird, wird kein Testfeld verwendet; stattdessen werden gut definierte natürliche Punkte bzw. Linien, die sowohl in den Scans als auch in den Photos beobachtet werden können, zur Bestimmung der Parameter verwendet. Das Einrichten eines Testfeldes entfällt somit und die Parameter der Kalibrierung werden aus den Aufnahmen des Projektes selbst bestimmt. Allerdings ist die geometrische Anordnung der Aufnahmen sowie die Verteilung geeigneter Punkte bzw. Linien in der Regel bei Projekten bei weitem nicht so gut wie dies bei einem Testfeld mit künstlichen Zielmarken der Fall ist.

Kapitel 4

Georeferenzierung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Orientierung von Sensoren (Kamera, terrestrischer Laserscanner) bezüglich eines übergeordneten Systems (Projektkoordinatensystem, Landeskoordinatensystem, Weltkoordinatensystem). Der Vorgang wird in dieser Arbeit als *Georeferenzierung* bezeichnet. Da dieser Begriff in den Geowissenschaften keine exakte einheitliche Bedeutung aufweist, wird er zunächst für die hier besprochenen Anwendungen präzisiert bzw. von seinen Bedeutungen in anderen Anwendungen abgegrenzt. Anschließend folgt ein Abschnitt über Orientierung terrestrischer Laserscanner-Daten mit Hilfe von 3D-Scan-Matching-Algorithmen. Schließlich werden Strategien für die Georeferenzierung von Aufnahmedaten des *CityGRID Scanner* sowohl im Stop-and-go-Modus als auch im dynamischen Modus angegeben.

4.1 Begriffsdefinition und Stand der Technik

Als *Georeferenzierung*¹ bezeichnet man ganz allgemein den Vorgang, für Daten einen räumlichen Bezug zur Erdoberfläche herzustellen. Somit kann bereits die einfache Verortung (Zuweisen von Weltkoordinaten) von Sachdaten als *Georeferenzierung* bezeichnet werden (in diesem Zusammenhang wird auch oft der Begriff *Geotagging* verwendet).

Handelt es sich um geometrische Daten, die von Aufnahmesensoren erfasst wurden (z.B. durch eine photographische Aufnahme definiertes Strahlenbündel oder Laserscanner-Punktwolken), ist mit dem Vorgang der *Georeferenzierung* die Bestimmung der Transformationsparameter zwischen dem jeweiligen Sensorkoordinatensystem und einem übergeordneten Bezugssystem verbunden. Zur Georeferenzierung zählt auch die sogenannte *Geokodierung*, womit die Anwendung der ermittelten Transformationsparameter auf die Daten gemeint ist, was bei Rasterdaten beispielsweise auch das dafür notwendige Resampling der Bildelemente miteinschließt. In der Fernerkundung wird für die Entzerrung eines Rasterbildes in diesem Zusammenhang eher der Begriff *Geometrische Rektifizierung* verwendet [KRAUS 1990].

¹griech.: gé = Erde; lat.: referre = auf etwas zurückführen, sich auf etwas beziehen, berichten

In [RIES 2004] umfasst der Begriff *Georeferenzierung* in Zusammenhang mit multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen neben der Sensororientierung auch den anschließenden Prozess der Orthophotoherstellung (basierend auf einem digitalen Geländemodell).

In dieser Arbeit wird der Begriff *Georeferenzierung* jedoch als Synonym für Sensororientierung bezüglich eines übergeordneten Systems verwendet, d.h. der Vorgang ist mit der Bestimmung der Transformationsparameter zwischen jeweiligem Sensor- und übergeordnetem Koordinatensystem abgeschlossen. Die in Kapitel 3 angesprochene relative Sensororientierung innerhalb eines Multisensorsystems ist damit nicht gemeint.

Können die unbekanntes Transformationsparameter nicht direkt beobachtet werden, ist man für deren Bestimmung auf Pass- und Verknüpfungspunkte angewiesen. Im Falle der Luftbildphotogrammetrie beispielsweise sind diese Unbekannten für jedes Photo die 6 Parameter der äußeren Orientierung, d.h. die 3 Koordinaten des Projektionszentrum und die 3 Drehwinkel. Mit Hilfe einer Aerotriangulation können die im übergeordneten System bekannten Koordinaten der Passpunkte auf die Verknüpfungspunkte „übertragen“ und simultan die Koordinaten der Projektionszentren und die Drehwinkel der Aufnahmen bestimmt werden. Man spricht dabei von *indirekter Georeferenzierung*, da die Ermittlung der Unbekannten indirekt durch deren funktionalen Zusammenhang mit den beobachteten Bildkoordinaten der Passpunkte erfolgt. In der Nahbereichsphotogrammetrie und beim terrestrischen Laserscanning hat die indirekte Georeferenzierung mittels Passpunkten nach wie vor eine sehr große Bedeutung.

Bei der *direkten Georeferenzierung* werden während der Aufnahme die Parameter der äußeren Orientierung der Aufnahmesensoren durch relativ zu ihnen kalibrierte Navigationssensoren (satellitengestütztes Positionierungssystem GPS, inertielle Messeinheit IMU) „direkt“ beobachtet. Im Idealfall einer fehlerfreien Kalibrierung und fehlerfreien Messungen der Navigationssensoren wären keinerlei Passpunkte notwendig und bei der Anordnung der Aufnahmen bräuchte man nicht auf eine für die indirekte Sensororientierung günstige Geometrie (blockförmige regelmäßige Anordnung der Flugstreifen) zu achten, d.h. eine wesentlich flexiblere Flugplanung wäre möglich. In der Praxis birgt die rein *direkte Georeferenzierung* allerdings Risiken in sich, da deren Qualität von der Qualität der Zeitsynchronisierung der Sensoren, der Korrektheit der absoluten GPS-Positionierung sowie von der Qualität der Systemkalibrierung abhängt ([CRAMER 1999]). Außerdem könnten in diesem Fall die Messergebnisse der Navigationssensoren und deren Qualität durch davon unabhängige Beobachtungen nicht kontrolliert werden, d.h. die Zuverlässigkeit ist äußerst gering. In terrestrischen Anwendungen kann zusätzlich das Problem von großen Abschattungen auftreten, die die Qualität der Positionierung aufgrund der geometrisch ungünstigen Konfiguration und aufgrund von Mehrwegausbreitungen der Signale stark beeinträchtigen bzw. überhaupt zu Totalausfällen des Systems führen können.

Werden die Beobachtungen der Navigationssensoren gemeinsam mit Passpunkten zur Sensororientierung verwendet, spricht man von *integrierter Georeferenzierung*. Mit Hilfe umfangreicher experimenteller Tests konnte für die Luftbildphotogrammetrie gezeigt werden, dass die integrierte Georeferenzierung signifikant genauer und vor allem zuverlässiger als die rein

direkte Georeferenzierung ist, bei welcher systematische Fehler zum Teil unentdeckt bleiben ([HEIPKE et al. 2002], [CRAMER 2003]). Durch den integrierten Ansatz lassen sich die Systemkalibrierungsparameter durch hybride Ausgleichung mitbestimmen. Die integrierte Georeferenzierung kommt auch bei terrestrischen Mobile-Mapping-Systemen (vgl. Abschnitt 1.2) aus Gründen der Kontrollierbarkeit und Zuverlässigkeit zum Einsatz. Allerdings ist bei solchen Systemen aufgrund der oben erwähnten Abschattungsproblematik der GPS-Signale ein höheres Maß an Kontrolle durch andere Sensoren erforderlich, da auch längere GPS-Totalausfälle auftreten können, die überbrückbar sein müssen. [FORLANI et al. 2005] bzw. [CAZZANIGA et al. 2007] schlagen etwa eine Methode vor, die direkte Georeferenzierung eines Mobile-Mapping-Systems photogrammetrisch mittels einer orientierten Stereobildsequenz zu stützen.

4.2 Orientierung von TLS-Daten mittels 3D-Matching

Die Standardmethode für die Orientierung von terrestrischen Laserscanner-Daten basiert auf signalisierten und in den einzelnen Scans extrahierten Pass- oder Verknüpfungspunkten. Bei Mobile-Mapping-Projekten ist diese Vorgangsweise jedoch aufgrund der großen Ausdehnung des Projektgebiets nicht praktikabel; um beispielsweise bei der Aufnahme einer Häuserschlucht eine gute geometrische Verteilung der Pass- bzw. Verknüpfungspunkte zu erzielen, müssten Punkte in höheren Stockwerken außen an den Gebäudefassaden signalisiert werden; die Passpunkte müssten dabei zusätzlich auch noch eingemessen werden. Das Feinscannen der Reflektoren an jeder einzelnen Scan-Position wäre sehr zeitaufwändig und für große Projekte (mehrere km Straßenraum) wirtschaftlich nicht vertretbar.

Eine weit verbreitete alternative Methode zur Orientierung von 3D-Punktwolken ist der ICP-Algorithmus bzw. Varianten davon. Dabei erfolgt die Bestimmung der Transformationsparameter vom jeweiligen lokalen Koordinatensystem der Punktwolke in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem mittels 3D-Matching, d.h. basierend auf der Geometrie der 3D-Scan-Punktwolken selbst. Dieser Schritt wird oft auch als „Registrierung“ bezeichnet; in dieser Arbeit wird jedoch der in der Photogrammetrie übliche Begriff „Orientierung“ beibehalten.

Zunächst wird der ICP-Algorithmus vorgestellt, anschließend folgt ein Abschnitt über eventuell notwendige Vorverarbeitung der Daten, und danach wird ein für Mobile Mapping adaptierter ICP-Algorithmus präsentiert. Zum Abschluss erfolgt eine Evaluierung dieses Algorithmus, indem dieser anhand mehrerer Testdatensätze mit zwei anderen, in kommerziellen Software-Paketen implementierten ICP-verwandten Algorithmen verglichen wird.

4.2.1 ICP-Algorithmus

Paarweises 3D-Matching

Der ICP-Algorithmus (Iterative-Closest-Point-Algorithmus) stammt aus dem Bereich der Computer Vision ([BESL und MCKAY 1992]; [CHEN und MEDIONI 1992]). Er wurde u.a. zur Lösung

folgender Aufgabenstellung (Qualitätskontrolle in der Fertigungsindustrie) entwickelt:

Gegeben seien zwei 3D-Punktwolken $M = \{\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_{N_M}\}$ und $D = \{\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \dots, \mathbf{d}_{N_D}\}$. M sei die sogenannte *Modell*-Punktwolke, die bereits im übergeordneten Koordinatensystem vorliegt (z.B. CAD-Modell eines zu fertigenden Objekts). D sei die sogenannte *Daten*-Punktwolke, die in einem lokalen Koordinatensystem vorliegt (z.B. Scan eines Teils eines nach obigem CAD-Modell gefertigten Objekts).

Gesucht ist jene rigide² (6-Parameter-)Transformation $\mathbf{T}(\mathbf{R}, \mathbf{t})$, die die Datenpunkte $\mathbf{d}_i \in D$ „optimal“ (d.h. gemäß einer gewählten Optimierungsmethode) ins Modellkoordinatensystem transformiert. Für eine kompaktere Beschreibung werden bei Bedarf ab nun homogene Transformationsmatrizen verwendet, also z.B.

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Gäbe es identische Punkte in beiden Koordinatensystemen (Punktkorrespondenzen), dann könnten die Datenpunkte nach der Methode der kleinsten Quadrate „optimal“ auf die Modellpunkte transformiert werden (3D-Helmert-Transformation ohne Maßstabsfaktor).

Das Problem bei der oben genannten Aufgabenstellung ist allerdings, dass solche Punktkorrespondenzen i.A. *nicht* bekannt sind bzw. nicht existieren.

Beim ICP-Algorithmus wird zunächst zu jedem Datenpunkt \mathbf{d}_i jener Modellpunkt \mathbf{m}_j als korrespondierender Punkt gewählt, der den kleinsten euklidischen Abstand zu ihm aufweist. Basierend auf den dadurch entstandenen N_D Punktpaaren wird durch Anwenden einer Optimierungsfunktion (dazu später noch) eine „optimale“ Transformation $\hat{\mathbf{T}}$ bestimmt und diese auf die Datenpunkte \mathbf{d}_i angewandt. Die transformierten Datenpunkte sind nun – falls erforderlich – Ausgangspunkt für weitere Iterationen. Der Nachteil dieses iterativen Algorithmus besteht jedoch darin, dass dieser nicht unbedingt zum gewünschten Ergebnis konvergiert, insbesondere im Falle schlechter Startwerte. Deshalb wird i.A. eine Näherungstransformation $\mathbf{T}^{(0)}$ benötigt. In Abhängigkeit eines geeigneten Abbruchkriteriums (dazu ebenfalls später) wird nach N_I Iterationsschritten ($N_I \geq 1$) abgebrochen. Es ergibt sich also folgende Transformationskette:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}^{(N_I)} = \hat{\mathbf{T}}^{(N_I)} \cdot \hat{\mathbf{T}}^{(N_I-1)} \cdot \dots \cdot \hat{\mathbf{T}}^{(1)} \cdot \mathbf{T}^{(0)} = \prod_{r=0}^{N_I-1} (\hat{\mathbf{T}}^{(N_I-r)}) \cdot \mathbf{T}^{(0)} \quad (4.1)$$

$\hat{\mathbf{T}}^{(k)}$ ist die im k -ten Iterationsschritt berechnete Korrekturtransformation (nur für $k \geq 1$ definiert), $\mathbf{T}^{(k)}$ die sich nach k Iterationensschritten ergebende Gesamttransformation (gilt auch für $k = 0$).

²lat.: rigidus = starr, steif, fest

Sei $\mathbf{d}_i^{(k)}$ ein nach $k \geq 0$ Iterationensschritten transformierter Datenpunkt:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{d}_i^{(k)} \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}^{(k)} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{d}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\widehat{\mathbf{T}}^{(k)} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{d}_i^{(k-1)} \\ 1 \end{pmatrix}}_{\text{gilt nur für } k \geq 1} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{R}}^{(k)} \mathbf{d}_i^{(k-1)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k)} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Dann beträgt der euklidische Abstand a_i zu seinem korrespondierenden Modellpunkt *vor* dem $(k + 1)$ -ten Iterationsschritt:

$$a_i(\mathbf{d}_i^{(k)}, \mathbf{m}_{j_i}) = \min_{1 \leq j \leq N_M} \left\| \mathbf{d}_i^{(k)} - \mathbf{m}_j \right\| \quad (4.3)$$

Die Zuordnung der Modellpunkte zu den Datenpunkten ist i.A. eine *surjektive* Abbildung der Indices i auf die Indices j ($i \mapsto j$). Folglich kann ein und derselbe Modellpunkt der korrespondierende Punkt für mehrere Datenpunkte sein.

Nach der Ermittlung der Korrespondenzen ergeben sich daher N_D Punktpaare $(\mathbf{d}_i^{(k)}, \mathbf{m}_i)$, wobei der Einfachheit halber i ab jetzt für den Index des Punktpaares steht ($1 \leq i \leq N_D$), d.h. die Modellpunkte seien dementsprechend umsortiert worden ($\mathbf{m}_i := \mathbf{m}_{j_i}$).

Um aus den ermittelten Punktpaaren die 6 Parameter der Korrekturtransformation $\widehat{\mathbf{T}}^{(k+1)}$ zu bestimmen, wurden zwei Optimierungsmethoden vorgeschlagen:

- Punkt-zu-Punkt-Methode (nach [BESL und MCKAY 1992])
- Punkt-zu-Ebene-Methode (nach [CHEN und MEDIONI 1992]³)

In beiden Fällen werden *Abstandsmaße* nach der Methode der kleinsten Quadrate minimiert.

Bei der Punkt-zu-Punkt-Methode wird als Abstandsmaß direkt der euklidische Abstand zwischen zwei korrespondierenden Punkten (Länge des Differenzvektors) verwendet. Folgende Fehlerfunktion $E_{P \rightarrow P}$ ist bezüglich $\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)}$ und $\widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}$ zu minimieren (vgl. Formeln 4.2 bzw. 4.3):

$$E_{P \rightarrow P} = \sum_{i=1}^{N_D} \left\| \mathbf{d}_i^{(k+1)} - \mathbf{m}_i \right\|^2 = \sum_{i=1}^{N_D} \left\| \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{d}_i^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} - \mathbf{m}_i \right\|^2 \quad (4.4)$$

Dieser Ansatz entspricht jenem für die Bestimmung der Parameter der zuvor erwähnten 3D-Helmert-Transformation. Eine geschlossene Lösung dafür haben [SANSÒ 1973] bzw. [HORN 1987] angegeben (der Maßstabsfaktor ist in diesem Fall gleich 1 zu setzen).

Bei der Punkt-zu-Ebene-Methode wird als Abstandsmaß der euklidische Abstand eines Datenpunktes zur an seinem korrespondierenden Modellpunkt abgeschätzten Tangentialebene

³In dieser Publikation wird allerdings vorgeschlagen, nicht den *nächstgelegenen* Modellpunkt, sondern den *Schnittpunkt* der am *Datenpunkt* abgeschätzten Flächennormalen mit der *Modellfläche* als korrespondierenden Punkt zu verwenden. Dieses Verfahren wird auch als *normal shooting* bezeichnet.

(Länge der Projektion des Differenzvektors in Richtung des Normalvektors $\mathbf{n}_{\mathbf{m}_i}$) verwendet. Folgende Fehlerfunktion $E_{P \rightarrow E}$ ist bezüglich $\hat{\mathbf{R}}^{(k+1)}$ und $\hat{\mathbf{t}}^{(k+1)}$ zu minimieren:

$$E_{P \rightarrow E} = \sum_{i=1}^{N_D} \left[\left(\mathbf{d}_i^{(k+1)} - \mathbf{m}_i \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{m}_i} \right]^2 = \sum_{i=1}^{N_D} \left[\left(\hat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{d}_i^{(k)} + \hat{\mathbf{t}}^{(k+1)} - \mathbf{m}_i \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{m}_i} \right]^2 \quad (4.5)$$

Bei dieser Methode müssen ganz zu Beginn Normalvektoren an den Modellpunkten auf eine geeignete Art und Weise abgeschätzt werden. Im Gegensatz zur ersten Methode gibt es in diesem Fall keine geschlossene Lösung ([RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001]). Das Problem kann mittels nichtlinearer Optimierungsverfahren (z.B. Levenberg-Marquardt-Methode) oder – einfacher – durch Linearisieren des Problems (bei Annahme kleiner Drehwinkel) gelöst werden (siehe Anhang C.2).

Bei beiden Varianten wird die ermittelte Transformation $\hat{\mathbf{T}}^{(k+1)}$ am Ende des $(k+1)$ -ten Iterationsschrittes auf die Datenpunkte angewandt.

Die Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat $\bar{a} = \sqrt{\frac{E}{N_D}}$ ist ein Maß für die Qualität der aktuellen Gesamttransformation. E ist dabei je nach verwendeter Methode die Fehlerfunktion aus Formel 4.4 bzw. 4.5. Als Abbruchkriterium kann beispielsweise die relative Änderung von \bar{a} gegenüber dem vorhergehenden Iterationsschritt mit einem vorgegebenen Schwellwert verglichen werden.

In Tabelle 4.1 sind die Schritte des ICP-Algorithmus nochmals zusammengefasst (die im Falle der zweiten Methode notwendige Bestimmung der Normalvektoren an den Modellpunkten sei bereits als Vorverarbeitungsschritt erfolgt).

1) Initialisiere den Algorithmus; setze $k := 1$
2) Suche für jeden Datenpunkt $\mathbf{d}_i^{(k-1)}$ seinen nächstgelegenen Modellpunkt \mathbf{m}_i
3) Bestimme die Transformation $\hat{\mathbf{T}}^{(k)}$ durch Minimieren einer Fehlerfunktion E
4) Wende diese Transformation auf die Datenpunkte an: $\Rightarrow \mathbf{d}_i^{(k)}$
5) Überprüfe ein Abbruchkriterium: Ist $(k+1)$ -ter Iterationsschritt erforderlich? Falls ja: Setze $k := k + 1$ und gehe zu Schritt 2)

Tabelle 4.1: Schritte des ICP-Algorithmus in seiner ursprünglichen Form

Die Punkt-zu-Ebene-Methode weist im Vergleich zur Punkt-zu-Punkt-Methode folgende Vor- bzw. Nachteile auf ([PULLI 1999], [MITRA et al. 2004]):

- + : deutlich schnellere Konvergenz (d.h. deutlich weniger Iterationsschritte erforderlich)
- + : kaum anfällig für Aliasing-Artefakte aufgrund der Punktanordnung am Objekt
- + : robuster gegenüber falschen Punktkorrespondenzen
- + : liefert genauere Ergebnisse; Punkt-zu-Ebene-Korrespondenzen entsprechen *eher* der Realität
- : Normalvektoren müssen zuvor abgeschätzt werden (Rechenaufwand, Methode?)

–: anfälliger, bei schlechten Näherungswerten zu einem falschen Ergebnis zu konvergieren

Der ICP-Algorithmus in seiner ursprünglichen Form ist allerdings nicht für die Orientierung mehrerer Scans geeignet – unabhängig davon, welche der beiden Fehlerfunktionen minimiert wird. Er geht von 2 Punktwolken aus, wobei eine davon einen Teil jenes Bereiches der Objektoberfläche repräsentiert, der auch durch die andere repräsentiert wird.

In der Praxis hat man es jedoch mit *einander überlappenden* Punktwolken zu tun; selbst bei Beschränkung auf nur 2 Punktwolken liefert der Algorithmus in diesem Fall unbrauchbare Ergebnisse, da fälschlicherweise auch zu Punkten außerhalb des Überlappungsbereiches korrespondierende Punkte ermittelt werden. Im Falle der Punkt-zu-Punkt-Methode transformieren die berechneten Transformationsparameter den Schwerpunkt der Datenpunktmenge nämlich exakt auf den Schwerpunkt der Modellpunktmenge ([HORN 1987]) – was bei überlappenden Punktwolken nicht der Realität entspricht. Die Verwendung *aller* Punktpaare ist allerdings auch für den ursprünglich konzipierten Anwendungsfall problematisch, und zwar dann, wenn Ausreißer im Datenmaterial vorhanden sind; die Ergebnisse können dadurch merklich verfälscht werden, insbesondere weil die L2-Norm zur Optimierung verwendet wird.

Weiters ist zu beachten, dass es Punktkorrespondenzen de facto nicht gibt, da die Punkte jedes Scans mehr oder weniger willkürlich auf der Objektoberfläche angeordnet sind. Wie bereits erwähnt, ist die Zuordnung der nächstgelegenen Modellpunkte zu den Datenpunkten beim ICP-Algorithmus i.A. nicht bijektiv, was bei der Punkt-zu-Punkt-Methode (Abb. 4.1) im Grunde genommen bereits beim Ansatz widersprüchlich ist: es existiert keine rigide Transformation, die zwei koordinativ verschiedene Datenpunkte auf ein- und denselben Modellpunkt abbildet.

Die Punkt-zu-Ebene-Methode ist insofern flexibler, als die Lotfußpunkte mehrerer Datenpunkte bezüglich der Tangentialebene (selbst am gleichen Modellpunkt) i.A. verschieden sind, d.h. es besteht eine „Gleitmöglichkeit“ entlang der Tangentialebene ([PULLI 1999]).

Für die Punkt-zu-Ebene-Methode gibt es zwei Varianten für die Bestimmung der korrespondierenden Modellpunkte:

- Ermittlung des euklidisch nächsten Modellpunktes (d.h. es werden dieselben Punktkorrespondenzen wie bei der Punkt-zu-Punkt-Methode verwendet) (Abb. 4.2)
- Ermittlung des nächsten Punktes der Modellfläche in Richtung der im Datenpunkt abgeschätzten Flächennormalen ([CHEN und MEDIONI 1992]; (Abb. 4.3))

Bei letzterem Ansatz ist der korrespondierende Punkt kein Punkt der gegebenen Modellpunktmenge M , sondern ein in der Modellfläche *interpolierter* Punkt. An jedem Datenpunkt wird zunächst die Flächennormale abgeschätzt. Diese wird anschließend mit der Modellfläche geschnitten (*normal shooting*). Der resultierende Schnittpunkt kann recht einfach durch Interpolation gewonnen werden, falls die Punktwolke in einem parametrischen Gitter vorliegt ([BERGEVIN et al. 1996]), was jedoch i.A. nicht der Fall ist und hier nicht vorausgesetzt wird.

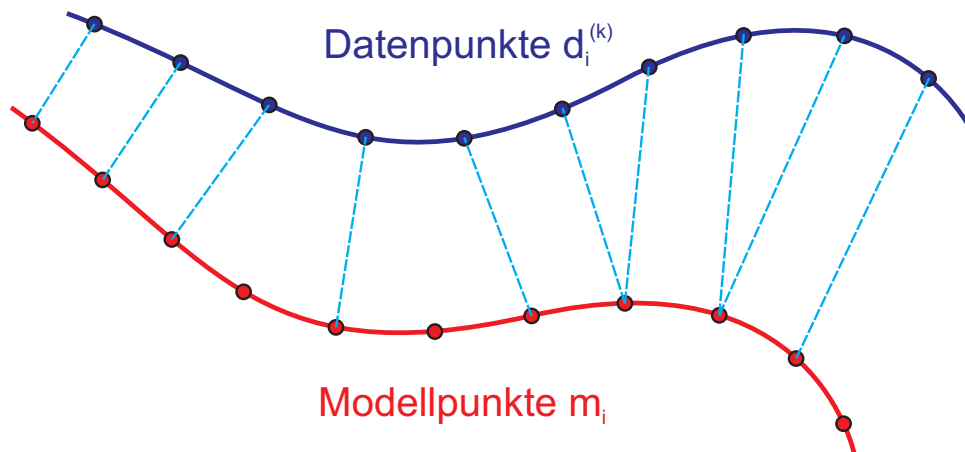


Abbildung 4.1: Punkt-zu-Punkt-Methode ([BESL und MCKAY 1992]). Abstandsmaß: euklidische Distanz zwischen Datenpunkt und seinem nächstgelegenen Modellpunkt.

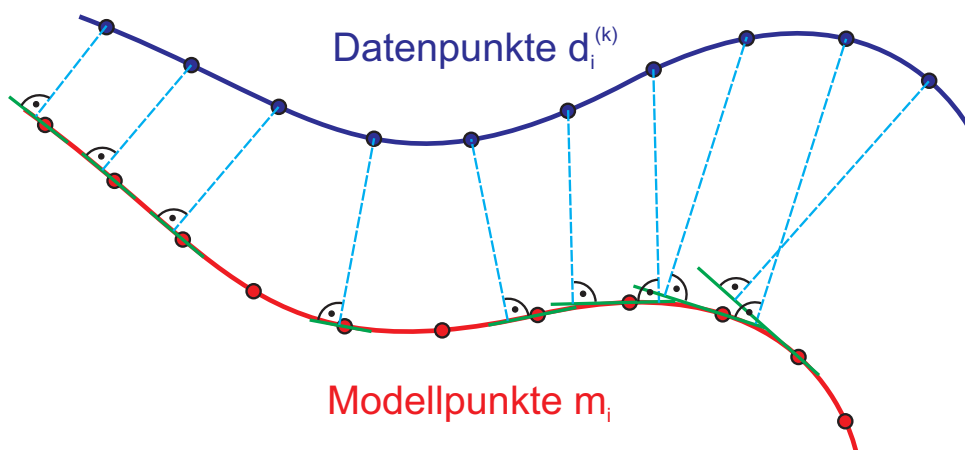


Abbildung 4.2: Punkt-zu-Ebene-Methode (basierend auf denselben Korrespondenzen wie bei der Punkt-zu-Punkt-Methode). Abstandsmaß: euklidische Distanz zwischen Datenpunkt und Tangentialebene an seinem nächstgelegenen Modellpunkt.

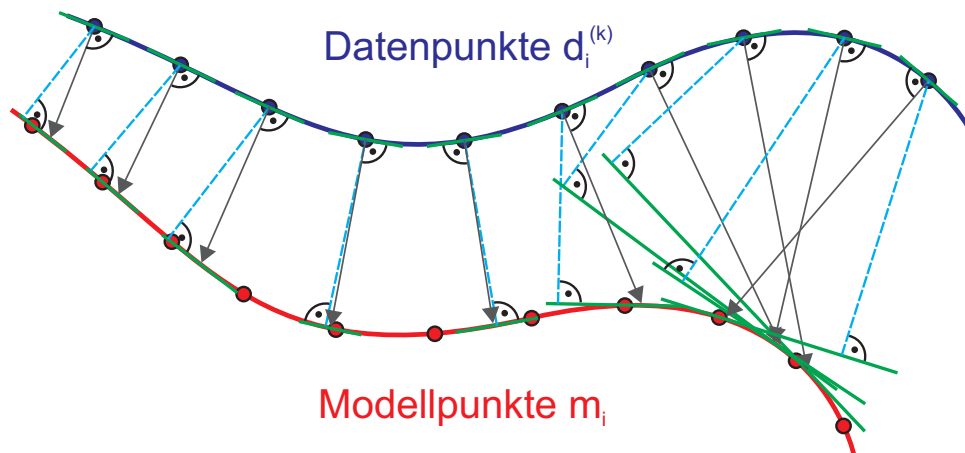


Abbildung 4.3: Punkt-zu-Ebene-Methode (basierend auf [CHEN und MEDIONI 1992]). Abstandsmaß: euklidische Distanz zwischen Datenpunkt und Tangentialebene an seinem korrespondierenden Punkt, der sich als Schnittpunkt der im Datenpunkt abgeschätzten Flächennormalen mit der Modellfläche ergibt (normal shooting).

Die *normal-shooting*-Methode konvergiert zwar prinzipiell sehr rasch ([RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001]), jedoch kann die Korrespondenz-Suche entlang der Flächennormalen im Falle schlechter Näherungswerte der Rotationsparameter problematisch sein und unter Umständen zu einem Lokal-Minimum anstatt zum Global-Minimum konvergieren (Abb. 4.4).

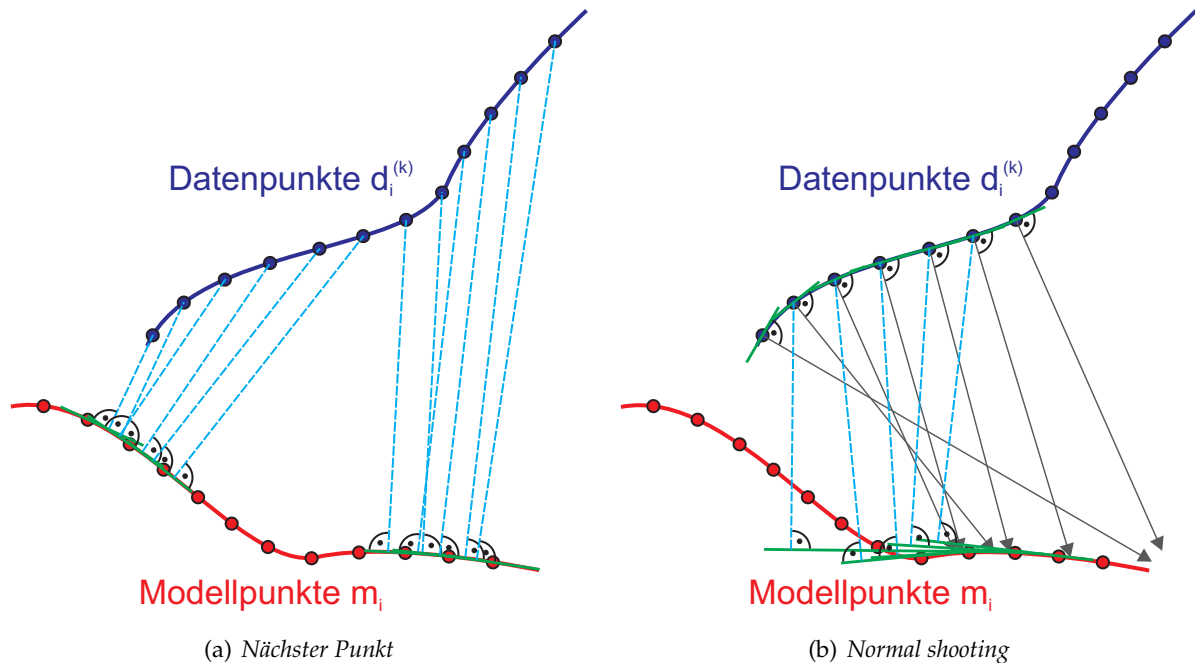


Abbildung 4.4: Die beiden Arten der Punkt-Korrespondenzsuche bei der Punkt-zu-Ebene-Methode im Falle schlechter Näherungswerte für die Rotation. In diesem Fall führt die Methode (a) zur richtigen Lösung; die Methode (b) hingegen droht, zu einem falschen lokalen Minimum zu konvergieren, da bei der Minimierung der Fehlerfunktion im ersten Iterationsschritt eine Transformation resultiert, die den linken Bereich der Datenfläche auf den rechten Bereich der Modellfläche transformiert. In den weiteren Iterationsschritten droht ein „Einrasten“ an der falschen Stelle.

Um die Unzulänglichkeiten des ursprünglichen ICP-Algorithmus überwinden zu können, wurden zahlreiche Varianten entwickelt und publiziert. Zunächst wird auf diejenigen davon eingegangen, die sich auf zwei Punktwolken beschränken (paarweises Scan-Matching). In [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001] erfolgt eine Klassifizierung solcher Varianten nach den folgenden 6 Gesichtspunkten:

1. Punktauswahl
2. Bestimmung der Korrespondenzen
3. Gewichtung der korrespondierenden Punktpaare
4. Kriterien zur Akzeptanz bzw. Verwerfung von Punktpaaren
5. Verwendete Fehlermetrik
6. Minimierung der Fehlermetrik

Ad 1): Während beim ursprünglichen ICP-Algorithmus für *alle* Datenpunkte Korrespondenzen ermittelt werden, erfolgt bei den meisten Varianten bereits vor dem eigentlichen Algorithmus eine Ausdünnung bzw. Vorselektion der Daten- und/oder Modellpunkte mittels einer geeigneten Methode (z.B. zufällige Ausdünnung, voxel-basierte Ausdünnung, normalen-basierte Ausdünnung; mehr dazu in Abschnitt 4.2.2). Auch eine je nach Iterationsschritt variierende Punktauswahl ist denkbar.

Ad 2): Die klassische Methode zur Korrespondenzbestimmung ist die Ermittlung des zu einem gegebenen Datenpunkt nächstgelegenen Modellpunktes (woher der ICP-Algorithmus auch ursprünglich seinen Namen hat). Daneben gibt es die bereits erwähnte Methode des *normal shooting* ([CHEN und MEDIONI 1992]) sowie die als *reverse calibration* bezeichnete Methode, bei welcher der Datenpunkt – ausgehend vom Aufnahmezentrum des Sensors – auf die Modellfläche projiziert wird ([BLAIS und LEVINE 1995]).

Ad 3): Im einfachsten Fall werden alle Punktpaare gleich gewichtet. Eine unterschiedliche Gewichtung kann beispielsweise in Abhängigkeit von der Punkt-zu-Punkt-Distanz (je größer, umso geringeres Gewicht) oder vom Skalarprodukt der an beiden Punkten abgeschätzten Normalvektoren erfolgen.

Ad 4): Bei der ursprünglichen Form des ICP-Algorithmus werden keine Punktpaare verworfen. Ein oft verwendetes Kriterium für die Verwerfung von Punktpaaren ist deren Distanz. Dabei kann ein fester Schwellwert für die maximal zulässige Distanz vorgegeben sein und/oder ein fester Prozentsatz der Paare (z.B. jene $p\%$ mit den größten Distanzen) verworfen werden. Auch ein von der Standardabweichung der Distanzen abhängiger Schwellwert ist denkbar. Weiters kommen auch Kompatibilitätskriterien wie maximal zulässiger Winkel zwischen Normalvektoren (vgl. 3) oder Konsistenzkriterien benachbarter Paare zum Einsatz.

Ad 5): Bei fast allen ICP-Varianten wird eine der beiden erwähnten Fehlerfunktionen 4.4 (Punkt-zu-Punkt-Methode) bzw. 4.5 (Punkt-zu-Ebene-Methode) verwendet. [MITRA et al. 2004] haben eine Methode angegeben, bei der die Modellfläche jeweils durch eine lokal abgeschätzte Fläche zweiter Ordnung approximiert wird. Das Abstandsmaß ist in diesem Fall die Distanz des Datenpunkts zu seiner korrespondierenden Quadrik. Die beiden zuvor erwähnten Methoden sind somit Spezialfälle der letzteren.

Ad 6): Die Minimierung der Fehlerfunktion erfolgt im Normalfall iterativ, d.h. in jedem Iterationsschritt erfolgt die Ermittlung von Korrespondenzen und anschließender Anwendung der daraus berechneten Transformation auf die Punktwolke. Zur Beschleunigung der Konvergenz haben [BESL und MCKAY 1992] zusätzlich die Durchführung eines Extrapolationsalgorithmus im Transformationsparameterraum vorgeschlagen. In anderen Varianten geht man von mehreren verschiedenen Näherungswerten aus, wendet den ICP-Algorithmus jeweils an und wählt schließlich die beste Lösung aus; damit kann die Gefahr der Konvergenz zu einem nicht-globalen Minimum der Fehlerfunktion reduziert werden, allerdings kann diese Vorgehensweise sehr zeitaufwändig sein.

3D-Matching von mehr als zwei Punktwolken

Bis jetzt wurde nur von zwei Punktwolken ausgegangen, wobei eine davon als Referenz („Modell“) für die andere („Daten“) diente. In der Praxis hat man es jedoch oftmals mit mehr als zwei Punktwolken zu tun, die zudem alle aus Messungen (Laserscans) entstanden sind (d.h. es gibt keine fehlerfreie Referenz).

Eine naheliegende Möglichkeit wäre es, von einer Punktwolke ausgehend die anderen Punktwolken sukzessive mittels paarweisem Scan-Matching zu orientieren:

1. Wähle eine Ausgangspunktswolke aus und nimm diese in die Liste der orientierten Punktwolken (L_O) auf
2. Nimm die übrigen Punktwolken in die Liste der nicht orientierten Punktwolken (L_N) auf
3. Ermittle jenes Punktwolkenpaar ($O \in L_O/N \in L_N$), das die größte Überlappung aufweist
4. Orientiere N relativ zu O mittels paarweisem Scan-Matching
5. Verschiebe N aus der Liste L_N in die Liste L_O
6. Falls $N \neq \emptyset$, gehe zu 3.

Das Problem dabei ist allerdings, dass sich Fehler in der Orientierung von Paar zu Paar akkumulieren, was sich besonders im Falle schleifenförmiger Aufnahmeanordnungen durch beträchtliche Klaffungen bemerkbar machen kann (Abb. 4.5).

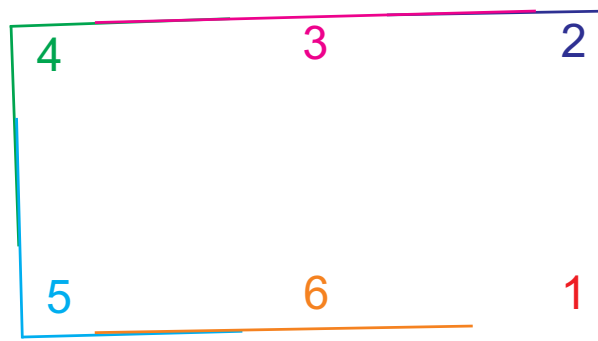


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung einer schleifenförmigen Aufnahmeanordnung. Ausgehend von Scan 1, werden die nachfolgenden Scans jeweils relativ zum vorhergehenden orientiert. Dabei akkumulieren sich die Fehler der Relativorientierungen, was am Ende der Schleife zu beträchtlichen Klaffungen (hier zwischen Scan 6 und Scan 1) führen kann. Hier wäre eine simultane Orientierungsmethode zu bevorzugen, welche den Schleifenschlussfehler auf alle Scans aufteilt.

Außerdem hängt das Ergebnis von der Orientierungsreihenfolge ab, die wiederum von der Wahl der Ausgangspunktswolke abhängig ist. Man könnte zwar fordern, von jener Punktwolke mit der größten Überlappung zu *allen anderen* Punktwolken auszugehen. Dies löst allerdings nicht das zuvor erwähnte Problem der Fehlerakkumulation.

[CHEN und MEDIONI 1992] haben vorgeschlagen, dass alle bereits orientierten Punktwolken zu einer großen Meta-Punktwolke zusammengefasst werden, welche für die noch zu orientierenden Punktwolken als Referenz dient. Für den in Abbildung 4.5 dargestellten Fall würde dies allerdings nichts ändern, da sich nur jeweils 2 Punktwolken überlappen. Für Situationen mit Mehrfachüberlappungen würde diese Variante hingegen eine gewisse Verbesserung bezüglich Fehlerakkumulation bringen, jedoch hängt das Ergebnis nach wie vor von der Orientierungsreihenfolge ab, vor allem weil bereits orientierte Punktwolken trotz eventuell nachträglicher Information von „neuen“ Punktwolken nicht mehr angetastet werden ([BERGEVIN et al. 1996]).

In [EGGERT et al. 1996] wird ein physikalisches Federkraft-Modell zur simultanen Lösung des Problems verwendet. Es handelt sich dabei um eine Punkt-zu-Punkt-Methode.

[NEUGEBAUER 1997] verallgemeinert die Punkt-zu-Ebene-Methode auf N Punktwolken und bestimmt durch Minimieren der Gesamtsumme aller zwischen überlappenden Punktwolken-Paaren auftretenden Abstandsquadratsummen alle unbekanntenen Transformationsparameter simultan. Die Lösung des nicht-linearen Optimierungsproblems erfolgt dabei mit Hilfe der Levenberg-Marquardt-Methode.

[PULLI 1999] schlägt eine Variante für große Datenmengen vor, bei der zunächst alle sich überlappenden Punktwolken-Paare jeweils relativ zueinander orientiert werden (die verwendete Methode ist dabei egal). Aus diesen Relativorientierungen werden anschließend *constraints* formuliert, die dafür sorgen, dass sich die ermittelten Relativorientierungen bei der endgültigen Orientierung möglichst wenig ändern. Schließlich werden die Orientierungsparameter mittels der Punkt-zu-Punkt-Fehlermetrik unter Berücksichtigung der *constraints* mit Hilfe eines Algorithmus, der inkrementell arbeitet und auf dem Konzept von Meta-Punktwolken basiert, bestimmt.

[GÜHRING 2002] bestimmt die Orientierungsparameter simultan, wobei – basierend auf Näherungswerten – künstliche Verknüpfungspunkte erzeugt werden, deren Positionen durch gewichtete Mittelwertbildung zwischen Oberflächenpunkten iterativ verbessert werden.

[POTTMANN et al. 2002] haben zur simultanen Orientierung eine Methode entwickelt, die auf kinematischer Analyse erster Ordnung basiert und mit lokalen quadratischen Approximationen der quadrierten Distanzfunktion arbeitet.

In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die im Prinzip den gleichen Ansatz wie in [NEUGEBAUER 1997] aufweist, bei der jedoch die Lösung durch Linearisieren des Problems erfolgt. Im Rahmen einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen werden dabei auch zusätzliche Beobachtungen wie Positionsmessungen mittels Satelliten und Neigungssensormessungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.2.3).

Zunächst folgt jedoch ein Abschnitt über Datenvorverarbeitungsschritte, die für jede Punktwolke (Scan) unabhängig voneinander erfolgen und entscheidend für die praktikable Durchführbarkeit der Orientierungsmethode und die Qualität des Resultats sind.

4.2.2 Datenvorverarbeitung

Wir gehen im folgenden davon aus, dass jede Scanner-Aufnahme im lokalen Sensorkoordinatensystem vorliegt und die Scannerposition somit jeweils im Ursprung liegt (vgl. Abb. 3.11). Die Punktwolke sei in Form einer Liste von xyz-Koordinaten gegeben, d.h. sie braucht *nicht* als Entfernungsbild (Matrix von Bildelementen mit Distanzwerten) vorliegen. In dieser Liste können die Punkte in beliebiger Reihenfolge auftreten, d.h. wir setzen keinerlei Informationen über deren Topologie voraus.

Um dennoch für einen gegebenen Punkt raschen Zugriff auf dessen benachbarte Punkte gewährleisten zu können, ist der Aufbau einer speziellen Datenstruktur erforderlich. Für die hier benötigten räumlichen Abfragen hat sich der *kd*-Baum als nützlich erwiesen.

Aufbau eines *kd*-Baumes

Ein *kd*-Baum ([BENTLEY 1975]) ist eine Datenstruktur zur Speicherung von Punkten des *k*-dimensionalen Raumes. Es handelt sich dabei um einen *binären* Baum, d.h. jeder Knoten des Baumes hat entweder 2 oder keinen Kinderknoten. In letzterem Fall handelt es sich um einen speziellen Knoten, nämlich ein Blatt. Jeder Knoten, der kein Blatt ist, enthält eine Koordinatenrichtungsangabe (für *k*=3 also 1,2 oder 3), einen Koordinatenwert sowie Verweise auf seine beiden Kinderknoten. Ein Blatt (*bucket*) enthält mehrere Punkte (oder besser Verweise auf diese); die maximal zulässige Anzahl von Punkten innerhalb eines Blattes wird durch die sogenannte *bucket size* B_{max} vorgegeben.

Der Bezug des Baumes zum euklidischen Raum (*k*=3) wird im folgenden erläutert:

Jeder Knoten (auch ein Blatt) repräsentiert einen quaderförmigen Bereich des Raumes (*bounds*)⁴. Für jeden Nicht-Blatt-Knoten existiert eine Trennebene, die den durch ihn repräsentierten räumlichen Bereich in zwei Sub-Bereiche unterteilt. Die Koordinatenrichtungsangabe eines solchen Knotens legt die Koordinatenrichtung des Normalvektors dieser Trennebene (im folgenden als „Trennrichtung“ bezeichnet) fest. Der Koordinatenwert („Trennwert“) eines solchen Knotens bestimmt die Position dieser Trennebene. Die Trennebene selbst „gehört“ – je nach Definition – zu einem der beiden Sub-Bereiche, die somit gemeinsam eine Partitionierung ihres Eltern-Bereiches bilden. Der oberste Knoten (Wurzel) entspricht dem gesamten Raum \mathbf{R}^3 .

Der Aufbau eines *kd*-Baumes erfolgt – ausgehend von der Wurzel – rekursiv:

Für jeden Knoten wird zunächst überprüft, ob mehr als B_{max} Punkte in seinen entsprechenden räumlichen Bereich fallen.

Falls dies der Fall ist, wird als Trennrichtung jene Koordinatenrichtung ausgewählt, in welcher diese Punkte die größte Varianz aufweisen. Als Trennwert wird der Median⁵ der der Trennrich-

⁴Von engl.: boundaries=Grenzen. Es handelt sich dabei um einen Bereich des Raumes \mathbf{R}^3 , der durch drei Intervalle I_x, I_y, I_z aufgespannt wird.

⁵Im Falle einer geraden Punktzahl wird einfachheitshalber einer der beiden mittleren Werte als Median verwendet (anstatt deren arithmetisches Mittel).

tung entsprechenden Koordinatenwerte der Punkte festgelegt. Die beiden dadurch definierten Kinderknoten werden anschließend auf dieselbe Weise untersucht.

Falls dies nicht der Fall ist, wird der Knoten zum Blatt erklärt und die in den entsprechenden räumlichen Bereich fallenden Punkte in eine unsortierte Liste aufgenommen.

Der Aufbau des Baumes ist abgeschlossen, sobald alle Knoten untersucht worden sind, d.h. die durch alle Blätter repräsentierten Bereiche gemeinsam eine Partitionierung des gesamten \mathbb{R}^3 bilden und somit jeder Punkt genau einem Blatt zugeordnet ist.

Die Abbildung 4.6 zeigt ein Beispiel für einen kd -Baum für den 2D-Fall (mit $n=20$ Punkten).

Verwenden des kd -Baumes zur Ermittlung der m nächsten Nachbarn

Mit Hilfe des kd -Baumes können die m nächsten Nachbarn für einen gegebenen Punkt W (Abb. 4.6) wie folgt bestimmt werden:

Während der gesamten Suche wird eine Liste U geführt, welche die Punkt-IDs der m euklidisch nächsten Punkte – aufsteigend sortiert nach deren Distanz – enthält. Zu Beginn werden die m Einträge jeweils mit einer ungültigen Punkt-ID sowie der Distanz ∞ initialisiert.

Von der Wurzel des Baumes ausgehend, wird zunächst zu jenem Blatt „herabgewandert“, in welches der Punkt W aufgrund seiner Koordinaten fällt. Anschließend werden die Distanzen zu den entsprechenden Punkten berechnet und von diesen die euklidisch nächsten m in die Liste U einsortiert (sofern das Blatt genügend Punkte aufweist). Danach wird um den Punkt W eine Kugel mit der Distanz des aktuellen m -ten Punktes der Liste U definiert und überprüft, ob sich diese Kugel vollständig innerhalb des durch das Blatt repräsentierten räumlichen Bereiches befindet (*Ball-Within-Bounds-* oder kurz BWB-Test). Falls dies der Fall ist, kann die Suche beendet werden.

Andernfalls wird überprüft, ob ein Überlappungsbereich der Kugel mit dem Bereich des unmittelbar benachbarten Knoten (Schwester-Knoten) existiert (*Bounds-Overlap-Ball-* oder kurz BOB-Test).

Falls dies zutrifft, wird – ausgehend von diesem Knoten als Wurzel eines Unterbaumes – bis zum aussichtsreichsten⁶ Blatt „herabgewandert“ und dieses in analoger Weise untersucht, d.h. die Liste U wird aktualisiert und anschließend wieder der BOB-Test durchgeführt.

Falls dies nicht zutrifft, wird bis zu jenem Knoten nach oben gewandert, dessen Schwesterknoten noch nicht untersucht wurde, und der BOB-Test dort wiederholt.

Die Durchführung des BOB-Tests erfolgt rekursiv.

Die Suche ist beendet, sobald man bei der Wurzel des Gesamtbaumes angekommen ist. Die Liste U enthält das gesuchte Ergebnis.

Für das in Abbildung 4.6 dargestellte 2D-Beispiel wird die Suche der $m = 2$ nächsten Punkte zu einem gegebenen Punkt $W = (7; 21)$ folgendermaßen durchgeführt:

⁶Jenes Blatt des Unterbaumes, das den dem Punkt W euklidisch nächsten räumlichen Bereich repräsentiert.

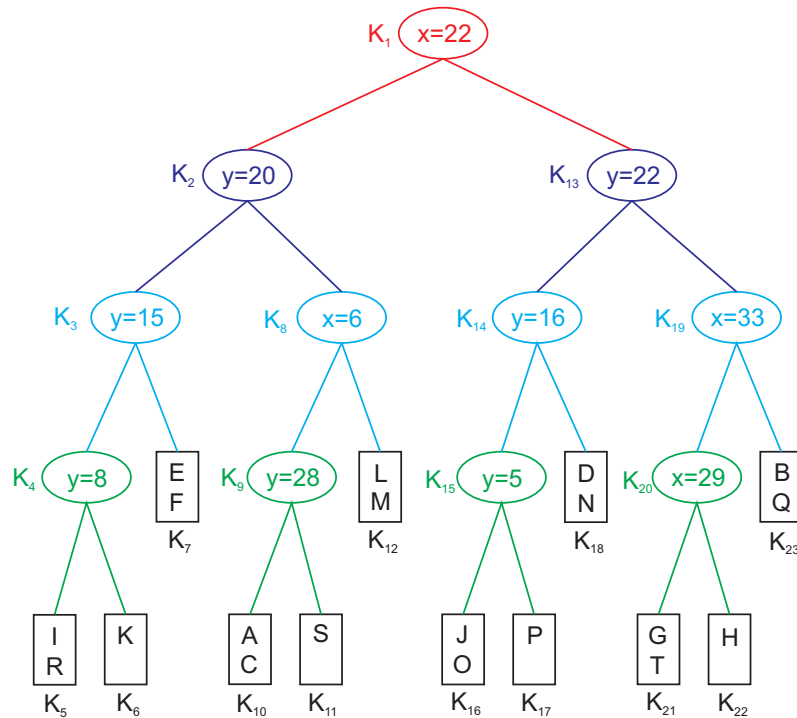
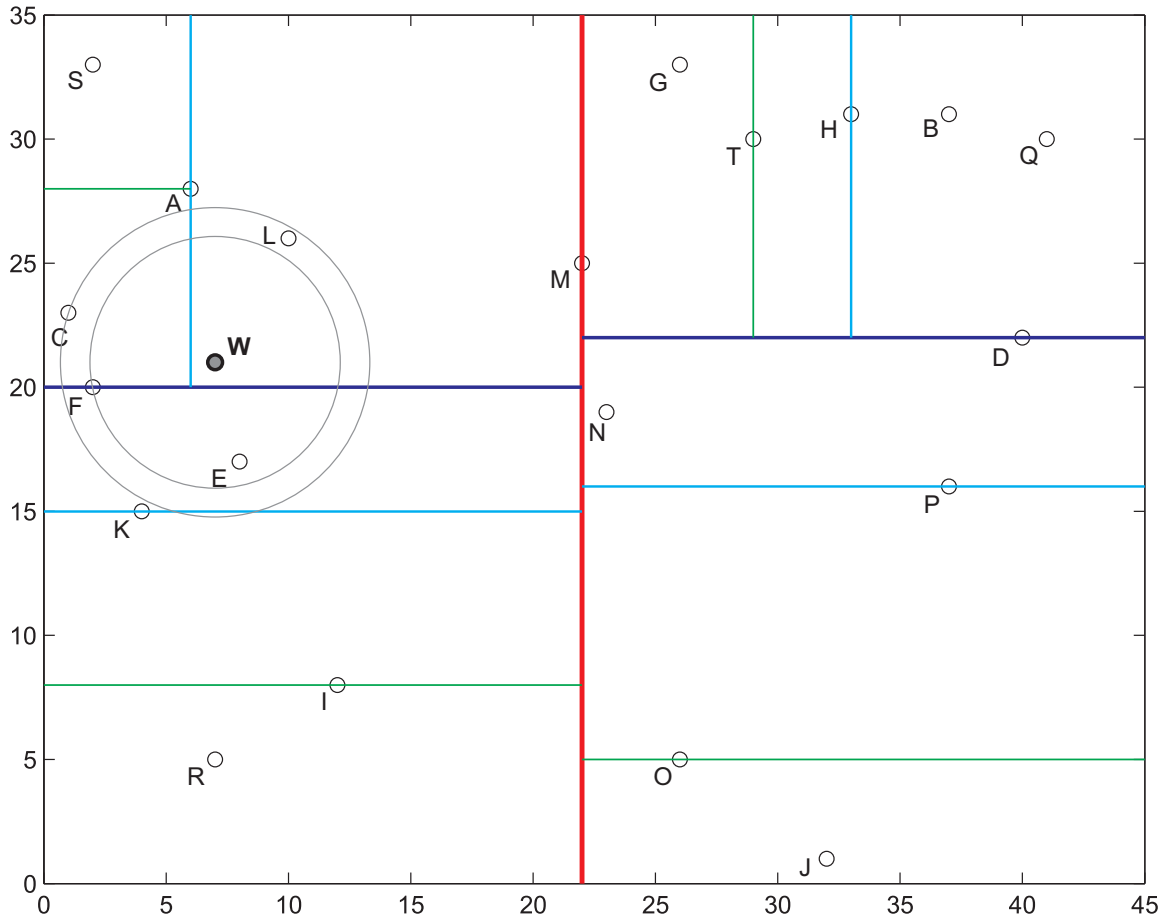


Abbildung 4.6: Erstellter kd-Baum (siehe unten) für einen aus $n = 20$ Punkten $A, B, C, \dots, T \in \mathbf{R}^2$ bestehenden Datensatz (siehe oben). Als bucket size wurde hier $B_{max} = 2$ gewählt. Zum einfacheren Referenzieren sind die Knoten des Baumes von K_1 bis K_{23} durchnummeriert. Der Punkt W und die beiden konzentrischen Kreise (oben) beziehen sich auf ein Beispiel für die Suche der m nächsten Nachbarn (Beschreibung siehe Text).

- Navigiere im Baum zu dem den Punkt W enthaltenden Blatt (K_{12}).
- Berechne die Distanzen zu den Punkten und ordne diese in die Liste ein: $U = \{L, M\}$
- Führe BWB-Test mit Radius \overline{WM} für Blatt K_{12} durch: negativ
- Führe BOB-Test mit Radius \overline{WM} für Nachbarknoten K_9 durch: positiv
- Navigiere zum aussichtsreichsten Blatt des benachbarten Unterbaumes (K_{10}).
- Berechne die Distanzen zu den Punkten und aktualisiere die Liste: $U = \{L, C\}$
- Führe BOB-Test mit Radius \overline{WC} (Abb. 4.6) für Nachbarblatt K_{11} durch : negativ
- Wandere hinauf zu Knoten K_8 .
- Führe BOB-Test mit Radius \overline{WC} für Nachbarknoten K_3 durch: positiv
- Navigiere zum aussichtsreichsten Blatt des benachbarten Unterbaumes (K_7).
- Berechne die Distanzen zu den Punkten und aktualisiere die Liste: $U = \{E, F\}$
- Führe BOB-Test mit Radius \overline{WF} (Abb. 4.6) für Nachbarknoten K_4 durch: negativ
- Wandere hinauf zu Knoten K_2 .
- Führe BOB-Test mit Radius \overline{WF} (Abb. 4.6) für Nachbarknoten K_{13} durch: negativ
- Wandere hinauf zu Knoten K_1 (=Wurzel) \Rightarrow Ende; Ergebnis: $U = \{E, F\}$

Der Aufbau eines kd -Baumes erfolgt mit der Zeitkomplexität $O(n \cdot \log n)$, die Ermittlung des nächsten Punktes mit $O(\log n)$ ([BENTLEY 1975]). Bei der Suche der m nächsten Punkte wächst der Zeitaufwand – bei konstantem n – in etwa linear mit m an ([FRIEDMAN et al. 1977]); es ergibt sich demnach insgesamt etwa ein Aufwand der Ordnung $O(m + \log n)$. In der Praxis lässt sich der Zeitaufwand jedoch erheblich reduzieren, indem man a-priori eine sinnvolle (endliche) obere Schranke für die Distanz zum m -ten Punkt vorgibt.

Die Verwendung des kd -Baumes zur Beantwortung räumlicher Abfragen macht sich selbstverständlich erst für wesentlich größere Datenmengen (z.B. Laserscans) bezahlt, da in diesem Fall eine globale lineare Suche mit $O(n)$ einen deutlich höheren Zeitaufwand erfordern würde. Im Falle des kd -Baumes erfolgt eine lineare Suche jeweils nur lokal für gewisse kleine Bereiche, welche den besuchten Blätter entsprechen.

Lokales Abschätzen von Normalvektoren

Wie bereits erwähnt wurde, benötigt man bei der Punkt-zu-Ebene-Variante des ICP-Algorithmus Normalvektoren für die korrespondierenden Punkte. Diese können vorab abgeschätzt werden, indem man für jeden Punkt die Oberfläche in dessen Umgebung durch eine Fläche niedriger

Ordnung (Ebene, Quadrik) approximiert, den Punkt auf diese Fläche projiziert, und die Flächennormale an dieser Position als Abschätzung verwendet. Im Falle einer Approximation durch eine Ebene – nur dieser Fall wird im folgenden behandelt – ist eine solche Projektion nicht erforderlich: für die abgeschätzte Flächennormale kann direkt der Normalvektor der approximierenden Ebene verwendet werden.

In der Regel wird eine ausgleichende Ebene durch den Ausgangspunkt \mathbf{d}_0 und einige Datenpunkte \mathbf{d}_k in dessen Umgebung ($k > 0$) bestimmt. Als „benachbarte“ Punkte können dabei beispielsweise

- die m nächsten Punkte
- alle Punkte innerhalb einer vorgegebenen Distanz
- die m nächsten Punkte innerhalb einer vorgegebenen Distanz

herangezogen werden. Dies kann mit Hilfe des zuvor aufgebauten kd -Baumes effizient durchgeführt werden.

Bei der Bestimmung einer ausgleichenden Ebene wird die Quadratsumme der Punktabstände orthogonal zur Ebene minimiert:

$$\sum_{k=0}^m a_k^2 = \sum_{k=0}^m (\mathbf{n}^T \mathbf{d}_k + c)^2 \quad \text{mit } \|\mathbf{n}\| = 1 \quad (4.6)$$

Dabei ist \mathbf{n} der gesuchte Normalvektor der Ebene und c gemäß Hesse-Form deren (je nach Orientierung von \mathbf{n}) gerichteter Abstand vom Koordinatenurprung. m ist die Anzahl der zu \mathbf{d}_0 benachbarten Datenpunkte, d.h. insgesamt nehmen $(m + 1)$ Punkte an der Ausgleichung teil.

Die Minimierung von (4.6) führt auf ein 3-dimensionales Eigenwertproblem, wobei der Eigenvektor \mathbf{n}_1 zum kleinsten Eigenwert λ_1 dem gesuchten Normalvektor \mathbf{n} entspricht (siehe Anhang C.1).

Um einzelne Ausreißer aufzuspüren und zu eliminieren, kann die Ausgleichung mit unterschiedlicher Gewichtung der Punkte \mathbf{d}_k durchgeführt werden. Die Gewichte werden dabei in Abhängigkeit von den Residuen aus der vorhergehenden Ausgleichung gewählt (Robuste Schätzung; siehe [KRAUS 1996]). Abschließend erfolgt wieder eine gleichgewichtete Ausgleichung ohne die eliminierten Ausreißer.

Die Orientierung des ermittelten Normalvektors ist von der (willkürlichen) Reihenfolge der Datenpunkte \mathbf{d}_k abhängig. Da eine Orientierung in Richtung jenes Halbraumes wünschenswert ist, welcher den Scanner-Standpunkt $(0 \ 0 \ 0)^T$ enthält, ist gegebenenfalls ein Vorzeichenwechsel des Normalvektors \mathbf{n} erforderlich:

$$\mathbf{n} = \begin{cases} -\mathbf{n} & \text{falls } \mathbf{n}^T \mathbf{d}_0 > 0 \\ \mathbf{n} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.7)$$

Durch diese Maßnahme kann später beim 3D-Matching u.a. verhindert werden, dass zwischen Punkten auf verschiedenen Seiten eines dünnen Objekts (z.B. Verkehrsschild) fälschlicherweise Korrespondenzen gebildet werden.

Bei der Wahl des Distanz-Schwellwertes bzw. von m ist das Verhältnis der Punktdichte am Objekt zur Messgenauigkeit des Laserscanners (insbesondere zur Distanz-Messgenauigkeit) für eine repräsentative Objektentfernung zu berücksichtigen (vgl. Anhang C.1).

Planaritätsfilter

Die bei der Aufnahme von realen Straßenszenen erfassten Objekte weisen in der Regel einen beträchtlichen Anteil an nicht-glatten Oberflächen auf (d.h. im Verhältnis zur Punktdichte raue oder linienförmige Strukturen wie z.B. Vegetation bzw. Stromleitungen). Punkte an solchen Oberflächen sollten beim 3D-Matching nicht verwendet werden, da dort der Normalvektor nicht zuverlässig abgeschätzt werden kann; dies kann zu falschen Ergebnissen führen. Deshalb ist im Rahmen der Vorverarbeitung ein Filter notwendig, mit dem nur Punkte, die einen glatten „planaren“ Oberflächenbereich in ihrer Umgebung aufweisen, selektiert werden.

Wie aus Anhang C.1 ersichtlich ist, sind die drei Eigenwerte, die man im Zuge der Abschätzung des Normalvektors erhält, jeweils direkt proportional zur Varianz der Datenpunkte in Richtung der entsprechenden Eigenvektoren.

Folgende Spezialfälle können (theoretisch) beim Lösen des Eigenwertproblems auftreten (vgl. Anhang C.1):

1. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0$: alle Punkte \mathbf{d}_k sind identisch; das Dreibein $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$ ist zur Gänze unbestimmt
2. $\lambda_1 = \lambda_2 = 0; \lambda_3 > 0$: die Punkte \mathbf{d}_k sind kollinear in Richtung \mathbf{n}_3 angeordnet; \mathbf{n}_1 und \mathbf{n}_2 sind innerhalb der auf \mathbf{n}_3 orthogonal stehenden Ebene unbestimmt
3. $\lambda_1 = 0; 0 < \lambda_2 \leq \lambda_3$: die Punkte \mathbf{d}_k liegen koplanar; \mathbf{n}_1 ist der Normalvektor der gemeinsamen Ebene; \mathbf{n}_2 und \mathbf{n}_3 sind parallel zur Ebene und eindeutig bestimmt, falls $\lambda_2 \neq \lambda_3$.
4. $\lambda_1 = \lambda_2 > 0; \lambda_2 < \lambda_3$: es gibt *eine* ausgezeichnete Richtung \mathbf{n}_3 ; \mathbf{n}_1 und \mathbf{n}_2 stehen orthogonal darauf, sind aber wie in Fall 2 innerhalb dieser Normalebene unbestimmt
5. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 > 0$: keine ausgezeichnete Richtung vorhanden; das Dreibein $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$ ist zur Gänze unbestimmt

In der Praxis treten diese Fälle in der Regel zwar kaum *exakt* auf; jedoch bewirken insbesondere die genäherten Fälle 2, 4 und 5 eine sehr unsichere Bestimmbarkeit des Normalvektors (selbst bei möglicherweise niedrigem mittleren Fehler $s_0 = \sqrt{\frac{\lambda_1}{m-2}}$; vgl. Anhang C.1).

Eine notwendige Bedingung für eine gute Bestimmbarkeit des Normalvektors aus Datenpunkten \mathbf{d}_k ist deren „planare“ Anordnung: Voraussetzung dafür ist, dass λ_2 signifikant größer als

λ_1 ist. Allerdings müssen aufgrund der Charakteristik des Laserscanners noch weitere Bedingungen erfüllt werden, um zu gewährleisten, dass der ermittelte Normalvektor auch eine gute Schätzung der realen Flächennormale ist:

- s_0 sollte einen der Messgenauigkeit des Laserscanners entsprechenden Wert aufweisen
- das Verhältnis $\frac{\lambda_3}{\lambda_2}$ sollte nicht extrem groß sein (Idealfall: $\lambda_3 \approx \lambda_2$)

Das letzte Kriterium ist insbesondere bei inhomogenen Punktverteilungen, wie sie bei der Aufnahme des Straßenraumes auftreten, von Bedeutung:

In gewissen Situationen befinden sich die m nächsten Nachbarn eines Punktes innerhalb derselben Scan-Zeile; sie wären bei in Scan-Zeilen-Richtung ungekrümmten Objektflächen und im Falle fehlerfreier Messungen exakt kollinear angeordnet (Fall 2 - siehe Abb. 4.7a). Die Richtung des abgeschätzten Normalvektors wäre somit unbestimmt.

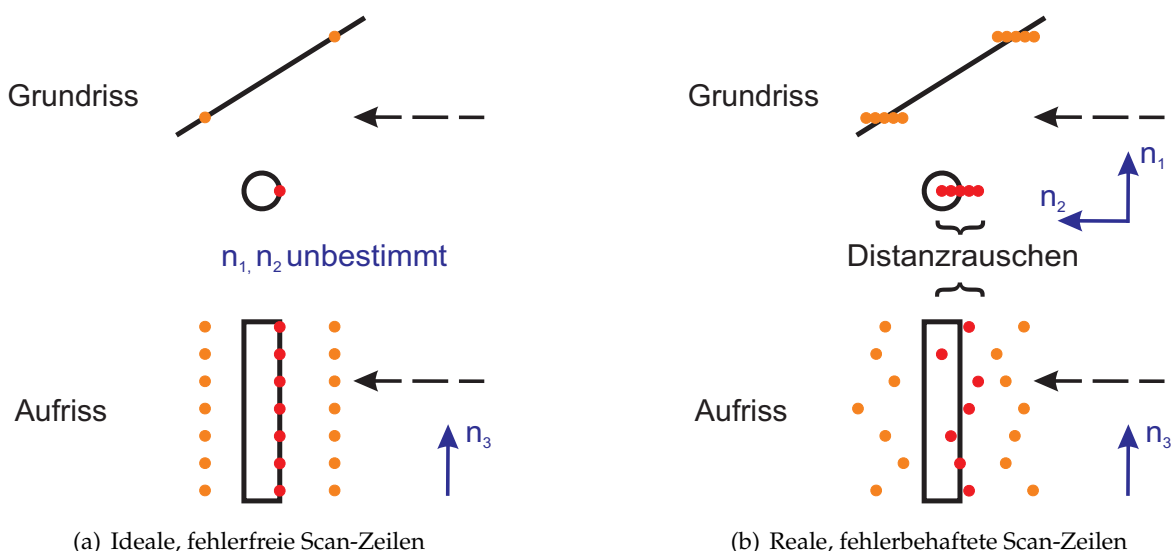


Abbildung 4.7: Mögliche Situation, bei der alle Punkte d_k ein und derselben Scan-Zeile angehören (z.B. hinreichend weit entfernter Steher eines Verkehrszeichens oder ebene Bereiche bei schrägem Einfallswinkel). In Fall (a) lässt sich der Normalvektor nicht bestimmen; in Fall (b) wird er fälschlicherweise orthogonal zu der von Scanzeile und Aufnahme-Richtung (strichlierter Pfeil) aufgespannten Ebene abgeschätzt.

In der Realität ist jedoch aufgrund der zufälligen Messfehler des Laserscanners häufig folgendes zu beobachten: Die gemessenen Punkte weisen – vom Laserscanner aus gesehen – in Tangentialrichtung normal zur Scan-Zeile eine wesentlich geringere Streuung auf als in Radialrichtung, da bei typischen Objektentfernungen die Auswirkung des Winkelmessfehlers am Objekt meist deutlich geringer als jene des Distanzmessfehlers σ_D ist (siehe Abb. 4.7b). Der Normalvektor wird fälschlicherweise orthogonal zur Ebene des Distanz-Rauschens abgeschätzt – gefährlicherweise mit einem niedrigen mittleren Fehler s_0 und einem möglicherweise durchaus großen Verhältnis $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ (λ_1 könnte ja sehr nahe bei 0 liegen). Erst der Vergleich von λ_2 mit

dem deutlich größeren Wert λ_3 zeigt auf, dass die Punktanordnung in diesem Fall nur deshalb „planar“ ist, weil diese durch Messfehler entlang einer in Wirklichkeit *linearen* Struktur entstanden ist.

Als „Planarität“ an einem Oberflächenpunkt wird daher im folgenden nicht die tatsächliche, sondern die im Idealfall (keine Messfehler, jedoch unter Berücksichtigung der diskreten Abtastung einer kontinuierlichen Oberfläche) gegebene Punktanordnung in dessen Umgebung verstanden.

Für diesen als „Planaritätsfilter“ bezeichneten Verarbeitungsschritt sind somit die folgende Größen maßgeblich:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\lambda_1}{m-2}} \quad (4.8)$$

$$\Lambda_{12} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \quad (4.9)$$

$$\Lambda_{23} = \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3} \quad (4.10)$$

Betrachtet man die $\sqrt{\lambda_i}$ ($i = 1..3$) als Halbachsen des triaxialen Ellipsoids der Hauptkomponentenanalyse, kann man $\sqrt{\Lambda_{12}}$ als dessen *äquatoriale* Exzentrizität und $\sqrt{\Lambda_{23}}$ als eine *meridionale* Exzentrizität (nämlich jener Meridianellipse in der von \mathbf{n}_2 und \mathbf{n}_3 aufgespannten Ebene) auffassen. Im Falle von Planarität sind idealerweise s_0 und Λ_{12} jeweils groß und Λ_{23} klein. Die Selektion der Punkte erfolgt mit Hilfe von empirisch ermittelten Schwellwerten.

Nach diesem Verarbeitungsschritt bleiben nur jene Punkte übrig, an denen der Normalvektor mit einer gewissen Verlässlichkeit abgeschätzt werden konnte.

Datenausdünnung

Der mit Abstand aufwändigste Schritt beim ICP-Algorithmus ist – selbst bei Verwendung einer geeigneter Datenstruktur (z.B. kd-Baum) – das Ermitteln korrespondierender Punktpaare. Bei großen Datenmengen, insbesondere bei der noch zu besprechenden Variante mit mehr als zwei Punktwolken, kann es – bei Verwendung jeweils aller Originalpunkte (selbst nach Reduktion der Punkte mittels Planaritätsfilter) – zu sehr langen Rechenzeiten kommen. Vor der Durchführung des ICP-Algorithmus ist daher in den meisten Fällen eine Ausdünnung der beteiligten Punktwolken erforderlich.

Unter „Ausdünnung“ wird im folgenden jener Vorgang verstanden, bei welchem eine Teilmenge von Punkten aus der Punktwolke ausgewählt wird; d.h. die resultierende Teilmenge besteht ausschließlich aus Original-Punkten.

Die *vor* der Ausdünnung in der Punktwolke enthaltenen Punkte liegen – wie am Anfang des Abschnitts erwähnt – in beliebiger Reihenfolge in Form einer Liste vor. Ihre Anzahl wird in der Folge mit N_P bezeichnet.

Eine schnelle und einfache Art der Ausdünnung besteht darin, nur jeden k -ten Punkt ($k \geq 2$) der Liste beizubehalten; d.h. es erfolgt eine Reduktion auf etwa $\frac{100}{k}\%$ der Punkte. Da die Punkte innerhalb der Liste i.A. nicht zufällig angeordnet sind, sondern meist in Scan-Zeilen aufeinanderfolgen, weisen die beibehaltenen Punkte in der Regel eine systematische räumliche Anordnung auf (siehe Abb. 4.8). Falls die Anzahl der Punkte pro Zeile und k *nicht* teilerfremd⁷ sind und alle Zeilen komplett sind (d.h. keine Lücken aufgrund fehlender Messungen vorliegen), können extreme Anordnungen wie in Abbildung 4.8b auftreten.

Eine andere einfache Möglichkeit ist die zufällige Ausdünnung. Dabei wird aus den N_P Punkten der Liste eine Teilmenge von K zufällig gewählten Punkten beibehalten; d.h. $\frac{100 \cdot K}{N_P}\%$ der Punkte bleiben übrig. Diese Methode erlaubt die Ausdünnung auf eine exakt vorgegebene Punktzahl; die resultierende Selektion ist jedoch im Gegensatz zur ersten und den noch folgenden Methoden nicht reproduzierbar.

Bei den beiden bisher genannten Verfahren bleibt die inhomogene, mit der Entfernung vom Laserscanner abnehmende Punktdichte im 3D-Raum im wesentlichen erhalten.

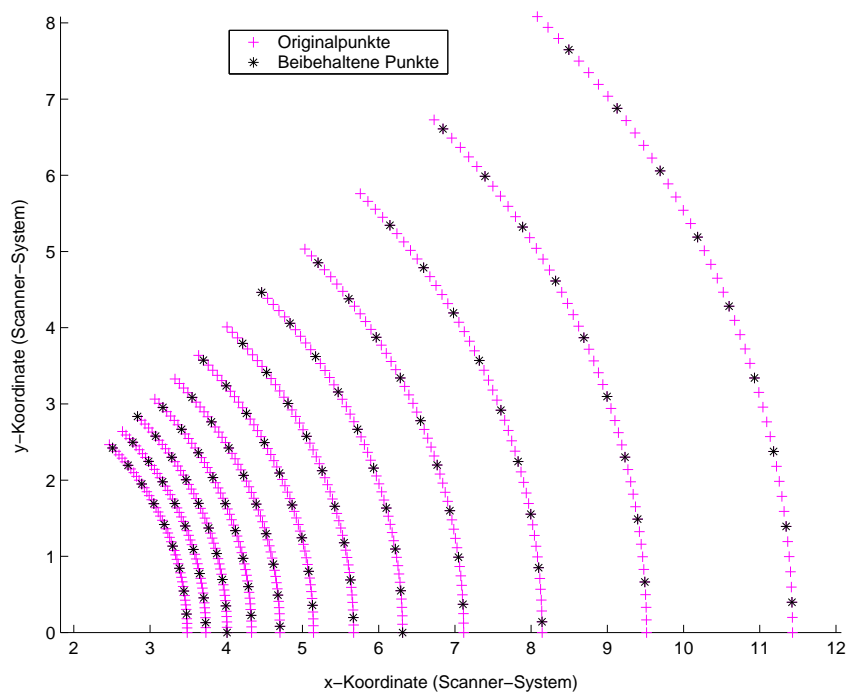
Eine Methode, die auf eine Homogenisierung der Punktdichte abzielt, ist die voxel⁸-basierte Ausdünnung. Dabei wird der Umgebungsquader⁹ (*Bounding-Box*) der Punktwolke in gleich große würfelförmige Voxels (Seitenlänge Δ) zerlegt. Innerhalb eines jeden Voxel werden alle Punkte bis auf einen einzigen entfernt; dieser kann beispielsweise der dem Voxel-Mittelpunkt nächstliegende Punkt sein. In Abbildung 4.9 ist eine solche voxel-basierte Ausdünnung (für den 2D-Fall) dargestellt.

Eine weitere Methode ist die normalen-basierte Ausdünnung (*normal space sampling*). Sie wurde von [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001] vorgeschlagen und hat sich vor allem bei Datensätzen bewährt, die eine glatte Fläche mit *einer* dominanten Flächennormalenrichtung aufweisen sowie wenige feine Strukturen innerhalb dieser Fläche enthalten (z.B: ebenes Objekt mit Gravuren). Die (abgeschätzten) Normalvektoren aller Punkte werden auf der Einheitskugel betrachtet, deren Oberfläche in B gleich große Bereiche eingeteilt wird. Somit fällt jeder Punkt aufgrund seines Normalvektors in einen solchen Bereich. Bei einer maximal angestrebten Gesamtpunktzahl von $K = \frac{N_P}{100} \cdot p$ (Ausdünnung auf p Prozent der Originalpunkte) wird nun für jeden Bereich ein maximal zulässiges Kontingent von $\frac{K}{B}$ Punkten festgelegt. Innerhalb eines Bereiches kann die Auswahl beispielsweise zufällig erfolgen. Ziel der Methode ist die Beibehaltung jener Punkte, die selten vorkommende Normalvektor-Richtungen aufweisen, während Punkte mit häufig vorkommenden Normalvektor-Richtungen stark reduziert werden (Homogenisierung der Flächennormalenrichtung). Diese „seltenen“ Punkte, von denen bei den zuvor erwähnten Arten der Ausdünnung ein hoher Anteil verlorengehe, sind für die Bestimmung

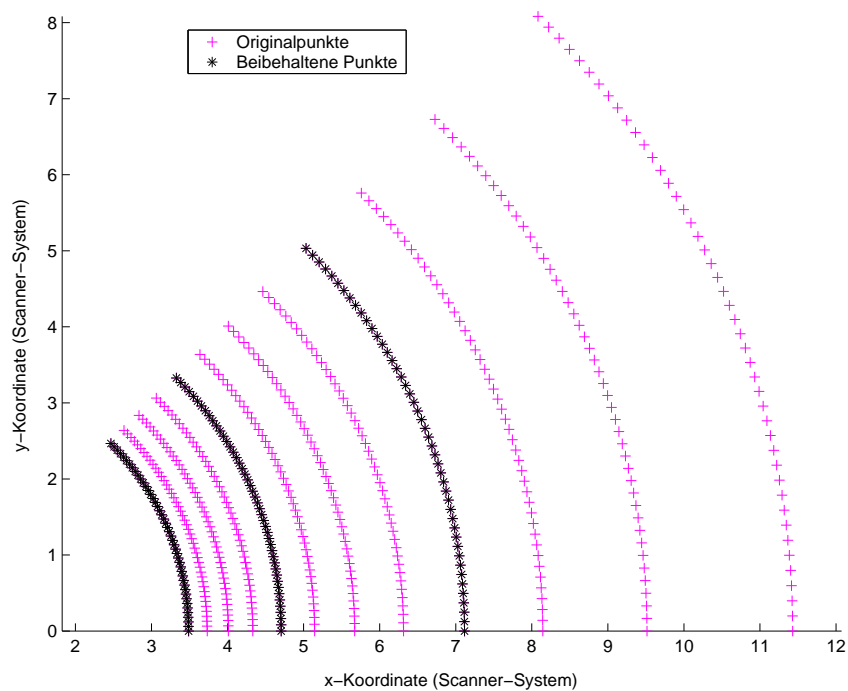
⁷Zwei ganze Zahlen sind genau dann teilerfremd, wenn sie keine gemeinsamen Primfaktoren aufweisen.

⁸Ein Voxel (*volumetric pixel*) bezeichnet in diesem Zusammenhang eine quaderförmige Zelle des 3D-Raumes.

⁹Der kleinste, die Punktwolke vollständig enthaltende, zu den Koordinatenachsen parallele Quader.



(a) $k = 5$



(b) $k = 4$

Abbildung 4.8: Beibehaltung jedes k -ten Punktes im Falle aufeinanderfolgender vertikaler Scan-Zeilen innerhalb der Punktliste. Der im Grundriss abgebildete synthetische Datensatz besteht aus 46 Scanzeilen (Horizontalwinkel $\varphi = \text{const}$) mit einer Zeilenlänge von jeweils 12 Punkten; der Scanbereich beträgt für $\vartheta [95^\circ; 106^\circ]$ und für $\varphi [0^\circ; 45^\circ]$ (mit einer Winkelschrittweite von jeweils 1°). Die (fehlerfreien) Punkte liegen alle in der Ebene $z = -1$ des virtuellen Scanner-Koordinatensystems. (a) zeigt einen Fall, bei dem Zeilenlänge und k teilerfremd sind; im Fall von (b) sind die beiden Größen nicht teilerfremd: daher treten die beibehaltenen Punkte nur an gewissen Positionen (hier: 4, 8, und 12) innerhalb der Zeilen auf.

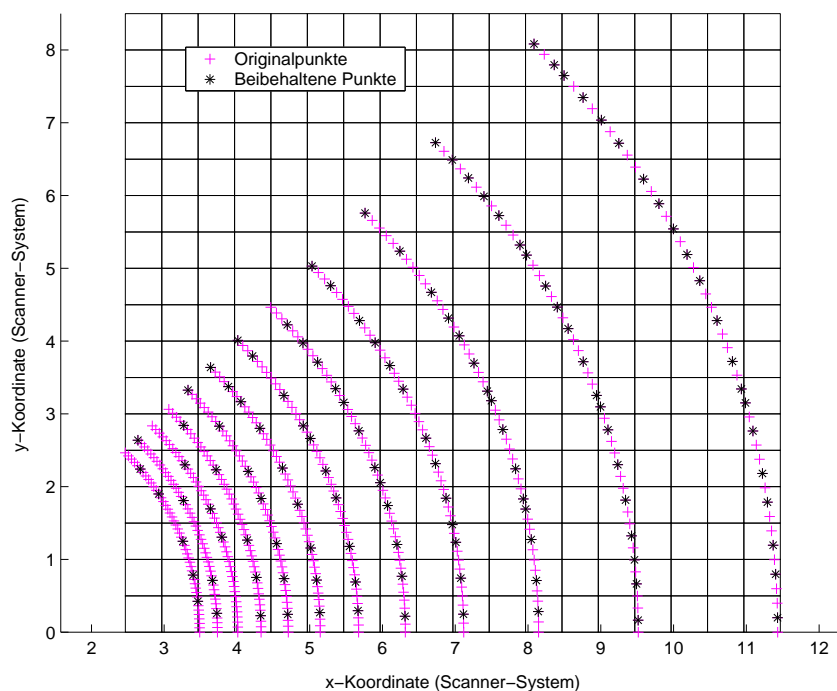


Abbildung 4.9: Voxel-basierte Ausdünnung im 2D-Fall (Seitenlänge eines Voxel-Würfels: $\Delta = 0.5$ Einheiten).

von drei der sechs Orientierungsparameter essentiell: nur sie beinhalten die notwendige Information, um Position und Drehung innerhalb der glatten Fläche festzulegen. Das Prinzip der normalen-basierten Ausdünnung ist in Abbildung 4.10 für den 2D-Fall dargestellt.

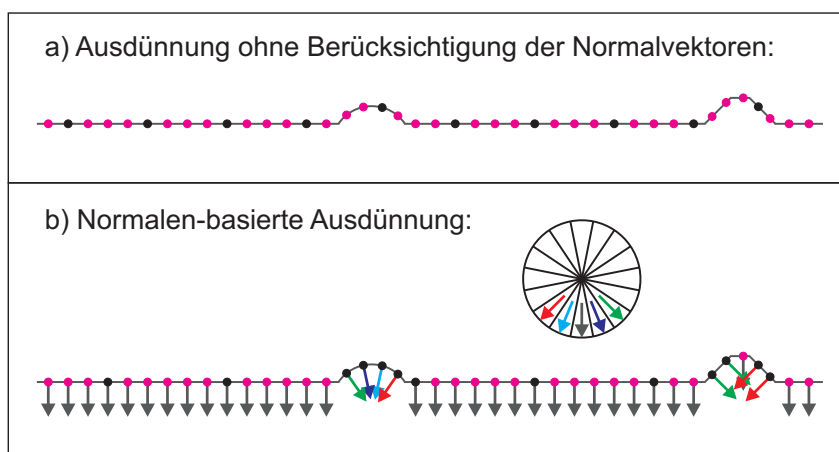


Abbildung 4.10: a) Ausdünnung ohne Analyse der Normalvektoren. b) Normalen-basierte Ausdünnung. Im hier gezeigten 2D-Fall werden die Normalvektor-Richtungen gleichmäßig in Kreissektoren eingeteilt. Im Gegensatz zu a) bleiben bei b) die Punkte mit selten vorkommenden Normalvektoren zur Gänze erhalten.

Eine Erweiterung der letztgenannten Methode wird in [GELFAND et al. 2003] beschrieben. Basierend auf der Analyse einer aus den Punktpaaren bestimmten Kovarianzmatrix lässt sich die Stabilität der daraus ermittelten Transformationsparameter abschätzen und – im Falle schlechter Stabilität – eine verbesserte Selektion der Punktpaare durchführen. Mit dieser Methode lassen sich im Gegensatz zur vorher genannten normalen-basierten Ausdünnung auch zwei

Kugeloberflächen mit eingeritzten feinen Strukturen stabil zueinander orientieren.

4.2.3 Für Mobile Mapping adaptierter ICP-Algorithmus

Verallgemeinerung des ICP-Algorithmus auf $N \geq 3$ Punktwolken

Eine für Mobile-Mapping-Zwecke erforderliche Erweiterung gegenüber dem ursprünglichen ICP-Algorithmus ist dessen Verallgemeinerung auf $N \geq 3$ Punktwolken, wobei zunächst zumindest eine davon als feste Referenz angenommen wird. Wir gehen also von N_R festgehaltenen und $N_T = N - N_R$ zu transformierenden Punktwolken aus (mit $1 \leq N_R < N$ und somit auch $1 \leq N_T < N$). Die Liste dieser Punktwolken sei in einer Weise sortiert, dass zunächst die N_R festgehaltenen und anschließend die N_T zu transformierenden Punktwolken aufscheinen.

Bei Verwendung von Ansatz (4.5) gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i^{(k+1)} &= \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{d}_i^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} (\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{d}_i + \mathbf{t}^{(k)}) + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = \\ &= \underbrace{\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{R}^{(k)}}_{=\mathbf{R}^{(k+1)}} \mathbf{d}_i + \underbrace{\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{t}^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}}_{=\mathbf{t}^{(k+1)}} \end{aligned}$$

Ein eleganterer Ansatz ist es, an Stelle des *globalen* Koordinatenursprungs jeweils den *lokalen* Koordinatenursprung als Fixpunkt bezüglich der Drehung zu verwenden, da sich in diesem Fall $\widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}$ als additiver Korrekturvektor für den Translationsvektor $\mathbf{t}^{(k)}$ auffassen lässt:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i^{(k+1)} &= \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} (\mathbf{d}_i^{(k)} - \mathbf{t}^{(k)}) + \mathbf{t}^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_i^{(k)} + \mathbf{t}^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = \\ &= \underbrace{\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{R}^{(k)}}_{\mathbf{R}^{(k+1)}} \mathbf{d}_i + \underbrace{\mathbf{t}^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}}_{=\mathbf{t}^{(k+1)}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$\widetilde{\mathbf{d}}_i^{(k)} = \mathbf{d}_i^{(k)} - \mathbf{t}^{(k)}$ sind die nach k Iterationsschritten auf den lokalen Koordinatenursprung reduzierten Punkte einer zu transformierenden Punktwolke. Im Gegensatz zu Ansatz (4.5) gilt bei Ansatz (4.11) $\widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = 0 \iff \mathbf{t}^{(k+1)} = \mathbf{t}^{(k)}$; d.h. $\widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}$ entspricht unmittelbar der Verschiebung des lokalen Koordinatenursprungs im $(k+1)$ -ten Iterationsschritt.

Für ein Punktwolken-Paar (J, K) mit $1 \leq J \leq N_R < K \leq N$ (d.h. eine feste und eine zu transformierende Punktwolke) ergibt sich gemäß (4.11) somit folgende Fehlerquadratsumme:

$$E_{J,K} = \sum_{i=1}^{N_{J,K}} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \mathbf{d}_{J,i}^{(0)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(0)}} \right]^2 \quad (4.12)$$

$N_{J,K}$ ist die Anzahl der für das Punktwolken-Paar (J, K) ermittelten Punktpaare (Korrespondenzen); k ist die Anzahl der bereits durchgeführten Iterationsschritte ($k \geq 0$); $\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)}$ sind die nach k Iterationsschritten transformierten und auf den lokalen Koordinatenursprung $\mathbf{t}^{(k)}$ reduzierten Punkte der Punktwolke K ; $\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)}$ bzw. $\widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)}$ ist die im $(k+1)$ -ten Iterationsschritt zu bestimmende Rotation bzw. Translation für die Punktwolke K ; $\mathbf{d}_{J,i}^{(0)}$ sind die mit der bekannten, festgehaltenen 4×4 -Transformationsmatrix ins Referenzsystem transformierten Punkte der Punktwolke J und $\mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(0)}}$ ihre entsprechenden Normalvektoren.

Für ein Punktwolken-Paar (J, K) mit $N_R < J < K \leq N$ (d.h. zwei zu transformierende Punktwolken) ergibt sich hingegen folgende Fehlerquadratsumme:

$$E_{J,K} = \sum_{i=1}^{N_{J,K}} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{J,i}^{(k)} - \mathbf{t}_J^{(k)} - \widehat{\mathbf{t}}_J^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k)}} \right]^2 \quad (4.13)$$

$\mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k)}}$ ist der nach k Iterationsschritten transformierte (rotierte) Normalvektor (vgl. Formel (4.2)):

$$\mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k)}} = \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}} = \underbrace{\widehat{\mathbf{R}}^{(k)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k-1)}}}_{\text{gilt nur für } k \geq 1} \quad (4.14)$$

Bei Ausdruck (4.13) ist zu beachten, dass – im Gegensatz zu Ausdruck (4.12), bei welchem die Punktwolke J festgehalten wird – auch auf die Normalvektoren $\mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k)}}$ die zu bestimmende Rotation $\widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)}$ anzuwenden ist.

Zur simultanen Bestimmung aller unbekanntenen Korrekturrotationen $\widehat{\mathbf{R}}_I$ und Korrekturtranslationen $\widehat{\mathbf{t}}_I$ mit $N_R < I \leq N$ wird die Summe aller paarweisen Fehlerquadratsummen minimiert:

$$E_{\text{Gesamt}} = \sum E_{J,K} \quad \text{mit } 1 \leq J < K \text{ und } N_R < K \leq N \quad (4.15)$$

In Abbildung 4.11 ist ein Beispiel für $N = 3$ mit $N_R = 1$ dargestellt.

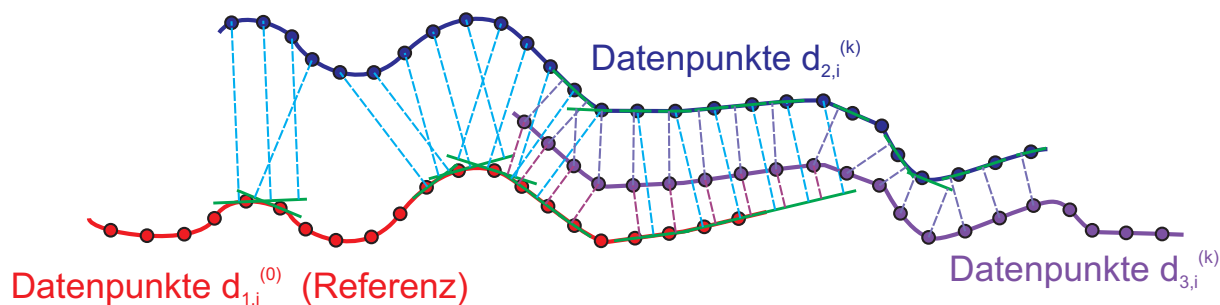


Abbildung 4.11: Simultane Bestimmung der Transformationsparameter für die Punktwolken 2 und 3, wobei die Punktwolke 1 als Referenz dient. Die Punktwolken 2 und 3 werden jeweils so gedreht und verschoben, dass die Quadratsumme der (strichliert eingezeichneten) Punkt-zu-Tangentialebene-Abstände aller $N_{1,2} + N_{1,3} + N_{2,3}$ ermittelten Punktpaare minimiert wird.

Bei Annahme kleiner Drehwinkel ω, φ, κ (Definition siehe Anhang A.2) lassen sich die Ausdrücke (4.12) bzw. (4.13) auf (4.16) bzw. (4.17) vereinfachen (Herleitung siehe Anhang C.2.2).

$$E_{J,K} = \sum_i [\mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i]^2 \quad (4.16)$$

$$E_{J,K} = \sum_i [\mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{b}_i^T \mathbf{w}_J - \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_J - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i]^2 \quad (4.17)$$

Dabei ist (einige Indizes werden einfachheitshalber weggelassen):

$$\mathbf{a}_i = \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \times \mathbf{n}_i; \quad \mathbf{b}_i = (\mathbf{d}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_J^{(k)}) \times \mathbf{n}_i; \quad \mathbf{c}_i = \mathbf{d}_{J,i}^{(k)} - \mathbf{d}_{K,i}^{(k)}; \quad \mathbf{n}_i \hat{=} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}^{(k)}}$$

$$\mathbf{w}_K = \begin{pmatrix} \omega_K & \varphi_K & \kappa_K \end{pmatrix}^T; \quad \mathbf{t}_K = \begin{pmatrix} t_{K,x} & t_{K,y} & t_{K,z} \end{pmatrix}^T;$$

$$\mathbf{w}_J = \begin{pmatrix} \omega_J & \varphi_J & \kappa_J \end{pmatrix}^T; \quad \mathbf{t}_J = \begin{pmatrix} t_{J,x} & t_{J,y} & t_{J,z} \end{pmatrix}^T$$

Das Problem lässt sich als Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formulieren: der Punkt-zu-Ebene-Abstand eines Punktpaares i des Punktwolken-Paares (J, K) wird jeweils als fiktive Nullbeobachtung eingeführt. Für $J \leq N_R < K$ lautet die Beobachtungsgleichung für ein Punktpaar i folgendermaßen:

$$L_i + v_i = 0 + v_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i \quad (4.18)$$

Für $N_R < J < K$ lautet die Beobachtungsgleichung dementsprechend:

$$L_i + v_i = 0 + v_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{b}_i^T \mathbf{w}_J - \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_J - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i \quad (4.19)$$

Die Anzahl der Beobachtungen beträgt also insgesamt:

$$n = \sum N_{J,K} \quad \text{mit } 1 \leq J < K \text{ und } N_R < K \leq N \quad (4.20)$$

Die Anzahl der Unbekannten beträgt:

$$u = 6 \cdot N_T = 6 \cdot (N - N_R) \quad (4.21)$$

Die Modellmatrix (Design-Matrix) \mathbf{A} besteht aus Submatrizen $\mathbf{A}_{J,K}$ sowie $-\mathbf{A}_{\underline{J},K}$ (man beachte den jeweils unterstrichenen Index):

$$\mathbf{A}_{J,K} = \begin{pmatrix} a_{J,K,1,x} & a_{J,K,1,y} & a_{J,K,1,z} & n_{J,K,1,x} & n_{J,K,1,y} & n_{J,K,1,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{J,K,N_{J,K},x} & a_{J,K,N_{J,K},y} & a_{J,K,N_{J,K},z} & n_{J,K,N_{J,K},x} & n_{J,K,N_{J,K},y} & n_{J,K,N_{J,K},z} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{A}_{\underline{J},K} = \begin{pmatrix} b_{J,K,1,x} & b_{J,K,1,y} & b_{J,K,1,z} & n_{J,K,1,x} & n_{J,K,1,y} & n_{J,K,1,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{J,K,N_{J,K},x} & b_{J,K,N_{J,K},y} & b_{J,K,N_{J,K},z} & n_{J,K,N_{J,K},x} & n_{J,K,N_{J,K},y} & n_{J,K,N_{J,K},z} \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Für jedes Punktwolkenpaar (J, K) enthält also $\mathbf{A}_{J,K}$ die partiellen Ableitungen der entsprechenden Beobachtungsgleichungen (4.18) bzw. (4.19) nach den unbekanntem Transformationsparametern der Punktwolke K .

Für Punktwolkenpaare (J, K) mit $N_R < J$ treten zusätzlich Submatrizen $\mathbf{A}_{\underline{J},K}$ auf, welche die partiellen Ableitungen der entsprechenden Beobachtungsgleichungen (4.19) nach den unbekanntem Transformationsparametern der Punktwolke J enthalten.

Die Modellmatrix \mathbf{A} ist folgendermaßen aufgebaut:

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{cccccc}
 \mathbf{A}_{1,N_R+1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{A}_{1,N_R+2} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{1,N_R+3} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{1,N-1} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{1,N} \\
 \hline
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \hline
 \mathbf{A}_{N_R,N_R+1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R,N_R+2} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R,N_R+3} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{N_R,N-1} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R,N} \\
 \hline
 -\mathbf{A}_{N_R+1,N_R+2} & \mathbf{A}_{N_R+1,N_R+2} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 -\mathbf{A}_{N_R+1,N_R+3} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R+1,N_R+3} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 -\mathbf{A}_{N_R+1,N-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{N_R+1,N-1} & \mathbf{0} \\
 -\mathbf{A}_{N_R+1,N} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R+1,N} \\
 \hline
 \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{N_R+2,N_R+3} & \mathbf{A}_{N_R+2,N_R+3} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{N_R+2,N-1} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{N_R+2,N-1} & \mathbf{0} \\
 \mathbf{0} & -\mathbf{A}_{N_R+2,N} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{N_R+2,N} \\
 \hline
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \hline
 \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -\mathbf{A}_{N-1,N} & \mathbf{A}_{N-1,N}
 \end{array} \right) \quad (4.24)$$

Der Bereich oberhalb des Doppelstriches entspricht den Beobachtungsgleichungen der Bauart (4.18), jener unterhalb jenen der Bauart (4.19).

Der gekürzte Beobachtungsvektor \mathbf{l} ergibt sich aus „beobachtet“ (jeweils 0) minus „berechnet“ (jeweils $-\mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i$); d.h. $l_i = 0 - (-\mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i) = \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i$. Die den Submatrizen (4.22) bzw. (4.23) entsprechenden Subvektoren lauten daher:

$$\mathbf{l}_{J,K} = \left(\mathbf{c}_{J,K,1}^T \mathbf{n}_{J,K,1} \quad \mathbf{c}_{J,K,2}^T \mathbf{n}_{J,K,2} \quad \cdots \quad \mathbf{c}_{J,K,N_{J,K}}^T \mathbf{n}_{J,K,N_{J,K}} \right)^T \quad (4.25)$$

Der gesamte Beobachtungsvektor \mathbf{l} ist aus den Subvektoren (4.25) wie folgt aufgebaut:

$$\mathbf{l} = \left(\mathbf{l}_{1,N_R+1}^T \cdots \mathbf{l}_{1,N}^T \cdots \mathbf{l}_{N_R,N_R+1}^T \cdots \mathbf{l}_{N_R,N}^T \quad \mathbf{l}_{N_R+1,N_R+2}^T \cdots \mathbf{l}_{N_R+1,N}^T \cdots \mathbf{l}_{N-1,N}^T \right)^T \quad (4.26)$$

Mit Hilfe einer diagonalen Gewichtsmatrix \mathbf{P} , die entsprechend \mathbf{A} bzw. \mathbf{l} aus (diagonalen) Submatrizen $\mathbf{P}_{J,K}$ besteht, lassen sich individuelle Gewichte für die fiktiven Punktpaar-Beobachtungen berücksichtigen.

Es ergibt sich das Normalgleichungssystem¹⁰ $\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{r}$, wobei die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} folgendermaßen aufgebaut ist:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{N_R+1, N_R+1} & -\mathbf{N}_{N_R+1, N_R+2} & \cdots & -\mathbf{N}_{N_R+1, N} \\ & \mathbf{N}_{N_R+2, N_R+2} & \cdots & -\mathbf{N}_{N_R+2, N} \\ & & \ddots & \cdots \\ \text{symmetrisch} & & & \mathbf{N}_{N, N} \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Für die Submatrizen $\mathbf{N}_{K,K}$ ($N_R < K \leq N$) der Hauptdiagonale gilt:

$$\mathbf{N}_{K,K} = \sum_{I=1}^{K-1} \mathbf{M}_{I,\underline{K}} + \sum_{I=K+1}^N \mathbf{M}_{\underline{K},I} \quad (4.28)$$

Dabei sind (bei Verwendung des Gauß'schen Summenzeichens $[x] = \sum_i x_i$ und Weglassen der Indizes I und K):

$$\mathbf{M}_{I,\underline{K}} = \mathbf{A}_{I,\underline{K}}^T \mathbf{P}_{I,K} \mathbf{A}_{I,\underline{K}} = \begin{pmatrix} [pa_x^2] & [pa_x a_y] & [pa_x a_z] & [pa_x n_x] & [pa_x n_y] & [pa_x n_z] \\ & [pa_y^2] & [pa_y a_z] & [pa_y n_x] & [pa_y n_y] & [pa_y n_z] \\ & & [pa_z^2] & [pa_z n_x] & [pa_z n_y] & [pa_z n_z] \\ & & & [pn_x^2] & [pn_x n_y] & [pn_x n_z] \\ & & & & [pn_y^2] & [pn_y n_z] \\ \text{symmetrisch} & & & & & [pn_z^2] \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{M}_{\underline{K},I} = \mathbf{A}_{\underline{K},I}^T \mathbf{P}_{K,I} \mathbf{A}_{\underline{K},I} = \begin{pmatrix} [pb_x^2] & [pb_x b_y] & [pb_x b_z] & [pb_x n_x] & [pb_x n_y] & [pb_x n_z] \\ & [pb_y^2] & [pb_y b_z] & [pb_y n_x] & [pb_y n_y] & [pb_y n_z] \\ & & [pb_z^2] & [pb_z n_x] & [pb_z n_y] & [pb_z n_z] \\ & & & [pn_x^2] & [pn_x n_y] & [pn_x n_z] \\ & & & & [pn_y^2] & [pn_y n_z] \\ \text{symmetrisch} & & & & & [pn_z^2] \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Für die Submatrizen $\mathbf{N}_{J,K}$ ($N_R < J < K \leq N$) abseits der Hauptdiagonale gilt:

$$\mathbf{N}_{J,K} = \mathbf{A}_{\underline{J},K}^T \mathbf{P}_{J,K} \mathbf{A}_{\underline{J},K} = \begin{pmatrix} [pa_x b_x] & [pa_y b_x] & [pa_z b_x] & [pb_x n_x] & [pb_x n_y] & [pb_x n_z] \\ [pa_x b_y] & [pa_y b_y] & [pa_z b_y] & [pb_y n_x] & [pb_y n_y] & [pb_y n_z] \\ [pa_x b_z] & [pa_y b_z] & [pa_z b_z] & [pb_z n_x] & [pb_z n_y] & [pb_z n_z] \\ [pa_x n_x] & [pa_y n_x] & [pa_z n_x] & [pn_x^2] & [pn_x n_y] & [pn_x n_z] \\ [pa_x n_y] & [pa_y n_y] & [pa_z n_y] & [pn_x n_y] & [pn_y^2] & [pn_y n_z] \\ [pa_x n_z] & [pa_y n_z] & [pa_z n_z] & [pn_x n_z] & [pn_y n_z] & [pn_z^2] \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

Der Unbekanntenvektor lautet:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{N_R+1}^T & \mathbf{x}_{N_R+2}^T & \cdots & \mathbf{x}_N^T \end{pmatrix}^T \quad \text{mit } \mathbf{x}_K = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_K^T & \mathbf{t}_K^T \end{pmatrix}^T \quad (4.32)$$

¹⁰Die rechte Seite des Normalgleichungssystems wird hier mit \mathbf{r} anstatt – wie meist üblich – mit \mathbf{n} oder \mathbf{b} bezeichnet, um Verwechslungen zu vermeiden.

Der Vektor \mathbf{r} setzt sich in analoger Weise aus Subvektoren \mathbf{r}_K zusammen:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \left(\mathbf{r}_{N_{R+1}}^T \quad \mathbf{r}_{N_{R+2}}^T \quad \dots \quad \mathbf{r}_N^T \right)^T \quad (4.33)$$

Für einen Subvektor \mathbf{r}_K ($N_R < K \leq N$) gilt:

$$\mathbf{r}_K = \sum_{I=1}^{K-1} \mathbf{r}_{I,K} - \sum_{I=K+1}^N \mathbf{r}_{K,I} \quad (4.34)$$

Dabei sind (bei Verwendung des Gauß'schen Summenzeichens $[x] = \sum_i x_i$ und Weglassen der Indizes I und K):

$$\mathbf{r}_{I,K} = \mathbf{A}_{I,K}^T \mathbf{P}_{I,K} \mathbf{l}_{I,K} = \left([pa_x \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pa_y \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pa_z \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_x \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_y \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_z \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \right)^T \quad (4.35)$$

$$\mathbf{r}_{K,I} = \mathbf{A}_{K,I}^T \mathbf{P}_{K,I} \mathbf{l}_{K,I} = \left([pb_x \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pb_y \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pb_z \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_x \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_y \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \quad [pn_z \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \right)^T \quad (4.36)$$

Die Normalgleichungsmatrix \mathbf{N} muss nicht vollbesetzt sein: können zwischen zwei Punktwolken J und K keine Korrespondenzen ermittelt werden (z.B. weil sie keinen geeigneten Überlappungsbereich aufweisen), sind die entsprechenden Submatrizen $\mathbf{A}_{J,K}$ und $\mathbf{A}_{J,K}$ jeweils Nullmatrizen (und somit auch $\mathbf{M}_{J,K}$, $\mathbf{M}_{J,K}$ und $\mathbf{N}_{J,K}$).

Zur Lösung des Normalgleichungssystems $\mathbf{N} \mathbf{x} = \mathbf{r}$ kann auf die Matrix \mathbf{N} die Cholesky-Zerlegung angewandt werden:

$$\mathbf{N} = \mathbf{C} \mathbf{C}^T \quad (4.37)$$

\mathbf{C} ist eine untere und \mathbf{C}^T folglich eine obere Dreiecksmatrix. Das Gleichungssystem lässt sich somit reduzieren und effizient lösen:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{x} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{r} =: \mathbf{g} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} = (\mathbf{C}^{-1})^T \mathbf{g} \quad (4.38)$$

Mit Hilfe des Vektors \mathbf{g} lässt sich die gewichtete Verbesserungsquadratsumme $\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ ohne Kenntnis des Verbesserungsvektors \mathbf{v} berechnen (Beweis siehe Anhang C.3):

$$\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{g}^T \mathbf{g} \quad (4.39)$$

Aus Ω und der Redundanz des Ausgleichungsproblems lässt sich bekanntlich der Gewichtseinheitsfehler a-posteriori abschätzen:

$$s_0 = \sqrt{\frac{\Omega}{n - u}} \quad (4.40)$$

Zur Abschätzung von Genauigkeitsmaßen für die ermittelten Transformationsparameter ist die Kenntnis der Kofaktormatrix der Unbekannten \mathbf{Q}_{xx} erforderlich:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} = \mathbf{N}^{-1} = (\mathbf{C}^{-1})^T \mathbf{C}^{-1} \quad (4.41)$$

Die mittleren Fehler der Unbekannten ergeben sich aus den Quadratwurzeln der entsprechenden Hauptdiagonalelemente der empirischen Varianz-Kovarianzmatrix \mathbf{C}_{xx} :

$$\mathbf{C}_{xx} = s_0^2 \mathbf{Q}_{xx} \quad (4.42)$$

Integration von satellitengestützten Positions-Beobachtungen

Wir gehen im folgenden davon aus, dass die satellitengestützten Positions-Beobachtungen bereits vom globalen Bezugssystem (World Geodetic System 84; WGS84) ins Landessystem und weiter ins das entsprechende übergeordnete Projektkoordinatensystem transformiert wurden. Weiters wird die Position der Antennenzenrum bezüglich des Scanner-Koordinatensystems \mathbf{z} (Exzenter, Offset) nach vorhergehender Kalibrierung (siehe Abschnitt 3.3.1) als bekannt und fehlerfrei angenommen.

Für eine beobachtete Position am Standpunkt I ($N_R < I \leq N$) erhält man die folgenden 3 Beobachtungsgleichungen:

$$s_I + \mathbf{v}_{s_I} = \widehat{\mathbf{R}}_I^{(k+1)} \tilde{\mathbf{z}}_I^{(k)} + \mathbf{t}_I^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_I^{(k+1)} \quad \text{mit} \quad \tilde{\mathbf{z}}_I^{(k)} = \mathbf{R}_I^{(k)} \mathbf{z} = \mathbf{z}_I^{(k)} - \mathbf{t}_I^{(k)} \quad (4.43)$$

Durch Ableitung nach den Unbekannten (siehe Anhang C.2.3) ergibt sich folgende Submatrix $\mathbf{A}_{\text{Sat},I}$ im entsprechenden Spalten-Bereich der Matrix (4.24):

$$\mathbf{A}_{\text{Sat},I} = \begin{pmatrix} 0 & \tilde{z}_{I,z}^{(k)} & -\tilde{z}_{I,y}^{(k)} & 1 & 0 & 0 \\ -\tilde{z}_{I,z}^{(k)} & 0 & \tilde{z}_{I,x}^{(k)} & 0 & 1 & 0 \\ \tilde{z}_{I,y}^{(k)} & -\tilde{z}_{I,x}^{(k)} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

Der entsprechende Teil des gekürzten Beobachtungsvektors \mathbf{l} lautet:

$$\mathbf{l}_{\text{Sat},I} = s_I - \mathbf{z}_I^{(k)} \quad (4.45)$$

Mit einer Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{\text{Sat},I}$ ergibt sich wieder eine Submatrix $\mathbf{N}_{\text{Sat},I} = \mathbf{A}_{\text{Sat},I}^T \mathbf{P}_{\text{Sat},I} \mathbf{A}_{\text{Sat},I}$, welche als zusätzlicher Summand in den entsprechenden Hauptdiagonalblock der Matrix (4.27) einzufügen ist.

Ebenso wird $\mathbf{b}_{\text{Sat},I} = \mathbf{A}_{\text{Sat},I}^T \mathbf{P}_{\text{Sat},I} \mathbf{l}_{\text{Sat},I}$ zum entsprechenden Subvektor (4.34) addiert.

Integration von Neigungssensor-Beobachtungen

Ist ein biaxialer Neigungssensor (Inklinometer) im Laserscanner eingebaut, können die beiden Drehwinkel $\varrho_{G,I}$ und $\nu_{G,I}$ (siehe Anhang A.3) der resultierenden *Gesamt*-Transformation des Standpunktes I beobachtet werden. Die Drehmatrix nach dem $(k+1)$ -ten Iterationsschritt lautet (vgl. Formeln (4.1) bzw. (4.2)):

$$\mathbf{R}_I^{(k+1)} = \widehat{\mathbf{R}}_I^{(k+1)} \mathbf{R}_I^{(k)} = \begin{pmatrix} 1 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 1 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11}^{(k)} & r_{12}^{(k)} & r_{13}^{(k)} \\ r_{21}^{(k)} & r_{22}^{(k)} & r_{23}^{(k)} \\ r_{31}^{(k)} & r_{32}^{(k)} & r_{33}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

Aufgrund der beiden Beziehungen $\tan \varrho = \frac{r_{32}}{r_{33}}$ und $\sin \nu = -r_{31}$ (siehe Anhang A.3) ergeben sich die beiden folgenden Beobachtungsgleichungen (der Index I wird jeweils weggelassen):

$$\varrho_G + v_{\varrho_G} = \arctan \frac{r_{32}^{(k+1)}}{r_{33}^{(k+1)}} = \arctan \frac{-r_{12}^{(k)} \cdot \varphi + r_{22}^{(k)} \cdot \omega + r_{32}^{(k)}}{-r_{13}^{(k)} \cdot \varphi + r_{23}^{(k)} \cdot \omega + r_{33}^{(k)}} \quad (4.47)$$

$$\nu_G + v_{\nu_G} = -\arcsin r_{31}^{(k+1)} = -\arcsin(-r_{11}^{(k)} \cdot \varphi + r_{21}^{(k)} \cdot \omega + r_{31}^{(k)}) \quad (4.48)$$

Durch Ableitung nach den Unbekannten (siehe Anhang C.2.3) erhält man:

$$\mathbf{A}_{\text{Inkl},I} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & \frac{\sin \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma^{(k)} & \cos \gamma^{(k)} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.49)$$

Der entsprechende Teil des gekürzten Beobachtungsvektors \mathbf{l} lautet:

$$\mathbf{l}_{\text{Inkl},I} = \begin{pmatrix} \varrho_{G,I} - \varrho_I^{(k)} \\ \nu_{G,I} - \nu_I^{(k)} \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

Mit einer Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{\text{Inkl},I}$ ergibt sich wieder eine Submatrix $\mathbf{N}_{\text{Inkl},I} = \mathbf{A}_{\text{Inkl},I}^T \mathbf{P}_{\text{Inkl},I} \mathbf{A}_{\text{Inkl},I}$, welche als zusätzlicher Summand in den entsprechenden Hauptdiagonalblock der Matrix (4.27) einzufügen ist.

Ebenso wird $\mathbf{b}_{\text{Inkl},I} = \mathbf{A}_{\text{Inkl},I}^T \mathbf{P}_{\text{Inkl},I} \mathbf{l}_{\text{Inkl},I}$ zum entsprechenden Subvektor (4.34) addiert.

Stochastisches Modell a-priori

Beim Vorhandensein zusätzlicher Beobachtungen $L_{\text{Sat},I}$ und/oder $L_{\text{Inkl},I}$ stellt sich die Frage, welche Gewichte diese (im Verhältnis zu den fiktiven Punkt-zu-Tangentialebene-Beobachtungen $L_{J,K,i}$) erhalten sollen. Während die Genauigkeiten der zusätzlichen Beobachtungen i.A. a-priori bekannt sind (z.B. Neigungssensor durch Herstellerangaben), müssen die Genauigkeiten der fiktiven Beobachtungen abgeschätzt werden. Eine grobe Abschätzung dafür ist am Ende von Anhang C.1 angegeben: dieser Wert kann beispielsweise als Gewichtseinheitsfehler a-priori σ_0 gewählt werden.

Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{\text{Sat},I}$ für eine mittels Satelliten beobachtete Position ergibt sich bei Annahme stochastisch unabhängiger Beobachtungen aus:

$$\mathbf{P}_{\text{Sat},I} = \text{diag} \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{Sat},I,x}^2} \quad \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{Sat},I,y}^2} \quad \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{Sat},I,z}^2} \right) \quad (4.51)$$

Ist die Varianz-Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{LL} aus einer vorhergehenden Ausgleichung gegeben, lautet die Gewichtsmatrix:

$$\mathbf{P}_{\text{Sat},I} = \mathbf{Q}_{LL,\text{Sat},I}^{-1} = \left(\frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{LL,\text{Sat},I} \right)^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma_{LL,\text{Sat},I}^{-1} \quad (4.52)$$

Für die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}_{\text{Inkl},I}$ gilt bei Annahme stochastisch unabhängiger Beobachtungen analog zu (4.51):

$$\mathbf{P}_{\text{Inkl},I} = \text{diag} \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{Inkl},I,\varrho}^2} \quad \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{\text{Inkl},I,\nu}^2} \right) \quad (4.53)$$

Stochastisches Modell a-posteriori

Die Matrix (4.42) enthält Varianz- und Kovarianzinformationen der Unbekannten. Letztere sind die im $(k+1)$ -ten Iterationsschritt bestimmten Parameter der Korrekturrotationen $\hat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)}$ und Korrekturtranslationen $\hat{\mathbf{t}}_J^{(k+1)}$. In der Praxis ist man jedoch an den Genauigkeitsmaßen der Transformationsparameter der resultierenden Gesamt-Transformationen $\mathbf{T}_J^{(N_I)}$ interessiert (N_I sei wieder die Anzahl der durchgeführten Iterationsschritte). Diese Maße erhält man durch Anwenden des Kovarianzfortpflanzungsgesetzes auf die im letzten Iterationsschritt N_I erhaltene Matrix \mathbf{C}_{xx} :

$$\mathbf{C}_{ff} = \mathbf{F}_{xx} \mathbf{C}_{xx} \mathbf{F}_{xx}^T \quad (4.54)$$

\mathbf{F}_{xx} ist die Funktional- (Jacobi-)Matrix, welche hier die partiellen Ableitungen der Gesamt-Transformationsparameter nach den Korrektur-Transformationsparametern enthält. \mathbf{C}_{ff} ist die gesuchte Varianz-Kovarianzmatrix der Gesamt-Transformationsparameter.

Bei Verwendung der $\omega\varphi\kappa$ -Parametrisierung beispielsweise lautet die Submatrix von \mathbf{F}_{xx} für einen Standpunkt K (Herleitung siehe Anhang C.2.4):

$$\mathbf{F}_{xx,K} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{\omega\varphi\kappa,K} & \mathbf{O}_{3,3} \\ \mathbf{O}_{3,3} & \mathbf{I}_{3,3} \end{pmatrix} \quad (4.55)$$

$$\text{mit } \mathbf{W}_{\omega\varphi\kappa,K} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \omega_K^{(N_I)} \tan \varphi_K^{(N_I)} & -\cos \omega_K^{(N_I)} \tan \varphi_K^{(N_I)} \\ 0 & \cos \omega_K^{(N_I)} & \sin \omega_K^{(N_I)} \\ 0 & -\frac{\sin \omega_K^{(N_I)}}{\cos \varphi_K^{(N_I)}} & \frac{\cos \omega_K^{(N_I)}}{\cos \varphi_K^{(N_I)}} \end{pmatrix}$$

Die Gesamtmatrix $\mathbf{F}_{xx} = \text{diag} \left(\mathbf{F}_{xx,N_{R+1}} \quad \cdots \quad \mathbf{F}_{xx,N} \right)$ ist eine Band-Diagonalmatrix.

Abbruchkriterium

Beim ursprünglichen ICP-Algorithmus, bei welchem die Datenpunktwolke eine Teilmenge jener Oberfläche repräsentiert, die durch die Modellpunktwolke repräsentiert wird (siehe Abschnitt 4.2.1), konvergiert die Fehlerfunktion $E(\mathbf{R}, t)$ von Iteration zu Iteration monoton gegen ein lokales Minimum (Beweis siehe [BESL und MCKAY 1992]). Beim adaptierten ICP-Algorithmus geht diese Monotonie-Eigenschaft aufgrund variierender Teilmengen der Punktwolken bzw. wegen der zuvor erwähnten Kriterien für zulässige Punktpaare verloren. Deshalb ist die relative Änderung des Fehlerfunktionswertes bzw. der Wert von \bar{a} (siehe 4.2.1) kein geeignetes Abbruchkriterium. Besser ist es, mit Hilfe eines statistischen Tests zu überprüfen, ob sich die ermittelten Korrektur-Transformationsparameter (mit einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit) signifikant von 0 unterscheiden. Die entsprechende Prüfgröße \hat{t} lautet für eine Unbekannte x :

$$\hat{t} = \frac{x}{s_x} \quad (4.56)$$

s_x ist der aus der Ausgleichung geschätzte mittlere Fehler der Unbekannten x . Bei Wahl einer zweiseitigen statistischen Sicherheit von $S = 95\%$ ergibt sich die Sicherheitsgrenze¹¹ (Quantil) $t_S = 1.96$.

Als Abbruchkriterium eignet sich beispielsweise folgende Forderung:

$$\hat{t}_{x_i} = \frac{x_i}{s_{x_i}} < t_S = 1.96 \quad \forall x_i \quad (4.57)$$

4.2.4 Evaluierung des adaptierten ICP-Algorithmus

Im Rahmen einer Forschungsinitiative der ISPRS-Arbeitsgruppe V/3 (Terrestrisches Laserscanning) wurde u.a. die im vorigen Abschnitt vorgestellte, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte ICP-Variante anhand einiger Datensätze aus verschiedenen Anwendungsbereichen evaluiert (siehe Tab. 4.2).

Datensatz	Anwendungsbereich	Sensor	Scans
Buddha-Statue	Kulturerbe	Riegl LMS-Z210	2
Industrieanlage	Industrievermessung	Leica HDS 2500	2
Zimmer	Innenraumvermessung	iQsun 880	2
Glasgow	Mobile Mapping (innerstädtisch)	Riegl LMS-Z420i	4
Klagenfurt	Mobile Mapping (locker verbaut)	Riegl LMS-Z420i	2

Tabelle 4.2: Zur Evaluierung des adaptierten ICP-Algorithmus untersuchte Datensätze

Die mit diesem Algorithmus erzielten Ergebnisse werden präsentiert und mit jenen zweier ausgewählter kommerzieller Software-Pakete, die über ein entsprechendes Modul verfügen,

¹¹Für eine hinreichend große Redundanz, die beim ICP-Algorithmus vorausgesetzt werden kann, lässt sich die diesem Test zugrundeliegende t-Verteilung (Student-Verteilung) durch die Normalverteilung ersetzen.

verglichen. Dabei gelten die am Anfang von Abschnitt 4.2.2 formulierten Voraussetzungen; d.h. die Scans sind jeweils im scannereigenen Koordinatensystem als Punktliste in Form von xyz-Dateien (ASCII-Format) gegeben.

Bei allen Datensätzen wurde genau ein Scan willkürlich als Referenz-Scan (*master scan*) definiert; d.h. dessen Koordinatensystem wird als Referenzsystem verwendet – oder anders ausgedrückt: dessen Transformationsmatrix ist die Einheitsmatrix und wird festgehalten. Weiters liegen Näherungswerte für die Transformationen aller anderen Scans (*slave scans*) in Form von homogenen 4×4 -Matrizen vor.

Jeder Algorithmus liefert als Ergebnis eine Transformationsmatrix für den *slave scans*, wobei für den Datensatz „Glasgow“ zusätzlich noch jeweils die simultane Orientierung aller 4 Scans untersucht wird.

Im Zeitrahmen dieser Arbeit wurden die folgenden ICP-verwandten Algorithmen untersucht:

- RiSCAN PRO 1.4.1 – Zusatz-Modul „Multi Station Adjustment“ ([RIEGL 2007])
- Geomagic Studio 9 – Werkzeug „Globale Registrierung“ ([GEOMAGIC 2007])
- Entwicklung im Rahmen dieser Arbeit: „Diss-ICP“ (vgl. Abschnitt 4.2.3)

RiSCAN PRO

Für das Software-Paket RiSCAN PRO gibt es ein Zusatz-Modul „Multi Station Adjustment“, mit welchem sich mehrere Scans mittels ICP-basierenden Algorithmus orientieren lassen, wobei auch zusätzliche Beobachtungen (künstliche Zielmarken als Verknüpfungspunkte) berücksichtigt werden können. Zunächst ist ein Vorverarbeitungsschritt erforderlich, bei dem in jedem Scan ebene Bereiche der Oberfläche (Flächenstücke) automatisch detektiert werden. Zur Detektion der ebenen Flächenstücke wird im Falle von im Polarraum vorliegenden Entfernungsbildern die Topologie der Datenmatrix verwendet (nur für Scans im Riegl-spezifischen Rohdatenformat). Basierend auf dem Raster wird eine hierarchische Unterteilung in ebene Bereiche durchgeführt. Ansonsten (also auch in unserem Fall) ist die Angabe einer Referenzebene erforderlich, auf welcher das Raster ausgebreitet werden kann. Jedes ebene Flächenstück wird durch Schwerpunkt, Normalvektor und Ausdehnung beschrieben. Danach erfolgt eine Suche nach korrespondierenden Flächenstücken zwischen verschiedenen Scans. Als Abstandsmaß wird die Summe der Normalabstände der Flächenschwerpunkte zu der jeweils korrespondierenden Ebene herangezogen. Nähere Details zu dieser Methode findet man in [ULLRICH und STUDNICKA 2006]. Die wählbaren Parameter sind wiederum in Anhang C.4.1 angeführt. Die Standard-Parameterwerte sind zur Orientierung von ALS-Daten relativ zu TLS-Daten gedacht.

Geomagic Studio

Das Software-Paket Geomagic Studio verfügt über das Werkzeug „Globale Registrierung“. Dabei können die in Anhang C.4.1 angegebenen Parameter vom Benutzer gewählt werden.

Eigenentwicklung „Diss-ICP“

Zunächst erfolgt für jede Punktwolke die Abschätzung der Normalvektoren an allen Punkten durch die Bestimmung der ausgleichenden Ebene durch die k nächsten Nachbarn. Im gleichen Schritt wird ein Planaritätsfilter angewandt, indem nur jene Punkte (samt Normalvektor) erhalten bleiben, bei denen die durch die Formeln (4.8), (4.9) bzw. (4.10) angeführten Werte der ausgleichenden Ebene allesamt kleiner als vorgegebene Schwellwerte sind. Für die beibehaltenen Punkte wird gegebenenfalls die Orientierung der Normalvektoren geändert (vgl. 4.7). Danach erfolgt optional eine voxel-basierte Ausdünnung, bei der die Zuordnung zu den am Anfang abgeschätzten Normalvektoren erhalten bleibt. Danach wird der in Abschnitt 4.2.3 beschriebene Algorithmus durchgeführt, wobei (4.57) als Abbruchkriterium verwendet wird. Eine Übersicht über die relevanten Parameter befindet sich in Anhang C.4.1. Die Standard-Parameterwerte sind für Mobile-Mapping-Datensätze mit dem *CityGRID Scanner* gedacht.

Evaluierungsmethode

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurden die resultierenden Transformationsparameter jeweils auf die *slave scans* angewandt und die Abweichungen des transformierten *slave scan* vom *master scan* an einzelnen Stellen (*patches*) untersucht. Letztere sind achsparallele quaderförmige Bereiche, innerhalb derer sich die erfasste Objektoberfläche jeweils hinreichend gut durch eine Ebene oder eine Drehzylinderfläche approximieren lässt. Bei der Wahl dieser *patches* wurde auf eine gute räumliche Verteilung sowie – bei den ebenen Bereichen – auf verschiedene Richtungen der Flächennormalen geachtet.

Zur Quantifizierung der Abweichung eines transformierten *slave scan* vom *master scan* innerhalb eines *patches* wird folgende Methode verwendet:

1. Ermittle all jene Punkte des *master scan*, die in den durch den *patch* gegebenen quaderförmigen Bereich fallen.
2. Bestimme eine ausgleichende Fläche durch diese Punkte (je nach *patch* eine Ebene (vgl. Anhang C.1) oder eine Drehzylinderfläche (vgl. Anhang C.4.3)).
3. Projiziere die Punkte auf die ausgleichende Fläche („verbesserte“ Punkte).
4. Führe die Schritte 1. bis 3. auch für den transformierten *slave scan* aus.
5. Berechne den mittleren (ungerichteten) Abstand der „verbesserten“ *slave scan*-Punkte von der *master*-Fläche.

Da bei dieser Aufgabenstellung systematische Abweichungen zweier Oberflächen *voneinander* von Interesse sind, werden also die zufälligen Fehler vorab durch Anbringen der in der Ausgleichung ermittelten Verbesserungen an die Datenpunkte eliminiert. Anschließend wird ein

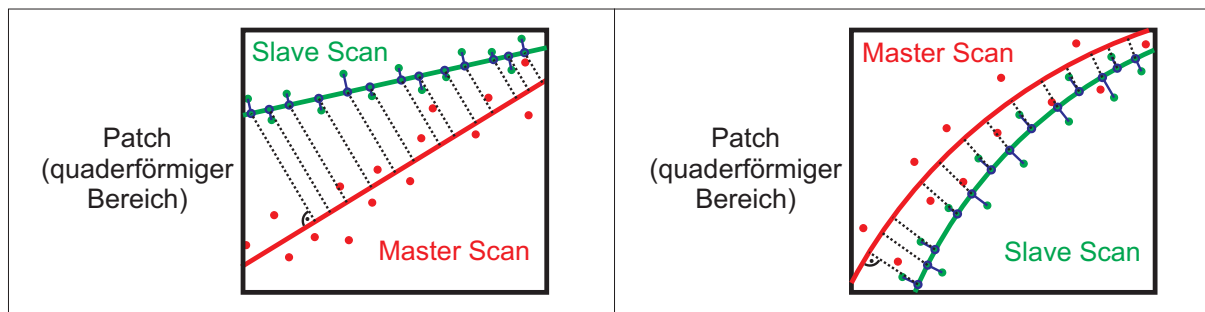


Abbildung 4.12: Zur Charakterisierung der Abweichung zweier Flächen (links: Ebenen, rechts: Drehzylinderflächen) voneinander innerhalb eines quaderförmigen Patch wird ein Abstandsmaß gewählt, das dem Mittelwert der punktiert eingezeichneten Abstände der verbesserten Punkte des slave scan von der ermittelten Fläche des master scan entspricht.

Abweichungsmaß zweier Flächen in einem begrenzten räumlichen Bereich aus diesen „verbesserten“ Datenpunkten empirisch ermittelt (Abb. 4.12).

Im folgenden werden die Ergebnisse für die in Tabelle 4.2 erwähnten Datensätze präsentiert. Dabei bedeutet in den Tabellen „NW“ Näherungswerte“, „S“ „Standard-Parameterwerte“, „B“ „benutzerdefinierte Parameterwerte“, „E“ „ebener Patch“ sowie „Z“ „zylindrischer Patch“. Eine Übersicht über die jeweils verwendeten Parameterwerte befindet sich in Anhang C.4.2. Die eingangs erwähnten Programme sind mit „RSP“, „GS“, und „Diss“ abgekürzt.

Datensatz „Buddha-Statue“

Dieser Datensatz besteht aus einem (vom Betrachter aus gesehen) linken (100.860 Punkte) und einem rechten (107.451 Punkte) Scan, wobei ersterer als *master scan* ausgewählt wurde. Die Objekt-Dimensionen betragen ca. $7.5 \times 3.2 \times 10.1$ m. Die insgesamt 9 *patches* sind jeweils würfelförmig mit Seitenlängen von 0.2 m (Abbildung 4.13).

Patch	1E	2E	3E	4E	5E	6E	7E	8E	9E
NW	7.8	22.2	61.2	24.7	107.0	83.0	18.0	11.5	17.2
RSP - S	Algorithmus aufgrund mangelnder Korrespondenzen abgebrochen								
RSP - B	4.9	3.9	1.3	6.8	5.2	9.4	1.8	1.7	5.0
GS - S	3.4	6.8	9.6	6.7	3.1	3.7	7.2	2.3	9.1
Diss - S	8.7	18.4	16.8	5.6	0.7	3.1	11.7	3.0	12.3
Diss - B	8.0	10.7	9.6	7.0	2.3	1.2	3.9	1.8	9.4

Tabelle 4.3: Mittlerer Abstand der verbesserten Slave-Punkte zur Master-Fläche [mm]

Mit den (voreingestellten) Standard-Parameterwerten liefert nur Geomagic Studio ein gutes Ergebnis (siehe Tabelle 4.3). Im Falle von RiSCAN PRO versagt der Algorithmus hier mit den Standard-Parameterwerten; es mussten andere Werte verwendet werden, um ein vergleichbar gutes Ergebnis zu erhalten. Die Standard-Parameterwerte beim Diss-ICP-Algorithmus liefern

ein etwas schlechteres Ergebnis als jene von Geomagic Studio. Bei Wahl anderer Parameterwerte lässt sich ein etwas besseres Ergebnis als mit den Standard-Parameterwerten erzielen.

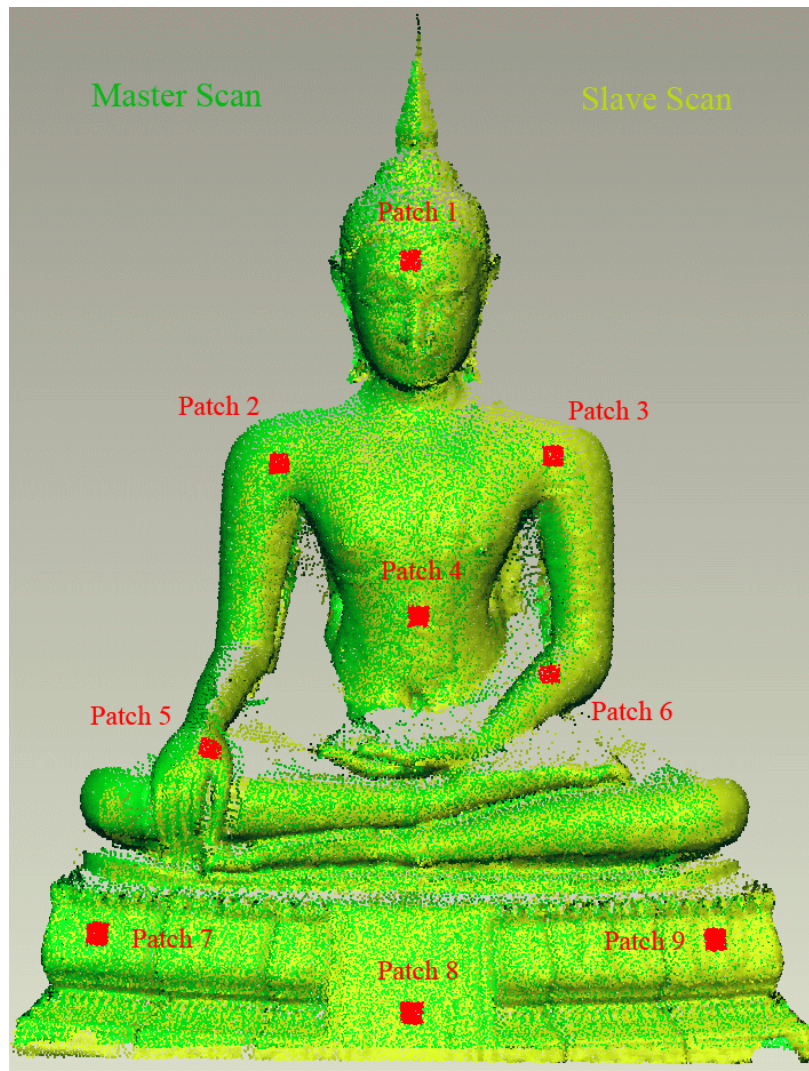


Abbildung 4.13: Datensatz „Buddha-Statue“ mit den ausgewählten patches

Datensatz „Industrieanlage“

Dieser Datensatz besteht ebenso aus einem linken (991.564 Punkte) und einem rechten (989.845) Scan, wobei wieder der erstere als *master scan* ausgewählt wurde. Der Überlappungsbereich der beiden Scans beträgt ca. $3.1 \times 5.6 \times 4.7$ m. Von den insgesamt 16 *patches* fallen 8 in ebene Bereiche sowie ebenso viele in Bereiche, die sich lokal jeweils durch eine Drehzylinderfläche beschreiben lassen. Die *patches* sind würfelförmig mit Seitenlängen von 0.1 m bei den *patches* #5 bis #11 und #14 bzw. 0.2 m bei den restlichen *patches* (Abbildung 4.14).

Bei Verwendung der Standard-Parameterwerte liefert Geomagic Studio ein sehr gutes Ergebnis (siehe Tabelle 4.4). Im Falle von RiSCAN PRO kommt es bei Verwendung der Standard-Parameterwerte zu einer Verschlechterung der Orientierungsparameter gegenüber den Nähe-

rungswerten. Durch Wahl anderer Parameterwerte lässt sich jedoch wieder ein gutes Ergebnis erzielen. Mit den Standard-Parameterwerten des Diss-ICP-Algorithmus erhält man kein besonders gutes Resultat; aber auch in diesem Fall kann durch Wahl anderer Parameterwerte eine deutliche Verbesserung erreicht werden.

Patch	1E	2E	3E	4E	5E	6E	7E	8Z	9Z	10Z	11Z	12Z	13Z	14E	15Z	16Z
NW	12.8	26.3	5.2	23.2	9.7	5.6	8.2	13.7	17.9	2.9	12.9	9.1	2.8	7.5	9.2	12.2
RSP-S	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten															
RSP-B	1.0	0.6	0.6	1.5	0.5	0.6	1.5	0.4	0.8	0.9	2.0	0.6	1.6	3.0	2.8	0.5
GS-S	0.3	0.6	0.4	0.2	0.6	0.4	0.6	0.5	0.7	1.1	0.6	0.5	0.5	0.1	0.4	0.3
Diss-S	5.8	6.2	5.5	4.9	0.2	1.3	1.9	4.2	2.4	1.2	7.3	1.2	4.0	6.2	4.4	4.9
Diss-B	1.7	1.7	1.6	1.4	0.2	0.3	0.5	0.9	1.1	0.8	2.0	0.2	0.8	1.6	0.3	0.9

Tabelle 4.4: Mittlerer Abstand der verbesserten Slave-Punkte zur Master-Fläche [mm]

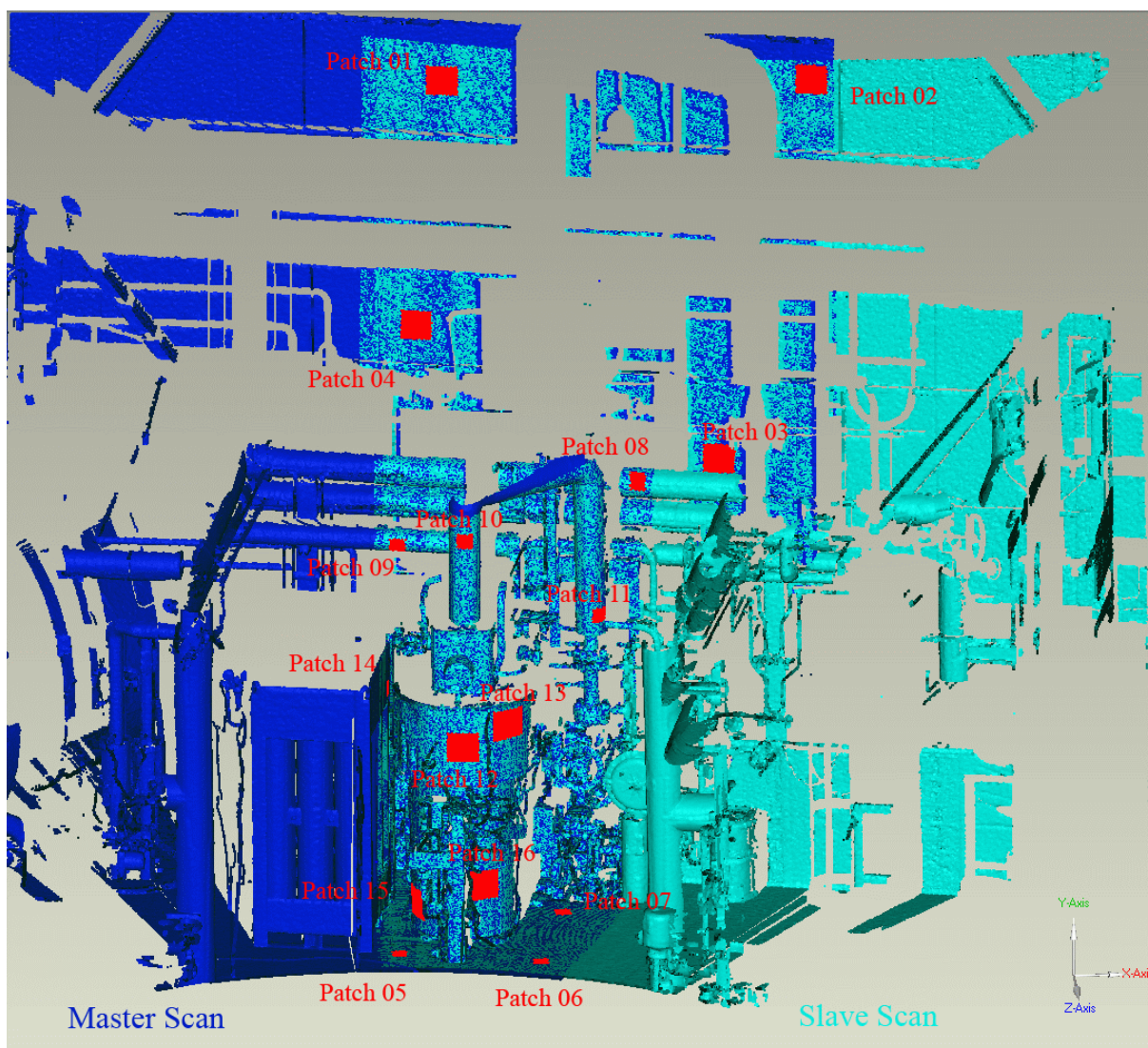


Abbildung 4.14: Datensatz „Industrieanlage“ mit den ausgewählten patches

Datensatz „Zimmer“

Dieser Datensatz besteht aus einem *master scan* mit hoher Auflösung (890.068 Punkte) und einem an derselben Position aufgenommenen *slave scan* mit geringer Auflösung (55.712 Punkte). Die Raumdimensionen betragen ca. $9.0 \times 5.4 \times 3.0$ m. Alle 12 *patches* repräsentieren ebene Bereiche (Abbildung 4.15); sie sind würfelförmig und weisen jeweils Seitenlängen von 0.4 m auf (mit Ausnahme der *patches* #4 sowie #8 bis #10 mit Seitenlängen von 0.8 m).

Patch	1E	2E	3E	4E	5E	6E	7E	8E	9E	10E	11E	12E
NW (=ID)	1.3	1.8	0.2	3.4	1.1	0.8	1.6	3.9	2.2	2.5	2.3	1.7
RSP - S	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten											
RSP - B	Keine geeigneten Parameterwerte gefunden											
GS - S	0.4	0.9	1.1	2.4	0.8	0.6	1.1	2.4	2.3	1.8	1.0	0.7
Diss - S	0.5	0.5	2.9	0.3	1.6	1.2	0.6	0.2	1.2	0.5	0.8	0.7
Diss - B	0.6	0.4	0.5	0.8	0.9	0.7	1.5	0.6	1.4	0.9	1.1	0.8

Tabelle 4.5: Mittlerer Abstand der verbesserten Slave-Punkte zur Master-Fläche [mm]

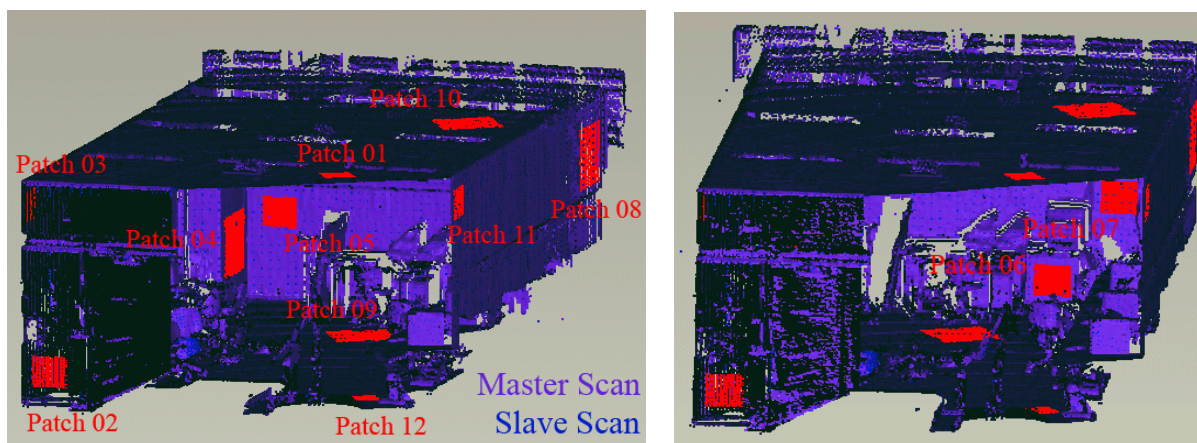


Abbildung 4.15: Datensatz „Zimmer“ mit den ausgewählten patches

Bei Verwendung der Standard-Parameterwerte liefern sowohl Geomagic Studio als auch der Diss-ICP-Algorithmus Ergebnisse, die besser im Vergleich zu den Näherungswerten (Einheitsmatrix) sind (siehe Tabelle 4.5). Mit anderen Parameterwerten kann im Falle des Diss-ICP-Algorithmus das maximale Abweichungsmaß von 2.9 mm auf 1.5 mm reduziert werden. Für RiSCAN PRO konnte in diesem Fall kein geeigneter Parametersatz gefunden werden.

Die beiden folgenden (Mobile-Mapping-)Datensätze stammen aus Aufnahmedaten des *City-GRID Scanner* im Stop-and-go Modus (siehe Abschnitt 2.1). Auf die dabei erzielten Ergebnisse wird deshalb etwas ausführlicher als bei den vorhergehenden Datensätzen eingegangen.

Datensatz „Glasgow“

Dieser Datensatz besteht aus den Scans SC_1250 (664.671 Punkte), SC_1253 (*master scan*; 651.696 Punkte), SC_1255 (618.470 Punkte), und SC_1258 (593.620 Punkte). Bei der Aufnahme wurde der Betriebsmodus entsprechend Abbildung 2.3(e) verwendet, wodurch eine hohe Überlappung benachbarter Scans gewährleistet ist. Mit Ausnahme von *patch* #4, welcher im Bereich einer zylindrischen Säule gewählt wurde, lässt sich die Objektoberfläche innerhalb aller anderen *patches* jeweils durch eine ebene Fläche approximieren (Abbildung 4.16).

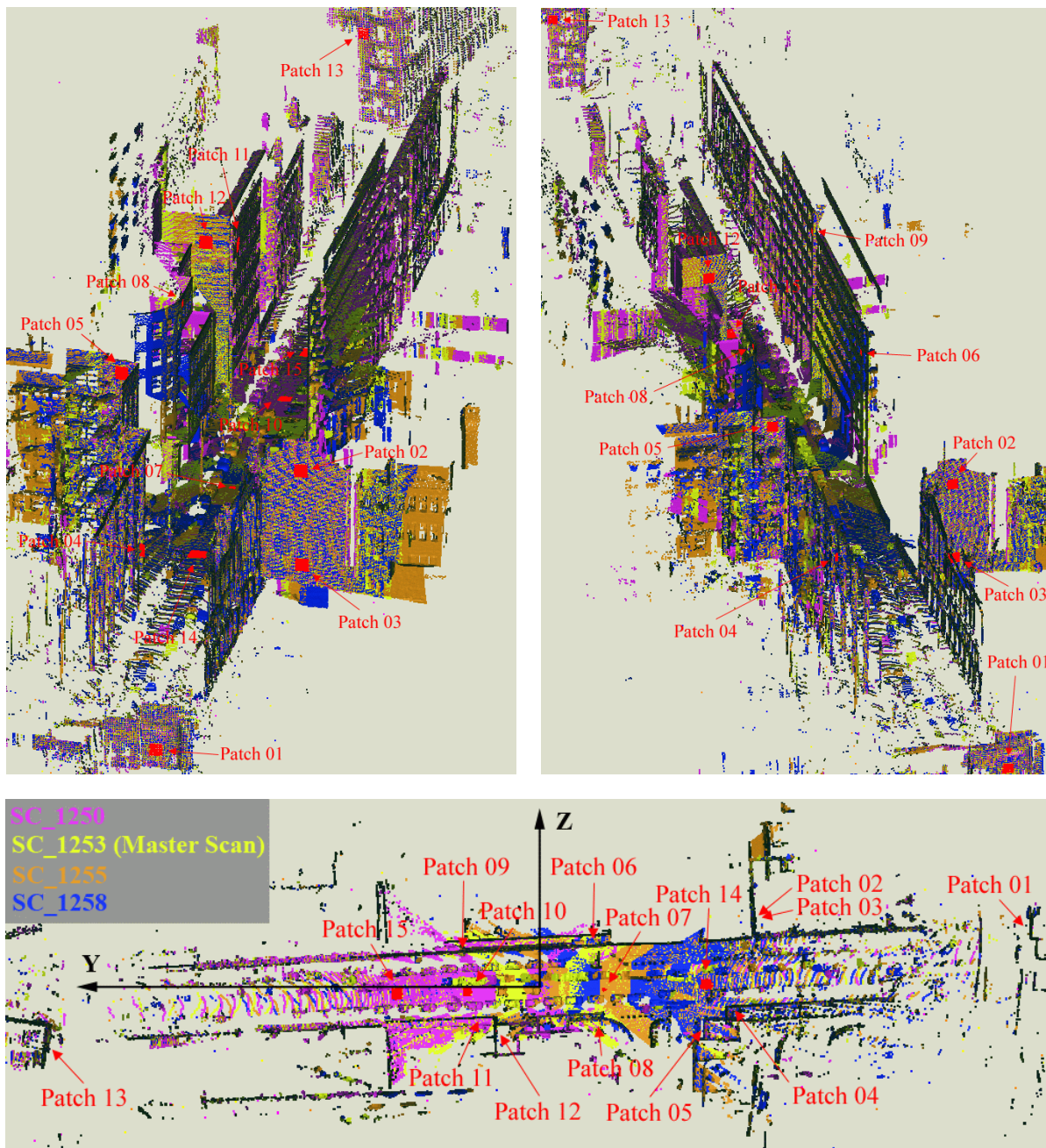


Abbildung 4.16: Datensatz „Glasgow“ mit den ausgewählten *patches*. Das Koordinatensystem von Scan SC_1253 wurde als übergeordnetes System XYZ gewählt. Die Entfernung zwischen den *patches* #01 und #13 beträgt ca. 260 m.

Die Achsen des Scanner-Koordinatensystems weisen in diesem Fall – genähert – die folgenden Richtungen auf: positive x -Achse in Nadirrichtung; negative y -Achse in Fahrtrichtung; positive z -Achse nach links (aus Lenkersicht). Als Näherung für die Transformationsparameter der 3 *slave scans* wurde daher jeweils nur die y -Translationskomponente (auf Meter genau) ermittelt: diese beträgt 9, -11, bzw. -19 m für die Scans 1250, 1255, bzw. 1258. Für die restlichen 5 Parameter wurde hingegen jeweils der Ausgangswert „0“ gewählt.

Patch	1E	2E	3E	4Z	5E	6E	7E	8E	9E	10E	11E	12E	13E	14E	15E
NW 1250	248	184	200	386	236	858	37	914	915	42	807	173	296	15	52
NW 1255	320	363	299	188	364	354	121	442	516	37	300	396	329	237	53
NW 1258	185	216	140	197	355	125	k.D.	220	158	65	94	367	472	315	33
RSP-S 50	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten														
RSP-S 55	55.7	39.1	50.7	43.4	35.7	1.4	8.1	1.7	1.2	27.5	3.3	36.0	47.5	26.5	41.0
RSP-S 58	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten														
RSP-S 50_sim	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten														
RSP-S 55_sim	69.0	47.1	62.0	53.2	42.2	2.7	39.1	3.2	5.5	6.9	5.5	42.7	57.9	64.7	25.0
RSP-S 58_sim	31.3	35.7	31.6	28.8	43.9	4.4	k.D.	5.8	6.3	6.7	5.1	42.5	48.4	22.4	3.6
RSP-B 50	24.4	25.1	24.0	20.3	29.1	10.6	3.0	13.6	8.6	3.6	4.1	26.2	28.1	7.8	6.2
RSP-B 55	11.9	12.5	13.8	8.3	7.5	4.9	3.4	5.0	5.5	1.6	8.1	6.8	18.5	2.2	3.7
RSP-B 58	8.8	4.8	8.3	5.0	4.8	1.0	k.D.	0.9	1.2	7.2	2.2	2.9	18.7	5.9	9.5
RSP-B 50_sim	4.4	4.8	3.8	7.4	7.8	6.3	3.1	8.6	5.2	3.8	2.3	4.5	13.0	7.6	6.5
RSP-B 55_sim	3.9	2.4	3.2	7.3	1.5	4.9	2.4	3.7	4.9	1.3	10.1	2.1	17.1	2.4	1.7
RSP-B 58_sim	6.8	8.7	7.2	6.0	12.3	1.2	k.D.	1.4	2.9	2.8	6.3	10.2	21.3	2.5	4.0
GS-S 50	2.7	7.6	2.6	21.6	30.7	42.0	3.4	44.8	16.1	16.8	4.2	37.2	46.6	15.9	25.4
GS-S 55	124.5	67.3	118.9	70.0	2.9	24.6	32.7	33.2	10.9	81.7	31.6	4.4	69.3	130.3	147.8
GS-S 58	34.1	37.9	32.5	49.5	71.6	34.7	k.D.	44.8	15.6	14.8	7.6	72.5	105.6	3.8	19.0
GS-S 50_sim	57.3	58.1	61.2	75.5	90.4	66.6	7.6	69.7	21.5	3.6	5.6	98.9	125.9	4.6	3.7
GS-S 55_sim	129.8	71.7	120.8	83.9	13.4	16.0	81.1	18.0	16.4	33.8	21.0	11.7	43.2	175.2	98.1
GS-S 58_sim	137.4	93.5	134.5	101.7	41.5	26.5	k.D.	21.8	44.8	71.6	54.9	44.7	40.4	106.9	121.8
GS-B 50	8.0	9.7	10.7	23.0	23.4	31.8	7.3	31.9	11.1	10.8	6.1	28.8	36.7	1.2	12.9
GS-B 55	50.1	28.5	48.6	32.0	4.4	5.0	11.3	6.0	4.3	32.7	4.8	3.5	20.1	51.8	59.9
GS-B 58	25.8	10.9	24.9	24.9	1.6	5.4	k.D.	3.0	4.5	33.0	2.6	3.4	19.5	26.4	49.0
GS-B 50_sim	4.2	4.8	8.4	26.5	13.7	15.6	6.6	10.3	7.5	6.9	1.3	18.1	27.6	8.2	7.0
GS-B 55_sim	17.6	20.0	17.1	23.9	4.2	1.0	8.4	4.1	22.9	18.1	12.9	4.1	20.1	6.7	21.1
GS-B 58_sim	61.0	47.1	62.0	51.1	28.7	6.8	k.D.	14.8	14.9	24.5	1.3	29.9	26.7	38.3	41.2
Diss-S 50	2.0	1.2	2.5	2.6	3.5	1.5	3.2	1.7	2.1	0.2	2.0	0.7	12.0	1.1	1.6
Diss-S 55	3.7	3.5	3.8	1.5	1.6	0.6	3.7	0.8	0.9	1.6	3.3	2.1	17.5	1.1	1.2
Diss-S 58	4.3	2.7	3.7	2.8	1.8	0.8	k.D.	0.5	3.6	3.6	4.7	1.1	17.3	0.8	3.8
Diss-S 50_sim	2.9	1.0	3.7	2.6	3.3	1.0	3.3	2.1	2.0	1.1	1.8	0.8	12.1	1.4	2.4
Diss-S 55_sim	3.6	2.7	3.2	1.2	1.8	0.6	3.5	0.8	1.4	1.6	3.7	2.2	17.3	1.3	1.4
Diss-S 58_sim	4.1	2.3	3.4	3.2	2.1	1.0	k.D.	0.5	3.8	2.8	4.5	1.1	17.4	0.4	3.4

Tabelle 4.6: Mittlerer Abstand der verbesserten Slave-Punkte zu der aus Scan 1253 abgeschätzten Master-Fläche [mm]. Im Falle simultan ermittelter Transformationsparameter wurde jeweils das Kürzel „_sim“ an den Scan-Namen angehängt. Patch #7 ist in Scan 1258 nicht abgebildet; daher sind dort jeweils keine Daten (k.D.) vorhanden.

Bei Verwendung der Standard-Parameterwerte konnte mit RiSCAN PRO nur der Scan 1255 einigermaßen gut orientiert werden (siehe Tabelle 4.6). Bei simultaner Anwendung des Algorithmus auf alle 3 *slave scans* ergibt sich eine Verschlechterung gegenüber der paarweisen Orientierung für denselben Scan; dafür ergibt sich für Scan 1258 im Gegensatz zur paarweisen Methode ein brauchbares Resultat. Die Verwendung anderer Parameterwerte führt bei allen 3 Scans zu deutlich besseren Resultaten. Im Falle der Scans 1250 und 1255 führt die Anwendung der simultanen Methode zu einer weiteren Verbesserung.

Für Geomagic Studio führt die Verwendung der Standard-Parameterwerte – mit Ausnahme der einigermaßen guten paarweisen Orientierung von Scan 1250 – zu schlechten Ergebnissen (systematische Abweichungen teilweise im dm-Bereich). Mit anderen Parametern kann zwar auch in diesem Fall eine deutliche Verbesserung erzielt werden; allerdings sind die Resultate bei weitem nicht so gut wie jene von RiSCAN PRO. Ein weiterer Nachteil von Geomagic Studio bei diesem Datensatz ist die Rechenzeit: für jede der insgesamt 8 Prozesse (3 paarweise sowie ein simultaner Prozess für jeweils 2 Parametersätze) betrug die Dauer jeweils fast eine Stunde, während die beiden anderen Implementierungen jeweils Rechenzeiten von wenigen bis maximal 10 Minuten aufwiesen.

Die mit Abstand besten Ergebnisse können mit dem Diss-ICP-Algorithmus erzielt werden – sowohl was die paarweise als auch die simultane Methode betrifft. Die Abweichungen betragen – mit Ausnahme von Patch #13 – jeweils nur wenige mm. Bei Patch #13 ist allerdings zu beachten, dass dieser bereits mehr als 130 Meter von der Scan-Position SC_1253 entfernt ist und die Punktdichte dementsprechend gering ist. Im Gegensatz zum ebenfalls weit entfernten Patch #1 sind die systematischen Abweichungen der gescannten Oberfläche von einer Ebene an dieser Stelle jedoch deutlich größer.

In den folgenden Tabellen sind einige Details aus dem Protokoll des Diss-ICP-Algorithmus zusammengefasst.

Die Tabelle 4.7 gibt eine Übersicht über die Punktzahl vor der Vorverarbeitung, nach dem Planaritätsfilter sowie nach der voxel-basierten Ausdünnung (1dm-Voxels). In der letzte Zeile ist die Anzahl jener Punkte gegeben, die – gemeinsam mit ihren abgeschätzten Normalvektoren – für den eigentlichen ICP-Algorithmus verwendet werden.

Punktzahl	Scan_1250	Scan_1253	Scan_1255	Scan_1258
Original-Scan	664.671	651.696	618.470	593.620
nach Planaritäts-Filter	547.788 ($\approx 82\%$)	538.145 ($\approx 83\%$)	508.501 ($\approx 82\%$)	485.799 ($\approx 82\%$)
nach Ausdünnung	246.416 ($\approx 37\%$)	236.626 ($\approx 36\%$)	234.203 ($\approx 38\%$)	229.215 ($\approx 39\%$)

Tabelle 4.7: Punktzahl der Original-Scans sowie nach Planaritätsfilter und nach Ausdünnung

Die Tabellen 4.8 bis 4.10 enthalten die Anzahl der durchgeführten Iterationsschritte k sowie – pro Schritt – die folgenden Werte: die Anzahl der ermittelten Punktpaare (Korrespondenzen)

N , die Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat der Punktpaare (\bar{a} ; siehe Abschnitt 4.2.1) vor der Transformation, sowie den mittleren Fehler s_0 nach der Transformation (lt. (4.40)). Die Tabelle 4.11 enthält die jeweiligen Endresultate.

k	N	\bar{a} [mm]	s_0 [mm]
1	44.701	165.4	61.6
2	70.749	62.8	45.7
3	163.375	89.9	18.1
4	167.521	16.3	16.1
5	167.515	16.1	16.1

Tabelle 4.8: Statistik für Orientierung von Scan 1250 zu Scan 1253. Anzahl N der Punktpaare (Korrespondenzen), Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat der Punktpaare (\bar{a} ; siehe Abschnitt 4.2.1) vor der Transformation, sowie mittlerer Fehler s_0 nach der Transformation (lt. (4.40)).

k	N	\bar{a} [mm]	s_0 [mm]
1	52.814	184.9	48.8
2	143.056	32.3	15.9
3	143.025	16.0	16.0
4	143.006	16.0	16.0

Tabelle 4.9: Statistik für Orientierung von Scan 1255 zu Scan 1253. Gleiche Bezeichnungen wie in Tabelle 4.8.

k	N	\bar{a} [mm]	s_0 [mm]
1	67.269	184.7	54.5
2	129.434	44.2	16.4
3	130.424	16.0	16.0
4	130.419	15.9	15.9

Tabelle 4.10: Statistik für Orientierung von Scan 1258 zu Scan 1253. Gleiche Bezeichnungen wie in Tabelle 4.8.

Scan	1250	1255	1258
ω	0.0114 gon \pm 0.2 mgon	-0.0626 gon \pm 0.2 mgon	0.1965 gon \pm 0.2 mgon
φ	-1.0753 gon \pm 0.3 mgon	-2.0991 gon \pm 0.4 mgon	-2.3593 gon \pm 0.5 mgon
κ	0.0121 gon \pm 0.3 mgon	-0.1599 gon \pm 0.3 mgon	-0.1815 gon \pm 0.4 mgon
t_x	0.034 m \pm 0.1 mm	-0.120 m \pm 0.1 mm	-0.211 m \pm 0.1 mm
t_y	8.781 m \pm 0.1 mm	-10.681 m \pm 0.1 mm	-18.748 m \pm 0.1 mm
t_z	-0.480 m \pm 0.1 mm	0.341 m \pm 0.1 mm	0.658 m \pm 0.1 mm

Tabelle 4.11: Resultierende Transformationsparameter sowie deren mittlere Fehler (aus der Matrix (4.54)) bei jeweils (unabhängig voneinander durchgeführten) paarweiser Orientierung

Die Tabellen 4.12 bis 4.14 enthalten die entsprechenden Informationen für den simultan ange-

wandten ICP-Algorithmus, wobei die Tabellen aus Platzgründen anders organisiert sind.

k	1250-1253	1250-1255	1250-1258	1253-1255	1253-1258	1255-1258	Gesamt
1	44.701	20.206	10.787	52.814	67.269	116.199	311.976
2	87.151	62.802	51.345	141.872	128.022	161.270	632.462
3	166.659	122.401	106.186	143.039	129.878	161.093	829.256
4	167.494	123.110	106.421	143.041	130.295	161.572	831.933
5	167.500	123.094	106.434	143.037	130.395	161.583	832.043
6	167.513	123.092	106.418	143.018	130.430	161.581	832.052
7	167.516	123.090	106.415	143.014	130.425	161.568	832.028
8	167.516	123.088	106.414	143.007	130.429	161.572	832.026

Tabelle 4.12: Anzahl der Korrespondenzen (Punktpaare) pro Iterationsschritt k bei simultaner Orientierung

k	1250-1253	1250-1255	1250-1258	1253-1255	1253-1258	1255-1258	Gesamt	s_0
1	165.4	151.9	185.8	184.9	184.7	150.1	167.7	63.7
2	136.6	140.0	139.8	55.9	67.8	31.6	89.4	32.8
3	38.3	48.8	37.5	21.1	29.8	31.6	35.2	17.7
4	17.2	16.2	21.2	16.3	19.8	19.8	18.4	16.4
5	16.3	16.1	17.4	16.0	16.6	16.9	16.5	16.2
6	16.2	16.0	16.7	16.0	16.1	16.5	16.2	16.2
7	16.2	16.0	16.6	16.0	16.0	16.4	16.2	16.2
8	16.2	16.0	16.5	16.0	16.0	16.4	16.2	16.2

Tabelle 4.13: Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat der Punktpaare (\bar{a} ; siehe Abschnitt 4.2.1) in [mm] vor der jeweiligen Transformation bei simultaner Orientierung. In der Spalte ganz rechts ist jeweils der mittlere Fehler s_0 (ebenfalls in [mm]) nach der Transformation angegeben (lt. (4.40)).

Scan	1250	1255	1258
ω	0.0107 gon \pm 0.1 mgon	-0.0608 gon \pm 0.1 mgon	0.1970 gon \pm 0.1 mgon
φ	-1.0782 gon \pm 0.3 mgon	-2.0980 gon \pm 0.3 mgon	-2.3553 gon \pm 0.3 mgon
κ	0.0146 gon \pm 0.2 mgon	-0.1590 gon \pm 0.2 mgon	-0.1813 gon \pm 0.2 mgon
t_x	0.033 m \pm 0.1 mm	-0.120 m \pm 0.1 mm	-0.210 m \pm 0.1 mm
t_y	8.782 m \pm 0.1 mm	-10.681 m \pm 0.1 mm	-18.748 m \pm 0.1 mm
t_z	-0.479 m \pm 0.1 mm	0.341 m \pm 0.1 mm	0.656 m \pm 0.1 mm

Tabelle 4.14: Resultierende Transformationsparameter sowie deren mittlere Fehler (aus der Matrix (4.54)) bei simultaner Orientierung

Die in den Tabellen 4.11 und 4.14 angegebenen, aus der Ausgleichung geschätzten Genauigkeitsmaße sind selbstverständlich bei weitem zu optimistisch. Die Ursache dafür ist höchstwahrscheinlich die Nichtberücksichtigung von vorhandenen Korrelationen zwischen den (fik-

tiven Null-)Beobachtungen. Aussagekräftig ist hingegen jeweils der mittlere Fehler s_0 nach dem letzten Iterationsschritt.

Datensatz „Klagenfurt“

Dieser Datensatz besteht aus den beiden Scans SC_0833 (*master scan*; 167.537 Punkte) und SC_0834 (*slave scan*; 184.929 Punkte), welche im Betriebsmodus entsprechend Abbildung 2.3(d) unmittelbar hintereinander in gleicher Fahrtrichtung aufgenommen wurden. Im Vergleich zum Datensatz „Glasgow“ sind Punktdichte und Überlappungsbereich geringer, außerdem weist der erfasste Straßenbereich eine deutlich geringere Bebauung (und dies nur auf einer Straßenseite) sowie einen verhältnismäßig hohen Anteil an Vegetation auf. Mit Ausnahme der *patches* #11 und #12 (Litfassäulen) wurden alle *patches* in ebenen Bereichen gewählt (Abbildung 4.17).

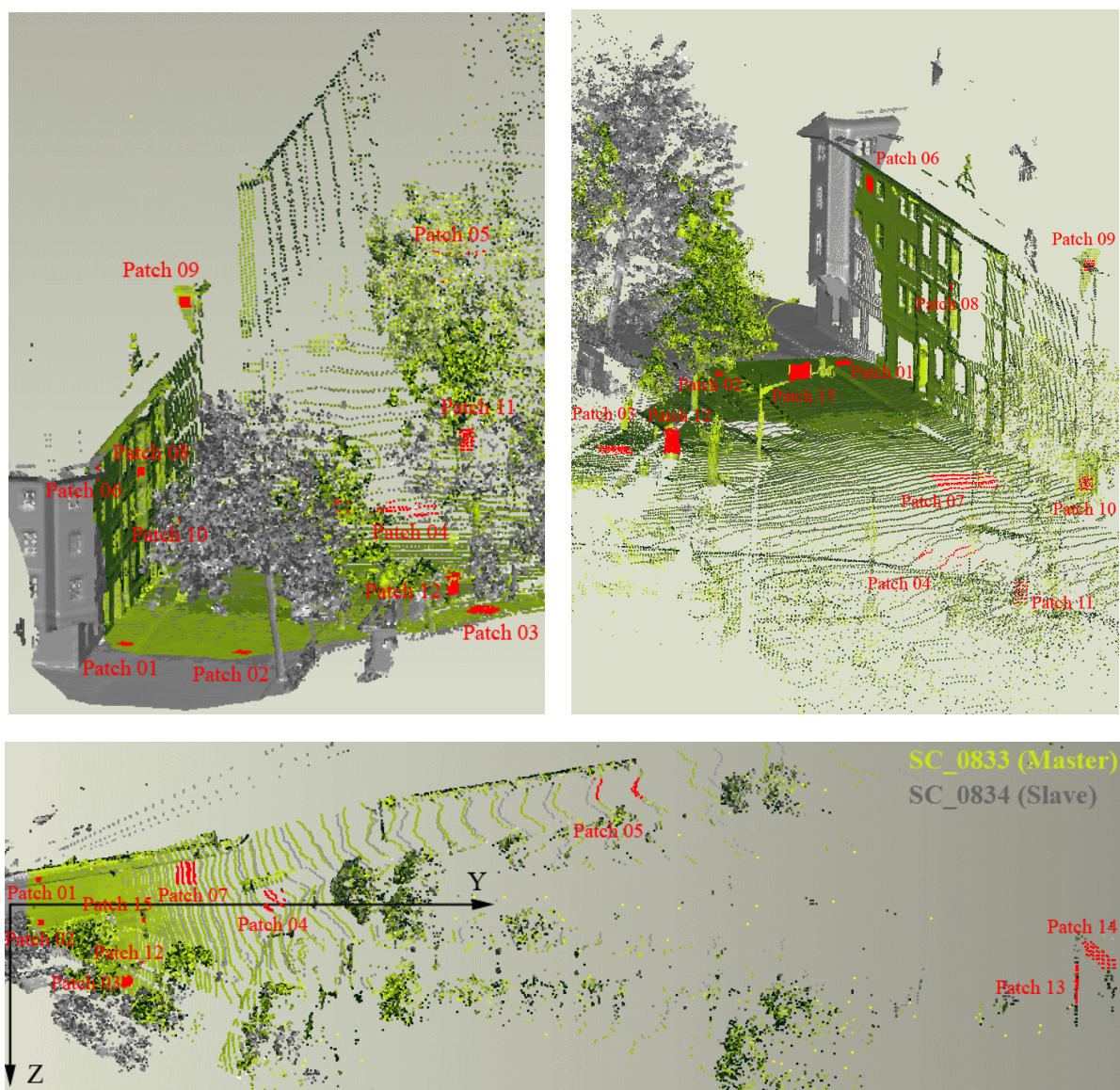


Abbildung 4.17: Datensatz „Klagenfurt“ mit den ausgewählten *patches*. Die *patches* #13 (Hausfront) und #14 (Hausdach) sind jeweils ca. 200 m vom Koordinatenursprung des Master-Scan entfernt.

Die Achsen des Scanner-Koordinatensystems sind analog zum Datensatz „Glasgow“ angeordnet. Als Näherungswerte für die Transformationsparameter des *slave scan* wurde $t_y^{(0)} = -14$ m sowie $t_z^{(0)} = 2$ m gewählt; die restlichen 4 Parameter erhielten wieder jeweils den Ausgangswert „0“.

Patch	1E	2E	3E	4E	5E	6E	7E	8E	9E	10E	11Z	12Z	13E	14E	15E
NW	46	6	99	78	124	209	22	535	522	539	213	165	589	44	610
RSP-S	17	5	65	277	751	3	190	38	124	32	16	18	131	1022	42
RSP-B	2	5	10	6	26	7	6	6	6	12	23	9	24	14	5
GS-S	Verschlechterung gegenüber Näherungswerten														
GS-B	3	6	9	57	163	6	38	6	11	4	7	10	17	206	3
Diss-S	2	6	7	6	17	2	3	6	5	6	7	6	7	10	4

Tabelle 4.15: Mittlerer Abstand der verbesserten Slave-Punkte zur Master-Fläche [mm].

Die Verwendung der Standard-Parameterwerte in RiSCAN PRO führt zwar lagemäßig (YZ-Ebene) gegenüber der Näherungstransformation zu einer Verbesserung der Ausrichtung; jedoch kommt es zu einer systematischen Verkippung, die sich vor allem in beträchtlichen Höhendifferenzen an den *patches* #5 (ca. 0.75 m) und #14 (ca. 1 m) äußert (siehe Tabelle 4.15). Mit anderen Parameterwerten lässt sich ein wesentlich besseres Ergebnis erzielen.

Mit Geomagic Studio kommt es bei Verwendung der Standard-Parameterwerten zu einer merklichen Verschlechterung im Vergleich zu den Näherungswerten. Mit anderen Parameterwerten lässt sich – was die Lage betrifft – eine erhebliche Verbesserung herbeiführen; jedoch weisen die an den horizontalen *patches* #4, #5, #7, und #14 ermittelten Höhendifferenzen auf eine systematischen Verkippung hin.

Das beste Ergebnis liefert in diesem Fall wieder der Diss-ICP-Algorithmus.

In den folgenden Tabellen sind einige Details aus dem Protokoll des Diss-ICP-Algorithmus zusammengefasst.

Die Tabelle 4.16 gibt wieder eine Übersicht über die Punktzahl vor der Vorverarbeitung, nach dem Planaritätsfilter sowie nach der voxel-basierten Ausdünnung (1dm-Voxels). In der letzte Zeile ist die Anzahl jener Punkte gegeben, die – gemeinsam mit ihren abgeschätzten Normalvektoren – für den eigentlichen ICP-Algorithmus verwendet werden.

Punktzahl	Scan_0833	Scan_0834
Original-Scan	167.537	184.929
nach Planaritäts-Filter	119.725 ($\approx 71\%$)	113.313 ($\approx 61\%$)
nach Ausdünnung	38.289 ($\approx 23\%$)	37.389 ($\approx 20\%$)

Tabelle 4.16: Punktzahl der Original-Scans sowie nach Planaritätsfilter und nach Ausdünnung

Die Tabelle 4.17 enthält die Anzahl der durchgeführten Iterationsschritte k sowie – pro Schritt – die folgenden Werte: die Anzahl der ermittelten Punktpaare (Korrespondenzen) N , die Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat der Punktpaare (\bar{a} ; siehe Abschnitt 4.2.1) vor der Transformation, sowie den mittleren Fehler s_0 nach der Transformation (lt. (4.40)).

k	N	\bar{a} [mm]	s_0 [mm]
1	1.456	144.7	46.2
2	1.736	69.6	49.2
3	2.170	100.0	27.1
4	2.478	17.9	16.9
5	2.474	16.7	16.7

Tabelle 4.17: Statistik für Orientierung von Scan 0834 zu Scan 0833. Anzahl N der Punktpaare (Korrespondenzen), Quadratwurzel aus dem mittleren Abstandsquadrat der Punktpaare (\bar{a} ; siehe Abschnitt 4.2.1) vor der Transformation, sowie mittlerer Fehler s_0 nach der Transformation (lt. (4.40)).

Rotation	Translation
$\omega = 0.4111 \text{ gon} \pm 3.9 \text{ mgon}$	$t_x = -0.044 \text{ m} \pm 1.3 \text{ mm}$
$\varphi = 0.3385 \text{ gon} \pm 4.7 \text{ mgon}$	$t_y = -14.556 \text{ m} \pm 0.7 \text{ mm}$
$\kappa = -0.1550 \text{ gon} \pm 2.6 \text{ mgon}$	$t_z = 2.136 \text{ m} \pm 1.7 \text{ mm}$

Tabelle 4.18: Resultierende Transformationsparameter sowie deren mittlere Fehler (aus der Matrix (4.54)) bei simultaner Orientierung

Die Tabelle 4.18 enthält die resultierenden Transformationsparameter sowie deren mittlere Fehler. Zu den aus der Ausgleichung geschätzten Genauigkeitsmaßen ist wiederum anzumerken, dass diese aufgrund nicht berücksichtigter Korrelationen zwischen den Beobachtungen zu optimistisch sind.

Fazit

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten adaptierten ICP-Algorithmus können für TLS-Daten, die mit dem Aufnahme-System *CityGRID Scanner* erfasst wurden, sehr gute Ergebnisse erzielt werden; auch im Falle anderer Sensoren bzw. Anwendungen liefert dieser Algorithmus gute Ergebnisse. Zu den beiden anderen Algorithmen ist zu sagen, dass mit anderen Parameterwerten möglicherweise noch durchaus Verbesserungen erzielt werden könnten, da bei der Evaluierung eine systematische Suche nach den „optimalen“ Werten für jeden Datensatz aufgrund der vielen Parameter im gegebenen Zeitrahmen nicht durchführbar war. Nichtsdestotrotz liefern die durchgeführten Untersuchungen zumindest grobe Anhaltspunkte dafür, in welchen Fällen Probleme auftreten können bzw. in welchen Fällen die Wahl der Parameterwerte einen großen Einfluss auf das Endresultat hat.

4.3 Georeferenzierung bei der Aufnahme des Straßenraumes

Mit dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen ICP-Algorithmus können mehrere terrestrische Laserscanneraufnahmen relativ zueinander orientiert werden. Existieren zusätzliche Beobachtungen (z.B. satellitengestützte Positionsbeobachtungen oder Messungen mit Neigungssensoren), welche die Laserscannerdaten mit einem übergeordneten Koordinatensystem in Beziehung setzen, ist mit diesem Algorithmus auch die Bestimmung der absoluten Orientierungsparameter (Georeferenzierung) möglich.

In diesem Abschnitt wird eine Strategie für den in Abschnitt 2.2 erwähnten Stop-and-go-Modus zur Aufnahme des Straßenraums (siehe Abbildung 2.3(d) und (e)) vorgestellt, bei der nicht notwendigerweise solche zusätzlichen Beobachtungen vorliegen müssen; auch die Verteilung und Einmessung retro-reflektierender Zielmarken ist bei diesem Verfahren nicht erforderlich. Dafür sei jedoch ein Bestandsplan des Interessensgebietes vorhanden, welcher auch Höheninformation enthält.

Die Strategie umfasst die folgenden Schritte:

- (1) Einteilung der Scanpositionen in Gruppen
- (2) Relative Orientierung der Scans innerhalb jeder Gruppe mittels ICP-Algorithmus
- (3) Einführung künstlicher „Ankerpunkte“ als Verknüpfungspunkte zwischen Scans gleicher Gruppe, basierend auf den zuvor erhaltenen relativen Orientierungsparametern
- (4) Interaktive Selektion geeigneter Passinformation (Passgerade) aus dem Bestandsplan
- (5) Absolute Orientierung der Scanpositionen durch Beobachtung von auf den Passgeraden liegenden Punkten in den Photos

Somit erfolgt die *relative* Orientierung der Scanpositionen gruppenweise mittels 3D-Matching der Scans, deren *absolute* Orientierung hingegen mittels Linienphotogrammetrie, wobei die Ergebnisse der relativen Orientierung in Form fiktiver Beobachtungen berücksichtigt werden.

Im folgenden wird auf die einzelnen Schritte näher eingegangen.

4.3.1 Relative Orientierung

Gruppieren der Scanpositionen

Die Einteilung der Scanpositionen in mehrere Gruppen ist empfehlenswert bzw. erforderlich, weil es ansonsten (bei simultaner Orientierung *aller* Scanpositionen) zu folgenden Problemen kommen kann:

- Die beim Stop-and-go-Modus (siehe Abbildung 2.3(d) und (e)) kollineare Aufnahmeanordnung bewirkt bei Anwendung des ICP-Algorithmus – ohne Stützung durch zusätzliche Beobachtungen – eine ungünstige Fortpflanzung von Fehlern der Orientierungsparameter, die erst bei der absoluten Orientierung ans Licht kommt. Die durch die simultane Orientierung bewirkte Aufteilung der Fehler kommt hier nur beschränkt zur Geltung, da nur für jene Scan-Paare Korrespondenzen gefunden werden, deren Scan-Positionen eine gewisse räumliche Nähe zueinander aufweisen (d.h. nur einige Scan-Positionen zwischen ihnen liegen). Die Matrix der Überlappungen zwischen zwei Scans weist somit eine bandförmige Struktur auf. Dieses Band ist in innerstädtischen Gebieten i.A. breiter als in locker verbauten Gebieten, da auch weit entfernte Gebäudefassaden aufgrund ihrer Höhe genügend Laserscannerpunkte enthalten, die zur Verknüpfung der Scans beitragen.
- Die simultane Haltung aller Daten im Arbeitsspeicher ist nicht mehr möglich; daher müssen diese öfters von der Festplatte eingelesen werden, was aufgrund der üblicherweise großen Datenmengen zu deutlich längeren Rechenzeiten führt.

Die Größe der Gruppen (d.h. Anzahl der Scanpositionen innerhalb einer Gruppe) ist in Abhängigkeit von den folgenden Faktoren zu wählen:

- Anzahl überlappender Scanpaare (Breite des Bandes in der Überlappungsmatrix)
- Größe der Überlappungsbereiche zwischen den Scans
- Auflösung der Scans in den Überlappungsbereichen
- Gegebenheiten des aufzunehmenden Bereiches (Bebauungsgrad, Gebäudehöhen, Vegetationsanteil, Verteilung der Flächennormalen)

Alle genannten Punkte sind ausschlaggebend für die Anzahl der ermittelten Korrespondenzen. Speziell vom ersten Punkt hängt ab, in welchem Ausmaß sich die Scans im Zuge des simultanen ICP-Algorithmus untereinander verknüpfen lassen. Vom letztgenannten Punkt hängt die räumliche Verteilung der Punkte sowie jene der Normalvektoren (auf der Einheitskugel) ab, was entscheidend für die Qualität der ermittelten Orientierungsparameter ist. Aus diesem Grund können die Gruppen für dicht verbaute Gebiete mit hohen Gebäuden und Erkern größer als für locker verbaute Gebiete mit wenigen niedrigen Gebäuden (z.B. Einfamilienhäuser) gewählt werden. Objektoberflächen, deren Flächennormalen in etwa parallel zur Aufnahme-richtung sind, lassen sich noch aus größeren Entfernungen mit akzeptablem Punktabstand am Objekt erfassen. Sie liefern somit wertvolle Verknüpfungsinformation in Längsrichtung.

Für locker bebaute Gebiete hat sich eine Gruppengröße von 10 bis 20 Scanpositionen bewährt; in innerstädtischen Gebieten kann man mit größeren Gruppen arbeiten.

Jede Gruppe repräsentiert einen bestimmten Straßenabschnitt. Bei der Einteilung der Scanpositionen in Gruppen ist zu beachten, dass an den beiden Enden des entsprechenden Straßenabschnittes jeweils eine ausreichende Anzahl an Passelementen im Bestandsplan vorhanden

ist. Umgekehrt lassen sich Bereiche, in denen keine geeigneten Passelemente verfügbar sind, durch geschickte Wahl der Gruppen überbrücken (siehe Abbildung 4.18).

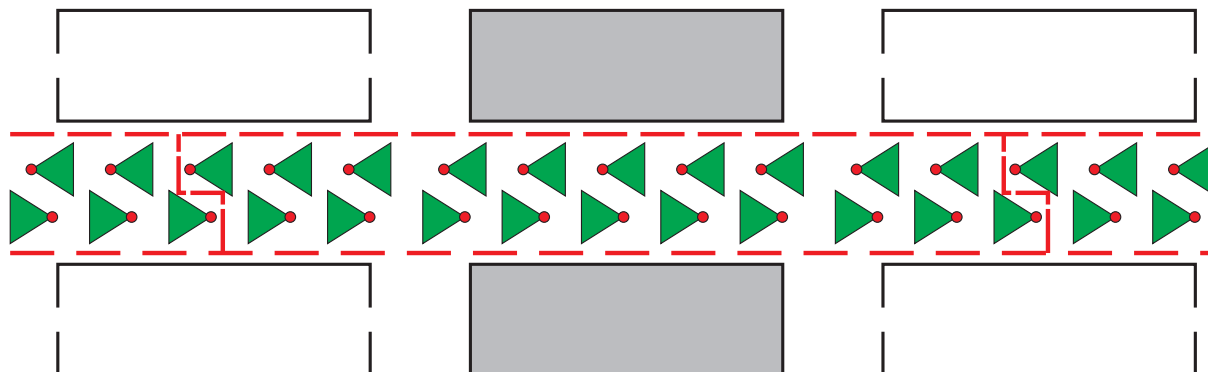


Abbildung 4.18: Einteilung der Scan-Positionen in Gruppen. Durch eine geschickte Einteilung können eventuell auftretende Bereiche mit mangelnder bzw. ohne Passinformation (hier grau dargestellt) überbrückt werden.

Anwenden des ICP-Algorithmus innerhalb jeder Gruppe

Der ICP-Algorithmus sowie die notwendigen Vorverarbeitungsschritte wurden ausführlich in Abschnitt 4.2 behandelt. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 4.2.4 untersuchten Mobile-Mapping-Datensätzen mit 4 bzw. 2 Scans müssen bei den hier genannten Gruppengrößen (10 bis 20 Scans oder sogar mehr) die Näherungswerte vor der Anwendung des simultanen ICP-Algorithmus deutlich besser als auf Meter genau sein, da ansonsten sehr viele Iterationsschritte erforderlich sind oder der Algorithmus sogar zu falschen Ergebnissen führt. Deshalb ist es ratsam, sich zuerst bessere Näherungswerte zu beschaffen, indem die Scans beispielsweise mittels paarweisem ICP-Algorithmus sukzessive zum *master scan* (inklusive zu den bisher abgearbeiteten *slave scans*) orientiert werden.

Allerdings ist anzumerken, dass der streng simultane ICP-Algorithmus im Falle des in Abbildung 4.18 dargestellten Aufnahmemodus unter Umständen zu keiner Verbesserung bzw. sogar zu einer Verschlechterung der relativen Orientierung führen kann. Die Ursache dafür ist, dass sich nach Anwenden des simultanen Algorithmus für jede der beiden Fahrtrichtungen eine Teilgruppe bilden kann, innerhalb derer die Scans zwar eventuell besser als zuvor zusammenpassen, dies allerdings mit einer merklichen Verschlechterung der relativen Orientierung von Scans verschiedener Fahrtrichtung verbunden ist (vgl. Abschnitt 5.2). In diesem Fall ist die sequentielle Anwendung des ICP-Algorithmus (in einer sinnvollen Reihenfolge) zu bevorzugen.

Am Ende dieses Schrittes erhält man innerhalb jeder Gruppe für jeden *slave scan* die 6 Transformationsparameter bezüglich des *master scan*.

4.3.2 Absolute Orientierung

Einführung künstlicher Verknüpfungspunkte zwischen den Scans

Basierend auf den im vorigen Schritt ermittelten Parametern der relativen Orientierung werden für jeden Scan künstliche Verknüpfungspunkte („Ankerpunkte“) erzeugt, diese in das Koordinatensystem des jeweiligen *master scan* transformiert, und schließlich in die Sensor-Koordinatensysteme der anderen (benachbarten) Scans derselben Gruppe rückgerechnet. Durch Umwandeln der kartesischen Koordinaten in Polarkoordinaten lassen sich für jeden Ankerpunkt fiktive Beobachtungen (Horizontalwinkel, Vertikalwinkel, Distanz) in den Scans erzeugen (Abbildung 4.19). Ziel dieser Ankerpunkte ist es, die Ergebnisse der relativen Orientierung im Zuge der hybriden Gesamtausgleichung (dazu später) zu berücksichtigen. Die Anzahl der Ankerpunkte sowie deren räumliche Verteilung ist willkürlich – sie brauchen nicht einmal notwendigerweise auf der gescannten Objektoberfläche liegen. Je nach Wahl der Genauigkeiten dieser Ankerpunktbeobachtungen bleiben die Relativorientierungen der Scans innerhalb einer Gruppe mehr oder weniger erhalten. Bei Wahl sehr hoher Genauigkeiten bzw. Gewichte haben diese Relativorientierungen den Charakter von „harten *constraints*“ (streng zu erfüllende Bedingungen); in letzterem Fall reduziert sich die absolute Orientierung auf die Einpassung der in sich starren Scan-Gruppen in das übergeordnete Referenzsystem.

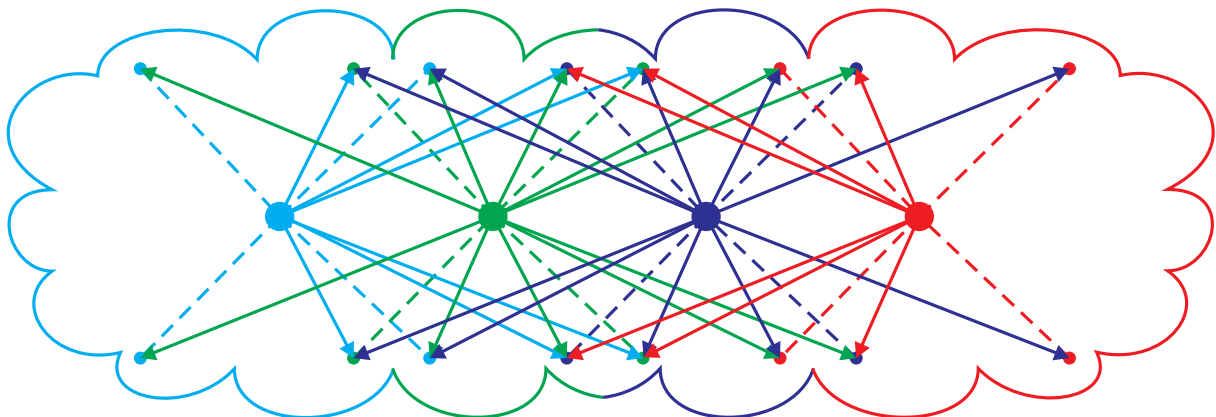


Abbildung 4.19: Verknüpfen der Scan-Punktewolken einer Gruppe mit Hilfe von künstlichen Ankerpunkten. Strichlierte Linien repräsentieren Beobachtungen zu den im jeweils „eigenen“ Scan erzeugten Punkten, die durchgezogenen Linien jeweils Beobachtungen zu den in anderen Scans erzeugten Punkten.

Selektion von Passinformation aus dem Bestandsplan

Als Passinformation zur absoluten Orientierung eignen sich vor allem gerade Linien bzw. Liniensegmente (Passgerade), da diese meist zur Beschreibung von Objekten im Straßenraum (Gebäudekanten, Gehsteigkanten etc.) ausreichen und dementsprechend häufig im Bestandsplan vorhanden sind. Die Vorteile von Passgeraden gegenüber Passpunkten sind folgende:

- Aufgrund von Sichthindernissen (Verkehr, parkende Autos, Bäume, etc.) kann es relativ häufig zu Verdeckungen von einzelnen Punkten kommen, insbesondere weil diese aus

dem Bestandsplan stammenden Punkte üblicherweise auf Straßenniveau liegen. Hingegen ist es vergleichsweise unwahrscheinlich, dass diese Verdeckungen gesamte Linien-segmente betreffen. Somit gestaltet sich die Orientierung mit Linien flexibler, als dies mit Punkten der Fall ist.

- Viele im Bestandsplan enthaltene Punkte sind Zwischenpunkte von Polygonen, welche in der Natur keine besondere Bedeutung haben, sondern nur Geradensegmente begrenzen, die im Zuge der Aufnahmegeneralisierung zur Approximation eines linienhaftes Objekts verwendet wurden (z.B. Gehsteigrand). Während die Punkte in den Photos nicht eruiert und somit nicht identifiziert werden können, lassen sich die Geradensegmente hingegen als Passinformation verwenden.
- Im Bestandsplan enthaltene Punkte, die am unteren Ende von vertikalen Linien (z.B. Gebäudekanten) aufgenommen wurden, können – auch im Falle fehlender Höhenkoten (Lagepasspunkte) – als vertikale Passgerade verwendet werden. Somit können auch weiter oben (mehrere) auf den Gebäudekanten liegende Punkte in den Photos beobachtet und den entsprechenden Passgeraden zugeordnet werden. Dadurch lässt sich eine erhöhte Redundanz sowie eine Stabilisierung des Blockes erzielen.

Wir beschränken uns im folgenden auf die Verwendung von Passgeraden¹².

Absolute Orientierung der Photos durch Beobachtung von auf den Passgeraden liegenden Punkten

Die Punkte auf den Passgeraden werden nicht in den Scans, sondern in den entsprechenden Photos beobachtet (Abbildung 4.20); die Messungen erfolgen dabei manuell. Die Mounting Calibration (siehe Abschnitt 3.3.2) wird dabei als bekannt und innerhalb der Messkampagne als konstant vorausgesetzt.

Die folgenden beiden Typen von Passgeraden werden verwendet:

- Allgemeine Passgerade (definiert als Verbindungsgerade durch zwei Vollpasspunkte)
- Vertikale Passgerade (definiert durch einen Lage- oder Vollpasspunkt und die Richtung der Z-Achse)

Die gemessenen Punkte müssen selbstverständlich den jeweiligen Passgeraden zugeordnet werden; dies lässt sich in der Praxis durch (genäherte) Rückprojektion der Passgeraden in die Photos erheblich erleichtern. Nach Abschluss der Messungen gibt es schließlich zu jeder Passgerade eine Menge von beobachteten Bildkoordinaten-Paare.

Bei der absoluten Orientierung mittels Passgeraden treten somit folgende Beobachtungskategorien auf:

¹²Passpunkte lassen sich in wohlbekannter Weise behandeln – auf sie wird daher nicht eingegangen.

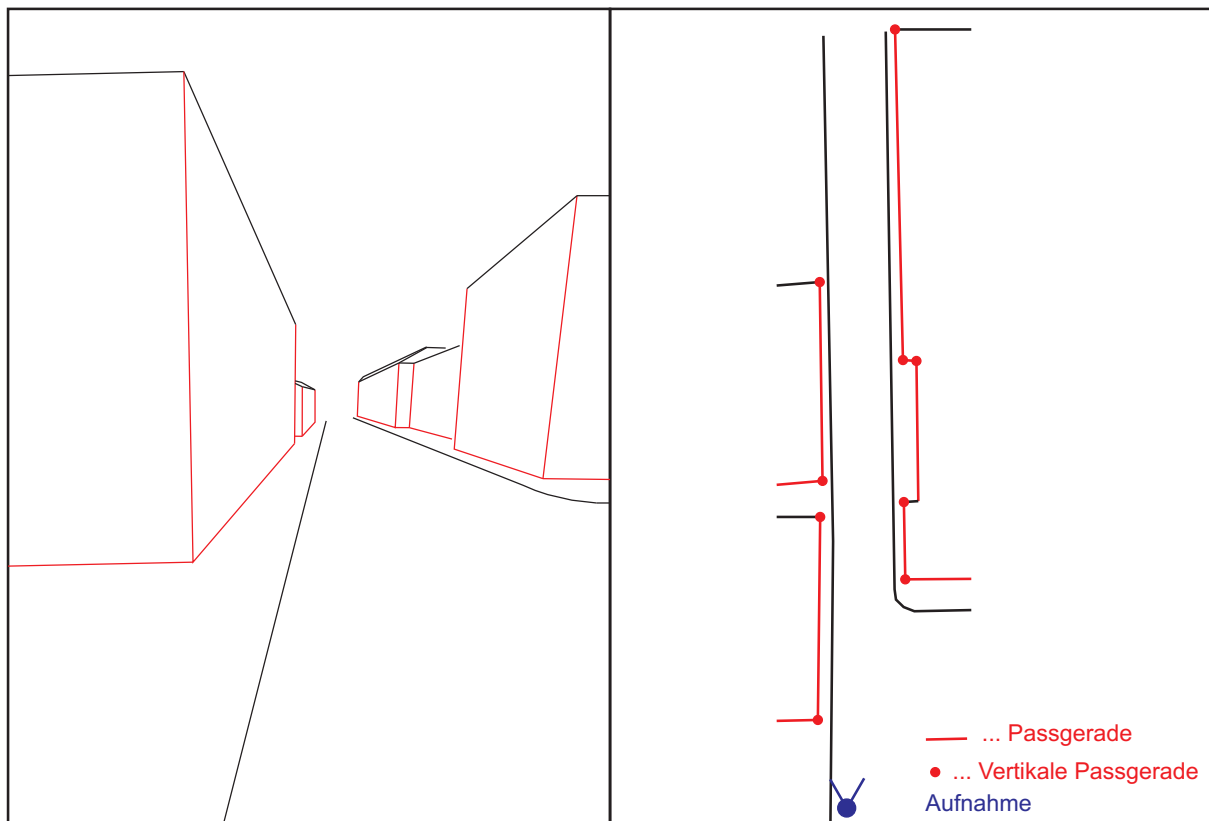


Abbildung 4.20: Verwendung von Passgeraden zur absoluten Orientierung der Scanpositionen. Darstellung im Photo (links) und im Bestandsplan (rechts).

- Beobachtete 3D-Koordinaten der Passpunkte („weiche Lagerung“)
- Beobachtete Bildkoordinaten
- Fiktiv beobachtete Null-Abstände von Punkten zu Geraden

Die im letzten Punkt genannten Beobachtungen werden im folgenden – in Anlehnung an die im Programmsystem ORIENT/ORPHEUS ([KAGER 2000], [KAGER et al. 2002]) bzw. in [KRAUS 1996] verwendete Terminologie – als sogenannte *Gestalt*-Beobachtungen bezeichnet. Damit sind i.A. fiktive Beobachtungen von geometrischen Annahmen über die Anordnung von Objektpunkten gemeint; d.h. es soll bei der Ausgleichung das a-priori-Wissen berücksichtigt werden, dass mehrere Objektpunkte auf einer gemeinsamen analytisch beschreibbaren Fläche bzw. Kurve („Gestalt“) liegen. Weiters lassen sich Beziehungen wie Parallelitäten und Orthogonalitäten zwischen solchen Gestalten formulieren, was in unserem Fall jedoch nicht erforderlich ist. Eine Gestalt umfasst neben ihrer analytischen Beschreibung eine Menge von ihr zugeordneten Punkten (sowohl Passpunkte als auch Neupunkte).

Eine Gerade lässt sich im System ORIENT beispielsweise durch die folgenden 4 unabhängigen Parameter als Gestalt definieren:

- 2 Drehwinkel zur Festlegung der *Richtung* der Geraden

- 2 Translationsparameter zur Festlegung der *Position* der Geraden

Für die Gestalt wird ein lokales $x_G y_G z_G$ -Koordinatensystem definiert (siehe Abbildung 4.21); die z_G -Achse wird dabei in die auszugleichende Gerade gelegt. Deren Richtung lässt sich durch den Primär- und den Sekundär-Drehwinkel (je nach Parametrisierung; z.B. ω und φ bzw. α und ζ) beschreiben. Der Tertiär-Drehwinkel κ um die z_G -Achse ist nicht relevant und kann beliebig gewählt werden. Die Koordinaten des Bezugspunktes P_0 im übergeordneten System sind ebenfalls beliebig wählbar; derselbe im lokalen System bezeichnete Punkt p_0 legt die $x_G y_G$ -Ebene des Gestalt-Koordinatensystems festgelegt, indem $z_{G,0} = 0$ gesetzt wird. Seine beiden anderen Koordinaten $x_{G,0}$ und $y_{G,0}$ entsprechen den beiden oben genannten Translationsparametern und sind im Rahmen der Ausgleichung gemeinsam mit den beiden Drehwinkeln zu bestimmen.

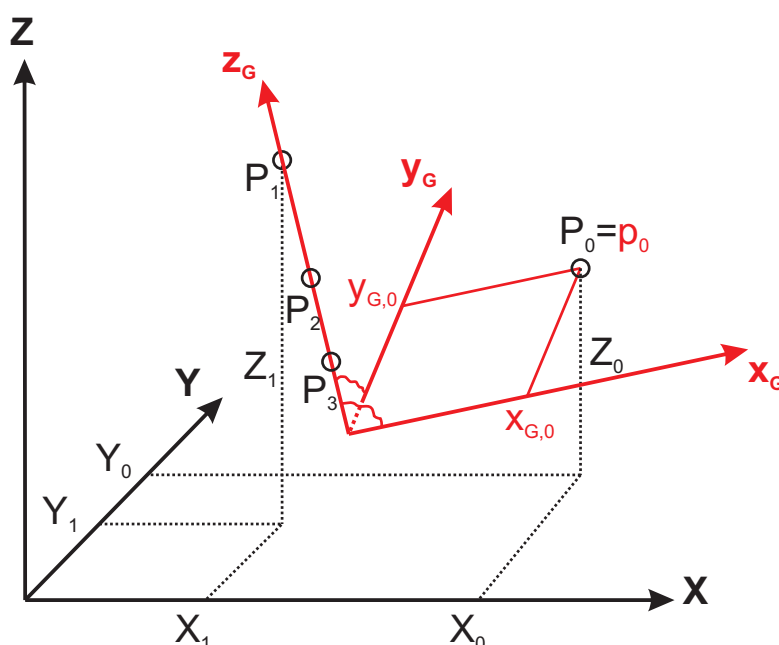


Abbildung 4.21: Passgerade entlang der z_G -Achse als Gestalt. Nach [KRAUS 1996].

Die auszugleichende Gerade kann als Schnittgerade der xz - und yz -Ebene aufgefasst werden. Für jeden Punkt P_i auf der Geraden lassen sich daher fiktive Beobachtungen des Abstands „0“ von jeder dieser beiden Koordinatenebenen formulieren.

Die entsprechenden Beobachtungsgleichungen lauten:

$$\begin{aligned} 0 + v_{x_G} &= x_{G,0} + r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0) \\ 0 + v_{y_G} &= y_{G,0} + r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0) \end{aligned} \quad (4.58)$$

Dabei sind r_{jk} die Elemente der entsprechenden Drehmatrix \mathbf{R} .

Im Spezialfall einer vertikalen Passgeraden degeneriert die Drehmatrix \mathbf{R} zur Einheitsmatrix und die Gleichungen (4.58) vereinfachen sich zu:

$$\begin{aligned}0 + v_{x_G} &= x_{G,0} + X - X_0 \\0 + v_{y_G} &= y_{G,0} + Y - Y_0\end{aligned}\tag{4.59}$$

In diesem Fall ist die Geraden-Gestalt durch die beiden Translationsparameter eindeutig bestimmt.

Der oder die Passpunkte, welche eine Passgerade definieren, liefern jeweils 2 fiktive Beobachtungen laut Gleichung (4.58) bzw. (4.59). Weiters existieren 3 (Vollpasspunkt) bzw. 2 (Lagepasspunkt) Beobachtungen für ihre zu bestimmenden Objektkoordinaten.

Jeder auf der Passgeraden befindliche und in einem Photo beobachtete Punkt liefert 4 Beobachtungen (2 fiktive Beobachtungen laut Gleichung (4.58) bzw. (4.59) sowie 2 Bildkoordinaten) gegenüber 3 Unbekannten (Objektkoordinaten), d.h. eine Redundanz von 1.

Im Falle einer „harten Lagerung“ (Annahme fehlerfreier Passpunkte) werden die jeweiligen Gestaltparameter zu Beginn aus den Passpunkten bestimmt und anschließend als Konstante behandelt. Bei der „weichen Lagerung“ (Passpunkte als fehlerbehaftete Beobachtungen) werden die Gestaltparameter zwar zunächst ebenfalls aus den Passpunkten bestimmt, jedoch in weiterer Folge als unbekannte Parameter in die Ausgleichung eingeführt.

Um ein *einzelnes* Bild mittels Passgeraden orientieren zu können, sind zumindest 6 Punkte zu messen, die auf 3 verschiedenen Passgeraden liegen. Dies ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung.

Um alle 3 Translationsparameter eindeutig bestimmen zu können, dürfen die verwendeten Passgeraden nicht alle parallel zueinander sein und einander auch nicht alle in einem gemeinsamen Punkt schneiden, da ansonsten noch eine beliebige Verschiebung des Aufnahmeortes in Richtung der parallelen Geraden bzw. entlang der Verbindungsgerade durch Aufnahmeort und Schnittpunkt (unbestimmte Entfernung!) möglich wäre. Drei von einer Hausecke ausgehende Kanten als Passgerade reichen somit zur Einzelbildorientierung alleine nicht aus.

Des Weiteren kann es zu einer differentiellen Unbestimmtheit einer oder mehrerer Drehwinkel aufgrund gefährlicher Örter 2. Art kommen [STRUNZ 1993]; in der Praxis – und speziell in dem hier vorliegenden Anwendungsfall – kommen solche Konstellationen jedoch kaum vor.

Allerdings ist in unserem Fall gar nicht die Orientierung *einzelner* Bilder erforderlich, sondern die Einpassung einer relativ zueinander orientierten *Gruppe* von (an den einzelnen Scanpositionen aufgenommenen) Bildern ins Referenzkoordinatensystem. Deshalb müssen bei weitem nicht in *jedem* Bild Punkte auf Passgeraden beobachtet werden, sondern es reichen entsprechende Beobachtungen an den beiden Enden der Gruppe aus.

Abschließend erfolgt die Bestimmung aller unbekannt Parameter durch eine hybride Gesamtausgleichung.

4.4 Georeferenzierung bei der dynamischen Fassadenaufnahme

Der dynamische Modus wurde bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt; dabei wird – ähnlich einem Bildflug – eine Bildsequenz von einer der beiden straßenseitigen Fassaden aufgenommen. Wird dabei zusätzlich der Laserscanner im Zeilen-Modus betrieben, lassen sich horizontale Profile der Fassade gewinnen. Zur Georeferenzierung können Navigationssensoren (z.B. satellitengestütztes Positionierungssystem GPS, Inklinometer) verwendet werden. Retroreflektierende Zielmarken sind nicht erforderlich.

Die Strategie umfasst – wie im Falle des Stop-and-go-Modus – zwei aufeinanderfolgende Stufen: relative und absolute Orientierung. Auch hier erfolgt für die relative Orientierung der Bilder aufgrund ihrer üblicherweise hohen Anzahl eine Unterteilung in kleinere handhabbare Bildsequenzen, die im ersten Schritt unabhängig voneinander bearbeitet werden.

Zunächst folgt ein Abschnitt, der sich mit der automatischen relativen Orientierung von Bildsequenzen mittels merkmalsbasierter Zuordnung befasst. Dabei wird auch auf praktische Erkenntnisse eingegangen, die im Zuge der Evaluierung eines bestehenden Systems gewonnen wurden. Anschließend wird eine Strategie zur Georeferenzierung vorgeschlagen, bei der satellitengestützte Positionsbeobachtungen sowie Inklinometerbeobachtungen verwendet werden.

4.4.1 Automatische relative Orientierung von Bildsequenzen

Für die automatische relative Orientierung von Bildsequenzen existieren bereits einige Methoden, die von Algorithmen aus der Computer Vision Gebrauch machen (z.B. [BAUER et al. 2004], [LÄBE und FÖRSTNER 2006]). Die Verfahren setzen dabei die Kamerakalibrierung als (zumindest näherungsweise) bekannt voraus. Falls die Kamerakalibrierung bekannt ist, bietet es sich an, die Bilder vorab von der Verzeichnung zu befreien, d.h. die Bildmatrizen jeweils so umzubilden, dass streng zentralperspektivische Abbildungen angenommen werden können. Näherungswerte für die Orientierungsparameter werden nicht benötigt; lediglich die Reihenfolge der Bilder wird als bekannt vorausgesetzt.

Im wesentlichen werden bei diesen Methoden die 3 folgenden Schritte durchgeführt:

- (1) Merkmalsextraktion in jedem Bild
- (2) Relative Orientierung von aufeinanderfolgenden Bildern der Sequenz durch paarweises Bild-Matching
- (3) Zusammensetzen der relativ orientierten Bildpaare zu einer Gesamtsequenz

Die einzelnen Schritte werden nun kurz erläutert.

Merkmalsextraktion

Im ersten Schritt werden bestimmte Merkmale in jedem Bild extrahiert. Dies können sogenannte Interessenspunkte (*Points of Interest*) sein: Dies sind markante Punkte im Bild, die mit Hilfe eines geeigneten Operators (*Interest-Operator*) detektiert werden können und bestimmte Merkmale aufweisen, die sich mit Hilfe von sogenannten Deskriptoren beschreiben lassen.

Ein Beispiel dafür sind die sogenannten *Harris-Ecken* ([HARRIS und STEPHENS 1988]), welche auf Basis von Grauwertgradienten detektiert werden, wobei auch jeweils ein Maß für die Stärke („Ausgeprägtheit“) der Ecke bestimmt wird. Für die relative Orientierung zweier Bilder mit deutlich unterschiedlicher Aufnahmeentfernung ist dieser Operator jedoch nicht geeignet, da dieser nicht maßstabsinvariant ist.

Mit dem Lowe-Operator ([LOWE 2004]) lassen sich Punkte mit rotations- und maßstabsinvarianten Deskriptoren – sogenannte SIFT-Merkmale (*Scale Invariant Feature Transform*) – extrahieren. Diese werden jeweils in einem Merkmalsvektor gespeichert und später als Basis für das Bild-Matching verwendet.

Neben den Interessenspunkten lassen sich – ausgehend von extrahierten Liniensegmenten – auch die Fluchtpunkte detektieren. Eine Methode dafür hat [ROTHER 2000] angegeben.

Relative Orientierung von Bildpaaren mittels Matching

In diesem zweiten Schritt erfolgt die paarweise Zuordnung von Punkten, deren Merkmale im Merkmalsraum eine geringe Distanz aufweisen. Mit Hilfe des 5-Punkt-Algorithmus ([NISTÉR 2004]) lässt sich die relative Orientierung der zwei Kamerapositionen, welche 5 Freiheitsgrade aufweist, auf Basis von 5 homologen Punkten bestimmen. Um eine robuste Lösung zu erzielen, kommt dabei der RANSAC-Algorithmus ([FISCHLER und BOLLES 1981]) zum Einsatz. Ausgehend von 5 zufällig ausgewählten Zuordnungen (*sample*) werden jeweils Hypothesen aufgestellt, welche gegenüber allen anderen Zuordnungen unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Komplanaritätsbedingungen überprüft werden. Jenes *sample*, das durch die anderen Zuordnungen die höchste Bestätigung (*support*) erhält, wird schließlich akzeptiert.

Falls im vorigen Schritt Fluchtpunkte detektiert wurden, lassen sich – basierend auf deren Zuordnung – die 5 Parameter der relativen Orientierung auch auf andere Weise bestimmen (für eine detaillierte Beschreibung siehe [KLAUS et al. 2002]).

Zusammensetzen der relativ orientierten Bildpaare zu einer Gesamtsequenz

Die relativ orientierten Bildpaare werden schließlich zu einer Sequenz zusammengesetzt. Dabei kann für jeweils 3 Bilder eine Konsistenzüberprüfung durchgeführt werden, da die beiden folgenden Bedingungen zu erfüllen sind ([TRAUTWEIN et al. 1999]):

$$\mathbf{R}_{ij}\mathbf{R}_{jk} = \mathbf{R}_{ik} \quad (4.60)$$

$$\alpha\mathbf{t}_{ij} + \beta\mathbf{R}_{ij}\mathbf{t}_{jk} = \mathbf{t}_{ik} \quad \text{mit } \alpha, \beta \neq 0 \quad (4.61)$$

Die erste Bedingung besagt, dass die aus den beiden nacheinander ausgeführten Relativedrehungen R_{jk} (Drehung vom (Kamerakoordinaten-)System k ins System j) und R_{ij} (Drehung vom System j ins System i) resultierende Gesamtdrehung der Relativedrehung R_{ik} (Drehung vom System k ins System i) entsprechen muss.

Die zweite Bedingung besagt, dass die drei (alle im selben System vorliegenden) relativen Translationsvektoren linear abhängig – d.h. komplanar – sein müssen.

Die 3 Translationskomponenten und die 3 Drehwinkel eines ausgewählten Bildes der Sequenz werden (jeweils mit „0“) festgehalten. Um außerdem den (unbestimmten) Maßstab der gesamten Sequenz festzulegen, wird in der Regel die Basislänge für ein bestimmtes Bildpaar willkürlich mit „1“ angenommen. Die anderen Basislängen werden anschließend relativ zu dieser Einheitsbasislänge bestimmt.

Im Zuge der Sequenzbildung lassen sich etwaige grobe Zuordnungsfehler des vorigen Schrittes eliminieren. Weiters kann eine sequentielle Kleinste-Quadrate-Optimierung der relativen Orientierungsparameter bezüglich der Rückprojektionsfehler korrespondierender Punkte durchgeführt werden ([KLAUS et al. 2002]).

Eine strenge Bündelblockausgleichung wäre zwar bereits hier denkbar; jedoch wird in der Regel erst im Zuge der absoluten Orientierung eine hybride Gesamtausgleichung durchgeführt.

Praktische Erfahrungen mit der automatischen relativen Bildorientierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das am Kompetenzzentrum für Virtual Reality und Visualisierung ([VRVIS 2007]) entwickelte System MetropoGIS ([KLAUS et al. 2002]) hinsichtlich der Verlässlichkeit der automatischen relativen Bildorientierung untersucht. Dies erfolgte durch eine Simulation des dynamischen Betriebsmodus des *CityGRID Scanner*, indem Bildsequenzen von straßenseitigen Fassaden manuell erzeugt wurden.

Im folgenden wird auf die dabei gewonnenen Erkenntnisse kurz eingegangen.

Wir beschränken uns hier auf Bildsequenzen innerhalb *einer* Straße, d.h. mit einer näherungsweise geradlinigen (virtuellen) Fahrzeugtrajektorie. Der für korrekte Ergebnisse erforderliche Überlappungsgrad benachbarter Bilder ist in erster Linie von den Eigenschaften der aufgenommenen Fassadenstruktur abhängig. In den meisten Fällen ist eine 3-fache bis 5-fache (66%-ige bis 80%-ige) Überlappung ausreichend. Allerdings können im Falle sich wiederholender Muster (z.B. nahezu identische vertikale Fensterreihen) viele Fehlzuordnungen und in weiterer Folge falsche Relativorientierungen auftreten, nämlich dann, wenn das Abtasttheorem nicht erfüllt ist, d.h. die Aufnahmebasis b größer oder gleich der Hälfte der Breite λ des sich wiederholenden Musters ist (siehe Abbildung 4.22).

Im Falle von Fassaden mit texturarmen Oberflächenbereichen kann es unter Umständen notwendig sein, von genäherten Senkrechtaufnahmen abzurücken, um stattdessen durch Schrägaufnahmen größere Bereiche der Fassade pro Bild erfassen zu können, um eine für die Bildzuordnung ausreichende Anzahl an Merkmalen extrahieren zu können.

Naturgemäß sind konstante Lichtverhältnisse – insbesondere diffuses Licht – für die Aufnahme wünschenswert. Stark wechselnde Lichtverhältnisse, Schatten sich bewegender Objekte, Reflexionen oder gar die Abbildung der Sonne im Bild beeinträchtigen die Qualität des Matching-Ergebnis mitunter erheblich. Im Falle konstanter Sonneneinstrahlung können sich hingegen mit Hilfe des Schlagschattens benachbarter statischer Objekte unter Umständen hilfreiche Merkmale in ansonsten texturarmen Bereichen der Oberfläche ergeben.

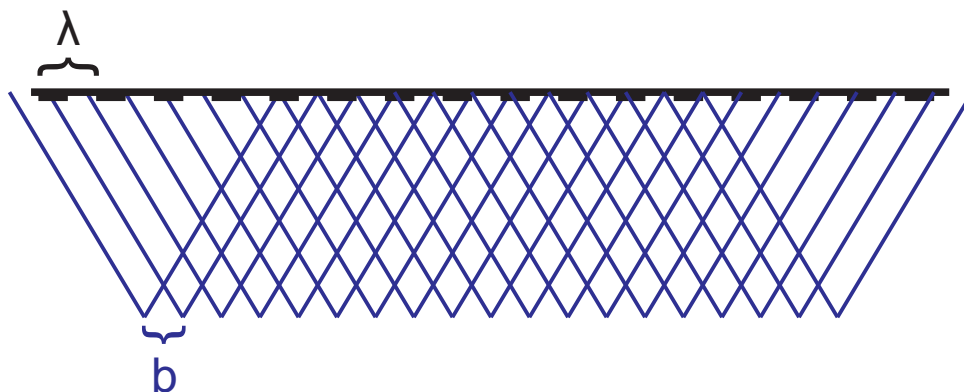


Abbildung 4.22: Bildsequenz einer Fassade mit sich im Abstand λ wiederholendem Muster (Grundriss). Trotz 7-facher (86%-iger) Überlappung wird das Abtasttheorem hier nicht erfüllt, da für die Basis $b = \frac{2}{3}\lambda \geq \frac{1}{2}\lambda$ gilt.

4.4.2 Georeferenzierung einer relativ orientierten Bildsequenz mit Hilfe von satellitengestützten Positions- und Inklinometerbeobachtungen

Die im vorigen Abschnitt erläuterte automatische relative Bildorientierung liefert folgende Zwischenergebnisse (die Bildanzahl der Sequenz sei n):

- Kamerapositionen (Bild-Projektionszentren) bezüglich des Kamerakoordinatensystems $S_{Kam,k}^*$ eines ausgewählten Bildes k ($1 \leq k \leq n$)
- Relativdrehungen der Kamerakoordinatensysteme bezüglich $S_{Kam,k}^*$
- 3D-Koordinaten der gematchten Punkte bezüglich $S_{Kam,k}^*$
- Bildkoordinaten der gematchten Punkte jeweils in zumindest 3 Bildern

Das System $S_{Kam,k}^*$ weist einen willkürlichen, nicht-metrischen Maßstab m auf (z.B. die Basislänge zu einem benachbartem Bild als Einheit), was durch das hochgestellte „*“-Symbol angedeutet werden soll.

Wir gehen im folgenden davon aus, dass für einige Aufnahmen der Sequenz zusätzlich Positionsbeobachtungen sowie Inklinometerbeobachtungen vorhanden sind.

Die Positionsbeobachtungen seien mittels eines satellitengestützten Positionierungssystem an einem Exzenter durchgeführt worden, der relativ zum Scannerkoordinatensystem als fest und

bekannt vorausgesetzt wird. Die Positionsbeobachtungen seien bereits im Projektkoordinatensystem (nach Post-Processing samt Datums-Transformation) gegeben.

Seit einiger Zeit kann der hier verwendete Laserscanner optional mit einem biaxialen Neigungssensor (Inklinometer) ausgestattet werden, der es erlaubt, die Neigung des Laserscannersystems um zwei Koordinatenachsen zu messen. Bei vertikaler Geräteachse (Abbildung 3.11) sind dies die x - und die y -Achse, bei horizontaler Geräteachse (Abbildung 3.12) die y - und die z -Achse. In letzterem Fall bietet es sich an, das Scannersystem für den Zeitraum der Georeferenzierung um 90° um die y -Achse zu drehen, sodass die neue z -Achse der alten negativen x -Achse bzw. die neue x -Achse der alten z -Achse entspricht. Die relativen Orientierungsparameter von Kamera (Mounting Calibration) und GPS-Antenne müssen dann entsprechend adaptiert werden.

Für die hybride Gesamtausgleichung werden Näherungswerte für die Unbekannten benötigt. Deren interaktive Ermittlung erfordert einen nicht zu unterschätzenden Zeitaufwand – insbesondere im Falle von vielen Bildsequenzen innerhalb eines Projekts. Im folgenden wird daher eine Methode angegeben, mit welcher diese Näherungswerte vollautomatisch bestimmt werden können.

Zunächst muss der Maßstabsfaktor m des Systems $S_{Kam,k}^*$ näherungsweise bestimmt werden.

Im Falle einer geradlinigen Fahrzeugtrajektorie ist die Bestimmung des Maßstabsfaktors m trivial, da die Abstände g_{ij} zwischen den GPS-Positionen die gleichen Längen wie die skalierten Abstände $d_{ij} = m \cdot d_{ij}^*$ zwischen den entsprechenden Kameraprojektionszentren aufweisen (siehe Abbildung 4.23).

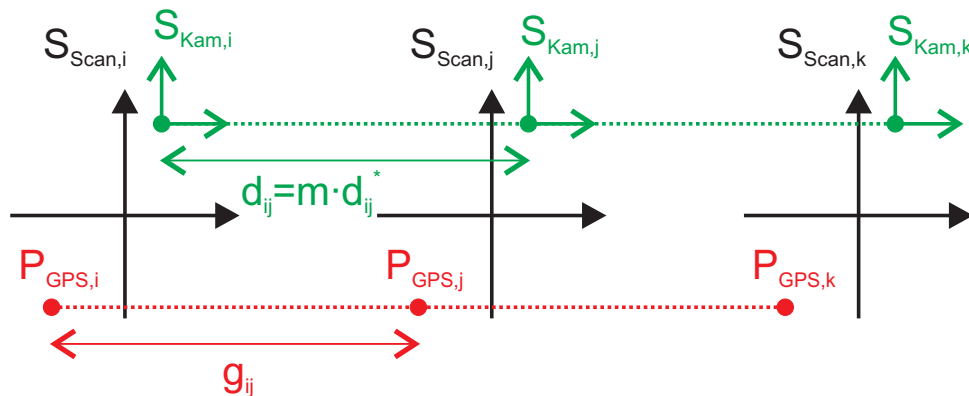


Abbildung 4.23: Scannerkoordinatensystem S_{Scan} , Kamerakoordinatensystem S_{Kam} , und GPS-Antennenzentrum P_{GPS} beschreiben bei geradliniger Fahrzeugtrajektorie kongruente Bahnen. Die aus den GPS-Koordinaten ermittelten Distanzen g_{ij} entsprechen daher den skalierten Aufnahmebasislängen $d_{ij} = m \cdot d_{ij}^*$. Daher lässt sich der Maßstabsfaktor unmittelbar durch $m = \frac{g_{ij}}{d_{ij}^*}$ bestimmen.

Im Falle einer gekrümmten Fahrzeugtrajektorie (siehe Abbildung 4.24) ist hingegen zu beachten, dass sich die Distanzen g_{ij} in Abhängigkeit von den Relativdrehungen R_{ij} deutlich von den skalierten Abständen $d_{ij} = m \cdot d_{ij}^*$ unterscheiden können. Das aus den Projektionszentren gebildete, im unskalierten System vorliegende Polygon lässt sich somit i.A. nicht mittels einer Ähnlichkeitstransformation auf das aus den GPS-Positionen gebildete Polygon abbilden.

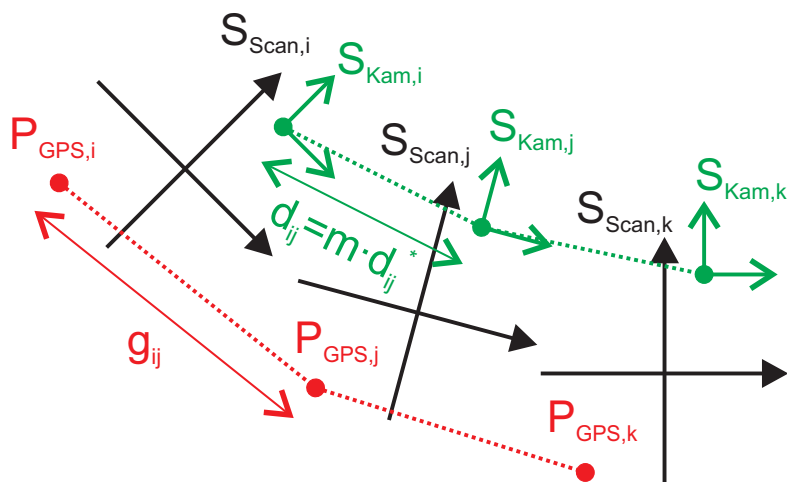


Abbildung 4.24: Scannerkoordinatensystem S_{Scan} , Kamerakoordinatensystem S_{Kam} , und GPS-Antennenzentrum P_{GPS} beschreiben bei gekrümmter Fahrzeugtrajektorie nicht-kongruente Bahnen. Die aus den GPS-Koordinaten ermittelten Distanzen g_{ij} unterscheiden sich daher i.A. von den Aufnahmebasislängen $d_{ij} = m \cdot d_{ij}^*$.

Bei der Bestimmung des Maßstabsfaktors m müssen daher die Relativdrehungen R_{ij} wie folgt berücksichtigt werden (siehe Abbildung 4.25):

Wir gehen vom unskalierten Kamerakoordinatensystem $S_{Kam,j}^*$ aus und verwenden dessen Ursprung K_j^* als Bezugspunkt für die durchzuführende Skalierung, es gilt also $K_j = K_j^*$. Der Ursprung K_i^* des anderen Systems wird somit nach der Skalierung auf einen Punkt K_i abgebildet, welcher auf der durch die beiden Punkte $K_j = K_j^*$ und K_i^* definierten Verbindungsgerade h_1 liegen muss. Der Vektor e zur GPS-Antennenposition G_j bezüglich des skalierten Systems K_j ist durch Kalibrierung bekannt. Durch Addition des relativ gedrehten Vektors $\mathbf{R}_{ij}e$ zum Ursprung K_i^* des unskalierten Systems erhält man den Hilfspunkt H . Die GPS-Antennenposition G_i muss auf der zu h_1 parallelen und durch den Punkt H verlaufenden Geraden h_2 liegen, und zwar im Abstand g_{ij} von G_j . Der Punkt G_i ergibt sich somit als Schnittpunkt der Geraden h_2 mit jener Kugel, deren Mittelpunkt G_j und deren Radius g_{ij} ist. Schließlich kann der Ursprung des skalierten Systems K_i durch Subtraktion des Vektors $\mathbf{R}_{ij}e$ vom Punkt G_i bestimmt werden, woraus sich die skalierte Distanz d_{ij} und in weiterer Folge der Maßstabsfaktor durch $m = \frac{d_{ij}}{d_{ij}^*}$ ermitteln lässt.

Zwecks Robustheit gegenüber eventuell vorhandenen groben Fehlern bietet es sich an, aus allen möglichen Paaren (i, j) jeweils einen Maßstabsfaktor m_{ij} zu bestimmen und schließlich den Median als Näherungswert für m zu verwenden.

Mit Hilfe des genäherten Maßstabsfaktors lassen sich die relativen Orientierungsparameter sowie die gematchten 3D-Punkte skalieren – d.h. vom System $S_{Kam,k}^*$ ins System $S_{Kam,k}$ überführen. Somit kann durch Anwendung von Gleichung (3.4) die Transformation vom (näherungsweise skalierten) Kamerakoordinatensystem $S_{Kam,k}$ ins (näherungsweise skalierte) Scannerkoordinatensystem $S_{Scan,k}$ erfolgen.

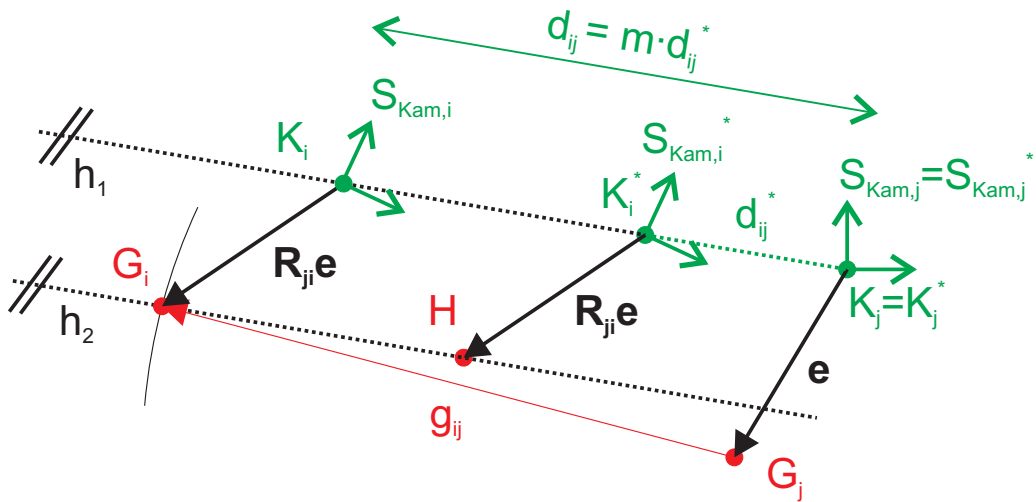


Abbildung 4.25: Bestimmung des Maßstabsfaktors m aus zwei Aufnahmepositionen i und j im allgemeinen Fall (Beschreibung siehe Text)

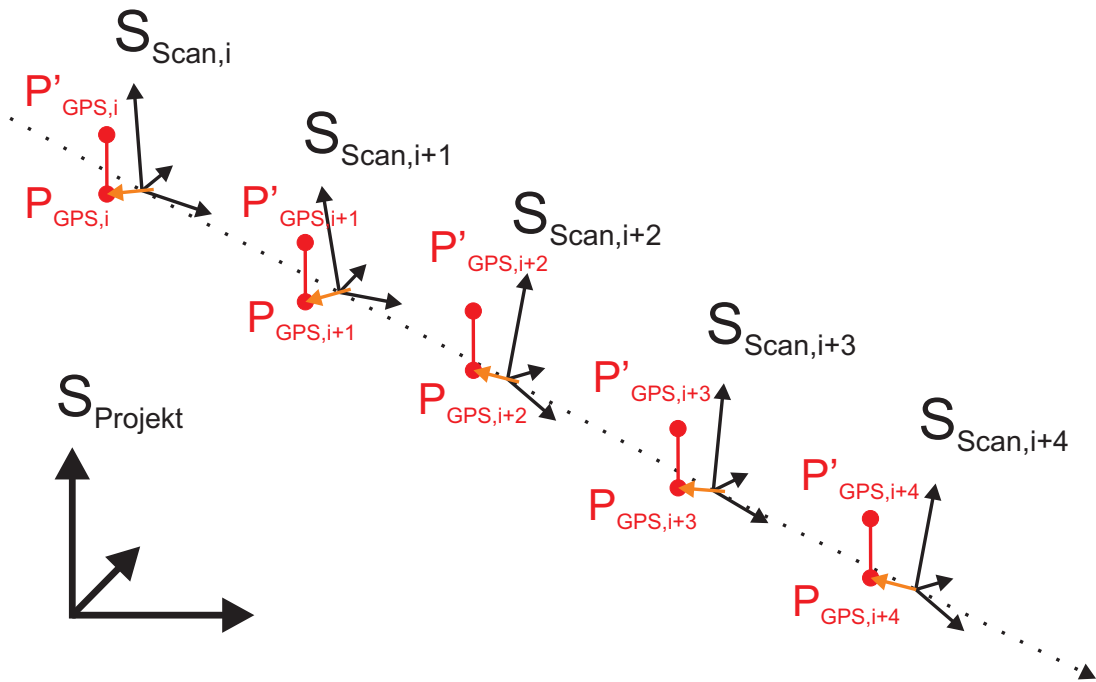


Abbildung 4.26: Scannerkoordinatensystem $S_{Scan,i}$ und GPS-Antennenzentrum $P_{GPS,i}$ für mehrere Aufnahmepositionen i entlang der Trajektorie. Mit Hilfe der Neigungssensor-Beobachtungen lassen sich zusätzliche, künstliche Punkte $P'_{GPS,i}$ einrechnen, was insbesondere im Falle nahezu geradliniger Trajektorien für die Beschaffung von genäherten Orientierungsparametern wichtig ist.

Die sowohl im (Ausgangs-)System $S_{Scan,k}$ als auch im (Ziel-)System (Projektkoordinatensystem $S_{Projekt}$) vorliegenden GPS-Antennenpositionen sind nun (nahezu) identische Punkte im Sinne einer 3D-Helmert-Transformation. Für die (näherungsweise) durchzuführende Transformation sollen jedoch auch die vom Neigungssensor gelieferten Beobachtungen berücksichtigt werden; dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die Trajektorie nahezu geradlinig ist, da in diesem Fall der Drehwinkel um die Trajektorien-Achse allein durch (nahezu kollineare) Punk-

te nur sehr unsicher bestimmt werden kann. Aus den Neigungssensor-Beobachtungen ist der Richtungsvektor des Zenit bezüglich des Scannersystems bekannt. Somit lassen sich zusätzliche identische Punkte $P'_{GPS,i}$ künstlich generieren, die sich jeweils in einem beliebigen Abstand (z.B. 1 m) lotrecht über den GPS-Positionen befinden (siehe Abbildung 4.26).

Die im Ausgangssystem $S_{Scan,k}$ vorliegenden Punkte $P_{GPS,i}$ und $P'_{GPS,i}$ werden anschließend mittels einer 3D-Helmert-Transformation (ohne Maßstabsfaktor; d.h. 6-Parametertransformation) auf die entsprechenden Punkte im Zielsystem $S_{Projekt}$ bestmöglich abgebildet. Dazu eignet sich die Methode von [SANSÒ 1973] bzw. [HORN 1987], welche ohne Näherungswerte auskommt. Mit Hilfe der resultierenden Transformation erhält man gute Näherungswerte für die absoluten Orientierungsparameter des Scanner-Systems an den Aufnahmepositionen i . Zur raschen visuellen Kontrolle können – falls vorhanden – die mit diesen Näherungswerten orientierten horizontalen Laserscanner-Profilen in einer Grundrissansicht dargestellt werden.

Schließlich erfolgt eine hybride Gesamtausgleichung, in welche die Bildkoordinaten der gematchten Punkte, die GPS-Positionen sowie die Inklinometer-Messungen als Beobachtungen eingehen.

4.5 Georeferenzierung bei der detaillierten Fassadenaufnahme

Die im vorigen Abschnitt erwähnte automatische relative Bildorientierung lässt sich auch für die Georeferenzierung bei der detaillierten Fassadenaufnahme sowie beim kombinierten Aufnahmemodus (siehe Abbildungen 2.3b bzw. c) anwenden. In beiden Fällen lassen sich damit gute Näherungswerte für die Orientierungsparameter der Scanpositionen (eventuell als Ausgangssituation für den ICP-Algorithmus) beschaffen.

Wir gehen davon aus, dass zumindest für die im Bereich der Straßenkreuzung aufgenommenen Scanpositionen GPS-Beobachtungen verfügbar sind. Dies ist eine durchaus berechtigte Annahme, da zum einen das Fahrzeug für die Zeit der Aufnahme stehenbleibt (statische Positionsbestimmung) und zum anderen in Kreuzungsbereichen in der Regel mit günstigeren Abschattungsverhältnissen gerechnet werden kann. Ziel ist es, die Orientierungsparameter für ein oder mehrere statische Scanpositionen zu bestimmen, an welcher keine GPS-Beobachtungen vorliegen. Dazu kann die automatische relative Bildorientierung herangezogen werden, wobei die an den Scanpositionen aufgenommenen Photos in die Bildsequenz integriert werden.

Wie gehen im folgenden von einer bereits relativ orientierten Bildsequenz mit noch willkürlichem Maßstab aus. Analog zum vorigen Abschnitt ist zunächst die Bestimmung des Maßstabsfaktors der Bildsequenz erforderlich. Anstatt aus GPS-Koordinatendifferenzen ist dieser jedoch nun aus einem (oder auch mehreren) der Scans zu ermitteln. Wir beschränken uns hier auf die Verwendung *eines* Scans.

Zunächst wird die Bildsequenz ins (unskalierte) Kamerakoordinatensystem $S_{Kam,k}^*$ jener Aufnahmeposition transformiert, an welcher der zur Skalierung verwendete Scan zur Verfügung

steht, und anschließend mit Hilfe der Mounting Calibration weiter ins Scannerkoordinatensystem $S_{Scan,k}$. Für jeden gematchten 3D-Punkt P_i^* der Bildsequenz lässt sich nun – sofern sich dieser Punkt im Bereich der durch den Scan erfassten Objektoberfläche befindet – ein Wert für den Maßstabsfaktor m folgendermaßen bestimmen:

Der skalierte Punkt P_i befindet sich auf dem Strahl, der vom Projektionszentrum $Z_k = Z_k^*$ (=Ursprung des Systems $S_{Kam,k}^*$) ausgeht und durch den Punkt P_i^* verläuft. P_i ergibt sich als Schnittpunkt des Strahls mit der durch die Laserscanner-Punktwolke repräsentierten Objektoberfläche (Abbildung 4.27).

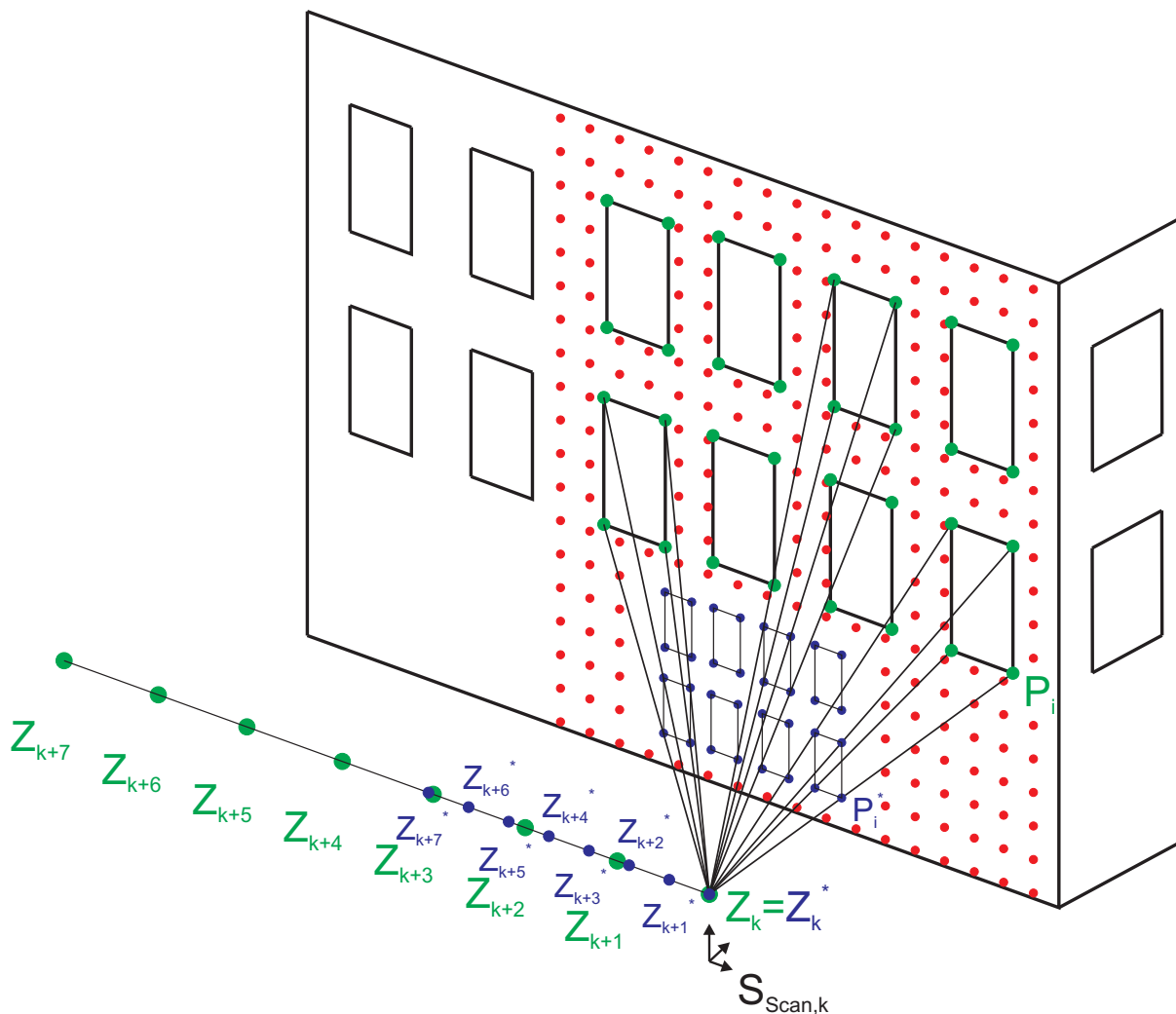


Abbildung 4.27: Bestimmung des Maßstabsfaktors m mit Hilfe einer Laserscanner-Punktwolke (Beschreibung siehe Text)

Dieselbe Problemstellung tritt beim Monoplotting auf und wurde für terrestrische Laserscanner- und Bilddaten u.a. in [RESSL et al. 2006] behandelt. Da es in diesem Fall jedoch nicht um die möglichst genaue Einzelpunktbestimmung, sondern um die genäherte Ermittlung des Maßstabsfaktors geht, beschränken wir uns auf die einfachste Lösung: Verwendung der Projektion des dem Strahl nächstgelegenen Laserscannerpunktes auf den Strahl als „Schnittpunkt“. Allerdings ist es empfehlenswert, einen Schwellwert für den maximal zulässigen Abstand des

Punktes vom Strahl zu berücksichtigen, um (fehlerhafte) Zuordnungen außerhalb des Scan-Bereiches zu vermeiden. Dieser Schwellwert ist in Abhängigkeit vom Laserscannerpunktstand am Objekt zu wählen.

Für einen Punkt P_i^* ergibt sich bei Erfüllung des Schwellwert-Kriteriums der Maßstabsfaktor m_i aus dem Verhältnis der beiden Strecken $\overline{Z_k P_i}$ und $\overline{Z_k P_i^*}$.

Um einen verlässlichen Wert für den Maßstabsfaktor m zu erhalten, ist es wieder günstig, den Median der ermittelten Maßstabsfaktoren m_i als Wert für m zu verwenden.

Mit Hilfe des Maßstabsfaktors lassen sich nun Näherungswerte für die Orientierungsparameter aller Bilder der Sequenz sowie eventuell dazugehöriger Scan-Aufnahmen bestimmen. Im Falle des Betriebsmodus für die detaillierte Fassadenaufnahme (Abbildung 2.3b) sind die aus dem Bild-Matching ermittelten Verknüpfungspunkte eine wertvolle Ergänzung zur Orientierung mittels ICP-Algorithmus; bei letzterem sind nämlich bei dieser Konfiguration die Translationskomponenten in Fahrtrichtung unter Umständen nur sehr schlecht bestimmbar, da aufgrund des relativ schmalen Aufnahmebereiches kaum Oberflächen mit Normalen in Fahrtrichtung gescannt werden können.

Auch hier wird abschließend eine hybride Ausgleichung durchgeführt, bei der die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, GPS-Positionen, Inklinometer-Messungen sowie eventuell nach dem ICP-Algorithmus ermittelte Ankerpunkte als Beobachtungen eingeführt werden.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die folgenden Probleme behandelt:

- Orientierung von TLS-Daten mittels ICP-Algorithmus unter Berücksichtigung der Anforderungen des Mobile Mapping (inkl. Vorverarbeitung der Daten)
- Georeferenzierung von TLS-Daten mit Hilfe von in den Photos beobachteten Passgeraden
- Georeferenzierung einer relativ orientierten Bildsequenz auf Basis von GPS- und Inklinometerbeobachtungen
- Ermittlung von Näherungswerten für den ICP-Algorithmus durch Skalierung einer relativ orientierten Bildsequenz

Somit wurden im wesentlichen alle Aufgaben des Mobile Mapping im Bereich Sensororientierung abgedeckt, die bei Verzicht auf ein Positions- und Orientierungssystem (POS: Kombination GPS/INS) anfallen können.

Kapitel 5

Beispiele

In diesem Kapitel werden zunächst 2 Beispiele zu der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Georeferenzierungsmethode angeführt. Anschließend folgt ein Beispiel, bei welchem Ansätze aus den Abschnitten 4.4 und 4.5 in der Praxis angewandt werden.

5.1 Beispiel 1: Experiment am Gang des Instituts

Ziel dieses Experimentes war es, die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Georeferenzierungsmethode unter vereinfachten Bedingungen zu testen.

5.1.1 Versuchsanordnung

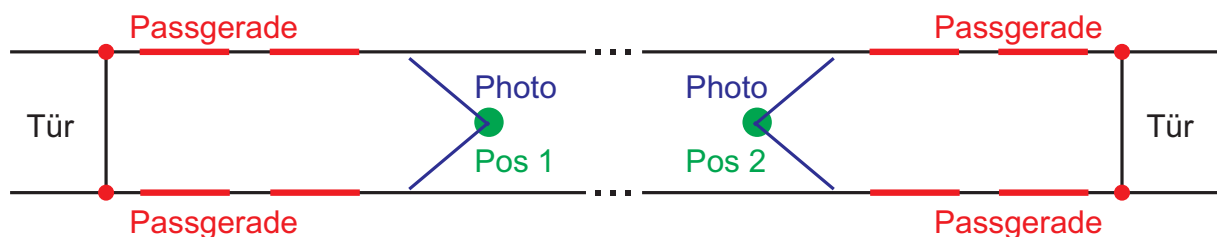


Abbildung 5.1: Schematische Anordnung des Experimentes. An den beiden Enden des ca. 38.2 m langen und 2.5 m breiten Ganges wurden mittels Totalstation jeweils mehrere Passgerade eingemessen. Die Entfernung der Scanposition von der jeweiligen Tür beträgt in beiden Fällen etwa 7 m.

Bei dem Experiment wurde ein Gang des Instituts aufgenommen, wobei als mobile Plattform ein Rollwagen verwendet wurde, auf welchen der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i samt aufgesetzter Kamera Canon EOS 1Ds (mit 20mm-Objektiv) gestellt wurde (vgl. Abbildung 2.2). Die Aufnahme erfolgte durch 2 Scanpositionen mit jeweils voller Ausnützung des Scan-Bereiches ($360^\circ \times 80^\circ$) und einer Winkelschrittweite von 0.1° . An beiden Scanpositionen wurde jeweils ein Foto in Richtung des nächstgelegenen Gang-Endes aufgenommen. Für die Zeit der Aufnahme wurden einige Kartonschachteln am Gang positioniert, damit später für

die relative Orientierung der beiden Scans mittels ICP-Algorithmus auch Flächen zur Verfügung standen, deren Normalvektoren parallel zur Gangrichtung sind. Im Bereich der beiden Gang-Enden wurden des weiteren mehrere Passgerade mittels einer Totalstation eingemessen. In Abbildung 5.1 ist die Anordnung des Experimentes skizziert.

5.1.2 Orientierung

Die relative Orientierung der beiden Scans erfolgte mittels ICP-Algorithmus, wobei die Standardparameterwerte Diss-S verwendet wurden (vgl. Anhang C.4.2). Zur Berücksichtigung der dabei erhaltenen relativen Orientierungsparameter wurden für beide Scans jeweils 4 Ankerpunkte mit den Koordinaten $\left(50 \cos(k \frac{\pi}{2}) \quad 50 \sin(k \frac{\pi}{2}) \quad 0 \right)^T$ mit $k = 0, 1, 2, 3$ im jeweiligen Scannersystem generiert, in den jeweils anderen Scan transformiert und als fiktive Polarbeobachtungen eingeführt. Dies ergibt somit insgesamt 16 in den Scans fiktiv beobachtete Polarpunkte (48 Beobachtungen). Als a-priori-Standardabweichungen wurden jeweils ± 20 mgon für die Winkelbeobachtungen bzw. ± 3 mm für die Distanzbeobachtungen gewählt.

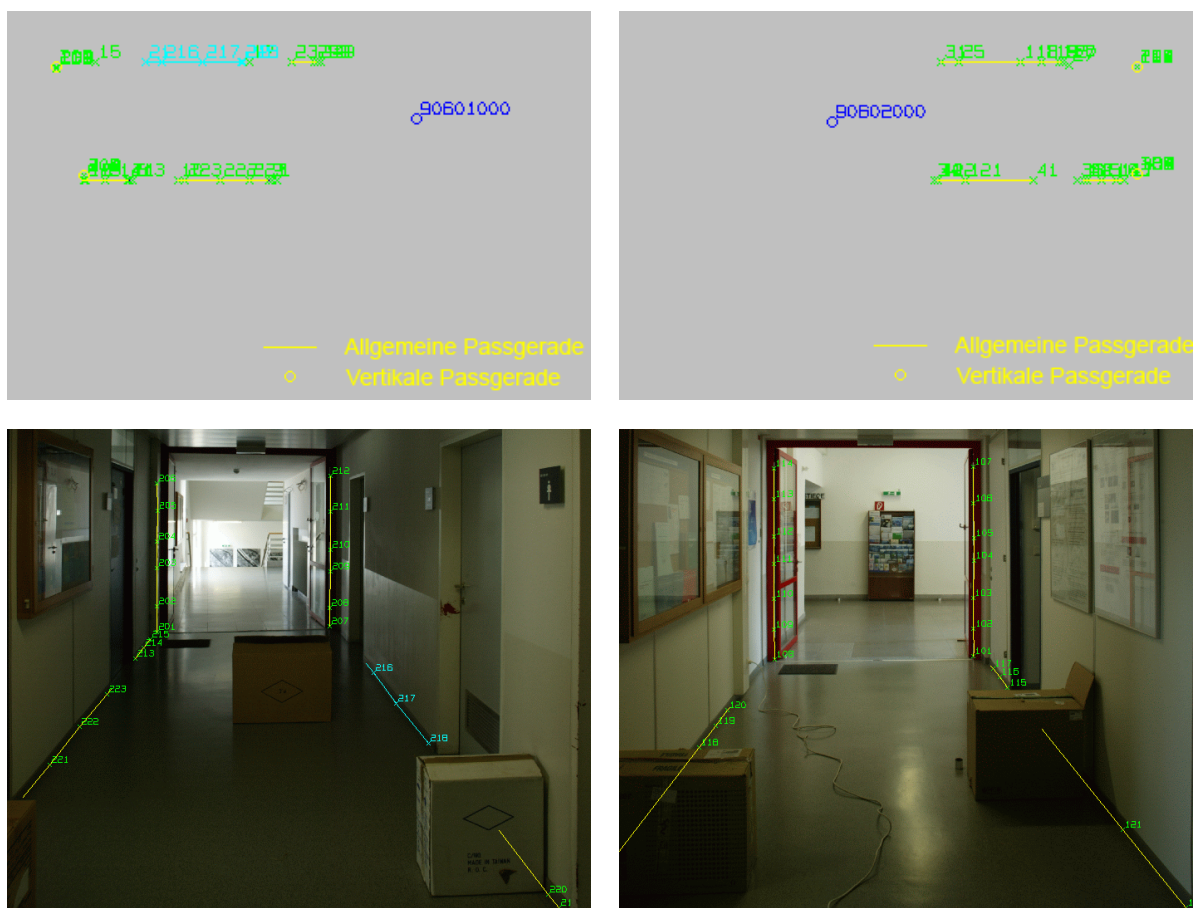


Abbildung 5.2: Oben links bzw. rechts: Grundrissdarstellung des Gang-Endes in der Nähe von Scanposition #1 bzw. #2. Unten links bzw. rechts: Ausschnitt des entsprechenden Photos mit rückprojizierten Passgeraden und darauf gemessenen Bildpunkten.

Die absolute Orientierung erfolgte mit Hilfe des Programmsystems ORIENT/ORPHEUS. Die

die Passgeraden definierenden eingemessenen Punkte wurden zunächst als Passpunkte in dieses System importiert. Anschließend wurden für die nicht-vertikalen Passgeraden die Verbindungslinien zwischen den entsprechenden Punkten hergestellt. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erwähnt, können Passgerade im System ORIENT durch Gestalten repräsentiert werden. Diese müssen jedoch zunächst definiert und parametrisiert werden, was für eine größere Anzahl an Gestalten relativ aufwendig wäre.

Um dies zu erleichtern und zu beschleunigen, wurde daher im Zuge dieser Arbeit ein Werkzeug entwickelt, mit welchem dieser Vorgang automatisiert durchgeführt werden kann. Dazu muss der Benutzer zuerst auswählen, ob eine allgemeine oder vertikale Passgerade als Gestalt generiert werden soll. Im ersten Fall erwartet das Programm ein Liniensegment, im zweiten Fall einen Punkt. Die Selektion erfolgt in der Grundrissdarstellung (Abbildung 5.2 links) mittels Mausklick. Die Erzeugung und Parametrisierung der Gestalt erfolgt danach vollautomatisch aus den Koordinaten des einen Punktes bzw. der beiden Endpunkte des Liniensegments. Da die Datumsfestlegung über eine weiche Lagerung (Passpunktkoordinaten als Beobachtungen) erfolgt, sind die Gestaltparameter Unbekannte der Ausgleichung und deren anfangs ermittelten Werte somit als Näherungswerte zu betrachten. Der oder die beiden gestalterzeugenden Passpunkte werden daher – neben den später noch folgenden Neupunkten – ebenfalls in die Punktmenge der Gestalt aufgenommen. Bei Vorhandensein von Näherungswerten für die Orientierungsparameter sowie der Mounting Calibration (welche für dieses Experiment neu bestimmt wurde) kann bei der Punktmessung die Zuordnung zu den Passgeraden durch deren Rückprojektion in die Photos erleichtert werden (Abbildung 5.2 rechts). Durch Öffnen der Gestalt wird die entsprechende Passgerade sowie die bereits ihr zugeordneten Punkte farblich hervorgehoben: durch Messen im Bild können weitere Punkte hinzugefügt werden.

Insgesamt wurden 7 allgemeine (nahezu horizontale) und 4 vertikale Passgerade verwendet. In dem Photo von Scanposition #1 wurden Punkte auf 4 horizontalen und 2 vertikalen Passgeraden beobachtet; in dem Photo von Scanposition #2 wurden Punkte auf 3 horizontalen und 2 vertikalen Passgeraden beobachtet.

5.1.3 Ergebnisse

Die Bilanz der Gesamtausgleichung ist in Tabelle 5.1 angegeben.

Die resultierenden Orientierungsparameter sowie deren aus der Ausgleichung geschätzten Genauigkeiten sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

Die aus der Ausgleichung erhaltenen Genauigkeitswerte sind möglicherweise etwas zu optimistisch, da die Korrelationen der fiktiv eingeführten Ankerpunktbeobachtungen beim stochastischen Modell nicht berücksichtigt wurden.

Zur Qualitätskontrolle ist daher der Vergleich der georeferenzierten (Gesamt-)Punktwolke mit den Passelementen interessant. Mittels visueller Begutachtung konnte festgestellt werden, dass alle Passpunkte mit einer Toleranz von ca. 1.5 cm auf ihren entsprechenden, aus der georeferenzierten Punktwolke extrahierten Kanten zu liegen kommen.

Beobachtungen	
Polarbeobachtungen ($2 \cdot 2 \cdot 4 = 16$ Tripel für Ankerpunkte)	48
Passpunktkoordinaten (18 Punkte)	54
Gestaltbeobachtungen (18 Passpunkte + 45 Neupunkte)	126
Bildkoordinaten (45 Neupunkte)	90
Beobachtungen gesamt	318
Unbekannte	
Orientierungsparameter der 2 Scanpositionen	12
Gestaltparameter der 7 allgemeinen Passgeraden	28
Gestaltparameter der 4 vertikalen Passgeraden	8
Objektkoordinaten der $2 \cdot 4 = 8$ Ankerpunkte	24
Objektkoordinaten der 18 Passpunkte	54
Objektkoordinaten der 45 Neupunkte	135
Unbekannte gesamt	261
Redundanz	57

Tabelle 5.1: Bilanz der Ausgleichung

Scan-Position	α [gon]	ζ [gon]	κ [gon]	X [m]	Y [m]	Z [m]
#1	0.089	0.408	96.366	7.504	1.284	1.278
	± 0.041	± 0.009	± 0.005	± 0.011	± 0.002	± 0.002
#2	0.362	0.209	98.529	31.856	1.227	1.288
	± 0.041	± 0.009	± 0.005	± 0.011	± 0.002	± 0.003

Tabelle 5.2: Resultierende Werte für die Orientierungsparameter und deren Genauigkeitsmaße

5.1.4 Zusammenfassung

Die in Abschnitt 4.3 vorgeschlagene Methode, bei der die relative Orientierung der Scans (und letztendlich auch jene der Photos) mittels ICP-Algorithmus ermittelt wird und anschließend die Georeferenzierung mit Hilfe von in den Passgeraden beobachteten Photos erfolgt, wurde anhand reeller Daten unter vereinfachten Bedingungen getestet. Das Verfahren hat sich als operationell einsetzbar erwiesen.

5.2 Beispiel 2: Klagenfurter Ring

Die in diesem Beispiel verwendeten Aufnahmedaten sind Teil eines kommerziellen Projektes der Firma Geodata IT, welches zur Dokumentation des Straßenraumes für einen Teil des Rings der Stadt Klagenfurt durchgeführt wurde. Die Datenerfassung erfolgte durch den *CityGRID Scanner* im Stop-and-go-Modus mittels Hin- und Rückfahrt (siehe Abbildung 2.3d).

Von den insgesamt mehr als 200 Scanpositionen auf ca. 1.5 km Straßenraum wurden für dieses Beispiel 42 Scanpositionen herangezogen, die im Bereich eines ca. 360 m langen Straßenabschnittes aufgenommen wurden. Zur Evaluierung der in Abschnitt 4.3 vorgeschlagenen Georeferenzierungsmethode wurden 2 Gruppen von Scanpositionen gebildet, die jedoch im Gegensatz zu Abbildung 4.18 zwei gemeinsame Scanpositionen enthalten, d.h. eine geringfügige Überlappung aufweisen. Beide Gruppen wurden jeweils für sich mit Hilfe von Passgeraden, die aus einem Bestandsplan entnommen wurden, unter Verwendung des Programmsystems ORIENT/ORPHEUS georeferenziert.

Auf die dabei erzielten Ergebnisse, die bei der Methode auftretenden Probleme sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse wird im Laufe dieses Abschnittes eingegangen. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung der Aufnahmedaten.

5.2.1 Aufnahmedaten

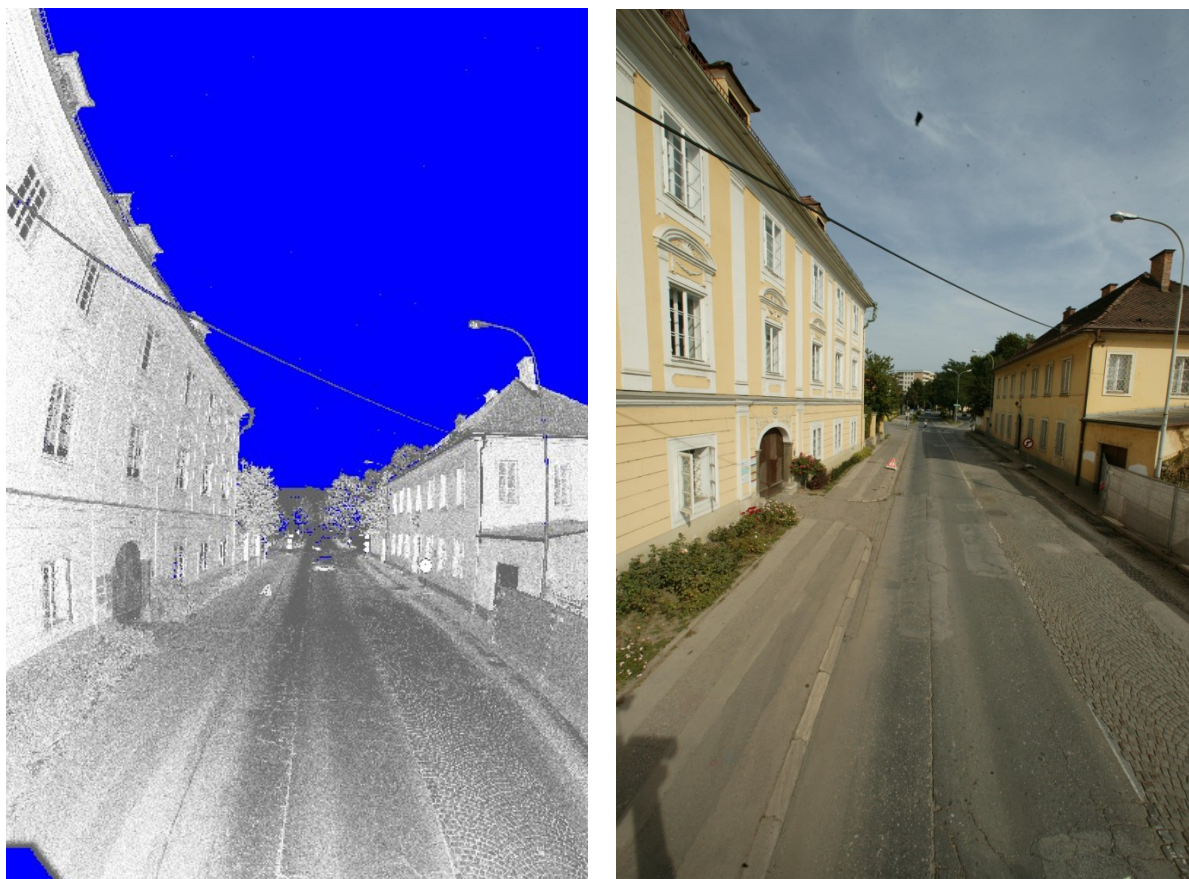


Abbildung 5.3: Intensitätsbild und Photo einer Scanposition.

Die Aufnahme sowohl der Scans als auch der Photos erfolgte – aus der Sicht des Fahrers – jeweils rückwärts. Die Scans wurden mit einer Winkelschrittweite von ca. 0.2° durchgeführt, was bei einem Aufnahmebereich von etwa $80^\circ \times 120^\circ$ einer Matrix von 400×600 Messungen und einer reinen Scan-Dauer von ca. 30 Sekunden entspricht. Im Vergleich zu den Photos, die

mit 14mm-Objektiven aufgenommen wurden und jeweils in etwa das gleiche Blickfeld mit einer Matrix von 2704×4064 Bildelementen abdecken, wurde somit eine relativ grobe Auflösung für die Scans gewählt. Die Anzahl der Punkte (d.h. gültigen Messungen) eines Scans hängt in erster Linie vom Anteil des Himmels im Scanbereich ab und variiert im Falle der betrachteten Aufnahmen zwischen rund 115.000 und 166.000. Obwohl beide Kameras bei der Datenerfassung genutzt wurden, werden für dieses Beispiel nur die Photos *einer* Kamera herangezogen. Scan-Intensitätsbild und entsprechendes Photo einer Scanposition sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

Von den insgesamt 42 betrachteten Scanpositionen stammen 23 von der Hin- sowie 19 von der Rückfahrt. Für dieses Beispiel wurden 2 Gruppen gebildet, die 2 gemeinsame Scanpositionen im Bereich einer Straßenkreuzung aufweisen (siehe Tabelle 5.3 bzw. Abbildung 5.4). Diese beiden Gruppen (A und B) werden in weiterer Folge getrennt voneinander behandelt.

5.2.2 Relative Orientierung

Als vorbereitende Maßnahme für die relative Orientierung wurden zunächst alle 42 Scans mit Hilfe der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Methoden bearbeitet: An jedem Punkt wurde der Normalvektor abgeschätzt, der Planaritätsfilter angewandt und schließlich eine voxelbasierte Ausdünnung durchgeführt. Dabei wurde der in Anhang C.4.2 angegebene Standard-Parametersatz (Diss-S) verwendet.

Ausgehend von interaktiv beschafften, auf einige dm bzw. gon genauen Näherungswerten für die Orientierungsparameter wurden die Scans zunächst einzeln nacheinander mittels ICP-Algorithmus relativ zueinander orientiert:

In der Gruppe A wurde der Scan 611 als *master scan* gewählt und die Scans 612 bis 623 sukzessive relativ dazu orientiert, d.h. jeweils Scan 611 und sämtliche bisher orientierte Scans festgehalten und ein einziger neuer Scan dazuorientiert. Anschließend wurden die Scans 709 bis 700 (in dieser Reihenfolge) ebenfalls hinzugefügt.

In der Gruppe B wurde der Scan 623 als *master scan* gewählt und die Scans 624 bis 636 sowie danach die Scans 700 bis 691 auf analoge Art und Weise dazuorientiert.

Aus praktischer Sicht könnte man bereits nach diesem Schritt die relative Orientierung als abgeschlossen betrachten, da eine visuelle Inspektion der relativ orientierten Punktwolke jeweils plausible Ergebnisse vermuten lässt, da keinerlei entsprechende systematische Fehler erkennbar sind. Aus theoretischer Sicht ist diese Vorgangsweise jedoch suboptimal, da das Ergebnis davon abhängt, in welcher Reihenfolge die Scans dazuorientiert werden, bzw. keine simultane Minimierung des Fehlermaßes über alle Scans im Sinne von Ausdruck (4.15) erfolgt.

Ausgehend von den ausgezeichneten Näherungswerten der sequentiellen Orientierung wurde daher für jede der beiden Gruppen die simultane Orientierung aller Scans durchgeführt. In beiden Fällen führte dies jedoch zu keinem befriedigenden Ergebnis. Zum einen wurde selbst nach 20 Iterationsschritten (ca. 4h Rechenzeit) das Abbruchkriterium jeweils noch nicht erfüllt,

ID	Zeitpunkt	Richtung	Gruppe
611	15:27:08	H	A
612	15:28:29	H	A
613	15:31:13	H	A
614	15:32:19	H	A
615	15:33:16	H	A
616	15:34:22	H	A
617	15:35:39	H	A
618	15:39:31	H	A
619	15:40:44	H	A
620	15:42:45	H	A
623	15:46:58	H	A,B
624	15:48:07	H	B
625	15:50:35	H	B
626	15:51:38	H	B
627	15:53:06	H	B
628	15:54:12	H	B
629	15:55:27	H	B
630	15:56:56	H	B
632	15:58:32	H	B
633	16:00:03	H	B
634	16:02:02	H	B

ID	Zeitpunkt	Richtung	Gruppe
635	16:06:04	H	B
636	16:06:58	H	B
691	17:21:57	R	B
692	17:23:14	R	B
693	17:24:16	R	B
694	17:30:50	R	B
695	17:31:46	R	B
696	17:32:48	R	B
697	17:33:55	R	B
698	17:34:49	R	B
699	17:36:13	R	B
700	17:37:13	R	A,B
701	17:38:11	R	A
702	17:39:07	R	A
703	17:40:02	R	A
704	17:41:08	R	A
705	17:42:06	R	A
706	17:43:14	R	A
707	17:44:24	R	A
708	17:45:36	R	A
709	17:46:40	R	A

Tabelle 5.3: Übersicht über die Scanpositionen, ihre Aufnahmezeitpunkte (h:m:s), Fahrtrichtung (H...Hinfahrt, R...Rückfahrt) sowie deren Einteilung in die beiden Gruppen A und B.

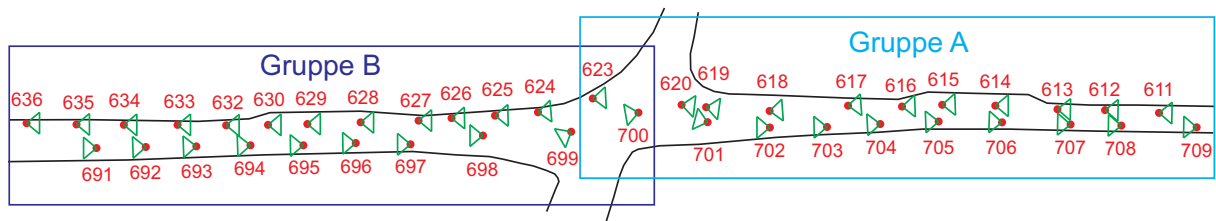


Abbildung 5.4: Skizze des Straßenabschnittes mit den Scanpositionen und deren Einteilung in Gruppen

zum anderen war nach den 20 durchgeführten Iterationsschritten in beiden Fällen eine deutliche Verschlechterung folgender Art zu beobachten: Es kam zur Bildung zweier Scan-Blöcke (Hin- und Rückfahrt), die in Richtung der Straßenachse auseinandergedriftet waren. Innerhalb dieser Blöcke war die relative Orientierung zwar nach wie vor plausibel; jedoch hatte sich die relative Orientierung von Scans verschiedener Fahrtrichtung im Vergleich zur Ausgangssituation merklich verschlechtert (siehe Abbildung 5.5).

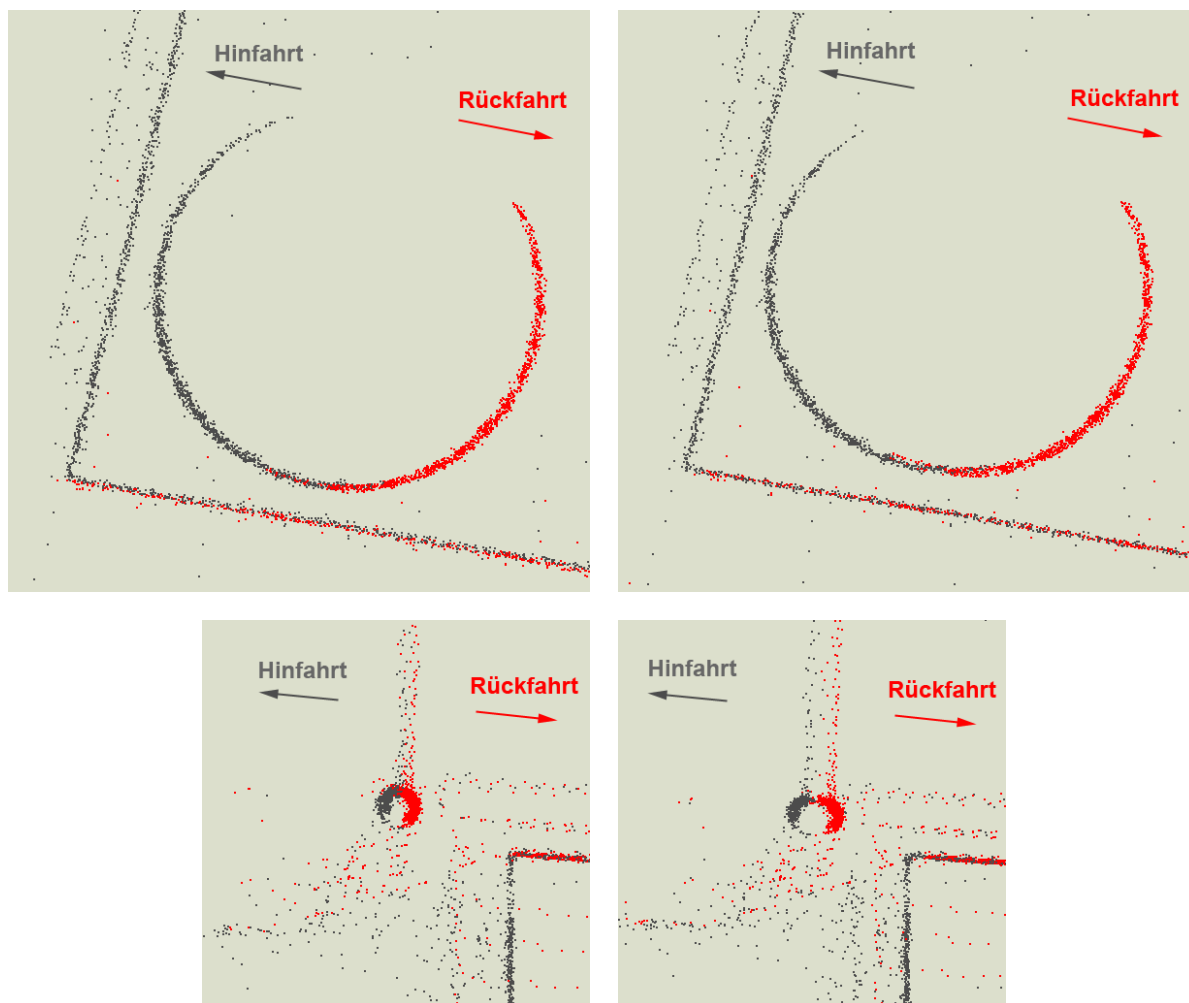


Abbildung 5.5: Zylindrische Säule (oben) bzw. Laternenmast (unten) jeweils vor (links) und nach (rechts) Anwendung des simultanen ICP-Algorithmus. Sämtliche Scans der Rückfahrt werden fälschlicherweise um ca. 7 cm in Fahrtrichtung verschoben.

Die Ursache dafür ist die Tatsache, dass die Translationskomponente in Straßenrichtung fast ausschließlich durch korrespondierende Punktpaare zwischen Scans *gleicher* Fahrtrichtung bestimmt wird; hingegen gibt es nur sehr wenige korrespondierende Punktpaare zwischen Scans *verschiedener* Fahrtrichtungen, die zur Bestimmung dieser Translationskomponente beitragen. Letztere Korrespondenzen gehen bei der simultanen Ausgleicheung in der Masse der anderen Korrespondenzen unter. Eine Lösung dieses Problems wäre möglicherweise eine individuelle Gewichtung jedes Punktpaares (z.B. basierend auf der Idee von [GELFAND et al. 2003]); allerdings wurde diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt, da dieser Ansatz insofern heikel ist, als

dabei auch fehlerhafte Korrespondenzen ein hohes Gewicht bekommen können.

Interessanterweise konnte die Orientierung *eines* Scans relativ zu allen Scans der anderen Fahrtrichtung ohne Probleme und sogar mit schlechteren Näherungswerten erfolgreich durchgeführt werden. Dies lässt sich dadurch begründen, dass zum einen die wenigen korrespondierenden Punktpaare, die zur Bestimmung der erwähnten Translationskomponente beitragen, in der Ausgleichung einen höheren Einfluss besitzen; zum anderen kann es von vornherein nicht zur Bildung dieser beiden Blöcke kommen.

Als Kompromiss wurden schließlich jeweils die Scans der Hinfahrt (Gruppe A: 611 bis 623; Gruppe B: 623 bis 636) durch simultane Anwendung des ICP-Algorithmus gemeinsam orientiert und anschließend die Scans der Rückfahrt sequentiell dazuorientiert.

5.2.3 Absolute Orientierung

Generierung von Ankerpunkten

Zur Berücksichtigung der im vorigen Schritt erhaltenen relativen Orientierungsparameter wurden pro Scan jeweils 4 Ankerpunkte mit den Koordinaten $\left(50 \cos(k\frac{\pi}{2}) \quad 50 \sin(k\frac{\pi}{2}) \quad 0 \right)^T$ mit $k = 0, 1, 2, 3$ im jeweiligen Scannersystem generiert, in die jeweils anderen Scans der Gruppe transformiert und als fiktive 3D-Polarbeobachtungen eingeführt, wobei nur solche mit einer Distanz < 100 m berücksichtigt wurden. Für die Gruppe A ergaben sich dadurch 1.237 in den Scans fiktiv beobachtete Polarpunkte (3.711 Beobachtungen); für die Gruppe B waren es 1.508 Polarpunkte (4.524 Beobachtungen).

Als a-priori-Standardabweichungen wurden jeweils ± 20 mgon für die Winkelbeobachtungen bzw. ± 3 mm für die Distanzbeobachtungen gewählt.

Selektion von Passinformation aus dem Bestandsplan

Aus dem Bestandsplan des Interessensgebietes (Ausschnitt siehe Abbildung 5.6) wurden zunächst jene Elemente, die als potentielle Passinformation in Frage kamen, ausgewählt und in das Programmsystem ORIENT/ORPHEUS als beobachtete Passpunkte mit den entsprechenden Linienverbindungen importiert (Abbildung 5.7).



Abbildung 5.6: Bestandsplan im Bereich des Interessensgebietes

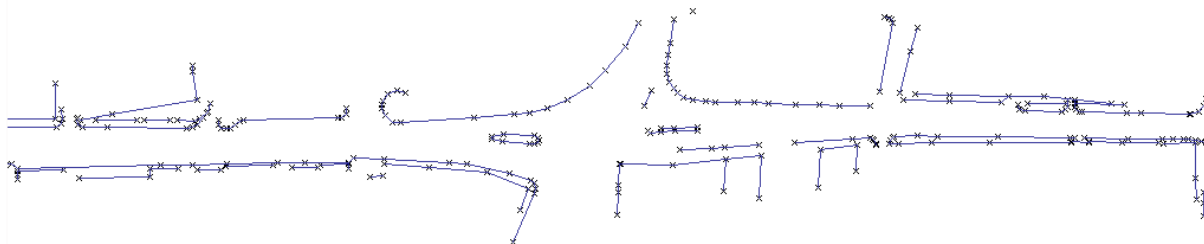


Abbildung 5.7: Manuell ausgewählte Planelemente als potentielle Passinformation

Es ist allerdings zu beachten, dass nicht alle diese Punkte eine Höhe (Z-Wert) aufweisen: rund 20% der importierten Punkte sind nur lagemäßig bekannt und lassen sich daher nur zur Definition von vertikalen Passgeraden (z.B. im Falle vertikaler Gebäudekanten) verwenden. Die Passinformation umfasst Gehsteigkanten und (hauptsächlich vertikale) Gebäudekanten.

Beobachtung von auf Passgeraden liegenden Punkten in den Photos

Die Passgeraden werden im System ORIENT durch Gestalten repräsentiert. Deren semi-automatische Definition und Parametrisierung sowie die interaktive Messung von ihr zugeordneten Punkten erfolgt analog zu Abschnitt 5.1.2. Abbildung 5.8 zeigt ein Photo mit rückprojizierten Passgeraden und darauf gemessenen Punkten.

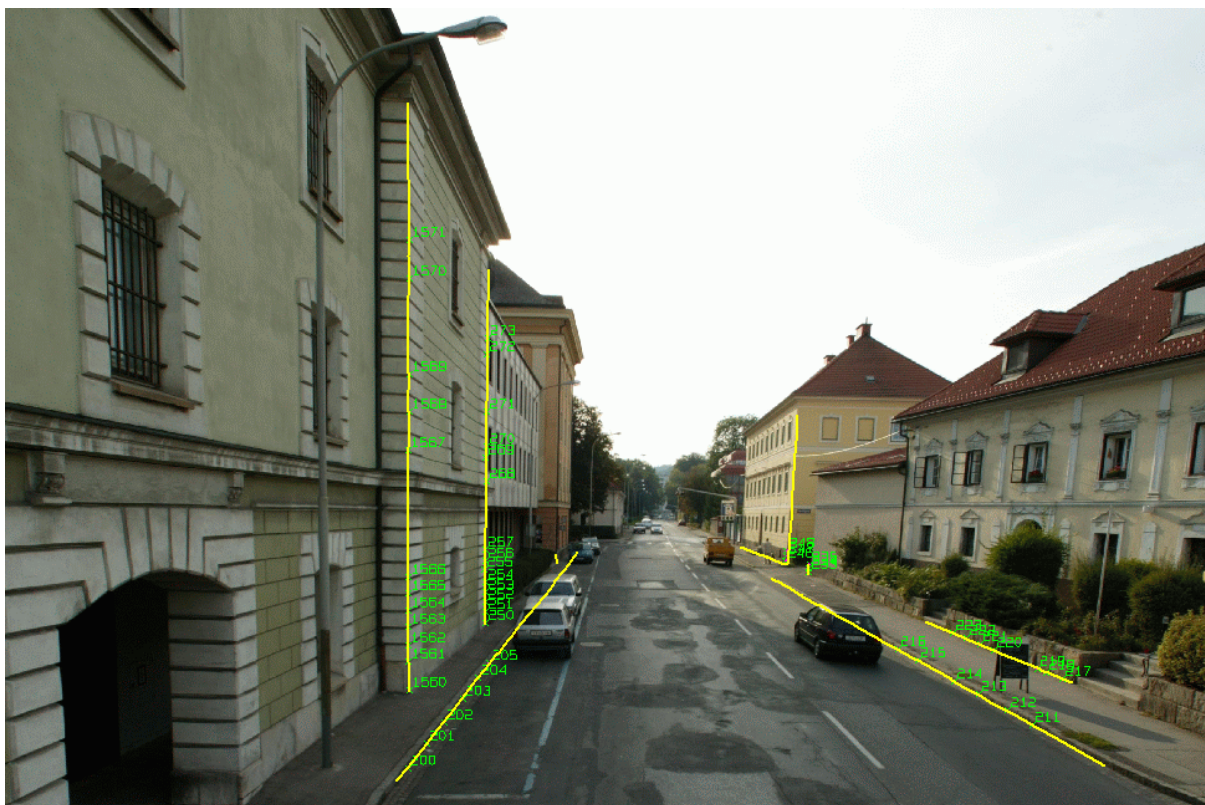


Abbildung 5.8: In ein Photo rückprojizierte Passgeraden mit darauf gemessenen Bildpunkten

Insgesamt wurden in diesem Beispiel 31 Gestalten verwendet, die 18 allgemeine (de facto näherungsweise horizontale) und 13 streng vertikale Passgerade repräsentieren (Abbildung 5.9). Als horizontale Passgeraden dienten 13 Gehsteigkanten, 3 Gebäudekanten sowie 2 Einfriedungskanten; als vertikale Passgerade dienten durchwegs Gebäudekanten.

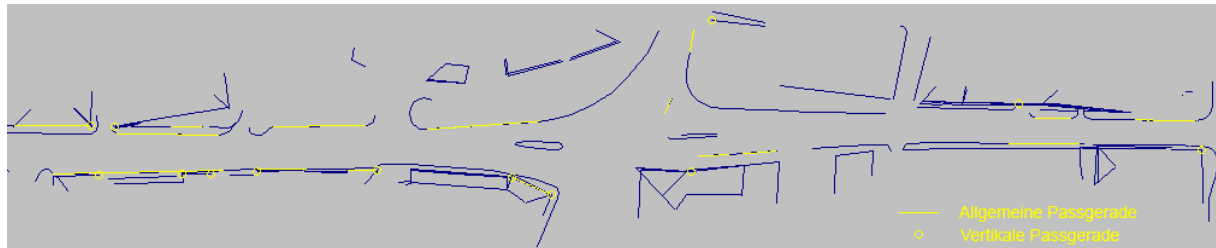


Abbildung 5.9: Verwendete Passgeraden (Grundrissansicht)

Zur Georeferenzierung von Gruppe A wurden 15 Gestalten herangezogen (9H/6V), im Falle der Gruppe B waren es 23 (13H/10V). Hauptursache für die geringere Anzahl der Passelemente in Gruppe A war eine Baustelle im entsprechenden Straßenabschnitt.

Insgesamt wurden in der Gruppe A 156 auf den Passgeraden befindliche Punkte in 11 der 21 Fotos gemessen. In den Photos 613, 616-619, 704-707 sowie 709 mussten keine Punkte gemessen werden.

In der Gruppe B waren es 441 Punkte in 15 der 23 Photos. In diesem Fall konnte in den Photos 624-626, 628, 629, 691, 693 sowie 698 auf derartige Messungen verzichtet werden.

Beobachtungen zur projektbegleitenden Bestimmung der Mounting Calibration

Für die (als konstant angenommene) relative Orientierung der Kamera bezüglich des Scanners (Mounting Calibration) wurden zunächst Werte aus einem älteren Projekt verwendet. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Werte für dieses Projekt nicht mehr brauchbar waren. Diese Tatsache konnte durch Projektion von Punkten, die im Intensitätsbild (vgl. Abbildung 5.3) gut definiert sind, in das entsprechende Foto – bzw. umgekehrt durch Transformation von Bildstrahlen in die 3D-Punktwolke des Scans – relativ einfach verifiziert werden: es wurden (tangente) Abweichungen von 15 cm im Objektraum auf Entfernungen von ca. 25 m beobachtet. Mit den in Abschnitt 3.3.2 aus Kalibrierenaufnahmen ermittelten Werte, die ca. 11 Wochen nach diesem Projekt durchgeführt wurden, ergaben sich ähnlich große Abweichungen. Als weiteres Indiz für eine inkorrekte Mounting Calibration traten bei der Gesamtausgleichung mit den entsprechenden festgehaltenen Parameterwerten auffallend große Residuen auf.

Somit war eine Neubestimmung der Mounting Calibration unbedingt erforderlich. Dies erwies sich jedoch als schwierig, da innerhalb des Projektes keine speziellen Kalibrierenaufnahmen zur Verfügung standen und eine Vorab-Bestimmung aus den vorhandenen Aufnahmen aufgrund ihrer dafür ungeeigneten Konfigurationen mit ausreichender Genauigkeit und Verlässlichkeit

nicht möglich war. Die einzige Alternative war daher die projektbegleitende Bestimmung der Mounting Calibration im Rahmen der Gesamtausgleichung.

Dazu wurden 4 in den Intensitätsbildern der Scans gut definierte Punkte (alle auf reflektierenden Verkehrszeichen) ausgewählt und in den entsprechenden Fotos gemessen. Allerdings ist deren räumliche Verteilung bei weitem nicht optimal – in der Nähe der Bildecken waren jedoch keine geeigneten Punkte vorhanden. Nichtsdestotrotz sorgen diese Beobachtungen für die notwendige Verknüpfung von Scans und Fotos. Alle 4 Punkte wurden in den Scan-Intensitätsbildern bzw. Fotos der Gruppe A gemessen (2 davon an derselben Scanposition), wobei Aufnahmen sowohl der Hin- als auch der Rückfahrt herangezogen wurden. Im Zuge der Gesamtausgleichung für diese Gruppe wurden die 6 Parameter der Mounting Calibration bestimmt. Diese wurden in die entsprechende Gesamtausgleichung der anderen Gruppe (B) als Konstante eingeführt, da deren Aufnahmen allesamt zeitlich zwischen den Aufnahmen der Hin- und Rückfahrt der Gruppe A liegen und daher keine signifikant unterschiedliche Mounting Calibration zu erwarten war.

Resultate der Georeferenzierung

Beobachtungen	
Polarbeobachtungen (1.237 Tripel im Ankerpunktnetz + 4 zusätzl. Punkte)	3.723
Passpunktkoordinaten (22 Punkte)	66
Gestaltbeobachtungen (24 Passpunkte + 156 Neupunkte)	360
Bildkoordinaten (156 Neupunkte + 4 zusätzl. Punkte)	320
Beobachtungen gesamt	4.469
Davon nach robuster Schätzung deaktiviert	8
Verwendete Beobachtungen	4.461
Unbekannte	
Orientierungsparameter der 21 Scanpositionen	126
Parameter der Mounting Calibration	6
Gestaltparameter der 9 allgemeinen Passgeraden	36
Gestaltparameter der 6 vertikalen Passgeraden	12
Objektkoordinaten der 21*4=84 Ankerpunkte	252
Objektkoordinaten der 22 Passpunkte	66
Objektkoordinaten der 156 Neupunkte	468
Objektkoordinaten der 4 zusätzl. Punkte zur Bestimmung der Mounting Calibration	12
Unbekannte gesamt	978
Redundanz	3483

Tabelle 5.4: Bilanz der Ausgleichung für die Gruppe A

In Tabelle 5.4 bzw. 5.5 ist die Bilanz der Ausgleichung für die Gruppe A bzw. Gruppe B angegeben. Der größte Anteil der Beobachtungen (und letztendlich der Redundanz) stammen jeweils

von den in den Scans fiktiv durchgeführten Polarbeobachtungen innerhalb des Ankerpunktnetzes. Der Großteil der Unbekannten sind Objektkoordinaten; jedoch stellen die ermittelten Werte der Orientierungsparameter der Scanpositionen das eigentliche Ergebnis dar, an dem man letztendlich interessiert ist.

Wie man anhand von Tabelle 5.4 erkennen kann, erhöht sich in diesem Fall aufgrund der projektbegleitenden Bestimmung der Mounting Calibration die Anzahl der Beobachtungen um $4 \cdot 3 + 4 \cdot 2 = 20$, die Anzahl der Unbekannte jedoch ebenfalls um $6 + 4 \cdot 3 = 18$, d.h. die Redundanz erhöht sich nur um 2. Allerdings ergeben sich bereits aus den Relativorientierungen der Bilder (die zum Teil durch die beobachteten Passgeraden bekannt sind) und der Scans (Ankerpunkte) gewisse Abhängigkeiten zwischen den 6 Parametern, sodass deren Bestimmung – wenn auch nur mit großer Unsicherheit – bereits ohne die zusätzlich durchgeführten Beobachtungen prinzipiell möglich wäre.

Beobachtungen	
Polarbeobachtungen (1.508 Tripel im Ankerpunktnetz)	4.524
Passpunktkoordinaten (30 Punkte)	90
Gestaltbeobachtungen (36 Passpunkte + 441 Neupunkte)	954
Bildkoordinaten (441 Neupunkte)	882
Beobachtungen gesamt	6.450
Davon nach robuster Schätzung deaktiviert	13
Verwendete Beobachtungen	6.437
Unbekannte	
Orientierungsparameter der 23 Scanpositionen	138
Gestaltparameter der 13 allgemeinen Passgeraden	52
Gestaltparameter der 10 vertikalen Passgeraden	20
Objektkoordinaten der $23 \cdot 4 = 92$ Ankerpunkte	276
Objektkoordinaten der 30 Passpunkte	90
Objektkoordinaten der 441 Neupunkte	1.323
Unbekannte gesamt	1.899
Redundanz	4.538

Tabelle 5.5: Bilanz der Ausgleichung für die Gruppe B

In beiden Fällen wurde eine robuste Schätzung zur Detektion und Elimination grober Beobachtungsfehler durchgeführt (Details der dazu im System ORIENT/ORPHEUS verwendeten Methode sind in [ROTTENSTEINER 2001] bzw. [KAGER et al. 2002] angegeben). Die dabei aufgedeckten Beobachtungsfehler sind in beiden Fällen auf eine oder mehrere grob fehlerhafte Passpunktkoordinaten zurückzuführen.

Interessant ist nun, inwieweit die Scans beider Gruppen nach der Georeferenzierung zueinanderpassen bzw. welche Abweichungen vom Bestandsplan auftreten. Dazu betrachten wir zunächst die beiden im Überlappungsbereich liegenden Scans und vergleichen ihre aus den beiden Gruppen ermittelten Orientierungsparametersätze.

In Tabelle 5.6 sind die entsprechenden Parameterwerte sowie deren Differenzen für die beiden Scans 623 und 700 angegeben. Auffällig groß sind die Abweichungen des Sekundärwinkels ζ (Zenitwinkel der z -Achse des lokalen Scannersystems). Die unterschiedlichen Vorzeichen, aber betragsmäßig ähnlich großen Werte für die beiden Winkeldifferenzen $\Delta\zeta$ bzw. $\Delta\kappa$ sind durch den um ca. 200 Gon verschiedenen Primärwinkel α (Horizontalwinkel der z -Achse des lokalen Scannersystems bezüglich der – hier nach Osten zeigenden – X -Achse des Landessystems) erklärbar. Somit ist zwischen Scans verschiedener Gruppen in erster Linie eine relative Verkipfung um die Straßenachse (Querneigung) zu beobachten. Diese bewirkt in 25 m Entfernung von der Straßenachse Höhendifferenzen von etwa 2 cm.

Scan	α [gon]	ζ [gon]	κ [gon]	X [m]	Y [m]	Z [m]
623-A	309.417	98.065	0.256	763.783	875.396	448.765
623-B	309.428	98.117	0.241	763.774	875.382	448.771
Δ	+0.011	+0.052	-0.015	-0.009	-0.014	+0.006
700-A	106.108	100.386	0.322	778.051	871.089	448.992
700-B	106.120	100.333	0.343	778.047	871.075	448.989
Δ	+0.012	-0.053	+0.021	-0.004	-0.014	-0.003

Tabelle 5.6: Aus den beiden Gruppen A und B ermittelte Orientierungsparametersätze der Scans 623 und 700

Die gemeinsame Grundrissdarstellung der georeferenzierten Scans mit dem Bestandsplan (siehe Abbildung 5.10) erlaubt, Schlüsse auf die Qualität der Georeferenzierung zu ziehen.

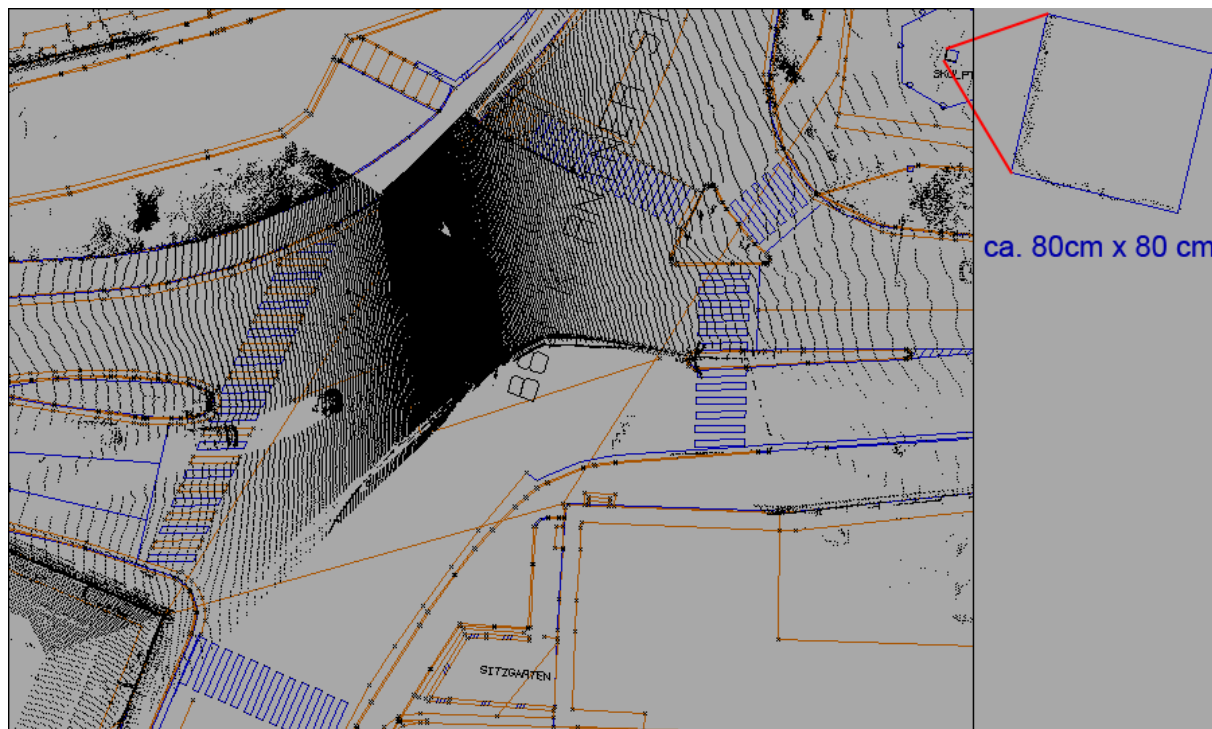


Abbildung 5.10: Bestandsplan mit den georeferenzierten Scans 623-A und 700-A (rechts oben: vergrößerte Darstellung eines Bereiches)

Während die georeferenzierte Punktwolke lagemäßig für beide Gruppen im gesamten Inter-

essensgebiet jeweils auf etwa ± 4 cm mit dem Bestandsplan übereinstimmt, treten höhenmäßig zum Teil auffällig große Abweichungen (bis zu 8 cm) auf, die noch dazu immer dasselbe Vorzeichen aufweisen (die TLS-Punkt wolke weist durchwegs geringere Höhen auf als gemäß Bestandsplan zu erwarten wäre). Dies konnte dadurch festgestellt werden, indem für mehrere Punkte aus dem Bestandsplan jeweils deren Höhe mit jener aus den Laserscannerdaten manuell ermittelten verglichen wurde.

Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind für beide Gruppen in den Abbildungen 5.11 bzw. 5.12 dargestellt. Wie man erkennen kann, sind die Abweichungen bei Gruppe B tendenziell geringer als bei Gruppe A. Bei letzterer treten im mittleren Bereich die maximalen Abweichungen von den Soll-Höhen laut Plan auf. Die zuvor erwähnte relative Verkippung im Kreuzungsbereich ist allerdings auf eine systematische Querneigung der Scans der Gruppe B zurückzuführen.



Abbildung 5.11: Höhenvergleich für Gruppe A (TLS-Punkt wolke minus Bestandsplan in cm)

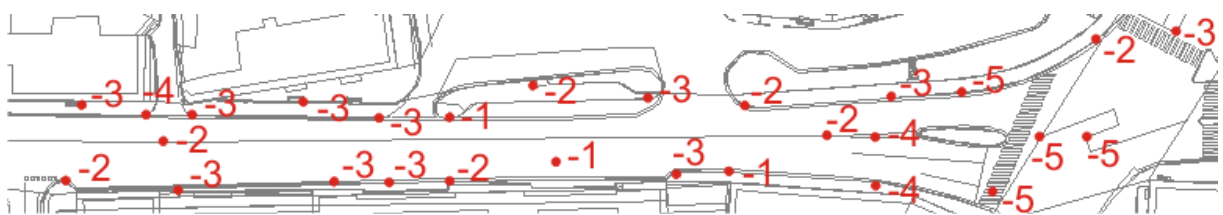


Abbildung 5.12: Höhenvergleich für Gruppe B (TLS-Punkt wolke minus Bestandsplan in cm)

Schlussfolgerungen

Während die untersuchte Georeferenzierungsmethode in einer vereinfachten Umgebung unter „Quasi“-Laborbedingungen (siehe Abschnitt 5.1) gute Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit liefert, lassen sich im Falle des betrachteten praxisnahen kommerziellen Projekts nicht jene Genauigkeiten erzielen, die aufgrund der angenommenen Genauigkeiten der Sensoren bzw. des Bestandsplans theoretisch zu erwarten wären.

Dafür gibt es mehrere Ursachen:

Wie bereits in Kapitel 3 festgestellt wurde, können die 3 Parameter der inneren Orientierung des verwendeten Kamera-Typs signifikanten Änderungen unterliegen. Werden diese Parameter für die innere Orientierung dennoch als konstant angenommen, äußern sich deren Schwankungen – aufgrund der hohen Korrelation – durch scheinbare Schwankungen der 6 Parameter der Mounting Calibration. Auch eine tatsächliche Instabilität der Mounting Calibration ist zusätzlich dazu denkbar. Somit verursacht die Instabilität der inneren Orientierung und/oder der Mounting Calibration bei Annahme konstanter Parameterwerte (wie dies in der Praxis oft

vorkommt, da meist nicht anders möglich) systematische Fehler aufgrund eines zu einfachen Modells.

Weiters ist zu bedenken, dass die Mounting Calibration im konkreten Fall nicht unmittelbar vor dem Projekt bestimmt wurde und dies somit projektbegleitend erfolgen musste. Allerdings ist die vorliegende Aufnahmekonfiguration in diesem Fall denkbar ungeeignet: Eine günstige Verteilung geeigneter Punkte ist in den meisten Fällen von vornherein bereits dadurch eingeschränkt, dass im oberen Bereich der Photos meist Himmel und im unteren Bereich meist Straßenasphalt auftritt. In letzterem Fall ist es meist schwierig, aufgrund der radiometrischen (Photos) bzw. geometrischen (Scans) Homogenität markante korrespondierende Punkte zu finden. Auch die Verwendung der Scan-Intensitätsbilder bietet aufgrund der groben Scan-Auflösung kaum eine Alternative. Zusätzlich beobachtete Verknüpfungspunkte zwischen mehreren Photos sorgen auch nicht für eine entscheidende Stabilisierung, da aufgrund der speziellen kollinearen Aufnahmeanordnung meist schleifende Strahlenschnitte auftreten. Unabhängig von der Stabilität der zuvor erwähnten 9 Parameter ist also eine genaue und zuverlässige Bestimmung der Mounting Calibration aus den gegebenen Aufnahmedaten nicht möglich.

Ein anderer Problembereich umfasst Unzulänglichkeiten im Plan (Aktualität bzw. tatsächlich grob fehlerhafte Punktkoordinaten), Fehlinterpretation des Plans durch den Operator sowie die Definitionsunsicherheit beim Messen der Passelemente in den Photos. Folglich ist die Methode, die auf der Messung nur relativ weniger Passelemente beruht, nicht verlässlich genug, da keine ausreichende Kontrolle möglich ist. Allerdings ist eine höhere Redundanz zur Aufdeckung grober Fehler durch Messung zusätzlicher Passelemente nur schwer erzielbar, da häufig die Sichtbarkeit zu den Passelementen aufgrund von Abschattungen nicht gegeben ist. Überhaupt ist anzumerken, dass die im 2D-Bestandsplan verfügbaren Passelemente nur äußerst geringe Höhenunterschiede aufweisen, was eine Unsicherheit der zu bestimmenden z -Translationskomponenten der Scanpositionen zur Folge hat.

Selbstverständlich ist auch die relative Orientierung der Scans eine mögliche Fehlerquelle, insbesondere im Falle des hier verwendeten Aufnahmemodus, bei welchem der auf die Scans beider Fahrtrichtungen simultan angewandte ICP-Algorithmus zu systematischen Fehlern führt (siehe Abschnitt 5.2.2). Dies ließe sich jedoch durch Verwenden eines anderen Aufnahmemodus (nämlich desjenigen in Abbildung 2.3(e)) vermeiden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die verwendete Methode zur Georeferenzierung nur unter günstigen „Quasi“-Laborbedingungen verlässlich funktioniert; in komplexeren Situationen, wie sie bei diesem Projekt auftreten, muss mit Problemen und in weiterer Folge mit Genauigkeitseinbußen gerechnet werden, da bei der Methode von relativ vielen Annahmen ausgegangen wird, die in der Praxis nicht oder nur zum Teil erfüllt sind.

Nichtsdestotrotz sind die die erzielbaren Genauigkeiten für viele Anwendungen durchaus ausreichend, wie dies auch bei diesem Projekt (Ziel: Visualisierung des Straßenraums; siehe Abbildung 5.13) der Fall war. Sollen höhere Genauigkeiten erzielt werden, muss man zwecks Erzeugung zusätzlicher Redundanz mehr Zeit in die Datenerfassung investieren und/oder zusätzliche Sensoren wie GPS, IMU oder Inklinometer einsetzen.



Abbildung 5.13: Visualisierung der eingefärbten georeferenzierten Punktwolke gemeinsam mit abgeleiteten texturierten Gebäudemodellen und texturiertem Boden (nach erfolgter Modellierung durch die Firma Geodata IT)

5.3 Beispiel 3: Nationaltheater Zagreb

Die Aufnahme­daten für dieses Beispiel stammen im Gegensatz zu jenem aus dem vorigen Abschnitt 5.2 nicht aus einem kommerziellen Projekt, sondern wurden eigens zur Evaluierung sowohl der automatischen relativen Bildorientierung als auch der in Abschnitt 4.5 beschriebenen Methode zur Ermittlung des Maßstabsfaktors erfasst. In diesem Abschnitt wird jedoch nur auf den letztgenannten Aspekt dieser Untersuchungen näher eingegangen.

5.3.1 Aufnahme­daten

Bei jeweils stehendem Fahrzeug wurden insgesamt 3 Scans aufgenommen (siehe Abbildung 5.14), wobei jedoch an Stelle der in Abbildung 2.1 dargestellten Plattform jeweils die Standard-Konfiguration (lotrechte Scannerachse mit direkt auf dem Scanner montierter Kamera; vgl. Abbildung 2.2) verwendet wurde. Die Scans wurden mit einer Winkelschrittweite von ca. 0.12° durchgeführt, was bei einem Aufnahmebereich von etwa $180^\circ \times 80^\circ$ einer Matrix von 1500×666 Messungen entspricht. An jeder der 3 Scanpositionen (als ScanPos03, ScanPos04 und ScanPos05 bezeichnet) wurden 3 Photos in verschiedene Horizontal-Richtungen aufgenommen, von denen jeweils nur das mittlere (Richtung zum Objekt) für die Tests herangezogen wurde.

Weiters wurde zwischen den Scanpositionen der dynamische Modus (vgl. Abbildung 2.3(a)) durch Aufnahme zusätzlicher Photos simuliert, sodass sich – gemeinsam mit den Photos der



Abbildung 5.14: Aus 3 Scanpositionen stammende eingefärbte Punktwolke zweier Fassaden des Nationaltheaters Zagreb.

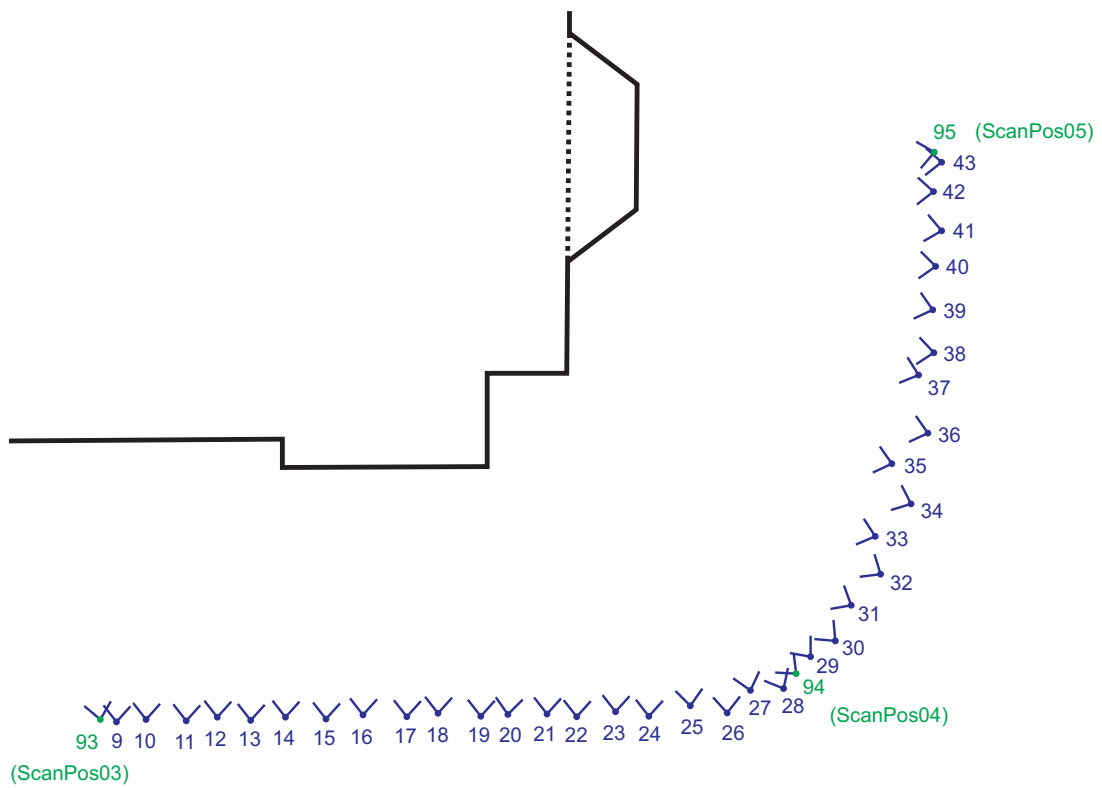


Abbildung 5.15: Vereinfachte Grundrissansicht von Teilen der beiden Gebäudefassaden sowie Positionen und Richtungen der aufgenommenen Photos. Die Photos 93, 94 bzw. 95 stammen von den Scanpositionen ScanPos03, ScanPos04 bzw. ScanPos05; die Photos 9 bis 43 wurden zusätzlich dazu aufgenommen.

3 Scanpositionen – eine Gesamt-Bildsequenz ergibt, die von ScanPos03 bis ScanPos05 reicht (siehe Abbildung 5.15¹). Für alle Photos wurde wieder ein 14mm-Objektiv verwendet.

5.3.2 Relative Orientierung der Scans

Zunächst wurden nur die 3 Scans betrachtet und deren relative Orientierung mittels ICP-Algorithmus (Standardparameter Diss-S; siehe Anhang C.4.2) ermittelt, wobei das Koordinatensystem von ScanPos03 als Referenzsystem verwendet wurde. Die resultierenden Orientierungsparameter sind in Tabelle 5.7 angegeben. Sie werden später als Vergleichswerte dienen.

Scan-Position	ω [gon]	φ [gon]	κ [gon]	X [m]	Y [m]	Z [m]
ScanPos03	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ScanPos04	-1.598	-1.518	41.004	-40.993	3.478	-0.164
ScanPos05	1.911	0.139	102.317	-53.576	-25.179	-1.293

Tabelle 5.7: Resultierende Werte für die Orientierungsparameter der Scanpositionen gemäß ICP-Algorithmus

5.3.3 Relative Orientierung der Photos

Mit Hilfe des in Abschnitt 4.4.1 bereits erwähnten Systems MetropoGIS ([VRVIS 2007], [KLAUS et al. 2002]) wurden zwei Bildsequenzen jeweils relativ zueinander orientiert. Die erste Sequenz (im folgenden als Sequenz A bezeichnet) umfasst den Bereich zwischen ScanPos03 und ScanPos04, d.h. die Bilder 93, 9, 10, ..., 27, 28, 94 (siehe Abbildung 5.15). Die zweite Sequenz (im folgenden als Sequenz B bezeichnet) umfasst den Bereich zwischen ScanPos04 und ScanPos05, d.h. die Bilder 94, 29, 30, ..., 42, 43, 95.

Als Längeneinheit wird vom System jeweils die Basislänge jenes Bildpaares gewählt, welche die stärkste Verknüpfung aufweist. Im Falle von Sequenz A war dies das Bildpaar (12;13), bei Sequenz B das Paar (42;43).

Als Ergebnis einer relativ orientierten Bildsequenz erhält man neben den relativen Orientierungsparametern der Bilder auch die Bild- und Objektkoordinaten der gematchten Punkte (letztere im lokalen, nicht-metrischen System der Sequenz).

¹Die zusätzlichen Photos weisen abwechselnd verschiedene Höhen auf, da dieses Experiment auch zur Evaluierung eines Dense-Matching-Algorithmus genutzt wurde (was allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit ist) und dafür eine zickzackförmige Trajektorie erforderlich war. Da jedoch bei der Aufnahme nur eine der beiden Kameras einsatzbereit war, wurden zunächst alle „hohen“Photos (ungerade Nummern in der Abbildung) und danach – um etwa das halbe Aufnahme-Intervall versetzt – alle „tiefen“Photos (gerade Nummern in der Abbildung) aufgenommen. Deshalb stammt jeweils nur jedes zweite zusätzliche Photo aus einer gemeinsamen Fahrzeugtrajektorie.

5.3.4 Ermittlung des Maßstabsfaktors

Um den Maßstabsfaktor einer Bildsequenz bestimmen zu können, müssen die gematchten Punkte zunächst vom Sequenz-Koordinatensystem ins Scannerkoordinatensystem jenes Scans transformiert werden, der für die Skalierung herangezogen werden soll. Dazu muss neben den relativen Orientierungsparametern der Sequenz sowohl die Mounting Calibration als auch der jeweilige Winkel φ (ebene Drehung des Scannerkopfes; vgl. Abbildung 3.14) des zur Scanposition gehörenden Photos bekannt sein, was wir im folgenden voraussetzen.

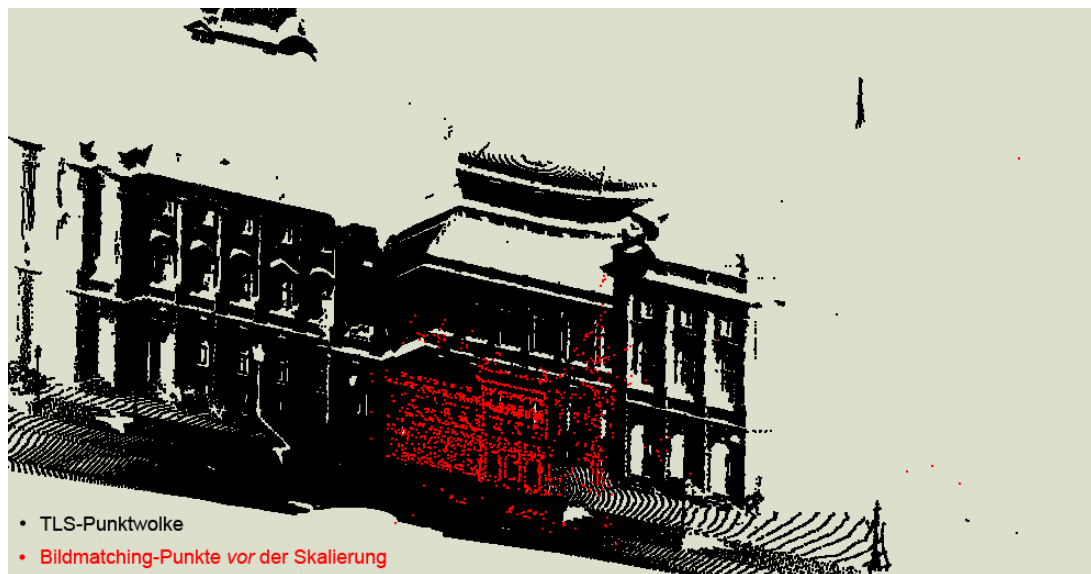


Abbildung 5.16: TLS-Punktwolke der Position „ScanPos03“ mit den aus der Bildsequenz A gematchten Punkten vor der Skalierung

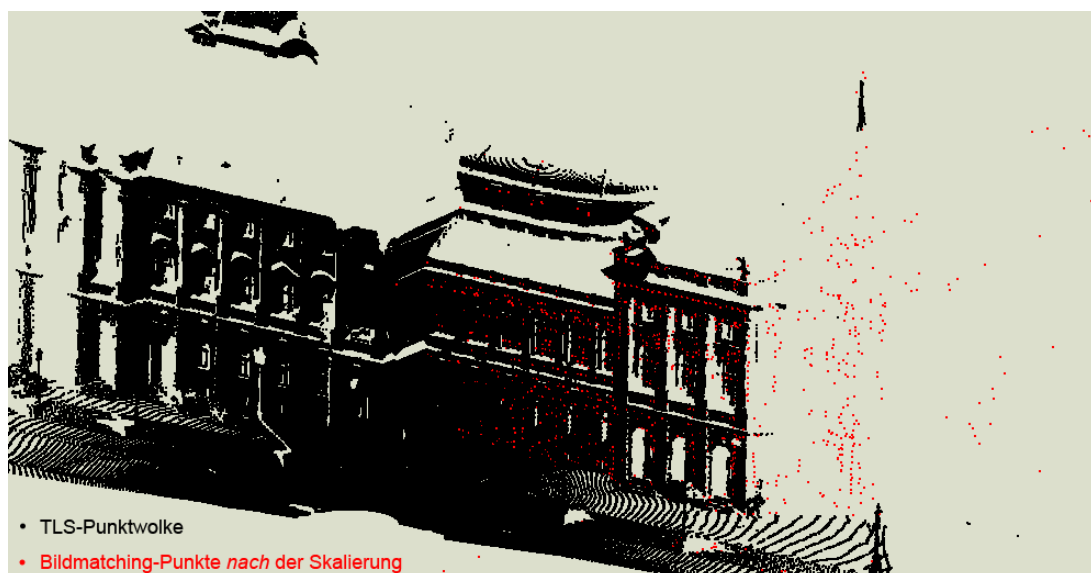


Abbildung 5.17: TLS-Punktwolke der Position „ScanPos03“ mit den aus der Bildsequenz A gematchten Punkten nach der Skalierung

In Abbildung 5.16 bzw. 5.17 ist ein Scan sowie die gematchten Punkte der Sequenz im selben

Koordinatensystem *vor* bzw. *nach* der Skalierung dargestellt. Wie man erkennen kann, existieren in diesem Fall gematchte Punkte in Fassadenbereichen, die aufgrund von Abschattungen durch den Scan nicht erfasst werden konnten. Somit würde bei Verwendung *aller* aus der Bildsequenz stammenden gematchten Punkte die in 4.27 beschriebene Methode aufgrund von Fehlzuordnungen zahlreiche systematisch fehlerhafte Maßstabsfaktoren m_i liefern (falls man keine aufwendige Sichtbarkeitsanalyse durchführen würde). Ab einem gewissen Anteil solcher Fehlzuordnungen wäre selbst der Median der Werte m_i keine verlässliche Schätzung mehr für den Maßstabsfaktor m .

Als Ausweg könnte man anstatt des Medians das Histogramm der m_i analysieren und auf geeignete Weise iterativ eine robuste Schätzung zur Ermittlung eines repräsentativen Wertes für m durchführen. Besser ist es allerdings, die zuvor erwähnten Fehlzuordnungen von vornherein möglichst zu vermeiden, indem nur jene aus dem Bildmatching stammenden Punkte für die Maßstabsbestimmung verwendet werden, bei deren Generierung das zur entsprechenden Scanposition gehörende Photo „beteiligt“ war, d.h. in diesem abgebildet wird. Dies wurde im folgenden auch so durchgeführt.

Zur Untersuchung der Methode wurden insgesamt 4 Szenarien durchgerechnet, wobei jeweils die Orientierungsparameter einer Scanposition (mit den Werten aus Tabelle 5.7) als bekannt angenommen und Näherungswerte für die Orientierungsparameter einer zweiten (benachbarten) Scanposition bestimmt wurden: Dazu wurde zunächst die relativ orientierte Bildsequenz zwischen den beiden Scanpositionen mit Hilfe des festgehaltenen Scans nach der oben erwähnten Methode skaliert. Anschließend konnte mit Hilfe der bekannten Transformation zwischen dem System der aufgesetzten Kamera und jenem des Scanners sowie mittels „Anhängen“ der skalierten Bildsequenz an die erste Scanposition auf die Orientierungsparameter der zweiten Scanposition geschlossen werden. In Tabelle 5.8 sind die angesprochenen 4 Szenarien beschrieben, wobei auch jeweils die Anzahl N der verwendeten Bildmatching-Punkte (entspricht der Anzahl der durch Distanzvergleich ermittelten Maßstabsfaktoren m_i) sowie der als Median der m_i ermittelte Wert m für den Maßstabsfaktor der Bildsequenz angegeben sind.

Szenario	Bekannt	Zu bestimmen	Bildsequenz	N	m
1	ScanPos03	ScanPos04	A	138	2.015
2	ScanPos04	ScanPos03	A	38	2.005
3	ScanPos04	ScanPos05	B	102	1.730
4	ScanPos05	ScanPos04	B	160	1.757

Tabelle 5.8: Zur Evaluierung der Methode durchgeführte Szenarien. Die Orientierungsparameter der ersten Scanposition werden jeweils als bekannt betrachtet, jene der zweiten sollen jeweils mit Hilfe der entsprechenden Bildsequenz näherungsweise bestimmt werden. N bezeichnet die Anzahl der zur Skalierung der Sequenz verwendeten Bildmatching-Punkte. m ist der für die Sequenz ermittelte Maßstabsfaktor.

Die Maßstabsfaktoren m sollten für die Szenarien 1 und 2 bzw. 3 und 4 theoretisch jeweils identisch sein, da sich diese jeweils auf die Basislänge desselben Bildpaares beziehen. Es treten relative Abweichungen von ca. 0.5% bzw. 1.5% auf. Betrachtet man für jedes Szenario das

Histogramm der m_i (siehe Abbildung 5.18), kann man erkennen, dass deren Streuung noch weitaus größere Werte annimmt (Die im Falle von Szenario 4 besonders große Streuung ist auf Abschattungen im Bereich des Haupteinganges und die damit verbundene relativ hohe Anzahl an Fehlzuordnungen zurückzuführen).

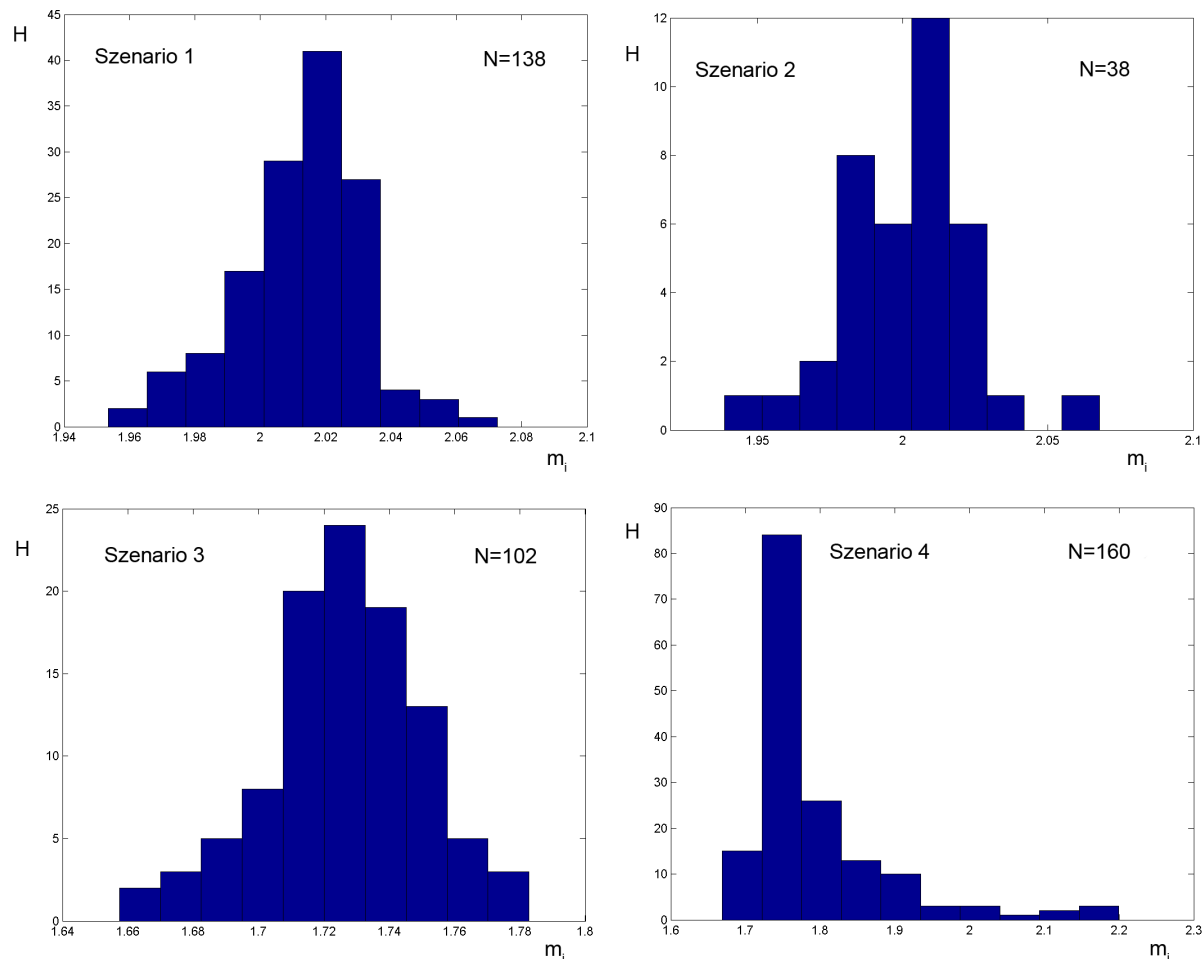


Abbildung 5.18: Histogramme der durch Distanzvergleich ermittelten Maßstabsfaktoren m_i für die 4 Szenarien.

Szenario	Näherung für Scanposition	ω [gon]	φ [gon]	κ [gon]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	ScanPos04	1.585	-2.174	40.475	-40.657	3.549	-0.273
	Δ ICP (vgl. Tab. 5.7)	+3.183	-0.656	-0.529	+0.336	+0.071	-0.109
2	ScanPos03	0.465	0.651	0.190	-0.424	0.315	-0.209
	Δ ICP (vgl. Tab. 5.7)	+0.465	+0.651	+0.190	-0.424	+0.315	-0.209
3	ScanPos05	1.830	-0.322	100.821	-53.325	-25.068	-1.397
	Δ ICP (vgl. Tab. 5.7)	-0.081	-0.461	-1.496	+0.251	+0.111	-0.104
4	ScanPos04	1.708	-1.062	42.502	-41.733	4.102	-0.084
	Δ ICP (vgl. Tab. 5.7)	+3.306	+0.456	+1.498	-0.740	+0.624	+0.080

Tabelle 5.9: Nach Durchrechnung der 4 Szenarien erhaltene Näherungswerte für die Orientierungsparameter der Scanpositionen und deren Abweichungen Δ zu den mittels ICP-Algorithmus erhaltenen Werten.

Ursache dafür ist die (im Vergleich zu den Laserscanner-Punkten) verhältnismäßig große Streuung der Bildmatching-Punkte um die jeweilige Fassadenebene (Tiefenunsicherheit beim Matching).

In Tabelle 5.9 sind für jede der 4 Szenarien die ermittelten Orientierungsparameter der jeweiligen Scanposition sowie deren Differenzen zu jenen aus Tabelle 5.7 angegeben. Die Diskrepanzen bei den Drehwinkeln sind klarerweise nicht auf Fehler des Maßstabsfaktors zurückzuführen, sondern weisen auf Fehler der Mounting Calibration und/oder der relativen Bildorientierung hin. Die Diskrepanzen bei den Translationskomponenten ergeben sich durch Überlagerung aller drei genannten Fehlerquellen.

Für jedes Szenario wurde anschließend überprüft, ob die erhaltenen Näherungswerte für die Orientierungsparameter der jeweiligen Scanposition gut genug sind, um als Startwerte für den ICP-Algorithmus verwendet werden zu können. In allen vier Fällen konvergierte der Algorithmus zu der in Tabelle 5.7 angegebenen Lösung, wobei im Falle von Szenario 4 erwartungsgemäß am meisten Iterationsschritte (nämlich 7) erforderlich waren. Somit konnte das Ziel (automatisierte Beschaffung von geeigneten Startwerten für den ICP-Algorithmus) mit Hilfe dieser Methode erreicht werden. Allerdings könnte es bei dieser Methode zu Problemen kommen, nämlich in jenen Fällen, in denen in Scanner-Nähe zu wenig verlässliche Bildmatching-Punkte (zu geringe Anzahl N) zur Bestimmung des Maßstabs zur Verfügung stehen und dieser daher nicht gut genug bestimmt werden kann. In solchen Fällen wäre es erforderlich, auch jene Bildmatching-Punkte, die sich nicht in unmittelbarer Nähe des Scanners befinden, zur Maßstabsbestimmung einzubeziehen.

Zu diesem Zweck könnte eine Art ICP-Algorithmus verwendet werden, bei dem allerdings nur der Maßstabsfaktor m als Unbekannte auftritt. Mit Hilfe eines Näherungswertes $m^{(0)}$ für m , der sich mit der obigen Methode unter Einbeziehung aller Bildmatching-Punkte ermittelt lässt, können Punkt-zu-Tangentialebene-Korrespondenzen zwischen Bildmatching-Punkten und Laserscannerpunkten (mit abgeschätzten Normalvektoren) ermittelt werden. Die zu minimierende Fehlerfunktion lautet in Analogie zum ICP-Algorithmus:

$$E(\hat{m}) = \sum_{i=1}^N \left[(\mathbf{c} + \hat{m} \cdot (\mathbf{p}_i - \mathbf{c}) - \mathbf{q}_i)^T \mathbf{n}_i \right]^2 \rightarrow \min \quad (5.1)$$

N ist die Anzahl der Korrespondenzen, \hat{m} der Korrektur-Maßstabsfaktor, \mathbf{p}_i sind die im Scannersystem vorliegenden näherungsweise skalierten Bildmatching-Punkte, \mathbf{q}_i die Laserscannerpunkte, \mathbf{n}_i die an den Laserscannerpunkten abgeschätzten Normalvektoren, und \mathbf{c} ist das Kameraprojektionszentrum (=Fixpunkt der Skalierung) bezüglich des Scannersystems.

Wir reduzieren die Punkte auf das Projektionszentrum \mathbf{c} , d.h. $\mathbf{p}_i := \mathbf{p}_i - \mathbf{c}$ und $\mathbf{q}_i := \mathbf{q}_i - \mathbf{c}$. Dann vereinfacht sich die Beziehung (5.1) zu:

$$E(\hat{m}) = \sum_{i=1}^N \left[(\hat{m} \cdot \mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i)^T \mathbf{n}_i \right]^2 \rightarrow \min \quad (5.2)$$

Mit $p_i := \mathbf{p}_i^T \mathbf{n}_i$ und $q_i := \mathbf{q}_i^T \mathbf{n}_i$ gilt:

$$E(\hat{m}) = \sum_{i=1}^N [\hat{m} \cdot p_i - q_i]^2 \rightarrow \min \quad (5.3)$$

Setzt man die Ableitung von (5.3) nach m gleich Null, erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \hat{m}} &= 2 \cdot \sum_{i=1}^N [(\hat{m} \cdot p_i - q_i) \cdot p_i] = 0 \\ \hat{m} \cdot \sum p_i^2 - \sum p_i q_i &= 0 \quad \Rightarrow \quad \hat{m} = \frac{\sum p_i q_i}{\sum p_i^2} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Nach jedem Iterationsschritt k ($k \geq 1$) erhält man neue Punktkoordinaten

$$p_i^{(k)} = \mathbf{c} + \hat{m} \cdot (\mathbf{p}_i^{(k-1)} - \mathbf{c})$$

und einen neuen (Gesamt-)Maßstabsfaktor

$$m^{(k)} = \hat{m} \cdot m^{(k-1)}$$

Als Abbruchkriterium bietet sich $|\hat{m} - 1| < \epsilon$ an.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Problematik der Orientierung von terrestrischen Laserscanneraufnahmen und Photos bei Verwendung einer mobilen Aufnahmeplattform zum Zwecke der Datenerfassung im innerstädtischen Raum behandelt. Der Blick auf bereits bestehende Mobile-Mapping-Systeme (siehe Abschnitt 1.2) hat gezeigt, dass deren Georeferenzierung meist auf satellitengestützter Positionierung (GPS) basiert, was in urbanen dicht verbauten Gebieten zu den bekannten Problemen (Signalausfälle aufgrund von Abschattungen, Mehrwegeeffekte, etc.) führen kann. Um solche Probleme möglichst vermeiden zu können, war es daher das erklärte Ziel dieser Arbeit, alternative Methoden zur Georeferenzierung zu entwickeln, bei denen eine solche Abhängigkeit von GPS nicht gegeben ist. Zur Evaluierung dieser Methoden in der Praxis stand das mobile Aufnahmesystem *CityGRID Scanner* der Firma Geodata IT zur Verfügung (siehe Kapitel 2).

Eine wichtige Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige Georeferenzierung ist die Kalibrierung sowohl der einzelnen Sensoren als auch des Gesamtsystems (siehe Kapitel 3).

In Abschnitt 3.2 wurde die Kamerakalibrierung behandelt. Dabei wurde insbesondere die Stabilität der Kamerakalibrierung bei handelsüblichen Kameras, welche heutzutage oft für photogrammetrische Zwecke eingesetzt werden, untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass bei den untersuchten Kameras die Parameter der inneren Orientierung signifikanten Änderungen unterliegen, die auf Bewegungen des Sensor-Chips im Inneren des Kameragehäuse und auf geometrische Instabilitäten des Objektivs zurückzuführen sind.

Der Abschnitt 3.3 befasste sich mit der Systemkalibrierung, wobei deren praktische Durchführung anhand eines Kalibrierprojektes des *CityGRID Scanner* gezeigt wurde. Die Systemkalibrierung beschränkte sich dabei auf die Bestimmung der relativen Orientierung des Kamerasystems gegenüber dem Scannersystem (Mounting Calibration). Die Translationskomponenten ließen sich dabei mit Genauigkeiten von wenigen mm sowie die Drehwinkel auf 0.3 bis 0.5 mrad genau bestimmen. Allerdings ist zu beachten, dass in der Praxis bei typischen Projekten die zuvor erwähnten Schwankungen der inneren Orientierung der Kamera auftreten können und diese sich dann als scheinbare Schwankungen der Mounting Calibration bemerkbar machen.

Das Kapitel 4 bildete den Schwerpunkt der Arbeit.

Nach einer kurzen Definition des Begriffes „Georeferenzierung“ in Abschnitt 4.1 wurde zunächst auf die Orientierung von terrestrischen Laserscannerdaten eingegangen. Als geeignete Methode dafür wurde der ICP-Algorithmus erachtet, da dieser ohne künstliche Zielmarken auskommt, was bei großräumigen Mobile-Mapping-Projekten aus wirtschaftlichen Gründen von entscheidender Bedeutung ist. Nachdem der klassische ICP-Algorithmus in Abschnitt 4.2.1 erläutert wurde, erfolgte in Abschnitt 4.2.3 eine Adaption desselbigen für Mobile-Mapping-Anwendungen. Diese besteht insbesondere in der Erweiterung auf mehrere Scans (simultane Orientierung), der Entwicklung eines Planaritätsfilters sowie der möglichen Berücksichtigung von zusätzlichen Beobachtungen (GPS-Positions- und Neigungssensorbeobachtungen).

Anschließend wurde die in dieser Arbeit entwickelte und implementierte Variante des ICP-Algorithmus im Rahmen eines ICP-Vergleichstest evaluiert (Abschnitt 4.2.4). Die Ergebnisse dieser Evaluierung, die sich nicht nur auf Mobile-Mapping-Datensätze beschränkt, sind als positiv und vielversprechend zu bewerten.

Zum Abschluss dieses Kapitels wurden Strategien zur Georeferenzierung erläutert, die für verschiedene Mobile-Mapping-Aufgabenbereiche bzw. Aufnahmemodi des *CityGRID Scanner* entwickelt worden waren.

In Kapitel 5 schließlich wurden zwei dieser Strategien anhand von Beispielen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft.

Das erste Beispiel hatte den Charakter eines Experimentes, welches unter stark vereinfachten Bedingungen stattfand. Dabei konnte die bei der Aufnahme des Straßenraumes vorgeschlagene Georeferenzierungsmethode erfolgreich durchgeführt werden.

Das zweite Beispiel war Teil eines kommerziellen Projektes, bei welchem dieselbe Methode wie im ersten Beispiel – diesmal jedoch unter praxisnahen Bedingungen – getestet wurde. Im Gegensatz zum Experiment traten jedoch mehrere Probleme bzw. Unsicherheiten auf:

- Probleme des simultanen ICP-Algorithmus aufgrund einer ungünstigen Aufnahmekonfiguration
- Interpretationsunsicherheit der Passelemente aus dem Bestandsplan
- Definitionsunsicherheit der Passelemente bei der Messung in den Photos
- Unsicherheiten, was die Aktualität des Bestandsplanes betrifft
- Instabilität der inneren Orientierung der Kamera und/oder der Mounting Calibration

Die im ersten Punkt erwähnten Probleme können durch Wahl des alternativen Stop-and-go-Betriebsmodus (siehe Abschnitt 2.2) vermieden werden. Dieser ist zwar mit einem größeren Zeitaufwand bei der Datenerfassung verbunden, jedoch kann eine deutlich verlässlichere Orientierung mit dem ICP-Algorithmus sichergestellt werden.

Die Methode an sich funktionierte zwar, jedoch konnten damit die erwarteten Genauigkeiten nicht erzielt werden. Die größten Abweichungen der georeferenzierten Punktwolke vom Bestandsplan traten in der Höhenkoordinate auf und betrug bis zu 8 cm, wobei die Punktwolke höhenmäßig systematisch unterhalb des Bestandsplans lag. Nichtsdestotrotz ist die Qualität des Ergebnis für einige Anwendungen (insbesondere Visualisierungen) durchaus akzeptabel.

Das dritte Beispiel diente zur Untersuchung, ob die in Abschnitt 4.5 vorgeschlagene Methode zur automatischen Beschaffung von geeigneten Näherungswerten für den ICP-Algorithmus in der Praxis funktioniert. Obwohl in diesem Beispiel die Methode in allen durchgerechneten Fällen erfolgreich war, wurden potentielle Unzulänglichkeiten entdeckt und schließlich auf eine alternative Lösungsmöglichkeit hingewiesen.

Die hier entwickelten Methoden gingen jeweils von der Konstanz der inneren Orientierung der Kamera sowie der Mounting Calibration aus. Allerdings trifft diese Annahme – wie im ersten Teil der Arbeit gezeigt wurde – i.A. nicht zu. Eine interessante Thematik für weitere Forschungen wäre daher die automatische Bestimmung der entsprechenden Parameter für jedes Scan-Photo-Paar mittels Merkmalsextraktion (vgl. [BÖHM und BECKER 2007]). Allerdings ist daran zu erinnern, dass beim Mobile Mapping – abhängig von der Aufnahmesituation – nicht immer ausreichend viele geeignete Merkmale zur Verfügung stehen, die das gesamte Bildformat abdecken (vgl. die homogenen Bereiche „Himmel“ und „Asphalt“ in Abbildung 5.3 des Abschnittes 5.2.1).

Weiters ist die noch offene Frage zu klären, inwieweit die Einbeziehung von satellitengestützten Beobachtungen, die in dieser Arbeit nur in theoretischer Hinsicht behandelt wurde, zu einer Stabilisierung der hier vorgestellten Methoden in der Praxis beitragen.

Zur Erzielung höherer Genauigkeiten (speziell interessant für das zweite Beispiel „Klagenfurt“) wäre ein hochqualitatives GPS/INS-System erforderlich. Gemeinsam mit den anderen Sensoren könnte dann eine integrierte Georeferenzierung durchgeführt werden.

Schließlich ist noch zu betonen, dass die in dieser Arbeit entwickelten Methoden nicht nur auf ein spezielles Aufnahmesystem im Rahmen des Mobile Mapping beschränkt sind, sondern vielmehr auch für andere Aufgabenbereiche (siehe v.a. Abschnitte 4.2 und 5.3) anwendbar sind.

Literaturverzeichnis

- [ASAI et al. 2005] ASAI, T., M. KANBARA und N. YOKOYA (2005). *3D modeling of outdoor scenes by integrating stop-and-go and continuous scanning of rangefinder*. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI-5/W17 (CD-ROM)*, Mestre-Venedig, Italien.
- [BAE und LICHTI 2007] BAE, K.-H. und D. LICHTI (2007). *On-Site Self-Calibration Using Planar Features for Terrestrial Laser Scanners*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-3/W52 (CD-ROM)*, S. 14–19, Espoo, Finnland.
- [BAUER et al. 2004] BAUER, J., H. BISCHOF, A. KLAUS und K. KARNER (2004). *Robust and fully automated Image Registration using Invariant Features*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B3*, S. 1119–1124, Istanbul, Türkei.
- [BÄUMKER und LUDWIG 2007] BÄUMKER, M. und J. LUDWIG (2007). *„eagle eyes technology“ - ein kinematisches terrestrisches photogrammetrisches Stereoaufnahmesystem mit direkter Georeferenzierung mittels INS, GPS und Odometer*. In: CHESI/WEINOLD, Hrsg.: *14. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2007*, S. 1–10, Obergurgl, Österreich.
- [BENNING und AUSSEMS 1998] BENNING, W. und T. AUSSEMS (1998). *Mobile mapping - digitale Datenerfassung mittels CDSS und automatisierter Auswertung von Videosequenzen*. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 123(6):202–209.
- [BENTLEY 1975] BENTLEY, J.L. (1975). *Multidimensional binary search trees used for associative searching*. *Communications of the ACM (Association for Computing Machinery)*, 8(9):509–517.
- [BERGEVIN et al. 1996] BERGEVIN, R., M. SOUCY, H. GAGNON und D. LAURENDEAU (1996). *Towards a General Multi-View Registration Technique*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(5):540–547.
- [BESL und MCKAY 1992] BESL, P.J. und N. MCKAY (1992). *A method for registration of 3-d shapes*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256.
- [BEWAG 2007] BEWAG, GEOSERVICE (2007). <http://www.geoservice.at/>. Webseite der BEWAG Geoservice GmbH, Zugriff Oktober 2007.

- [BLAIS und LEVINE 1995] BLAIS, G. und M. D. LEVINE (1995). *Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 17(8):820–824.
- [BÖHLER et al. 2003] BÖHLER, W., M. B. VICENT und A. MARBS (2003). *Investigating Laser Scanner Accuracy*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV-5/C15, S. 696–701, Antalya, Türkei.
- [BÖHM und BECKER 2007] BÖHM, J. und S. BECKER (2007). *Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans Using Reflectance Features*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, Bd. I, S. 338–344, Zürich, Schweiz.
- [BROWN 1971] BROWN, D. (1971). *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, 37(8):855–866.
- [CANON 2007] CANON (2007). <http://www.canon.de/>. Webseite von Canon Deutschland, Zugriff Oktober 2007.
- [CAZZANIGA et al. 2007] CAZZANIGA, N.E., G. FORLANI und R. RONCELLA (2007). *Improving the Reliability of a GPS/INS Navigation Solution for Mobile Mapping Vehicles by Photogrammetry*. In: *The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT'07) (CD-ROM)*, Padua, Italien.
- [CHEN und MEDIONI 1992] CHEN, Y. und G. MEDIONI (1992). *Object modeling by registration of multiple range images*. Image and Vision Computing, 10(3):145–155.
- [CLARKE et al. 1998] CLARKE, T.A., J. FRYER und X. WANG (1998). *The principal point for CCD cameras*. Photogrammetric Engineering, 16(92):293–312.
- [CRAMER 1999] CRAMER, M. (1999). *Direct Geocoding – is Aerial Triangulation Obsolete?*. In: FRITSCH/SPILLER, Hrsg.: *Photogrammetric Week '99*, S. 59–70. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- [CRAMER 2003] CRAMER, M. (2003). *Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation – recent test results*. In: FRITSCH, D., Hrsg.: *Photogrammetric Week '03*, S. 161–172. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- [DORFFNER und ZÖCHLING 2003] DORFFNER, L. und A. ZÖCHLING (2003). *Das 3D Modell von Wien - Erzeugung und Fortführung auf Basis der Wiener Mehrzweckkarte*. In: *Proceedings CORP 2003*, S. 161–166, Wien, Österreich.
- [EGGERT et al. 1996] EGGERT, D., A. FITZGIBBON und R. FISHER (1996). *Simultaneous Registration of Multiple Range Views Satisfying Global Consistency Constraints For Use in Reverse Engineering*. Technical Report 804. Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh.
- [EL-SHEIMY 1996] EL-SHEIMY, N. (1996). *The Development of VISAT - A Mobile Survey System for GIS Applications*. Doktorarbeit, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Kanada.

- [FISCHLER und BOLLES 1981] FISCHLER, R. und R. BOLLES (1981). *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. Communications of the ACM, 24(6):381–395.
- [FORKERT et al. 2005] FORKERT, G., A. HARING und G. SÜKAR (2005). *Der Einsatz von fahrzeuggestütztem 3D-Laserscanning für kommunale Anwendungen*. In: STROBL/BLASCHKE/GRIESEBNER, Hrsg.: *Angewandte Geoinformatik 2005 - Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg*, S. 171–175, Salzburg, Österreich.
- [FORLANI et al. 2005] FORLANI, G., R. RONCELLA und F. REMONDINO (2005). *Structure and motion reconstruction of short mobile mapping image sequences*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Bd. I, S. 265–274, Wien, Österreich.
- [FÖRSTNER 1991] FÖRSTNER, W. (1991). *Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung*. Habilitationsschrift. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 370.
- [FOX et al. 1999] FOX, D., W. BURGARD, F. DELLAERT und S. THRUN (1999). *Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots*. In: *Proceedings of the Sixteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'99)*, S. 343–349, Orlando, Florida, USA.
- [FRÜH 2001] FRÜH, C. (2001). *Automated 3D Model Generation for Urban Environments*. Doktorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Karlsruhe, Deutschland.
- [FRÜH und ZAKHOR 2004] FRÜH, C. und A. ZAKHOR (2004). *An Automated Method for Large-Scale, Ground-Based City Model Acquisition*. International Journal of Computer Vision, 60(1):202–209.
- [FRIEDMAN et al. 1977] FRIEDMAN, J.H., J. BENTLEY und R. FINKEL (1977). *An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time*. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 3(3):209–226.
- [GELFAND et al. 2003] GELFAND, N., L. IKEMOTO, S. RUSINKIEWICZ und M. LEVOY (2003). *Geometrically Stable Sampling for the ICP Algorithm*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'03)*, S. 260–267, Banff, Kanada. IEEE Computer Society Press.
- [GEOMAGIC 2007] GEOMAGIC (2007). <http://www.geomagic.com>. Webseite der Fa. Geomagic, Zugriff Oktober 2007.
- [GIELSDORF et al. 2004] GIELSDORF, F., A. RIETDORF und L. GRUENDIG (2004). *A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners*. In: *Proceedings FIG Working Week (online)*, Athen, Griechenland.
- [GONTRAN et al. 2003] GONTRAN, H., J. SKALLOUD und P.-Y. GILLIÉRON (2003). *A Mobile Mapping System for Road Data Capture via a Single Camera*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Bd. I, S. 373–380, Zürich, Schweiz.

- [VAN GOSLIGA et al. 2006] GOSLIGA, R. VAN, R. LINDENBERGH und N. PFEIFER (2006). *Deformation Analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning*. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, Volume XXXVI, Part 5, Dresden (2006)*, S. 167–172.
- [GRÄFE 2003] GRÄFE, G. (2003). *Mobile Mapping with Laser Scanners using the MoSES*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Bd. I, S. 381–388, Zürich, Schweiz.
- [GRÄFE et al. 2001] GRÄFE, G., W. CASPARY, H. HEISTER und J. KLEMM (2001). *The road data acquisition system MoSES - determination and accuracy of trajectory data gained with Applanix POS/LV*. In: *Proceedings of The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (CD-ROM)*, Kairo, Ägypten.
- [GRÖGER et al. 2005] GRÖGER, G., J. BENNER, D. DÖRSCHLAG, R. DREES, U. GRUBER, K. LEINEMANN und M.-O. LÖWNER (2005). *Das Interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D*. *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*, 130(6):343–353.
- [GÜHRING 2002] GÜHRING, J. (2002). *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, 560 Dissertation.
- [HAIG et al. 2006] HAIG, C., C. HEIPKE und M. WIGGENHAGEN (2006). *Lens Inclination due to Instable Fixings Detected and Verified with VDI/VDE 2634 Part 1*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5 (CD-ROM)*, Dresden, Deutschland.
- [HARING et al. 2005] HARING, A., M. KERSCHNER und G. SÜKAR (2005). *Vehicle-born Acquisition of Urban Street Space by Combined Use of 3D Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Bd. I, S. 275–284, Wien, Österreich.
- [HARRIS und STEPHENS 1988] HARRIS, C. und M. STEPHENS (1988). *A combined corner and edge detector*. In: *Proceedings of the 4th Alvey Visual Conference*, S. 147–151, Manchester, Großbritannien.
- [HEIPKE et al. 2002] HEIPKE, C., K. JACOBSEN und H. WEGMANN (2002). *Analysis of the results of the OEEPE test „Integrated sensor orientation“*. In: HEIPKE/JACOBSEN/WEGMANN, Hrsg.: *Integrated Sensor Orientation, OEEPE Official Publication No. 43*, S. 31–49.
- [HORN 1987] HORN, B.K.P. (1987). *Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions*. *Journal of the Optical Society of America*, 4(4):629–642.
- [INGENSAND et al. 2003] INGENSAND, H., A. RYF und T. SCHULZ (2003). *Performances and experiences in terrestrial laser scanning*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Bd. I, S. 236–244, Zürich, Schweiz.

- [KAARTINEN et al. 2005] KAARTINEN, H., J. HYYPPÄ, E. GÜLCH, G. VOSSELMAN, H. HYYPPÄ, L. MATIKAINEN, A. HOFMANN, U. MÄDER, Å PERSSON, U. SÖDERMAN, M. ELMQVIST, A. RUIZ, M. DRAGOJA, D. FLAMANC, G. MAILLET, T. KERSTEN, J. CARL, R. HAU, E. WILD, L. FREDERIKSEN, J. HOLMGAARD und K. VESTER (2005). *Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison*. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI-3/W19*, Enschede, Niederlande.
- [KAGER 2000] KAGER, H. (2000). *ORIENT User Manual*. Institut für Photogrammetrie and Fernerkundung, TU Wien.
- [KAGER et al. 2002] KAGER, H., F. ROTTENSTEINER, M. KERSCHNER und P. STADLER (2002). *ORPHEUS User Manual*. Institut für Photogrammetrie and Fernerkundung, TU Wien.
- [KALMAN 1960] KALMAN, R. E. (1960). *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82(Series D):35–45.
- [KIENAST 2006] KIENAST, J. (2006). *Untersuchung einer relativ zum terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i kalibrierten Kamera hinsichtlich Stabilität dieser Kalibrierung*. Diplomarbeit. Institut für Photogrammetrie and Fernerkundung, TU Wien.
- [KIM et al. 2006] KIM, G.-H., H.-G. SOHN und Y.-S. SONG (2006). *Road Infrastructure Data Acquisition Using a Vehicle-Based Mobile Mapping System*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(5):346–356.
- [KLAUS et al. 2002] KLAUS, A., J. BAUER, K. KARNER und K. SCHINDLER (2002). *MetropoGIS: A Semi-Automatic City Documentation System*. In: *Commission III Symposium. Photogrammetric Computer Vision (PCV'02)*, S. 187–192, Graz, Österreich.
- [KRAUS 1990] KRAUS, K. (1990). *Fernerkundung (Band 2), Auswertung photographischer und digitaler Bilder, mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider*. Dümmler-Verlag, Bonn.
- [KRAUS 1996] KRAUS, K. (1996). *Photogrammetrie (Band 2), Verfeinerte Methoden und Anwendungen, mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager*. Dümmler-Verlag, Bonn.
- [KREMER und HUNTER 2007] KREMER, J. und G. HUNTER (2007). *Performance of the StreetMapper Mobile LIDAR Mapping System in „Real World“ Projects*. In: FRITSCH, Hrsg.: *Photogrammetric Week '07*, S. 215–225, Stuttgart, Deutschland.
- [LÄBE und FÖRSTNER 2006] LÄBE, T. und W. FÖRSTNER (2006). *Automatic relative orientation of images*. In: GRÜNDIG / ALTAN, Hrsg.: *Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days (CD-ROM)*, Berlin.
- [LI 1997] LI, R. (1997). *Mobile Mapping - An Emerging Technology for Spatial Data Acquisition*. Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(9):1085–1092.
- [LICHTI 2007] LICHTI, D.D. (2007). *Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61(5):307–324.

- [LICHTI und FRANKE 2005] LICHTI, D.D. und J. FRANKE (2005). *Self-calibration of the iQsun 880 laser scanner*. In: GRÜN/KAHMEN, Hrsg.: *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Bd. I, S. 112–121, Wien, Österreich.
- [LOWE 2004] LOWE, D.G. (2004). *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110.
- [MAAS 1997] MAAS, H.-G. (1997). *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Habilitationsschrift ETH Zürich. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 62.
- [MITRA et al. 2004] MITRA, N.J., N. GELFAND, H. POTTMANN und L. GUIBAS (2004). *Registration of point cloud data from a geometric optimization perspective*. In: SCOPIGNO/ZORIN, Hrsg.: *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, S. 23–32. Eurographics Association.
- [NEUGEBAUER 1997] NEUGEBAUER, P. J. (1997). *Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Images*. In: *Proceedings of the 1997 International Conference on Shape Modeling and Applications*, S. 130–139, Aizu-Wakamatsu, Japan. IEEE Computer Society Press.
- [NISTÉR 2004] NISTÉR, D. (2004). *An efficient solution to the five-point relative pose problem*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 26(6):756–770.
- [NOTHEGGER und DORNINGER 2007] NOTHEGGER, C. und P. DORNINGER (2007). *Automated Modeling of Surface Detail from Point Clouds of Historical Objects*. In: *XXI CIPA International Symposium*, Athen, Griechenland.
- [PICTOMETRY 2007] PICTOMETRY (2007). <http://www.pictometry.com/>. Webseite der Pictometry International Corp., Zugriff Oktober 2007.
- [POTTMANN et al. 2002] POTTMANN, H., S. LEOPOLDSIEDER und M. HOFER (2002). *Simultaneous registration of multiple views of a 3D object*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV/3A, S. 265–270, Graz, Österreich.
- [PULLI 1999] PULLI, K. (1999). *Multiview Registration for Large Data Sets*. In: *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, S. 160–168, Ottawa, Kanada.
- [RESSL et al. 2006] RESSL, C., A. HARING, C. BRIESE und F. ROTTENSTEINER (2006). *A Concept For Adaptive Mono-Plotting Using Images and Laserscanner Data*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems*, XXXVI part 3, S. 98–104.
- [RIEGL 2007] RIEGL (2007). <http://www.riegl.com/>. Webseite der RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Zugriff Oktober 2007.
- [RIES 2004] RIES, C. (2004). *Ein allgemeiner Ansatz zur Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen*. Doktorarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.

- [ROTHER 2000] ROTHER, C. (2000). *A new approach for vanishing point detection in architectural environments*. In: *Proceedings of the 11th British Machine Vision Conference*, S. 382–391, Bristol, Großbritannien.
- [ROTTENSTEINER 2001] ROTTENSTEINER, F. (2001). *Semi-Automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS*. Doktorarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- [RUSINKIEWICZ und LEVOY 2001] RUSINKIEWICZ, S. und M. LEVOY (2001). *Efficient Variants of the ICP Algorithm*. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, S. 145–152, Québec, Kanada.
- [SANSÒ 1973] SANSÒ, F. (1973). *An exact solution of the roto-translation problem*. *Photogrammetria*, 29(6):203–216.
- [STERNBERG et al. 2001] STERNBERG, H., W. CASPARY, H. HEISTER und J. KLEMM (2001). *Mobile Data Capturing on Roads and Railways utilizing the Kinematic Survey System KiSS*. In: *Proceedings of The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology (CD-ROM)*, Kairo, Ägypten.
- [STRUNZ 1993] STRUNZ, G. (1993). *Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen*. Dissertation. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 408.
- [TALAYA et al. 2004] TALAYA, J., R. ALAMUS, E. BOSCH, A. SERRA, W. KORNUS und A. BARON (2004). *Integration of A Terrestrial Laser Scanner With GPS/IMU Orientation Sensors*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV/B5, S. 990–995, Istanbul, Türkei.
- [TRAUTWEIN et al. 1999] TRAUTWEIN, S., M. MÜHLICH, D. FEIDEN und R. MESTER (1999). *Estimating Consistent Motion from Three Views: An Alternative to Trifocal Analysis*. In: SOLINA/LEONARDIS, Hrsg.: *Proceedings of the International Conference on the Analysis of Images and Patterns (CAIP'99), Ljubljana, Slovenia. Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 1689, S. 311–320. Springer Verlag.
- [ULLRICH und STUDNICKA 2006] ULLRICH, A. und N. STUDNICKA (2006). *Entwicklungen in der Zusammenführung boden- und luftgestützter Laserscanner- und Kameradaten*. In: LUHMANN/MÜLLER, Hrsg.: *Tagungsband der Oldenburger 3D-Tage 2006*, S. 356–365. Wichmann-Verlag.
- [VRVIS 2007] VRVIS (2007). <http://www.vrvis.at/>. Webseite des Kompetenzzentrum für Virtual Reality und Visualisierung (VRVis), Zugriff Oktober 2007.
- [ZHAO und SHIBASAKI 2004] ZHAO, H. und R. SHIBASAKI (2004). *Updating Digital Geographic Database Using Vehicle-borne Laser Scanners and Line Cameras*. In: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV/B3, S. 494–499, Istanbul, Türkei.

Anhang A

Parametrisierung der Drehmatrix

A.1 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\alpha\zeta\kappa$

Die $\alpha\zeta\kappa$ -Parametrisierung ist im Ausgleichssystem ORIENT (vgl. [KAGER 2000]) wie folgt definiert:

- Achsparallelität von lokalem (xyz-) und globalem (XYZ-) Koordinatensystem entspricht $\alpha = \zeta = \kappa = 0$ bzw. der Einheitsmatrix als Rotationsmatrix
- Die Winkel werden mathematisch positiv (gegen den Uhrzeigersinn bei entgegen der positiven Drehachse gerichtetem Blick) gezählt.
- Primärdrehung: Winkel α um z-Achse
- Sekundärdrehung: Winkel ζ um y'-Achse (=y-Achse nach Primärdrehung)¹
- Tertiärdrehung: Winkel κ um z''-Achse (=z-Achse nach Sekundärdrehung)

Die Drehmatrix, die Koordinaten vom lokalen ins globale System transformiert, lautet:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\alpha\zeta\kappa} &= \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\zeta \mathbf{R}_\kappa = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \zeta & 0 & \sin \zeta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \zeta & 0 & \cos \zeta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \zeta \cos \kappa - \sin \alpha \sin \kappa & -\cos \alpha \cos \zeta \sin \kappa - \sin \alpha \cos \kappa & \cos \alpha \sin \zeta \\ \sin \alpha \cos \zeta \cos \kappa + \cos \alpha \sin \kappa & -\sin \alpha \cos \zeta \sin \kappa + \cos \alpha \cos \kappa & \sin \alpha \sin \zeta \\ -\sin \zeta \cos \kappa & \sin \zeta \sin \kappa & \cos \zeta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Im Falle einer genähert horizontalen z-Achse ($\zeta \approx 100^{\text{gon}}$) gilt für die Drehmatrix somit jeweils näherungsweise (vgl. Abb. 3.2):

für $\kappa \approx 0^{\text{gon}}$:	für $\kappa \approx 100^{\text{gon}}$:	für $\kappa \approx 200^{\text{gon}}$:	für $\kappa \approx 300^{\text{gon}}$:
$\begin{pmatrix} 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \\ \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \\ 0 & -\cos \alpha & \sin \alpha \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \\ -\cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$

¹Singularität bei Rückrechnung auf die beiden anderen Winkel für $\sin \zeta = 0$ ($\zeta = 0^{\text{gon}}$ und $\zeta = 200^{\text{gon}}$).

A.2 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\omega\varphi\kappa$

Die $\omega\varphi\kappa$ -Parametrisierung ist im Ausgleichungssystem ORIENT (vgl. [KAGER 2000]) wie folgt definiert:

- Achsparallelität von lokalem (xyz-) und globalem (XYZ-) Koordinatensystem entspricht $\omega = \varphi = \kappa = 0$ bzw. der Einheitsmatrix als Rotationsmatrix
- Die Winkel werden mathematisch positiv (gegen den Uhrzeigersinn bei entgegen der positiven Drehachse gerichtetem Blick) gezählt.
- Primärdrehung: Winkel ω um x-Achse
- Sekundärdrehung: Winkel φ um y' -Achse (=y-Achse nach Primärdrehung)²
- Tertiärdrehung: Winkel κ um z'' -Achse (=z-Achse nach Sekundärdrehung)

Die Drehmatrix, die Koordinaten vom lokalen ins globale System transformiert, lautet:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} &= \mathbf{R}_{\omega}\mathbf{R}_{\varphi}\mathbf{R}_{\kappa} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Für kleine Drehwinkel ω, φ, κ gilt näherungsweise:

$$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} \approx \begin{pmatrix} 1 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 1 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 1 \end{pmatrix}$$

A.3 Parametrisierung mit den Drehwinkeln $\varrho\nu\gamma$

Die $\varrho\nu\gamma$ -Parametrisierung (*Rollwinkel, Nickwinkel, Gierwinkel*³) wird hier folgendermaßen definiert:

- Achsparallelität von lokalem (xyz-) und globalem (XYZ-) Koordinatensystem entspricht $\varrho = \nu = \gamma = 0$ bzw. der Einheitsmatrix als Rotationsmatrix

²Singularität bei Rückrechnung auf die beiden anderen Winkel für $\cos \varphi = 0$ ($\varphi = 100^{\text{gon}}$ und $\varphi = 300^{\text{gon}}$).

³Die im Englischen als *roll*, *pitch*, und *yaw* bezeichneten Drehwinkel werden vor allem in der Flugzeugnavigation verwendet.

- Die Winkel werden mathematisch positiv (gegen den Uhrzeigersinn bei entgegen der positiven Drehachse gerichtetem Blick) gezählt.
- Primärdrehung: Winkel ϱ um X-Achse
- Sekundärdrehung: Winkel ν um Y-Achse⁴
- Tertiärdrehung: Winkel γ um Z-Achse

Im Gegensatz zu den beiden zuvor erwähnten Parametrisierungen ($\alpha\zeta\kappa$ und $\omega\varphi\kappa$) erfolgt die Drehung um die *raumfesten* Achsen X, Y, und Z des übergeordneten Systems; daher wird die Gesamt-Drehmatrix aus den drei Teil-Drehmatrizen durch sukzessive Multiplikation von *links* (anstatt von rechts) aufgebaut.

Die Drehmatrix, die Koordinaten vom lokalen ins globale System transformiert, lautet:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\varrho\nu\gamma} &= \mathbf{R}_\gamma \mathbf{R}_\nu \mathbf{R}_\varrho = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \nu & 0 & \sin \nu \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \nu & 0 & \cos \nu \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varrho & -\sin \varrho \\ 0 & \sin \varrho & \cos \varrho \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \nu \cos \gamma & -\cos \varrho \sin \gamma + \sin \varrho \sin \nu \cos \gamma & \sin \varrho \sin \gamma + \cos \varrho \sin \nu \cos \gamma \\ \cos \nu \sin \gamma & \cos \varrho \cos \gamma + \sin \varrho \sin \nu \sin \gamma & -\sin \varrho \cos \gamma + \cos \varrho \sin \nu \sin \gamma \\ -\sin \nu & \sin \varrho \cos \nu & \cos \varrho \cos \nu \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Der Vorteil dieser Parametrisierung gegenüber den beiden vorher erwähnten liegt darin, dass sich die drei Drehwinkel mit Navigationssensoren jeweils direkt beobachten lassen.

Die Richtung der Z-Achse bezüglich des lokalen Systems entspricht der dritten Zeile der obigen Drehmatrix und ist somit allein durch die beiden Winkel ϱ und ν bestimmt. Letztere lassen sich mit Hilfe eines im Laserscanner eingebauten biaxialen Neigungssensors (Inklinometer) direkt beobachten, falls die Z-Achse parallel zur Lotrichtung ist (unter der Voraussetzung, dass sowohl ϱ als auch ν innerhalb des Messbereiches des Neigungssensors liegen).

Bei hinreichend kleinen Neigungen ϱ und ν kann auch γ (z.B. mit Hilfe eines Kompasses⁵) gemessen werden. Die Richtung der x-Achse bezüglich des globalen Systems entspricht der ersten Spalte der obigen Drehmatrix. Die Projektion der x-Achse in die XY-Ebene schließt mit der X-Achse den Winkel γ ein.

Für kleine Drehwinkel ϱ, ν, γ gilt näherungsweise:

$$\mathbf{R}_{\varrho\nu\gamma} \approx \begin{pmatrix} 1 & -\gamma & \nu \\ \gamma & 1 & -\varrho \\ -\nu & \varrho & 1 \end{pmatrix}$$

In diesem Fall entspricht das Tripel $\varrho\nu\gamma$ in guter Näherung dem Tripel $\omega\varphi\kappa$ (vgl. Anhang A.2).

⁴Singularität bei Rückrechnung auf die beiden anderen Winkel für $\cos \nu = 0$ ($\nu = 100^\circ$ und $\nu = 300^\circ$).

⁵In diesem Fall wäre die Nadelabweichung (Winkel zwischen Magnetisch-Nord und Gitter-Nord) zu berücksichtigen.

Anhang B

Ergänzungen – Bereich „Kalibrierung“

B.1 Ergebnisse der Kamerakalibrierungen

Die Ergebnisse der Kamerakalibrierung sind wie folgt angegeben:

```
norme ( 1400.0)
Pho kappa x0 y0 c adp3 adp4
Pho.....Bildnummer
kappa[gon]....Kantung (Vielfaches von 100gon)
x0[Pixel].....x-Koordinate des Bildhauptpunkts
y0[Pixel].....y-Koordinate des Bildhauptpunkts
c[Pixel].....Kamerakonstante
adp3.....Zusätzlicher Parameter Nr. 3 (Koeffizient für radialsymmetrische Verzeichnung; Grad 3)
adp4.....Zusätzlicher Parameter Nr. 4 (Koeffizient für radialsymmetrische Verzeichnung; Grad 5)
norme[Pixel]..Normierungsradius rho

Wert # Genauigkeit.....aus der Ausgleichung bestimmter Wert der Unbekannten +/- ihre geschätzte Standardabweichung
```

B.1.1 Canon EOS 1Ds

Serie Canon EOS 1Ds + 20mm-Objektiv (06.07.2006)

```
norme ( 1400.0)
Pho kappa x0 y0 c adp3 adp4
8161 100 2056.30762 # .2771 -1328.62292 # .4647 2283.15015 # .5818 -40.6522 # 4.18E-01 10.8299 # 2.05E-01
8162 0 2043.72864 # .6589 -1338.85303 # .3842 2282.04053 # 1.0037 -43.0129 # 6.97E-01 12.6972 # 7.86E-01
8163 300 2060.33057 # .2705 -1346.15442 # .4281 2282.69214 # .5451 -41.2337 # 3.92E-01 11.1322 # 1.84E-01
8164 200 2073.12524 # .5363 -1335.25330 # .3507 2280.60376 # .7259 -42.0228 # 8.41E-01 11.4668 # 8.08E-01

8165 100 2056.08154 # .3083 -1329.55713 # .5198 2283.03052 # .6309 -40.2070 # 3.97E-01 10.4933 # 1.41E-01
8166 0 2044.45361 # .5910 -1338.78027 # .4043 2281.59399 # 1.1386 -42.4412 # 9.05E-01 12.1133 # 1.10E+00
8167 300 2057.62988 # .3305 -1346.44482 # .4673 2283.01099 # .5923 -41.4537 # 4.18E-01 11.2926 # 1.93E-01
8168 200 2074.13452 # .6249 -1337.94470 # .5496 2283.24805 # .9737 -41.7214 # 7.37E-01 12.1829 # 6.42E-01

8169 100 2056.15039 # .2616 -1328.42383 # .4649 2282.40332 # .5787 -40.7683 # 3.75E-01 10.7397 # 1.49E-01
8170 200 2073.74414 # .5446 -1335.40442 # .3349 2281.61230 # .7963 -43.5277 # 9.61E-01 13.1827 # 1.01E+00
8171 0 2044.45581 # .5809 -1338.43372 # .3897 2280.53174 # 1.2229 -42.9604 # 1.00E+00 12.2041 # 1.27E+00
8172 300 2059.13159 # .2802 -1346.45154 # .4839 2282.95117 # .5926 -41.5966 # 4.44E-01 11.4524 # 2.42E-01

8173 100 2055.91113 # .2882 -1329.34155 # .4893 2283.10278 # .5973 -40.0921 # 3.70E-01 10.4323 # 1.29E-01
8174 0 2043.52075 # .7119 -1339.12903 # .3982 2282.27002 # 1.0390 -43.3245 # 6.86E-01 13.0193 # 7.63E-01
8175 300 2060.73828 # .3035 -1346.84399 # .4543 2282.70166 # .5873 -41.5304 # 4.37E-01 11.3201 # 2.12E-01
8176 200 2073.61670 # .6251 -1336.79834 # .4048 2281.81641 # .7426 -41.8597 # 5.79E-01 11.5762 # 3.88E-01

8187 100 2056.22046 # .3060 -1328.52612 # .4730 2283.05127 # .6095 -41.2899 # 4.64E-01 11.2795 # 2.43E-01
8188 0 2043.84814 # .6970 -1338.80212 # .4552 2282.07324 # 1.0773 -43.7765 # 8.14E-01 13.3958 # 9.25E-01
```

ANHANG B. ERGÄNZUNGEN – BEREICH „KALIBRIERUNG“

8191	300	2061.42407 # .4856	-1346.37109 # .4864	2281.73853 # .7146	-41.1127 # 4.44E-01	10.8915 # 1.62E-01
8192	200	2074.24634 # .7356	-1340.36316 # .4660	2282.28198 # .8345	-42.7236 # 6.33E-01	12.2206 # 4.30E-01

Serie Canon EOS 1Ds + 20mm-Objektiv (09.08.2006)

Pho	kappa	norme (1400.0)				
		x0	y0	c	adp3	adp4
8196	100	2062.97168 # .2908	-1329.73596 # .4634	2282.72705 # .5675	-40.8364 # 4.05E-01	10.8253 # 1.70E-01
8197	0	2051.45874 # .5430	-1339.10876 # .4348	2281.15698 # .8749	-42.8602 # 7.55E-01	12.1542 # 7.43E-01
8198	200	2081.86841 # .6389	-1337.20715 # .3784	2281.95435 # .8697	-43.6895 # 6.57E-01	13.2245 # 6.17E-01
8199	300	2065.81812 # .3212	-1346.67651 # .4949	2282.10254 # .6893	-41.0874 # 4.43E-01	10.7830 # 1.71E-01
8200	100	2064.03564 # .3087	-1329.90649 # .4708	2283.02783 # .6034	-40.8162 # 4.44E-01	10.8880 # 1.97E-01
8201	0	2050.89746 # .6145	-1339.17505 # .4035	2281.83960 # .9666	-43.2321 # 7.02E-01	12.7297 # 7.64E-01
8202	200	2081.53809 # .6484	-1337.05603 # .4045	2281.28784 # .9334	-43.1597 # 7.28E-01	12.7887 # 7.14E-01
8203	300	2069.64941 # .3000	-1348.28723 # .4580	2282.05322 # .5834	-41.4125 # 4.27E-01	11.1778 # 2.10E-01
8204	100	2064.54810 # .3091	-1330.15051 # .4908	2282.85425 # .5696	-41.1107 # 3.95E-01	11.0406 # 1.79E-01
8205	0	2051.26685 # .6740	-1339.02869 # .4561	2281.57324 # .9839	-43.1130 # 7.17E-01	12.5520 # 7.54E-01
8206	200	2082.89893 # .7413	-1336.97876 # .3993	2282.04932 # .9435	-43.4663 # 6.74E-01	13.2123 # 6.33E-01
8207	300	2067.46997 # .3452	-1348.32532 # .5822	2282.58105 # .6887	-41.3752 # 4.71E-01	11.1682 # 2.36E-01
8208	100	2063.78369 # .3090	-1330.29785 # .4228	2282.88110 # .5727	-41.0928 # 4.36E-01	11.0762 # 2.08E-01
8209	0	2050.67163 # .7316	-1339.55078 # .4191	2282.10376 # 1.1062	-43.4169 # 7.44E-01	12.9838 # 8.67E-01
8210	200	2083.18457 # .7221	-1336.79419 # .3813	2282.36230 # .8972	-43.4042 # 6.30E-01	13.3181 # 5.90E-01
8211	300	2065.79150 # .3029	-1348.26599 # .5110	2282.54761 # .6185	-41.5069 # 4.76E-01	11.2239 # 2.17E-01
8212	100	2064.77710 # .3607	-1328.14160 # .4966	2283.64648 # .6304	-40.6153 # 4.22E-01	10.9581 # 1.89E-01
8213	0	2049.29785 # .9830	-1338.19128 # .4373	2283.41699 # 1.2667	-43.8158 # 6.83E-01	13.5405 # 7.53E-01
8215	200	2082.80908 # .6977	-1335.04590 # .3618	2282.09497 # .8944	-43.9140 # 6.16E-01	13.5737 # 6.04E-01
8216	300	2066.12134 # .3759	-1346.38452 # .8021	2282.87354 # .9467	-41.4371 # 5.21E-01	11.2919 # 2.55E-01
8218	100	2064.35718 # .3038	-1327.55957 # .4571	2283.55493 # .5796	-41.0832 # 4.27E-01	11.1848 # 2.11E-01
8221	0	2050.77222 # .8632	-1337.43005 # .4277	2282.31006 # 1.0099	-43.9981 # 5.87E-01	13.0719 # 5.70E-01
8222	200	2081.74072 # .6344	-1335.68079 # .4132	2281.27832 # .8066	-42.1084 # 6.46E-01	11.6944 # 5.06E-01
8223	300	2066.71118 # .3431	-1345.28735 # .4507	2282.88599 # .6056	-41.2412 # 4.29E-01	11.1168 # 1.97E-01
8224	100	2064.45972 # .3144	-1327.30139 # .4606	2283.20337 # .6024	-41.2330 # 4.57E-01	11.2674 # 2.27E-01
8225	0	2051.70410 # .5784	-1337.45178 # .3997	2281.79956 # 1.0264	-43.5368 # 8.02E-01	13.1062 # 9.57E-01
8226	200	2082.56396 # .6564	-1335.43823 # .4394	2281.50635 # .7976	-41.9581 # 6.16E-01	11.7880 # 4.76E-01
8227	300	2067.80005 # .3468	-1345.52661 # .4842	2282.76563 # .6285	-41.1137 # 4.85E-01	11.0024 # 2.35E-01
8228	100	2064.03149 # .2947	-1327.51807 # .4189	2282.80078 # .5691	-41.6045 # 4.41E-01	11.3701 # 2.15E-01
8232	200	2082.71899 # .6722	-1335.09314 # .4535	2280.18213 # .7630	-42.8707 # 6.02E-01	12.0622 # 4.13E-01
8233	0	2050.89307 # .8062	-1338.05811 # .4608	2281.40503 # .9019	-43.3816 # 5.31E-01	12.4794 # 4.52E-01

Serie Canon EOS 1Ds + 20mm-Objektiv (16.08.2006)

Pho	kappa	norme (1400.0)				
		x0	y0	c	adp3	adp4
8235	100	2063.08716 # .2914	-1328.88208 # .4712	2282.65112 # .5303	-41.0736 # 3.95E-01	10.9954 # 1.57E-01
8236	200	2080.66504 # .5679	-1334.34595 # .4751	2280.03809 # .8706	-41.6567 # 7.87E-01	11.1000 # 5.30E-01
8238	0	2052.02295 # .5912	-1337.59460 # .4571	2280.79907 # .8507	-42.3455 # 5.52E-01	11.6906 # 4.13E-01
8239	100	2063.90112 # .3007	-1328.82788 # .5374	2282.82080 # .5162	-40.9494 # 3.91E-01	10.9289 # 1.63E-01
8240	200	2080.66016 # .5505	-1334.65979 # .4307	2280.73340 # .7812	-41.3202 # 7.46E-01	11.0584 # 5.12E-01
8241	300	2070.03296 # .3026	-1345.60132 # .6668	2278.12744 # .8757	-42.6759 # 5.39E-01	11.2594 # 1.94E-01
8242	0	2053.78027 # .6633	-1339.13098 # .4976	2282.35620 # .9376	-42.2759 # 5.20E-01	11.7836 # 3.56E-01
8243	100	2061.56860 # .2887	-1329.42737 # .5140	2282.66235 # .4918	-41.0871 # 4.06E-01	11.0643 # 1.92E-01
8248	200	2079.60352 # .5831	-1334.80981 # .5083	2280.96338 # .9451	-42.0157 # 7.33E-01	11.5430 # 5.05E-01
8249	300	2069.85596 # .3028	-1347.33740 # .6008	2279.49268 # .7440	-42.6597 # 4.53E-01	11.5417 # 2.16E-01
8250	0	2050.87305 # .6150	-1338.41907 # .4287	2281.37183 # .8911	-42.4123 # 5.10E-01	11.7629 # 3.78E-01
8251	100	2062.73901 # .2899	-1329.63257 # .4753	2283.03784 # .5260	-41.3889 # 3.88E-01	11.2374 # 1.78E-01
8252	200	2079.96826 # .5771	-1334.75037 # .4503	2280.62207 # .8817	-42.2847 # 5.77E-01	11.5645 # 4.04E-01
8253	300	2069.68457 # .3132	-1347.03467 # .5552	2279.36255 # .6819	-42.6581 # 3.91E-01	11.5267 # 1.79E-01
8254	0	2051.11841 # .5209	-1338.58545 # .4004	2281.46680 # .7940	-42.0098 # 5.11E-01	11.5488 # 3.71E-01

ANHANG B. ERGÄNZUNGEN – BEREICH „KALIBRIERUNG“

8255	100	2063.60791 # .2495	-1329.24841 # .4431	2282.73047 # .4654	-40.9335 # 3.46E-01	10.9229 # 1.36E-01
8256	200	2081.55762 # .6404	-1334.87024 # .4008	2280.98999 # .8828	-42.4120 # 4.67E-01	11.7490 # 3.23E-01
8257	300	2070.76538 # .3612	-1348.75830 # .6125	2281.09399 # .6290	-41.4142 # 5.88E-01	11.3506 # 2.99E-01
8258	0	2053.05762 # .5463	-1337.65906 # .4253	2280.95117 # .7817	-42.2181 # 4.92E-01	11.5020 # 3.47E-01

B.1.2 Nikon D70

Serie Nikon D70 + 14mm-Objektiv (06.07.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	norme (1400.0)	
					adp3	adp4
65	100	1493.24548 # .2710	-1004.20404 # .3831	1792.33069 # .7444	-59.5898 # 8.66E-01	22.9009 # 8.23E-01
66	0	1492.35632 # .4479	-1006.41614 # .3991	1793.64856 # 1.2982	-57.5286 # 1.42E+00	21.4388 # 1.90E+00
67	300	1494.30859 # .2423	-1012.16443 # .3657	1793.12610 # .6946	-58.5270 # 7.88E-01	21.9987 # 7.60E-01
68	200	1497.08313 # .6026	-1009.03955 # .4607	1794.21326 # 1.9137	-59.6948 # 1.84E+00	23.4851 # 2.58E+00
73	100	1497.25867 # .2169	-1000.95935 # .3373	1792.21643 # .5963	-58.1535 # 7.05E-01	21.3942 # 5.90E-01
74	200	1498.82324 # .7783	-1004.96368 # .4617	1795.25696 # 1.4875	-59.3530 # 1.61E+00	24.2381 # 1.85E+00
75	0	1495.88379 # .5984	-1004.15161 # .3736	1792.71606 # 1.3225	-58.7343 # 1.38E+00	22.0231 # 1.74E+00
76	300	1499.04260 # .2550	-1008.39923 # .3581	1793.17151 # .6547	-57.9386 # 7.71E-01	21.3484 # 6.22E-01
77	0	1495.23120 # .5163	-1002.20587 # .4602	1792.66174 # 1.5525	-58.4039 # 1.44E+00	21.9247 # 1.85E+00
78	100	1497.66113 # .2595	-999.91608 # .3992	1792.30811 # .6850	-58.3506 # 7.62E-01	21.7803 # 6.21E-01
79	200	1501.56775 # .5631	-1004.59961 # .3856	1793.28381 # 1.7233	-61.2236 # 1.18E+00	24.3370 # 1.79E+00
80	300	1498.65771 # .2417	-1008.35455 # .3854	1793.02625 # .6693	-57.5986 # 7.75E-01	21.3358 # 6.58E-01
89	100	1499.76123 # .2145	-1001.16345 # .3426	1792.29480 # .6127	-58.2983 # 7.53E-01	21.6177 # 6.67E-01
90	200	1502.50916 # .6832	-1005.16815 # .4618	1794.18152 # 1.4635	-58.0010 # 1.66E+00	22.4011 # 1.88E+00
91	0	1498.26050 # .5262	-1003.22375 # .3923	1793.48376 # 1.5563	-58.3687 # 1.56E+00	22.0339 # 2.13E+00
92	300	1500.86841 # .2363	-1009.44727 # .3538	1792.81580 # .6296	-57.3447 # 7.48E-01	20.9672 # 6.11E-01
101	100	1497.27246 # .2089	-1000.58838 # .3320	1793.18201 # .5741	-57.7866 # 6.81E-01	21.2466 # 5.49E-01
102	200	1500.71326 # .5845	-1004.72662 # .4293	1794.03333 # 1.5480	-59.1557 # 1.59E+00	22.8607 # 1.94E+00
103	0	1495.78882 # .5448	-1002.77844 # .4503	1793.72241 # 1.4101	-57.9193 # 1.55E+00	21.4061 # 1.87E+00
104	300	1498.96765 # .2268	-1008.24188 # .3513	1793.87732 # .5954	-59.6182 # 8.47E-01	23.2893 # 7.80E-01

Serie Nikon D70 + 15mm-Objektiv (06.07.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	norme (1400.0)	
					adp3	adp4
61	100	1480.95251 # .3042	-1038.41479 # .4698	1918.98633 # .7645	-49.0094 # 8.11E-01	17.5004 # 6.77E-01
62	0	1482.31519 # .5007	-1032.85962 # .4375	1917.66663 # 1.1420	-51.6922 # 1.26E+00	19.1311 # 1.53E+00
63	300	1480.47339 # .3314	-1029.78320 # .4757	1920.32874 # .8164	-49.1753 # 8.95E-01	18.0063 # 7.62E-01
64	200	1478.01599 # .6549	-1032.06213 # .4675	1922.45520 # 2.5407	-53.7622 # 2.03E+00	23.8689 # 3.25E+00
69	100	1483.77246 # .3205	-1026.00854 # .5025	1919.50098 # .7689	-47.3147 # 7.65E-01	16.2972 # 5.22E-01
70	0	1484.88855 # .6452	-1021.65399 # .4157	1918.24988 # 1.0525	-51.4488 # 1.13E+00	19.2245 # 1.15E+00
71	200	1478.83386 # .6604	-1017.77924 # .4398	1919.41235 # 1.4517	-52.6252 # 1.48E+00	20.8786 # 1.84E+00
72	300	1482.96277 # .2721	-1018.00067 # .4500	1919.83093 # .6803	-47.3578 # 7.06E-01	16.0472 # 5.05E-01
81	0	1475.56714 # .5046	-1030.80408 # .4343	1916.89807 # .9334	-50.8367 # 9.81E-01	17.4297 # 8.99E-01
82	100	1474.02600 # .3190	-1037.16199 # .4688	1918.69348 # .7433	-47.2362 # 7.63E-01	15.6814 # 5.06E-01
83	200	1472.95154 # .5765	-1029.81897 # .5062	1918.80432 # 1.6450	-52.3485 # 1.40E+00	20.1494 # 1.69E+00
84	300	1474.92786 # .2574	-1027.75012 # .4182	1920.12073 # .6632	-50.0135 # 7.12E-01	18.2988 # 5.72E-01
85	100	1476.92590 # .2871	-1036.32568 # .4960	1918.92188 # .7661	-48.2057 # 7.99E-01	16.5271 # 6.35E-01
86	200	1472.90637 # .5843	-1028.23059 # .4273	1919.98486 # 1.4987	-51.7837 # 1.42E+00	19.9678 # 1.79E+00
87	0	1477.66663 # .4900	-1030.78772 # .3978	1917.18518 # 1.1833	-50.9713 # 1.15E+00	18.1629 # 1.37E+00
88	300	1475.18030 # .2782	-1026.14294 # .4456	1919.57056 # .7331	-49.0491 # 8.49E-01	17.2280 # 7.12E-01
93	100	1482.90564 # .3349	-1039.51831 # .5559	1920.03418 # .9071	-49.0631 # 1.00E+00	17.8279 # 8.84E-01
94	200	1479.92273 # .6694	-1031.31262 # .4784	1919.19971 # 2.2233	-51.7334 # 1.90E+00	19.4387 # 2.83E+00
95	0	1483.62793 # .5545	-1034.00391 # .4199	1918.78894 # 1.3597	-50.6074 # 1.32E+00	18.2614 # 1.73E+00
96	300	1482.23718 # .3144	-1030.03821 # .4691	1921.02930 # .7684	-49.9077 # 8.79E-01	18.3480 # 7.31E-01
97	100	1483.33105 # .3432	-1038.67993 # .5487	1919.51208 # .8391	-48.0303 # 8.26E-01	16.6583 # 5.84E-01
98	200	1480.65674 # .5232	-1033.08252 # .4161	1916.11121 # 1.3853	-52.9156 # 1.30E+00	19.1879 # 1.55E+00

ANHANG B. ERGÄNZUNGEN – BEREICH „KALIBRIERUNG“

99	0	1483.59961 #	.5247	-1033.90430 #	.4167	1918.18762 #	1.2106	-50.8919 #	1.20E+00	18.1028 #	1.36E+00
100	300	1481.81458 #	.2780	-1029.16150 #	.4344	1920.21790 #	.7218	-48.8671 #	8.33E-01	17.0951 #	6.83E-01

Serie Nikon D70 + 15mm-Objektiv(16.08.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	adp3	adp4	norme (1400.0)				
23	100	1480.99902 #	.3039	-1028.52087 #	.4114	1919.88977 #	.6741	-48.0207 #	7.30E-01	16.5616 #	5.34E-01
24	0	1482.04517 #	.5067	-1022.55981 #	.4072	1919.87036 #	1.5014	-51.4742 #	1.34E+00	19.6880 #	1.95E+00
25	200	1476.90991 #	.6661	-1019.89435 #	.4754	1922.10510 #	3.2424	-53.0948 #	2.13E+00	22.3086 #	3.80E+00
26	300	1479.54260 #	.2795	-1018.07422 #	.4385	1920.79077 #	.7195	-48.5004 #	8.80E-01	17.0743 #	7.58E-01
27	100	1480.64368 #	.2778	-1029.27161 #	.4575	1919.67371 #	.6373	-50.5089 #	8.82E-01	18.8126 #	7.39E-01
28	0	1481.16785 #	.5304	-1022.90338 #	.3908	1918.10242 #	1.5517	-49.6862 #	1.40E+00	16.7485 #	1.97E+00
29	300	1480.15112 #	.2640	-1019.07391 #	.4222	1919.86316 #	.6542	-48.0575 #	7.81E-01	16.4194 #	6.08E-01
30	200	1477.72205 #	.5706	-1020.30969 #	.4220	1920.01160 #	2.2675	-49.8148 #	1.73E+00	17.8235 #	2.76E+00
31	100	1483.82507 #	.2566	-1026.54773 #	.4009	1919.36060 #	.6377	-47.9367 #	7.29E-01	16.3982 #	5.68E-01
32	0	1484.24109 #	.6067	-1021.51117 #	.5009	1918.81726 #	1.4856	-50.6841 #	1.48E+00	18.1517 #	1.94E+00
33	200	1479.06445 #	.6315	-1019.20801 #	.4509	1922.82788 #	3.1533	-53.4004 #	2.19E+00	22.9728 #	3.85E+00
34	300	1482.81995 #	.2577	-1017.68573 #	.4124	1920.02258 #	.6707	-48.9856 #	7.82E-01	17.1273 #	6.45E-01

Stativ-Serie Nikon D70 + 15mm-Objektiv (16.08.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	adp3	adp4	norme (1400.0)				
1	100	1480.11926 #	.3399	-1033.18237 #	.5943	1920.15295 #	.7715	-48.9852 #	9.47E-01	17.6953 #	8.24E-01
2	100	1479.85730 #	.3030	-1032.56250 #	.5311	1919.95862 #	.6881	-49.9561 #	8.45E-01	18.3002 #	7.35E-01
3	100	1480.09766 #	.3148	-1032.74158 #	.5514	1920.18115 #	.7149	-49.3267 #	8.77E-01	17.8854 #	7.63E-01
4	100	1479.90479 #	.3090	-1032.72498 #	.5419	1920.04236 #	.7016	-49.9940 #	8.61E-01	18.2789 #	7.49E-01
5	100	1480.07336 #	.3041	-1032.73206 #	.5328	1919.78967 #	.6908	-50.1153 #	8.47E-01	18.3623 #	7.37E-01
6	100	1480.08606 #	.3117	-1032.61963 #	.5460	1919.92664 #	.7078	-50.4692 #	8.69E-01	18.6492 #	7.55E-01
7	100	1480.05750 #	.3058	-1032.70349 #	.5352	1919.93921 #	.6946	-49.9994 #	8.52E-01	18.3268 #	7.41E-01
8	100	1480.14270 #	.3126	-1032.54102 #	.5473	1919.96204 #	.7098	-50.0583 #	8.71E-01	18.3555 #	7.58E-01
9	100	1480.24219 #	.2938	-1032.68518 #	.5152	1919.98621 #	.6669	-50.0521 #	8.19E-01	18.3608 #	7.12E-01
10	100	1479.99426 #	.3084	-1032.66809 #	.5403	1920.05908 #	.7002	-50.1087 #	8.60E-01	18.3959 #	7.48E-01
11	100	1480.05664 #	.3067	-1032.56677 #	.5376	1920.00964 #	.6963	-50.3576 #	8.54E-01	18.6276 #	7.43E-01

Stativumstellung:

12	100	1483.85828 #	.3349	-1029.15283 #	.4999	1919.43298 #	.6801	-50.0482 #	9.07E-01	18.1111 #	7.40E-01
13	100	1483.87866 #	.3348	-1029.00256 #	.4999	1919.15991 #	.6871	-50.3309 #	9.14E-01	18.3240 #	7.44E-01
14	100	1483.94897 #	.3249	-1028.83887 #	.4855	1918.96973 #	.6661	-50.5398 #	8.87E-01	18.4252 #	7.22E-01
15	100	1483.75867 #	.3390	-1029.16479 #	.5060	1919.40784 #	.6885	-49.9774 #	9.18E-01	18.0862 #	7.49E-01
16	100	1483.84253 #	.3345	-1029.08606 #	.4992	1919.46692 #	.6789	-50.0278 #	9.05E-01	18.0403 #	7.39E-01
17	100	1483.91492 #	.3375	-1028.95068 #	.5034	1919.30554 #	.6849	-49.9886 #	9.14E-01	18.0434 #	7.46E-01

Stativumstellung, mit leichtem Kippen:

18	100	1482.87158 #	.3963	-1027.94604 #	.4992	1919.37732 #	.7430	-47.8849 #	8.85E-01	16.2697 #	6.95E-01
19	100	1482.98035 #	.3860	-1028.06885 #	.4896	1918.98889 #	.7266	-48.2945 #	8.59E-01	16.4302 #	6.71E-01
20	100	1482.91272 #	.4023	-1027.90161 #	.5059	1919.23682 #	.7537	-48.2268 #	8.97E-01	16.4172 #	7.04E-01
21	100	1482.74817 #	.4172	-1028.00513 #	.5248	1919.13623 #	.7821	-48.2739 #	9.32E-01	16.4455 #	7.31E-01
22	100	1482.73999 #	.4183	-1028.12183 #	.5263	1919.29968 #	.7842	-48.3061 #	9.33E-01	16.5184 #	7.33E-01

B.1.3 Nikon D200

Serie Nikon D200 + 14mm-Objektiv (06.07.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	adp3	adp4	norme (1400.0)				
01	100	1932.23596 #	.3320	-1299.27832 #	.4968	2326.91772 #	.6349	-35.6216 #	4.79E-01	8.10989 #	2.49E-01

ANHANG B. ERGÄNZUNGEN – BEREICH „KALIBRIERUNG“

02	0	1928.09021 # .6740	-1302.72986 # .4407	2328.44360 # 1.0069	-36.6516 # 1.16E+00	9.51793 # 1.22E+00
03	300	1932.71191 # .3623	-1310.96094 # .4609	2327.38037 # .6084	-34.7680 # 3.95E-01	7.53062 # 1.71E-01
04	200	1941.69080 # .8007	-1303.07813 # .4487	2329.69116 # .9684	-38.4159 # 8.27E-01	10.9073 # 8.03E-01
09	100	1931.74707 # .3157	-1297.76465 # .5267	2328.11499 # .6660	-34.5062 # 4.30E-01	7.22375 # 1.71E-01
10	0	1928.27441 # .6865	-1300.49451 # .4513	2328.95435 # .8566	-35.6509 # 8.65E-01	8.22086 # 7.71E-01
11	200	1936.13562 # .8328	-1302.36841 # .5195	2329.28735 # .9521	-36.9786 # 9.36E-01	9.52237 # 7.67E-01
12	300	1933.52612 # .2627	-1309.37476 # .4435	2329.31689 # .5418	-34.8861 # 3.77E-01	7.58667 # 1.77E-01
21	0	1939.74634 # .6712	-1302.43542 # .4707	2327.23120 # .8553	-34.9746 # 8.48E-01	7.82986 # 7.05E-01
22	100	1942.88159 # .3874	-1299.67163 # .6339	2327.36450 # .8196	-33.8807 # 5.55E-01	7.15288 # 2.38E-01
23	200	1949.41919 # .7702	-1303.37366 # .6210	2328.39551 # 1.1449	-35.5103 # 1.06E+00	8.43975 # 9.73E-01
24	300	1944.75830 # .3398	-1310.73840 # .5733	2327.30688 # .6752	-34.7910 # 4.11E-01	7.36224 # 1.84E-01
25	100	1932.59253 # .3219	-1299.96252 # .5313	2326.50659 # .6704	-35.1785 # 5.04E-01	7.72268 # 2.58E-01
26	200	1937.56982 # .7371	-1305.25330 # .5279	2327.27344 # .9055	-35.6506 # 8.46E-01	8.30878 # 6.27E-01
27	0	1928.78479 # .6314	-1304.24023 # .4203	2327.00244 # .7859	-35.8333 # 7.45E-01	8.31141 # 6.09E-01
28	300	1933.39075 # .3096	-1311.57166 # .4558	2327.06177 # .5921	-35.0030 # 4.39E-01	7.73212 # 2.17E-01
33	100	1935.59583 # .3441	-1296.81592 # .5403	2327.94653 # .6855	-34.4869 # 4.29E-01	7.31661 # 1.69E-01
34	0	1932.51904 # .6240	-1300.32349 # .4736	2328.79712 # .8738	-35.1833 # 8.54E-01	8.10101 # 7.75E-01
35	200	1942.66626 # .7423	-1301.60645 # .4895	2329.74390 # 1.0326	-36.6593 # 7.92E-01	9.36650 # 7.25E-01
36	300	1936.86304 # .2963	-1307.26917 # .4607	2328.10254 # .5864	-35.2100 # 4.51E-01	7.86448 # 2.46E-01
37	100	1936.04138 # .2997	-1296.34448 # .4795	2327.88037 # .6177	-34.8199 # 4.47E-01	7.55228 # 2.06E-01
38	200	1941.41272 # .6432	-1301.33813 # .4710	2328.41382 # .9390	-36.2707 # 8.72E-01	8.84371 # 7.76E-01
39	0	1932.88318 # .6097	-1302.06519 # .4334	2328.23438 # .8409	-35.5528 # 8.16E-01	8.28631 # 7.10E-01
40	300	1937.14233 # .2799	-1307.61572 # .4484	2328.01538 # .5739	-34.8886 # 4.25E-01	7.64076 # 2.08E-01

Serie Nikon D200 + 14mm-Objektiv (06.07.2006)

Pho	kappa	x0	y0	c	norme (1400.0)	
					adp3	adp4
05	100	1913.43237 # .3753	-1336.05444 # .5371	2490.12671 # .6628	-28.5052 # 4.30E-01	5.64650 # 1.81E-01
06	0	1914.29578 # .7197	-1328.79077 # .4530	2491.20239 # .8118	-28.2663 # 7.95E-01	5.44273 # 7.17E-01
07	200	1910.88635 # .9157	-1325.90051 # .6003	2493.28491 # 1.1231	-29.9317 # 8.15E-01	7.02218 # 7.25E-01
08	300	1910.63977 # .4653	-1324.65002 # .6248	2489.63257 # .7644	-29.2666 # 4.91E-01	5.89959 # 2.00E-01
13	100	1909.99622 # .3538	-1330.18335 # .5841	2490.05200 # .6978	-28.8739 # 4.78E-01	5.87872 # 2.35E-01
14	200	1906.38318 # .8351	-1317.72668 # .5188	2490.56787 # .8947	-28.3949 # 8.75E-01	5.37997 # 7.53E-01
15	0	1911.36963 # .8251	-1322.02930 # .5415	2489.60571 # .9598	-27.6643 # 9.44E-01	4.63972 # 8.43E-01
16	300	1907.80249 # .3548	-1319.25391 # .6048	2491.28394 # .6908	-28.3343 # 4.49E-01	5.54859 # 2.09E-01
17	0	1911.34668 # .6348	-1330.47986 # .4254	2490.56860 # .6634	-28.1755 # 5.34E-01	5.26187 # 3.17E-01
18	100	1909.83521 # .3748	-1338.60767 # .6436	2489.72241 # .7308	-29.2897 # 5.20E-01	6.15652 # 2.80E-01
19	200	1907.71899 # .7808	-1327.37354 # .5502	2492.36401 # 1.3626	-29.6334 # 1.35E+00	6.83626 # 1.55E+00
20	300	1910.33752 # .3555	-1327.56714 # .6221	2491.08960 # .6931	-28.8882 # 4.68E-01	5.83305 # 2.42E-01
29	100	1917.92651 # .3660	-1340.28931 # .6186	2489.94897 # .7155	-28.6570 # 4.74E-01	5.73291 # 2.23E-01
30	200	1914.69250 # .7357	-1329.41931 # .5104	2490.95679 # .8310	-28.2270 # 7.75E-01	5.20904 # 5.75E-01
31	0	1918.82715 # .6369	-1332.45020 # .4477	2490.85864 # .7234	-27.6760 # 6.75E-01	4.91510 # 5.14E-01
32	300	1915.03259 # .3434	-1328.40161 # .5695	2490.99292 # .6703	-29.0323 # 4.66E-01	5.87504 # 2.33E-01
41	100	1911.49390 # .3639	-1339.09741 # .6116	2490.84375 # .7200	-28.5590 # 4.95E-01	5.73070 # 2.43E-01
42	200	1907.63428 # .6994	-1327.70471 # .5027	2491.72949 # .8918	-28.8237 # 8.54E-01	5.74023 # 7.27E-01
43	0	1910.63049 # .6152	-1331.24573 # .4855	2491.02148 # .7886	-27.9112 # 7.30E-01	4.95898 # 5.70E-01
44	300	1908.39270 # .3620	-1327.18298 # .6151	2491.37378 # .7096	-28.7998 # 4.91E-01	5.75651 # 2.43E-01

Anhang C

Ergänzungen – Bereich „Georeferenzierung“

C.1 Normalvektor-Abschätzung

Wie in Abschnitt 4.2.2 erwähnt, soll an einem gegebenen Datenpunkt \mathbf{d}_0 der Normalvektor der Objektoberfläche mit Hilfe m benachbarter Punkte \mathbf{d}_k ($k > 0$) abgeschätzt werden. Dazu wird eine ausgleichende Ebene durch die insgesamt $(m + 1)$ Punkte gelegt (wir setzen eine Redundanz $r > 0$ voraus, also $m \geq 3$). Im Gegensatz zu Formel (4.6) wird hier der Ansatz dahingehend erweitert, dass individuelle Gewichte $p_k > 0$ für die Punkte zugelassen werden:

$$E(\mathbf{n}, c) = \sum_{k=0}^m p_k \cdot a_k^2 = \sum_{k=0}^m p_k \cdot (\mathbf{n}^T \mathbf{d}_k + c)^2 \quad \text{mit } \|\mathbf{n}\| = 1 \quad (\text{C.1})$$

Minimiert man $E(\mathbf{n}, c)$ bezüglich c , erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c} &= 2 \cdot \sum_{k=0}^m p_k \cdot (\mathbf{n}^T \mathbf{d}_k + c) = 2 \cdot \mathbf{n}^T \sum_{k=0}^m p_k \cdot \mathbf{d}_k + 2 \cdot c \cdot \sum_{k=0}^m p_k = 0 \\ \Rightarrow c &= \frac{-\mathbf{n}^T \sum_{k=0}^m p_k \cdot \mathbf{d}_k}{\sum_{k=0}^m p_k} = -\mathbf{n}^T \mathbf{s} \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

\mathbf{s} ist der Schwerpunkt der Datenpunkte \mathbf{d}_k ; er liegt in der gesuchten Ebene $\mathbf{n}^T \mathbf{x} + c = 0$. Setzt man (C.2) in (C.1) ein, erhält man:

$$E(\mathbf{n}) = \sum_{k=0}^m p_k \cdot [\mathbf{n}^T (\mathbf{d}_k - \mathbf{s})]^2 = \sum_{k=0}^m p_k \cdot [\mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{d}}_k]^2 \quad (\text{C.3})$$

$\tilde{\mathbf{d}}_k$ sind die auf den Schwerpunkt reduzierten Datenpunkte.

Mit der Matrix $\tilde{\mathbf{D}}^T = (\tilde{\mathbf{d}}_0 \quad \tilde{\mathbf{d}}_1 \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{d}}_m)$, der Gewichtsmatrix $P = \text{diag}(p_0 \quad p_1 \quad \dots \quad p_m)$ und $\mathbf{A} = \tilde{\mathbf{D}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{D}}$ lässt sich (C.3) auch folgendermaßen formulieren:

$$E(\mathbf{n}) = \mathbf{n}^T \tilde{\mathbf{D}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{D}} \mathbf{n} = \mathbf{n}^T \mathbf{A} \mathbf{n} \quad (\text{C.4})$$

Mittels der Lagrange'schen Multiplikatorenregel lässt sich die Nebenbedingung $\mathbf{n}^T \mathbf{n} = 1$ berücksichtigen; die zu minimierende Funktion lautet:

$$L(\mathbf{n}, \lambda) = E(\mathbf{n}) - \lambda \cdot (\mathbf{n}^T \mathbf{n} - 1) = \mathbf{n}^T \mathbf{A} \mathbf{n} - \lambda \cdot (\mathbf{n}^T \mathbf{n} - 1) \quad (\text{C.5})$$

Deren Ableitung nach \mathbf{n} muss gleich Null sein:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{n}} = 2 \cdot \mathbf{A} \mathbf{n} - 2 \cdot \lambda \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{A} \mathbf{n} = \lambda \cdot \mathbf{n} \quad (\text{C.6})$$

(C.6) ist ein Eigenwertproblem bezüglich der Matrix A . Da der Ausdruck (C.4) für jedes beliebige \mathbf{n} ein nicht-negatives Resultat ergibt, ist die Matrix A positiv semi-definit. Daraus folgt, dass alle drei Eigenwerte der Matrix A nicht-negative Werte aufweisen. Seien λ_1, λ_2 , und λ_3 die aufsteigend nach ihrem Wert sortierten Eigenwerte der Matrix A und $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$, und \mathbf{n}_3 die jeweils dazugehörigen Eigenvektoren. Dann minimiert der Eigenvektor \mathbf{n}_1 zum kleinsten Eigenwert λ_1 die Fehlerfunktion $E(\mathbf{n})$

$$E_{min} = E(\mathbf{n}_1) = \mathbf{n}_1^T \mathbf{A} \mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_1^T \lambda_1 \cdot \mathbf{n}_1 = \lambda_1 \cdot \mathbf{n}_1^T \mathbf{n}_1 = \lambda_1 \quad (\text{C.7})$$

und ist somit der gesuchte Normalvektor \mathbf{n} . Der Parameter c ergibt sich aus (C.2).

Der mittlere Fehler der Ausgleichung ergibt sich aus E_{min} und der Redundanz r :

$$s_0 = \sqrt{\frac{E_{min}}{r}} = \sqrt{\frac{\lambda_1}{(m+1)-3}} = \sqrt{\frac{\lambda_1}{m-2}} \quad (\text{C.8})$$

Es stellt sich die Frage, wie groß m zu wählen ist, um den Normalvektor mit einer bestimmten Genauigkeit abschätzen zu können. Um einen groben Anhaltspunkt zu bekommen, wurden Überlegungen angestellt, wobei folgende Voraussetzungen als gegeben betrachtet wurden:

- Die Oberfläche sei in der Nachbarschaft des betrachteten Punktes \mathbf{d}_0 ungekrümmt (eben).
- Der Einfallswinkel des Laserstrahls sei normal auf diese ebene Oberfläche.
- Die Entfernung des Laserscanners zu den Punkten \mathbf{d}_k sei hinreichend groß, sodass der Laserstrahl für alle Punkte \mathbf{d}_k parallel angenommen werden kann.
- Die Punkte \mathbf{d}_k seien innerhalb der Ebene in einem fehlerfreien xy -Gitter mit Gitterweite Δ angeordnet, wobei \mathbf{d}_0 im xy -Ursprung liege (Abb. C.1).

- Die „wahre“ Ebene sei durch $z = 0$ sowie der „wahre“ Normalvektor durch \mathbf{e}_z (Einheitsvektor in z -Richtung) gegeben.
- Nur in Aufnahme­richtung z gebe es zufällige Fehler (Distanzmessung), die normalverteilt seien: $Z \sim N(0, \sigma_D^2)$.
- Die ausgleichende Ebene minimiere die Quadratsumme der Punkt-Ebene-Distanzen in z -Richtung.

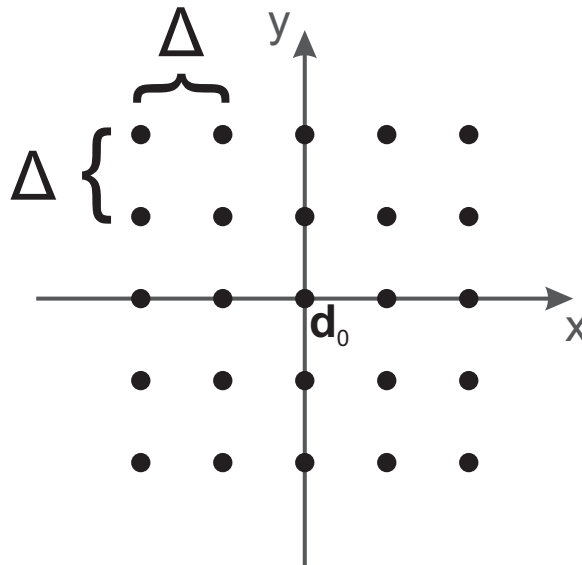


Abbildung C.1: Gitterförmige Punktanordnung um den Ausgangspunkt \mathbf{d}_0 . Für die Anzahl der m nächsten Nachbarn werden in der Regel aus Symmetriegründen die Werte 4,8,12,20,24,28, usw. gewählt. In der Abbildung ist $m = 24$ dargestellt.

Man geht also von den folgenden $(m + 1)$ Beobachtungsgleichungen für die Unbekannten a , b und c aus:

$$z_k + v_k = a \cdot x_k + b \cdot y_k + c$$

Die Modellmatrix (Design-Matrix) \mathbf{A} bzw. $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ lautet somit (der Einfachheit halber wird das Gauß'sche Summenzeichen $[x] = \sum_i x_i$ verwendet):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{pmatrix} [x^2] & [xy] & [x] \\ & [y^2] & [y] \\ \text{symmetrisch} & & m + 1 \end{pmatrix}$$

Bei symmetrischer Anordnung der m Nachbarn in den 4 Quadranten verschwinden die Nicht-Diagonalelemente und $[x^2] = [y^2]$. Die Kofaktormatrix der Unbekannten lautet daher:

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \text{diag} \left(\frac{1}{[x^2]} \quad \frac{1}{[x^2]} \quad \frac{1}{m+1} \right)$$

Somit ergeben sich folgende Genauigkeiten für die (unkorrelierten) Unbekannten a , b , und c (σ_D ist die Genauigkeit der Distanzmessung):

$$\sigma_a = \sigma_b = \frac{\sigma_D}{\sqrt{[x^2]}} \quad \text{und} \quad \sigma_c = \frac{\sigma_D}{\sqrt{m+1}} \quad (\text{C.9})$$

Die Ebenenparameter a und b (genauer: die entsprechenden Zufallsvariablen A und B) sind – unter obigen Voraussetzungen – jeweils normalverteilt mit $N(0, \sigma_a^2)$; sie folgen einer zweidimensionalen Normalverteilung mit $N(\mu_a = 0, \mu_b = 0, \sigma_a^2, \sigma_b^2 = \sigma_a^2, \rho = 0)$.

Daher beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein geschätztes Paar (a, b) die Bedingung $a^2 + b^2 \leq R_1^2 = \sigma_a^2$ erfüllt (vgl. Helmert'sche Fehlerellipse):

$$\begin{aligned} P(a^2 + b^2 \leq \sigma_a^2) &= \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_a^2} \iint_{r^2 = a^2 + b^2 \leq \sigma_a^2} e^{-\frac{a^2 + b^2}{2 \cdot \sigma_a^2}} da db = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_a^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sigma_a} e^{-\frac{r^2}{2 \cdot \sigma_a^2}} r d\varphi dr = \\ &= \frac{1}{\sigma_a^2} \int_0^{\sigma_a} r \cdot e^{-\frac{r^2}{2 \cdot \sigma_a^2}} dr = \frac{1}{\sigma_a^2} \left[-\sigma_a^2 \cdot e^{-\frac{r^2}{2 \cdot \sigma_a^2}} \right]_0^{\sigma_a} = -\frac{1}{\sqrt{e}} + 1 \approx 0.3935 \end{aligned}$$

Analog erhält man für den doppelten Radius $R_2 = 2 \cdot \sigma_a$:

$$P(a^2 + b^2 \leq 4 \cdot \sigma_a^2) = \frac{1}{\sigma_a^2} \left[-\sigma_a^2 \cdot e^{-\frac{r^2}{2 \cdot \sigma_a^2}} \right]_0^{2 \cdot \sigma_a} = -\frac{1}{e^2} + 1 \approx 0.8647 \quad (\text{C.10})$$

Der abgeschätzte Normalvektor lautet (nach Normierung):

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \cdot \begin{pmatrix} -a \\ -b \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.11})$$

Für den Winkel α , den er mit dem „wahren“ Normalvektor $\mu_{\mathbf{n}} = (0 \ 0 \ 1)^T$ einschließt, gilt bei Verwendung der goniometrischen Beziehung $\cos^2 \alpha = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha}$:










$$\cos \alpha = \mathbf{n}^T \mu_{\mathbf{n}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \Rightarrow \tan \alpha = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (\text{C.12})$$

Setzt man $a^2 + b^2 = R_2^2 = 4 \cdot \sigma_a^2$, erhält man mit (C.9):

$$\tan \alpha_2 = 2 \cdot \sigma_a = 2 \cdot \frac{\sigma_D}{\sqrt{[x^2]}} \quad (\text{C.13})$$

Das bedeutet also, dass der abgeschätzte Normalvektor \mathbf{n} in ca. 86.5% der Fälle nicht mehr als um den Winkel α_2 vom „wahren“ Normalvektor abweicht.

In der folgenden Tabelle sind Werte für den Winkel α_2 (in $^\circ$) in Abhängigkeit von der Anzahl m symmetrisch angeordneter nächster Nachbarn und dem Verhältnis $f = \sigma_D : \Delta$ von Distanzmessgenauigkeit des Laserscanners zur Gitterweite (Punktabstand am Objekt) angegeben (in der ersten Zeile steht die sich für das jeweilige m ergebende Quadratsumme $[x^2]$):

$[x^2]$	$2\Delta^2$	$6\Delta^2$	$14\Delta^2$	$34\Delta^2$	$50\Delta^2$	$68\Delta^2$	$108\Delta^2$	$160\Delta^2$	$192\Delta^2$
m	4	8	12	20	24	28	36	44	48
f									
2:1	70.5	58.5	46.9	34.3	29.5	25.9	21.1	17.5	16.1
1:1	54.7	39.2	28.1	18.9	15.8	13.6	10.9	9.0	8.2
1:2	35.3	22.2	15.0	9.7	8.0	6.9	5.5	4.5	4.1
1:3	25.2	15.2	10.1	6.5	5.4	4.6	3.7	3.0	2.8
1:4	19.5	11.5	7.6	4.9	4.0	3.5	2.8	2.3	2.1

Beispielsweise ergibt sich für den Riegl LMS-Z420i ($\sigma_D = 10$ mm) bei einer Winkelschrittweite von 0.1° unter obigen Voraussetzungen auf 10 m Entfernung ein Punktabstand am Objekt von $\Delta = 17$ mm, d.h. $f = 1 : 1.7$. Bei Verwendung von $m = 8$ Nachbarn ergibt sich in diesem Fall $\alpha_2 = 25.1^\circ$, für $m = 24$ ist $\alpha_2 = 9.2^\circ$.

Diese Werte sind – wie erwähnt – nur als grobe Abschätzungen zu sehen, da in der Realität

- selbst als „eben“ empfundene Objektoberflächen Rauigkeiten von relevanter Größenordnung aufweisen können.
- der Einfallswinkel i.A. nicht 90° – wie vorausgesetzt – beträgt.
- auch die gemessenen Winkel fehlerbehaftet sind.
- Korrelationen zwischen den Messungen auftreten (z.B. wegen überlappender Footprints).

Der (in z -Richtung gemessene) Abstand w eines Punktes $\mathbf{d}_P = (x_P \ y_P \ z_P)^T$ von der am Punkt \mathbf{d}_0 abgeschätzten Tangentialebene beträgt:

$$w(a, b, c, z_P) = a \cdot x_P + b \cdot y_P + c - z_P \quad (\text{C.14})$$

x_P und y_P werden als fehlerfrei angenommen, z_P habe wieder Erwartungswert 0 und Varianz σ_D^2 (Distanzmessung). Dann ergibt das Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\sigma_w^2 = x_P^2 \cdot \sigma_a^2 + y_P^2 \cdot \sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_D^2 \quad (\text{C.15})$$

Bei obigem Beispiel ($m = 8$, $\sigma_D = 10$ mm) ergibt sich daher im günstigsten ($x_P = y_P = 0$) bzw. im ungünstigsten Fall ($|x_P| = |y_P| = \frac{1}{2}\Delta$):

$$\sigma_w^2 = \frac{\sigma_D^2}{9} + \sigma_D^2 = \frac{10}{9}\sigma_D^2 \Rightarrow \sigma_w = 10.5 \text{ mm} \quad \text{bzw.}$$

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\Delta^2}{4} \cdot \frac{\sigma_D^2}{6\Delta^2}\right) \cdot 2 + \frac{\sigma_D^2}{9} + \sigma_D^2 = \left(\frac{1}{12} + \frac{1}{9} + 1\right)\sigma_D^2 \Rightarrow \sigma_w = 10.9 \text{ mm}$$

C.2 Bestimmung der Transformationsparameter beim ICP-Algorithmus durch Minimierung der Punkt-zu-Ebene-Fehlerfunktion

Zunächst wird eine Lösung des Problems (mittels Linearisierung) für zwei Punktwolken gezeigt, danach erfolgt eine Verallgemeinerung dieses paarweisen Ansatzes auf $N \geq 3$ Punktwolken zur simultanen Bestimmung aller unbekanntem Transformationsparameter.

C.2.1 Lösung für zwei Punktwolken mittels Linearisierung des Problems

Folgende Fehlerfunktion (vgl. Formel 4.5) ist bezüglich $\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)}$ und $\widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)}$ zu minimieren:

$$E_{P \rightarrow E} = \sum_{i=1}^{N_D} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{d}_i^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} - \mathbf{m}_i \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{m}_i} \right]^2 \quad (\text{C.16})$$

Für die Beschreibung der Drehung werden die in Anhang A.2 definierten Drehwinkel ω , φ , und κ verwendet. Der Einfachheit halber werden in der Folge einige Indizes weggelassen:

$$E(\omega, \varphi, \kappa, t_x, t_y, t_z) = \sum_i \left[\left(\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_i \right)^T \mathbf{n}_i \right]^2 \quad (\text{C.17})$$

Zwischen der für kleine Winkel vereinfachten Drehmatrix (siehe Anhang A.2), dem Winkelvektor $\mathbf{w} := \begin{pmatrix} \omega & \varphi & \kappa \end{pmatrix}^T$, und einem zu transformierenden Punkt \mathbf{d}_i gilt folgende Beziehung:

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \mathbf{d}_i = \left[I + \begin{pmatrix} 0 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 0 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 0 \end{pmatrix} \right] \mathbf{d}_i = \mathbf{d}_i + \mathbf{w} \times \mathbf{d}_i \quad (\text{C.18})$$

Setzt man (C.18) in (C.17) ein und multipliziert aus, erhält man:

$$\begin{aligned} E(\omega, \varphi, \kappa, t_x, t_y, t_z) &= \sum_i \left[\mathbf{d}_i^T \mathbf{n}_i + (\mathbf{w} \times \mathbf{d}_i)^T \mathbf{n}_i + \mathbf{t}^T \mathbf{n}_i - \mathbf{m}_i^T \mathbf{n}_i \right]^2 \\ &= \sum_i \left[(\mathbf{d}_i - \mathbf{m}_i)^T \mathbf{n}_i + (\mathbf{d}_i \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w} + \mathbf{t}^T \mathbf{n}_i \right]^2 \end{aligned}$$

Mit $\mathbf{a}_i := \mathbf{d}_i \times \mathbf{n}_i$ und $\mathbf{c}_i := \mathbf{m}_i - \mathbf{d}_i$ lautet die zu minimierende Fehlerfunktion:

$$E(\omega, \varphi, \kappa, t_x, t_y, t_z) = \sum_i \left[\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i \right]^2 \quad (\text{C.19})$$

Zur Minimierung müssen deren partielle Ableitungen nach den Unbekannten gleich Null sein:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial \omega} &= 2 \cdot \sum_i [a_{i,x} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \varphi} &= 2 \cdot \sum_i [a_{i,y} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial \kappa} &= 2 \cdot \sum_i [a_{i,z} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial t_x} &= 2 \cdot \sum_i [n_{i,x} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial t_y} &= 2 \cdot \sum_i [n_{i,y} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial t_z} &= 2 \cdot \sum_i [n_{i,z} \cdot (\mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i)] = 0\end{aligned}$$

Daraus ergibt sich das folgende lineare Gleichungssystem (der Einfachheit halber wird das Gauß'sche Summenzeichen $[x] = \sum_i x_i$ verwendet):

$$\begin{pmatrix} [a_x^2] & [a_x \cdot a_y] & [a_x \cdot a_z] & [a_x \cdot n_x] & [a_x \cdot n_y] & [a_x \cdot n_z] \\ & [a_y^2] & [a_y \cdot a_z] & [a_y \cdot n_x] & [a_y \cdot n_y] & [a_y \cdot n_z] \\ & & [a_z^2] & [a_z \cdot n_x] & [a_z \cdot n_y] & [a_z \cdot n_z] \\ & & & [n_x^2] & [n_x \cdot n_y] & [n_x \cdot n_z] \\ & & & & [n_y^2] & [n_y \cdot n_z] \\ & & & & & [n_z^2] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega \\ \varphi \\ \kappa \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [a_x \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \\ [a_y \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \\ [a_z \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \\ [n_x \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \\ [n_y \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \\ [n_z \cdot \mathbf{c}^T \mathbf{n}] \end{pmatrix} \quad (\text{C.20})$$

Das Problem lässt sich auch als Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formulieren, indem man die Punkt-zu-Ebene-Abstände als fiktive Nullbeobachtungen einführt. Die entsprechenden Beobachtungsgleichungen (nach Linearisierung und mit den Bezeichnungen entsprechend (C.19)) für die korrespondierenden Punktpaare i lauten:

$$L_i + v_i = 0 + v_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{w} + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t} - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i \quad (\text{C.21})$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{1,x} & a_{1,y} & a_{1,z} & n_{1,x} & n_{1,y} & n_{1,z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_D,x} & a_{N_D,y} & a_{N_D,z} & n_{N_D,x} & n_{N_D,y} & n_{N_D,z} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{l} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1^T \mathbf{n}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{N_D}^T \mathbf{n}_{N_D} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}$$

Mit der Modellmatrix \mathbf{A} , dem gekürzten Beobachtungsvektor \mathbf{l} , dem Unbekanntenvektor \mathbf{x} , und der Gewichtsmatrix $\mathbf{P} = \mathbf{I}$ für gleichgewichtete Punktpaare entspricht $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$ genau dem Gleichungssystem (C.20).

C.2.2 Verallgemeinerung auf $N \geq 3$ Punktwolken

Im folgenden werden die Bezeichnungen aus Abschnitt 4.2.3 verwendet.

Für ein Punktwolken-Paar (J, K) mit $1 \leq J \leq N_R < K \leq N$ (d.h. eine feste und eine zu transformierende Punktwolke) ergibt sich folgende Fehlerquadratsumme (vgl. Formel (4.12)):

$$E_{J,K} = \sum_{i=1}^{N_{J,K}} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \mathbf{d}_{J,i}^{(0)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} \right]^2 \quad (\text{C.22})$$

Dieser Ausdruck lässt sich – ähnlich wie in Anhang C.2.1 – bei Annahme kleiner Drehwinkel vereinfachen:

$$\begin{aligned} E_{J,K} &= \sum_i \left[\left(\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \widehat{\mathbf{w}}_K^{(k+1)} \times \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \mathbf{d}_{J,i}^{(0)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} \right]^2 = \\ &= \sum_i \left[\left(\mathbf{d}_{K,i}^{(k)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} + \left(\widehat{\mathbf{w}}_K^{(k+1)} \times \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} + \left(\widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} - \mathbf{d}_{J,i}^{(0)T} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} \right]^2 = \\ &= \sum_i \left[\left(\mathbf{d}_{K,i}^{(k)} - \mathbf{d}_{J,i}^{(0)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} + \left(\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \times \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} \right)^T \widehat{\mathbf{w}}_K^{(k+1)} + \left(\widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)} \right]^2 = \\ &= \sum_i \left[\mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i \right]^2 \end{aligned} \quad (\text{C.23})$$

Dabei ist:

$$\mathbf{a}_i = \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \times \mathbf{n}_i; \quad \mathbf{c}_i = \mathbf{d}_{J,i}^{(0)} - \mathbf{d}_{K,i}^{(k)}; \quad \mathbf{n}_i \hat{=} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(0)}$$

$$\mathbf{w}_K = \left(\omega_K \quad \varphi_K \quad \kappa_K \right)^T; \quad \mathbf{t}_K = \left(t_{K,x} \quad t_{K,y} \quad t_{K,z} \right)^T$$

Für ein Punktwolken-Paar (J, K) mit $N_R < J < K \leq N$ (d.h. zwei zu transformierende Punktwolken) ergibt sich hingegen folgende Fehlerquadratsumme (vgl. Formel (4.13)):

$$\begin{aligned} E_{J,K} &= \sum_{i=1}^{N_{J,K}} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \mathbf{R}_K^{(k)} \mathbf{d}_{K,i} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{R}_J^{(k)} \mathbf{d}_{J,i} - \mathbf{t}_J^{(k)} - \widehat{\mathbf{t}}_J^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)} \right]^2 \\ E_{J,K} &= \sum_{i=1}^{N_{J,K}} \left[\left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_K^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} - \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \widetilde{\mathbf{d}}_{J,i}^{(k)} - \mathbf{t}_J^{(k)} - \widehat{\mathbf{t}}_J^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)} \right]^2 = \\ &= \sum_i [T_1 + T_2 + T_3 - T_4 - T_5 - T_6]^2 \end{aligned} \quad (\text{C.24})$$

$$T_1 = \left(\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \right)^T \left(\widehat{\mathbf{R}}_K^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

$$T_2 = \left(\mathbf{t}_K^{(k)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

$$T_3 = \left(\widehat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

$$T_4 = \left(\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \right)^T \left(\widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)} = \left(\widetilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)} \right)^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

$$T_5 = \left(\mathbf{t}_J^{(k)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

$$T_6 = \left(\widehat{\mathbf{t}}_J^{(k+1)} \right)^T \widehat{\mathbf{R}}_J^{(k+1)} \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$$

Neben dem Term 4 lassen sich auch die anderen Terme in Formel (C.24) vereinfachen, wenn wieder kleine Drehwinkel angenommen werden:

Term 1:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_K^T \mathbf{R}_J &\approx \begin{pmatrix} 1 & \kappa_K & -\varphi_K \\ -\kappa_K & 1 & \omega_K \\ \varphi_K & -\omega_K & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\kappa_J & \varphi_J \\ \kappa_J & 1 & -\omega_J \\ -\varphi_J & \omega_J & 1 \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} 1 + \kappa_J \cdot \kappa_K + \varphi_J \cdot \varphi_K & -(\kappa_J - \kappa_K) - \omega_J \cdot \varphi_K & (\varphi_J - \varphi_K) - \omega_J \cdot \kappa_K \\ (\kappa_J - \kappa_K) - \varphi_J \cdot \omega_K & 1 + \kappa_J \cdot \kappa_K + \omega_J \cdot \omega_K & -(\omega_J - \omega_K) - \varphi_J \cdot \kappa_K \\ -(\varphi_J - \varphi_K) - \kappa_J \cdot \omega_K & (\omega_J - \omega_K) - \kappa_J \cdot \varphi_K & 1 + \varphi_J \cdot \varphi_K + \omega_J \cdot \omega_K \end{pmatrix} \approx \\
 &\approx \begin{pmatrix} 1 & -(\kappa_J - \kappa_K) & (\varphi_J - \varphi_K) \\ (\kappa_J - \kappa_K) & 1 & -(\omega_J - \omega_K) \\ -(\varphi_J - \varphi_K) & (\omega_J - \omega_K) & 1 \end{pmatrix} = \\
 &= \mathbf{I} + \begin{pmatrix} 0 & -\kappa_J & \varphi_J \\ \kappa_J & 0 & -\omega_J \\ -\varphi_J & \omega_J & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & -\kappa_K & \varphi_K \\ \kappa_K & 0 & -\omega_K \\ -\varphi_K & \omega_K & 0 \end{pmatrix} \\
 \Rightarrow T_1 &= \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T \mathbf{R}_K^T \mathbf{R}_J \mathbf{n}_i = \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T [\mathbf{n}_i + \mathbf{w}_J \times \mathbf{n}_i - \mathbf{w}_K \times \mathbf{n}_i] = \\
 &= \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T \mathbf{n}_i + \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T (\mathbf{w}_J \times \mathbf{n}_i) - \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T (\mathbf{w}_K \times \mathbf{n}_i) = \\
 &= \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T \mathbf{n}_i - (\tilde{\mathbf{d}}_{K,i} \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w}_J + (\tilde{\mathbf{d}}_{K,i} \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w}_K = \\
 &= \tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^T \mathbf{n}_i + \mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K - \mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_J
 \end{aligned}$$

Term 2:

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{t}_K^{(k)})^T \mathbf{R}_J \mathbf{n}_i &= (\mathbf{t}_K^{(k)})^T (\mathbf{n}_i + \mathbf{w}_J \times \mathbf{n}_i) = (\mathbf{t}_K^{(k)})^T \mathbf{n}_i + (\mathbf{t}_K^{(k)})^T (\mathbf{w}_J \times \mathbf{n}_i) = \\
 &= (\mathbf{t}_K^{(k)})^T \mathbf{n}_i - (\mathbf{t}_K^{(k)} \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w}_J
 \end{aligned}$$

Term 3 (für $\hat{\mathbf{t}}_K^{(k+1)}$ wird Einfachheit halber \mathbf{t}_K geschrieben):

$$\mathbf{t}_K^T \mathbf{R}_J \mathbf{n}_i = \mathbf{t}_K^T \mathbf{n}_i - (\mathbf{t}_K \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w}_J \approx \mathbf{t}_K^T \mathbf{n}_i$$

Die Projektion des Translationsvektors \mathbf{t}_K auf die (leicht) gedrehte Flächennormale $\mathbf{R}_J \mathbf{n}_i$ wird durch die Projektion desselbigen auf die ungedrehte Flächennormale \mathbf{n}_i ersetzt.

Term 4: $(\tilde{\mathbf{d}}_{K,i}^{(k)})^T \mathbf{n}_{\mathbf{d}_{J,i}}^{(k)}$

Term 5: analog zu Term 2, d.h.: $(\mathbf{t}_J^{(k)})^T \mathbf{R}_J \mathbf{n}_i = (\mathbf{t}_J^{(k)})^T \mathbf{n}_i - (\mathbf{t}_J^{(k)} \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{w}_J$

Term 6: analog zu Term 3, d.h.: $\mathbf{t}_J^T \mathbf{R}_J \mathbf{n}_i \approx \mathbf{t}_J^T \mathbf{n}_i$

Mit den Bezeichnungen aus (C.23) und $\mathbf{b}_i = (\mathbf{d}_{K,i}^{(k)} + \mathbf{t}_J^{(k)}) \times \mathbf{n}_i$ vereinfacht sich der Ausdruck (C.24) zu:

$$E_{J,K} = \sum_i [\mathbf{a}_i^T \mathbf{w}_K + \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_K - \mathbf{b}_i^T \mathbf{w}_J - \mathbf{n}_i^T \mathbf{t}_J - \mathbf{c}_i^T \mathbf{n}_i]^2 \quad (\text{C.25})$$

Die weitere Behandlung des Problems (Formulierung als Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen) wird in Abschnitt 4.2.3 durchgeführt.

C.2.3 Partielle Ableitungen der zusätzlichen Beobachtungsgleichungen

Die 3 Beobachtungsgleichungen (4.43) für eine mittels Satelliten beobachtete Position lauten ausgeschrieben ($t \hat{=} \hat{t}^{(k+1)}$):

$$\begin{aligned} s_x + v_{s_x} &= \tilde{z}_x - \tilde{z}_y \cdot \kappa + \tilde{z}_z \cdot \varphi + t_x^{(k)} + t_x \\ s_y + v_{s_y} &= \tilde{z}_x \cdot \kappa + \tilde{z}_y - \tilde{z}_z \cdot \omega + t_y^{(k)} + t_y \\ s_z + v_{s_z} &= -\tilde{z}_x \cdot \varphi + \tilde{z}_y \cdot \omega + \tilde{z}_z + t_z^{(k)} + t_z \end{aligned}$$

Die partiellen Ableitungen nach den Unbekannten lauten:

$$\begin{array}{ccccccc} \frac{\partial s_x}{\partial \omega} = 0 & \frac{\partial s_x}{\partial \varphi} = \tilde{z}_z & \frac{\partial s_x}{\partial \kappa} = -\tilde{z}_y & \frac{\partial s_x}{\partial t_x} = 1 & \frac{\partial s_x}{\partial t_y} = 0 & \frac{\partial s_x}{\partial t_z} = 0 \\ \frac{\partial s_y}{\partial \omega} = -\tilde{z}_z & \frac{\partial s_y}{\partial \varphi} = 0 & \frac{\partial s_y}{\partial \kappa} = \tilde{z}_x & \frac{\partial s_y}{\partial t_x} = 0 & \frac{\partial s_y}{\partial t_y} = 1 & \frac{\partial s_y}{\partial t_z} = 0 \\ \frac{\partial s_z}{\partial \omega} = \tilde{z}_y & \frac{\partial s_z}{\partial \varphi} = -\tilde{z}_x & \frac{\partial s_z}{\partial \kappa} = 0 & \frac{\partial s_z}{\partial t_x} = 0 & \frac{\partial s_z}{\partial t_y} = 0 & \frac{\partial s_z}{\partial t_z} = 1 \end{array}$$

Die 2 Beobachtungsgleichungen (4.47) und (4.48) für beobachtete Neigungswinkel lauten bei Weglassen des Index (k):

$$\begin{aligned} \varrho_G + v_{\varrho_G} &= \arctan \frac{-r_{12} \cdot \varphi + r_{22} \cdot \omega + r_{32}}{-r_{13} \cdot \varphi + r_{23} \cdot \omega + r_{33}} \\ \nu_G + v_{\nu_G} &= -\arcsin(-r_{11} \cdot \varphi + r_{21} \cdot \omega + r_{31}) \end{aligned}$$

Mit $(\arctan x)' = \frac{1}{1+x^2}$ erhält man durch Anwenden der Ketten- und Quotientenregel:

$$\frac{\partial \varrho_G}{\partial \omega} = \frac{1}{1 + \left(\frac{-r_{12} \cdot \varphi + r_{22} \cdot \omega + r_{32}}{-r_{13} \cdot \varphi + r_{23} \cdot \omega + r_{33}} \right)^2} \cdot \frac{r_{22} \cdot (-r_{13} \cdot \varphi + r_{23} \cdot \omega + r_{33}) - (-r_{12} \cdot \varphi + r_{22} \cdot \omega + r_{32}) \cdot r_{23}}{(-r_{13} \cdot \varphi + r_{23} \cdot \omega + r_{33})^2}$$

Für die Näherungswerte der Unbekannten $\omega^{(0)} = \varphi^{(0)} = 0$ ergibt sich daher:

$$\frac{\partial \varrho_G}{\partial \omega} = \frac{r_{33}^2}{r_{32}^2 + r_{33}^2} \cdot \frac{r_{22} \cdot r_{33} - r_{32} \cdot r_{23}}{r_{33}^2} = \frac{r_{22} \cdot r_{33} - r_{32} \cdot r_{23}}{r_{32}^2 + r_{33}^2}$$

Mit Hilfe der Matrix $\mathbf{R}_{\varrho\nu\gamma}$ (siehe Anhang A.3) lässt sich der Ausdruck weiter vereinfachen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varrho_G}{\partial \omega} &= \frac{(\cos \varrho \cos \gamma + \sin \varrho \sin \nu \sin \gamma) \cdot \cos \varrho \cos \nu - \sin \varrho \cos \nu \cdot (-\sin \varrho \cos \gamma + \cos \varrho \sin \nu \sin \gamma)}{(-\sin \varrho \cos \nu)^2 + (\cos \varrho \cos \nu)^2} = \\ &= \frac{\cos^2 \varrho \cos \nu \cos \gamma + \sin^2 \varrho \cos \nu \cos \gamma}{\cos^2 \nu} = \frac{\cos \nu \cos \gamma}{\cos^2 \nu} = \frac{\cos \gamma}{\cos \nu} \end{aligned}$$

Auf analoge Weise erhält man:

$$\frac{\partial \varrho_G}{\partial \varphi} = \frac{-r_{12} \cdot r_{33} + r_{32} \cdot r_{13}}{r_{32}^2 + r_{33}^2} = \frac{\sin \gamma}{\cos \nu}$$

Die Ableitungen nach den anderen Unbekannten verschwinden jeweils:

$$\frac{\partial \varrho_G}{\partial \kappa} = \frac{\partial \varrho_G}{\partial t_x} = \frac{\partial \varrho_G}{\partial t_y} = \frac{\partial \varrho_G}{\partial t_z} = 0$$

Mit $(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ erhält man durch Anwenden der Kettenregel:

$$\frac{\partial \nu_G}{\partial \omega} = -\frac{1}{\sqrt{1 - (-r_{11} \cdot \varphi + r_{21} \cdot \omega + r_{31})^2}} \cdot r_{21}$$

Für die Näherungswerte der Unbekannten $\omega^{(0)} = \varphi^{(0)} = 0$ ergibt sich daher:

$$\frac{\partial \nu_G}{\partial \omega} = -\frac{r_{21}}{\sqrt{1 - r_{31}^2}} = -\frac{\cos \nu \sin \gamma}{\sqrt{1 - \sin^2 \nu}} = -\sin \gamma$$

Auf analoge Weise erhält man:

$$\frac{\partial \nu_G}{\partial \varphi} = \frac{r_{11}}{\sqrt{1 - r_{31}^2}} = \frac{\cos \nu \cos \gamma}{\sqrt{1 - \sin^2 \nu}} = \cos \gamma$$

Die Ableitungen nach den anderen Unbekannten verschwinden jeweils:

$$\frac{\partial \nu_G}{\partial \kappa} = \frac{\partial \nu_G}{\partial t_x} = \frac{\partial \nu_G}{\partial t_y} = \frac{\partial \nu_G}{\partial t_z} = 0$$

C.2.4 Ableitungen der Gesamt- nach den Korrektur-Transformationsparametern

Die Gesamt-Transformationsparameter sind Funktionen der in der Ausgleichung bestimmten Korrektur-Transformationsparameter. Durch Anwendung des Kovarianzfortpflanzungsgesetzes auf die Varianz-Kovarianzmatrix der Unbekannten \mathbf{C}_{xx} lässt sich somit die Kovarianzmatrix der Gesamt-Transformationsparameter \mathbf{C}_{ff} bestimmen. Dazu benötigt man die Funktionalmatrix, welche die Ableitungen der Gesamt- nach den Korrektur-Transformationsparametern beinhaltet.

Für einen Standpunkt gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^{(k+1)} &= \widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} \mathbf{R}^{(k)} \\ \mathbf{t}^{(k+1)} &= \mathbf{t}^{(k)} + \widehat{\mathbf{t}}^{(k+1)} \end{aligned}$$

Mit $\widehat{\mathbf{R}}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} 0 & -\kappa & \varphi \\ \kappa & 0 & -\omega \\ -\varphi & \omega & 0 \end{pmatrix}$ lauten die Elemente $r_{ij}^{(k+1)}$ der Gesamt-Drehmatrix:

$$\begin{aligned} r_{11}^{(k+1)} &= r_{11}^{(k)} - r_{21}^{(k)} \kappa + r_{31}^{(k)} \varphi \\ r_{12}^{(k+1)} &= r_{12}^{(k)} - r_{22}^{(k)} \kappa + r_{32}^{(k)} \varphi \\ r_{13}^{(k+1)} &= r_{13}^{(k)} - r_{23}^{(k)} \kappa + r_{33}^{(k)} \varphi \\ r_{21}^{(k+1)} &= r_{11}^{(k)} \kappa + r_{21}^{(k)} - r_{31}^{(k)} \omega \\ r_{22}^{(k+1)} &= r_{12}^{(k)} \kappa + r_{22}^{(k)} - r_{32}^{(k)} \omega \\ r_{23}^{(k+1)} &= r_{13}^{(k)} \kappa + r_{23}^{(k)} - r_{33}^{(k)} \omega \\ r_{31}^{(k+1)} &= -r_{11}^{(k)} \varphi + r_{21}^{(k)} \omega + r_{31}^{(k)} \\ r_{32}^{(k+1)} &= -r_{12}^{(k)} \varphi + r_{22}^{(k)} \omega + r_{32}^{(k)} \\ r_{33}^{(k+1)} &= -r_{13}^{(k)} \varphi + r_{23}^{(k)} \omega + r_{33}^{(k)} \end{aligned} \tag{C.26}$$

Mit $\hat{\mathbf{t}}^{(k+1)} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z \end{pmatrix}^T$ lauten die Komponenten $t_i^{(k+1)}$ der Gesamt-Translation:

$$\begin{aligned} t_x^{(k+1)} &= t_x^{(k)} + t_x \\ t_y^{(k+1)} &= t_y^{(k)} + t_y \\ t_z^{(k+1)} &= t_z^{(k)} + t_z \end{aligned}$$

Die Ableitungen der $t_i^{(k+1)}$ nach den Korrektur-Transformationsparametern sind trivial:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_i^{(k+1)}}{\partial t_j} &= \delta_{ij} \quad (\text{Kronecker-Delta; d.h. 1 für } i = j \text{ und 0 für } i \neq j) \\ \frac{\partial t_i^{(k+1)}}{\partial \omega} &= \frac{\partial t_i^{(k+1)}}{\partial \varphi} = \frac{\partial t_i^{(k+1)}}{\partial \kappa} = 0 \end{aligned}$$

Bei der Repräsentation der Rotation mit Hilfe von drei Drehwinkeln α_i (vgl. Anhang A) verschwinden auch deren Ableitungen nach den Korrektur-Translationsparametern:

$$\frac{\partial \alpha_i^{(k+1)}}{\partial t_j} = 0$$

Die Funktional-(Jakobi-)Matrix weist für einen Standpunkt K somit folgende Struktur auf:

$$\mathbf{F}_{xx,K} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_{\alpha_1\alpha_2\alpha_3,K} & \mathbf{O}_{3,3} \\ \mathbf{O}_{3,3} & \mathbf{I}_{3,3} \end{pmatrix}$$

Die Submatrix $\mathbf{W}_{\alpha_1\alpha_2\alpha_3,K}$ enthält die – von der Parametrisierung der Drehung abhängigen – partiellen Ableitungen der Gesamt-Drehwinkel $\alpha_1^{(k+1)}$, $\alpha_2^{(k+1)}$, und $\alpha_3^{(k+1)}$ nach den Korrektur-Drehwinkeln ω , φ , und κ .

Die Ableitungen sind im folgenden für die in Anhang A erwähnten Winkelsätze angegeben:

$\omega\varphi\kappa$ -Parametrisierung

$$\begin{aligned} \omega^{(k+1)} &= -\arctan \frac{r_{23}^{(k+1)}}{r_{33}^{(k+1)}} = -\arctan \frac{r_{13}^{(k)}\kappa + r_{23}^{(k)} - r_{33}^{(k)}}{\omega - r_{13}^{(k)}\varphi + r_{23}^{(k)}\omega + r_{33}^{(k)}} \\ \varphi^{(k+1)} &= \arcsin(r_{13}^{(k+1)}) = \arcsin(r_{13}^{(k)} - r_{23}^{(k)}\kappa + r_{33}^{(k)}\varphi) \\ \kappa^{(k+1)} &= -\arctan \frac{r_{12}^{(k+1)}}{r_{11}^{(k+1)}} = -\arctan \frac{r_{12}^{(k)} - r_{22}^{(k)}\kappa + r_{32}^{(k)}\varphi}{r_{11}^{(k)} - r_{21}^{(k)}\kappa + r_{31}^{(k)}\varphi} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \omega^{(k+1)}}{\partial \omega} = -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{33}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{-r_{33}^{(k)2} - r_{23}^{(k)2}}{r_{33}^{(k)2}} = 1$$

$$\frac{\partial \omega^{(k+1)}}{\partial \varphi} = -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{33}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{r_{13}^{(k)} \cdot r_{23}^{(k)}}{r_{33}^{(k)2}} = \frac{\sin \omega^{(k)} \sin \varphi^{(k)} \cos \varphi^{(k)}}{\cos^2 \varphi^{(k)}} = \sin \omega^{(k)} \tan \varphi^{(k)}$$

$$\frac{\partial \omega^{(k+1)}}{\partial \kappa} = -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{33}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{r_{13}^{(k)}}{r_{33}^{(k)}} = -\frac{r_{13}^{(k)} \cdot r_{33}^{(k)}}{r_{23}^{(k)2} + r_{33}^{(k)2}} = -\cos \omega^{(k)} \tan \varphi^{(k)}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \varphi^{(k+1)}}{\partial \omega} &= 0 \\
 \frac{\partial \varphi^{(k+1)}}{\partial \varphi} &= \frac{1}{\sqrt{1 - r_{13}^{(k)2}}} \cdot r_{33}^{(k)} = \cos \omega^{(k)} \\
 \frac{\partial \varphi^{(k+1)}}{\partial \kappa} &= \frac{1}{\sqrt{1 - r_{13}^{(k)2}}} \cdot (-r_{23}^{(k)}) = \sin \omega^{(k)} \\
 \frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \omega} &= 0 \\
 \frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \varphi} &= -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{12}^{(k)}}{r_{11}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{r_{32}^{(k)} \cdot r_{11}^{(k)} - r_{12}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)}}{r_{11}^{(k)2}} = -\frac{\sin \omega^{(k)} \cos \varphi^{(k)}}{\cos^2 \varphi^{(k)}} = -\frac{\sin \omega^{(k)}}{\cos \varphi^{(k)}} \\
 \frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \kappa} &= -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{12}^{(k)}}{r_{11}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{-r_{22}^{(k)} \cdot r_{11}^{(k)} + r_{12}^{(k)} \cdot r_{21}^{(k)}}{r_{11}^{(k)2}} = -\frac{-\cos \omega^{(k)} \cos \varphi^{(k)}}{\cos^2 \varphi^{(k)}} = \frac{\cos \omega^{(k)}}{\cos \varphi^{(k)}} \\
 &\Rightarrow \mathbf{W}_{\omega\varphi\kappa} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \omega^{(k)} \tan \varphi^{(k)} & -\cos \omega^{(k)} \tan \varphi^{(k)} \\ 0 & \cos \omega^{(k)} & \sin \omega^{(k)} \\ 0 & -\frac{\sin \omega^{(k)}}{\cos \varphi^{(k)}} & \frac{\cos \omega^{(k)}}{\cos \varphi^{(k)}} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Im Falle hinreichend kleiner Korrektur-Drehwinkel können an Stelle der Winkel $\omega^{(k)}, \varphi^{(k)}, \kappa^{(k)}$ genau so gut die Winkel $\omega^{(k+1)}, \varphi^{(k+1)}, \kappa^{(k+1)}$ für die Berechnung verwendet werden.

$\varrho\nu\gamma$ -Parametrisierung

Die partiellen Ableitungen von ϱ und ν nach den Korrektur-Drehwinkeln wurden bereits in Anhang C.2.3 durchgeführt. Sie lauten:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \varrho^{(k+1)}}{\partial \omega} &= \frac{\cos \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & \frac{\partial \varrho^{(k+1)}}{\partial \varphi} &= \frac{\sin \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & \frac{\partial \varrho^{(k+1)}}{\partial \kappa} &= 0 \\
 \frac{\partial \nu^{(k+1)}}{\partial \omega} &= -\sin \gamma^{(k)} & \frac{\partial \nu^{(k+1)}}{\partial \varphi} &= \cos \gamma^{(k)} & \frac{\partial \nu^{(k+1)}}{\partial \kappa} &= 0 \\
 \gamma^{(k+1)} &= \arctan \frac{r_{21}^{(k+1)}}{r_{11}^{(k+1)}} = \arctan \frac{r_{11}^{(k)}\kappa + r_{21}^{(k)} - r_{31}^{(k)}\omega}{r_{11}^{(k)} - r_{21}^{(k)}\kappa + r_{31}^{(k)}\varphi} \\
 \frac{\partial \gamma^{(k+1)}}{\partial \omega} &= \frac{1}{1 + \frac{r_{21}^{(k)2}}{r_{11}^{(k)2}}} \cdot \frac{-r_{31}^{(k)}}{r_{11}^{(k)}} = \frac{-r_{11}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)}}{r_{11}^{(k)2} + r_{21}^{(k)2}} = \cos \gamma^{(k)} \tan \nu^{(k)} \\
 \frac{\partial \gamma^{(k+1)}}{\partial \varphi} &= \frac{1}{1 + \frac{r_{21}^{(k)2}}{r_{11}^{(k)2}}} \cdot \frac{-r_{21}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)}}{r_{11}^{(k)2}} = \frac{-r_{21}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)}}{r_{11}^{(k)2} + r_{21}^{(k)2}} = \sin \gamma^{(k)} \tan \nu^{(k)} \\
 \frac{\partial \gamma^{(k+1)}}{\partial \kappa} &= \frac{1}{1 + \frac{r_{21}^{(k)2}}{r_{11}^{(k)2}}} \cdot \frac{r_{11}^{(k)2} + r_{21}^{(k)2}}{r_{11}^{(k)2}} = 1 \\
 &\Rightarrow \mathbf{W}_{\varrho\nu\gamma} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & \frac{\sin \gamma^{(k)}}{\cos \nu^{(k)}} & 0 \\ -\sin \gamma^{(k)} & \cos \gamma^{(k)} & 0 \\ \cos \gamma^{(k)} \tan \nu^{(k)} & \sin \gamma^{(k)} \tan \nu^{(k)} & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Im Falle hinreichend kleiner Korrektur-Drehwinkel können an Stelle der Winkel $\varrho^{(k)}, \nu^{(k)}, \gamma^{(k)}$ genau so gut die Winkel $\varrho^{(k+1)}, \nu^{(k+1)}, \gamma^{(k+1)}$ für die Berechnung verwendet werden.

$\alpha\zeta\kappa$ -Parametrisierung

$$\begin{aligned}\alpha^{(k+1)} &= \arctan \frac{r_{23}^{(k+1)}}{r_{13}^{(k+1)}} = \arctan \frac{r_{13}^{(k)}\kappa + r_{23}^{(k)} - r_{33}^{(k)}\omega}{r_{13}^{(k)} - r_{23}^{(k)}\kappa + r_{33}^{(k)}\varphi} \\ \zeta^{(k+1)} &= \arccos(r_{33}^{(k+1)}) = \arccos(-r_{13}^{(k)}\varphi + r_{23}^{(k)}\omega + r_{33}^{(k)}) \\ \kappa^{(k+1)} &= -\arctan \frac{r_{32}^{(k+1)}}{r_{31}^{(k+1)}} = -\arctan \frac{-r_{12}^{(k)}\varphi + r_{22}^{(k)}\omega + r_{32}^{(k)}}{-r_{11}^{(k)}\varphi + r_{21}^{(k)}\omega + r_{31}^{(k)}}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \alpha^{(k+1)}}{\partial \omega} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{13}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{-r_{33}^{(k)}}{r_{13}^{(k)}} = \frac{-r_{13}^{(k)} \cdot r_{33}^{(k)}}{r_{13}^{(k)2} + r_{23}^{(k)2}} = -\cos \alpha^{(k)} \cot \zeta^{(k)}$$

$$\frac{\partial \alpha^{(k+1)}}{\partial \varphi} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{13}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{-r_{23}^{(k)} \cdot r_{33}^{(k)}}{r_{13}^{(k)2}} = \frac{-r_{23}^{(k)} \cdot r_{33}^{(k)}}{r_{13}^{(k)2} + r_{23}^{(k)2}} = -\sin \alpha^{(k)} \cot \zeta^{(k)}$$

$$\frac{\partial \alpha^{(k+1)}}{\partial \kappa} = \frac{1}{1 + \left(\frac{r_{23}^{(k)}}{r_{13}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{r_{13}^{(k)2} + r_{23}^{(k)2}}{r_{13}^{(k)2}} = 1$$

$$\frac{\partial \zeta^{(k+1)}}{\partial \omega} = -\frac{1}{\sqrt{1 - r_{33}^{(k)2}}} \cdot r_{23}^{(k)} = -\sin \alpha^{(k)}$$

$$\frac{\partial \zeta^{(k+1)}}{\partial \varphi} = -\frac{1}{\sqrt{1 - r_{33}^{(k)2}}} \cdot (-r_{13}^{(k)}) = \cos \alpha^{(k)}$$

$$\frac{\partial \zeta^{(k+1)}}{\partial \kappa} = 0$$

$$\frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \omega} = -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{32}^{(k)}}{r_{31}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{r_{22}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)} - r_{32}^{(k)} \cdot r_{21}^{(k)}}{r_{31}^{(k)2}} = -\frac{\cos \alpha^{(k)} \sin \zeta^{(k)}}{\sin^2 \zeta^{(k)}} = \frac{\cos \alpha^{(k)}}{\sin \zeta^{(k)}}$$

$$\frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \varphi} = -\frac{1}{1 + \left(\frac{r_{32}^{(k)}}{r_{31}^{(k)}}\right)^2} \cdot \frac{-r_{12}^{(k)} \cdot r_{31}^{(k)} + r_{32}^{(k)} \cdot r_{11}^{(k)}}{r_{31}^{(k)2}} = -\frac{\sin \alpha^{(k)} \sin \zeta^{(k)}}{\sin^2 \zeta^{(k)}} = \frac{\sin \alpha^{(k)}}{\sin \zeta^{(k)}}$$

$$\frac{\partial \kappa^{(k+1)}}{\partial \kappa} = 0$$

$$\Rightarrow \mathbf{W}_{\alpha\zeta\kappa} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha^{(k)} \cot \zeta^{(k)} & -\sin \alpha^{(k)} \cot \zeta^{(k)} & 1 \\ -\sin \alpha^{(k)} & \cos \alpha^{(k)} & 0 \\ \frac{\cos \alpha^{(k)}}{\sin \zeta^{(k)}} & \frac{\sin \alpha^{(k)}}{\sin \zeta^{(k)}} & 0 \end{pmatrix}$$

Im Falle hinreichend kleiner Korrektur-Drehwinkel können an Stelle der Winkel $\alpha^{(k)}, \zeta^{(k)}, \kappa^{(k)}$ genau so gut die Winkel $\alpha^{(k+1)}, \zeta^{(k+1)}, \kappa^{(k+1)}$ für die Berechnung verwendet werden.

C.3 Bestimmung von $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$ ohne explizite Kenntnis von \mathbf{v}

Normalgleichungssystem:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{N} \mathbf{x} = \mathbf{C} \mathbf{C}^T \mathbf{x} = \mathbf{r} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$$

Reduziertes Normalgleichungssystem:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{x} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{r} =: \mathbf{g} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{x} = (\mathbf{C}^{-1})^T \mathbf{g}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} &= (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l})^T \mathbf{P} (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \\ &= \mathbf{x}^T \underbrace{(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l})}_{=0} - \mathbf{r}^T \mathbf{x} + \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \\ &= \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{x}^T \mathbf{C} \mathbf{C}^T \mathbf{x} = \\ &= \mathbf{l}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{g}^T \mathbf{g} \end{aligned}$$

C.4 Vergleich von ICP-verwandten Algorithmen

C.4.1 Vom Benutzer wählbare Parameter

Die Voreinstellungen (Standard-Parameterwerte) sind jeweils in geschwungenen Klammern angegeben.

RiSCAN PRO 1.4.1 – Modul „Multi Station Adjustment“

- (R1) Maximal zulässige Standardabweichung einer Ebenen [m] {0.015}
- (R2) Referenzebene {XY-Ebene}
- (R3) Auflösung des Basis-Raster [m] {1.0}
- (R4) Maximale zulässiger Neigungswinkel gegenüber der Normalen der Referenzebene {30°}
- (R5) Korrespondenzsuche. XOR-Auswahl: [Ein nächster Punkt/Alle nächsten Punkte] {Alle nächsten Punkte}
- (R6) Suchradius [m] {0.5}
- (R7) Maximal zulässiger Winkel zwischen korrespondierenden Ebenenstücken {5°}
- (R8) Minimale Änderung der Standardabweichung [m] {0.005}
- (R9) Ausreißer-Faktor {2}
- (R10) Ausgleichungsmethode. XOR-Auswahl: [Kleinste Quadrate/Robust] {Kleinste Quadrate}

Die Parameter (R1) bis (R4) beziehen sich auf den Vorverarbeitungsschritt, die restlichen Parameter auf den eigentlichen ICP-Algorithmus.

Erklärungen laut Handbuch:

Ad (R1): Ein Ebene muss eine geringere Standardabweichung als dieser Wert aufweisen, um als gültiges Ebenenstück akzeptiert zu werden.

Ad (R2): Ebene, in welcher das für den Algorithmus erforderliche Raster ausgebreitet wird.

Ad (R3): Ausgehend von dieser Gitterweite erfolgt bei Bedarf eine hierarchische Unterteilung zum Auffinden der Ebenenstücke.

Ad (R4): Der Winkel zwischen der Normalen eines Ebenenstücks und der Normalen der Referenzebene darf diesen Wert nicht überschreiten.

Ad (R5): Korrespondenzsuche nach einem nächsten Punkt oder aller nächsten Punkte der benachbarten Scans.

Ad (R6): Maximal zulässige Entfernung für gültige Korrespondenzen.

Ad (R7): Maximal zulässiger Winkel zwischen den Normalenvektoren korrespondierender Ebenenstücken.

Ad (R8): Ist die Änderung der Standardabweichung der Distanzen aller verwendeten Punkt-paare kleiner als dieser Wert, wird der Iterationsprozess beendet.

Ad (R9): Punkt-paare, die eine größere Distanz als die mit diesem Faktor multiplizierte Standardabweichung voneinander aufweisen, werden als Ausreißer klassifiziert und eliminiert.

Ad (R10): Verwendung der L2- oder der L1-Norm.

Geomagic Studio 9

(G1) Iterationen für Konvergenz. Wertebereich: [1 bis 10000] {3}

(G2) Überlappung von Nachbarn. [1 bis 6] {3}

(G3) Verbindungsgraph. Check-Box {ein}

(G4) Sequentiell. Check-Box {aus}

(G5) Zuordnung. XOR-Auswahl: [Nächster/Median/Zufall] {Median}

(G6) Nahpunkt. XOR-Auswahl: [Gerichtet/Ungerichtet/Kein Rand] {Kein Rand}

(G7) Toleranz. [>0.00 m] {0.00m}

(G8) Max. Iterationen. [1 bis 1000] {100}

(G9) Auswahlgröße. [1 bis 10000] {2000}

(G10) Rutschkontrolle. Check-Box {ein}

(G11) Verschiebung beschränken. Check-Box {aus}

→ falls aktiviert: max. Verschiebung [0.000 m bis 1.000 m]

Erklärungen laut Online-Handbuch:

Ad (G1): Anzahl der Iterationen, nach denen der Prozess gestoppt wird, falls keine Verbesserung erzielt wird.

Ad (G2): Beeinflusst die Detektion korrespondierender Punkte in verschiedenen Scans.

Ad (G3): Falls aktiviert, werden korrespondierende Punkte nur in Scans mit hinreichender Überlappung gesucht.

Ad (G4): Falls aktiviert, wird sequentieller Algorithmus (schneller), ansonsten simultaner Algorithmus verwendet.

Ad (G5): Beeinflusst Registrierung mehrerer Scans in überlappenden Bereichen.

Ad (G6): Gibt eine Methode zur Auflösung ungenauer Korrespondenzen an.

Ad (G7): Gibt die mittlere Abweichung zwischen Punkte verschiedener Scans an, bei der Algorithmus abgebrochen wird.

Ad (G8): Maximale Anzahl an Iterationen, die durchgeführt werden.

Ad (G9): Gibt die Anzahl der Punkte jedes Scans an, die zur Steuerung des Registrierungsprozesses verwendet werden.

Ad (G10): Aktiviert eine automatische Beschränkung der Translation.

Ad (G11): Manuelle Beschränkung der Translation. Im Zweifelsfall wird der kleinere Wert (automatisch/manuell) verwendet.

Eigenentwicklung Diss-ICP

(I1) Anzahl k der nächsten Nachbarn. {8}

(I2) Maximal zulässiger mittlerer Fehler s_0 bei der Ebenen-Ausgleichung [m]. {0.02}

(I3) Voxel-Größe für Ausdünnung [m] (0 für keine Ausdünnung). {0.1}

(I4) Maximal zulässige Distanz zwischen korrespondierenden Punkten. [m] {0.1}

(I5) Mindestwert für das Skalarprodukt der Normalvektoren korrespondierender Punkte. {0.9}

(I6) Vorzeitiger Abbruch bei gleichzeitiger Erfüllung der beiden folgenden Kriterien:

- (a) Der betragsmäßig größte der 3 Korrekturwinkel ist kleiner als der Winkel-Schwellwert [mgon]. {1.0}
- (b) Die betragsmäßig größte der 3 Korrekturverschiebungskomponenten ist kleiner als der Schwellwert [mm]. {1.0}

(I7) Maximal durchgeführte Anzahl an Iterationsschritten. {20}

Für die (vom Benutzer nicht einstellbaren) Schwellwerte für die Exzentrizitäten Λ_{12} bzw. Λ_{23} wurde 0.5 bzw. 0.9 gewählt.

C.4.2 Für die Evaluierung verwendete Parameterwerte

Neben den im vorigen Abschnitt angegebenen Standard-Parameterwerten (in Abschnitt 4.2.4 als RSP-S, GS-S bzw. Diss-S bezeichnet) wurden im Zuge der Evaluierung außerdem folgende benutzerdefinierte Parametersätze verwendet (in Abschnitt 4.2.4 als RSP-B, GS-B bzw. Diss-B bezeichnet):

Parametersatz	R1 [m]	R2	R3 [m]	R4 [°]	R5	R6 [m]	R7 [°]	R8 [m]	R9	R10
RSP-S	0.015	XY	1.0	30	Alle	0.5	5	0.0050	2.0	L2-N.
RSP-B Buddha	0.050	YZ	0.1	90	Alle	0.5	5	0.0001	2.0	L2-N.
RSP-B Industr.	0.020	XY	0.1	90	Alle	0.1	5	0.0001	2.0	L2-N.
RSP-B Glasgow	0.020	YZ	1.0	90	Alle	0.5	5	0.0001	2.0	L2-N.
RSP-B Klgft.	0.020	YZ	1.0	90	Alle	0.5	5	0.0001	2.0	L2-N.

Tabelle C.1: Verwendete Parametersätze in RiSCAN PRO

Parametersatz	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7 [m]	G8	G9	G10	G11
GS-S	3	3	ein	aus	Median	Kein Rand	0.0	100	2000	ein	aus
GS-B Glasgow	3	1	ein	aus	Median	Kein Rand	0.0	1000	2000	ein	aus
GS-B Klgft.	3	1	ein	aus	Median	Kein Rand	0.0	1000	2000	ein	aus

Tabelle C.2: Verwendete Parametersätze in Geomagic Studio

Parametersatz	I1	I2 [m]	I3 [m]	I4 [m]	I5	I6a [mm]	I6b [mm]	I7
Diss-S	8	0.020	0.1	0.10	0.9	1.0	1.0	20
Diss-B Buddha	36	0.050	0.00	0.1	0.9	1.0	1.0	20
Diss-B Industr.	36	0.006	0.02	0.1	0.9	1.0	1.0	20
Diss-B Zimmer	36/8	0.006	0.00	0.1	0.9	1.0	1.0	20

Tabelle C.3: Verwendete Parametersätze beim Diss-ICP-Algorithmus

Im Falle des Parametersatzes „Diss-B Zimmer“ wurden bei der Normalvektorabschätzung verschieden große Nachbarschaften k für *Master* und *Slave Scan* gewählt.

C.4.3 Bestimmung einer ausgleichenden Drehzylinderfläche durch Datenpunkte

Durch N gegebene Datenpunkte soll eine ausgleichende Drehzylinderfläche derart bestimmt werden, dass die Quadratsumme der Punkt-zu-Fläche-Abstände minimiert wird.

Ein Drehzylinder in allgemeiner räumlicher Lage ist durch 5 voneinander unabhängige Parameter bestimmt: 4 für dessen Achse (Gerade im Raum) sowie einer für dessen Radius. Eine Gerade im Raum lässt sich beispielsweise durch ihren Richtungsvektor (1 unabhängige Parameter) und die 2D-Position ihres Durchstoßpunkts durch eine geeignete (d.h. *nicht* zu ihr parallele) Koordinatenebene festlegen (2 weitere unabhängige Parameter).

Zur Lösung des oben genannten Ausgleichungsproblems wird der von [VAN GOSLIGA et al. 2006] vorgeschlagene Weg eingegangen, bei dem eine Überparametrisierung des Drehzylinders erfolgt. Dessen Achse wird dabei durch 6 voneinander *abhängige* Parameter beschrieben, nämlich durch die 3 Komponenten ihres normierten Richtungsvektors $\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_x & a_y & a_z \end{pmatrix}^T$ sowie durch die 3 Koordinaten eines beliebigen auf der Zylinderachse liegenden Punkts $\mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_x & c_y & c_z \end{pmatrix}^T$. Der 7. Parameter des Zylinders ist dessen Radius r .

Sei \mathbf{p}_i ein Datenpunkt. Dann entspricht sein Abstand $d(\mathbf{p}_i)$ von der Zylinderachse genau dem Wert des Ausdrucks $\|(\mathbf{p}_i - \mathbf{c}) \times \mathbf{a}\|$, wie man anhand von Abbildung C.2 erkennen kann.

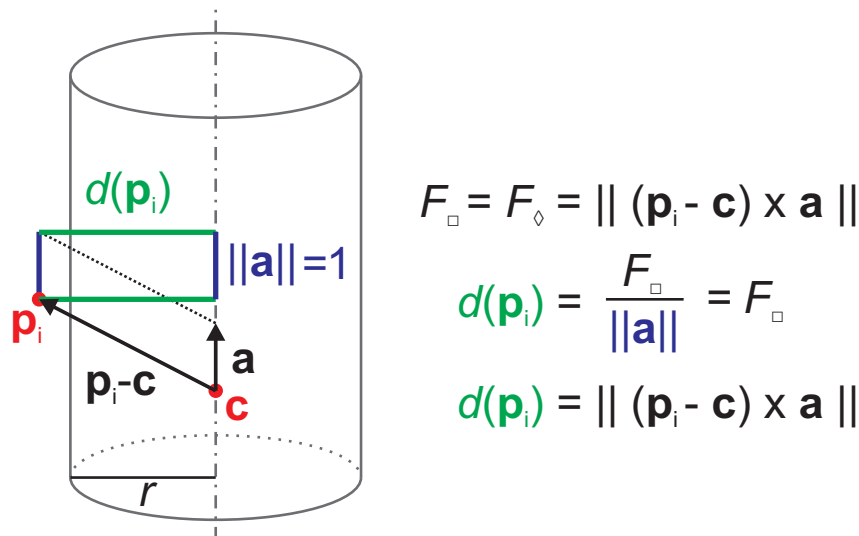


Abbildung C.2: Abstand $d(\mathbf{p}_i)$ eines Punktes \mathbf{p}_i von der durch den Punkt \mathbf{c} und den Richtungsvektor \mathbf{a} gegebenen Zylinderachse. Der Flächeninhalt des von $(\mathbf{p}_i - \mathbf{c})$ und \mathbf{a} aufgespannten Parallelogramms ist identisch mit jenem des eingezeichneten Rechtecks und entspricht auch genau dem gesuchten Abstand $d(\mathbf{p}_i)$, da wir einen normierten Richtungsvektor voraussetzen.

Jeder Datenpunkt \mathbf{p}_i liefert somit eine (fiktive Null-)Beobachtungsgleichung der folgenden Form:

$$L_i + v_i = 0 + v_i = d(\mathbf{p}_i) - r = \|(\mathbf{p}_i - \mathbf{c}) \times \mathbf{a}\| - r \quad (\text{C.27})$$

Weiters werden 2 zusätzliche Beobachtungsgleichungen zur Normierung von \mathbf{a} bzw. zum Festhalten einer Koordinate von \mathbf{c} angesetzt. Üblicherweise hält man jene Koordinate von \mathbf{c} fest, in

Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name: Alexander Haring
Geboren: am 16.11.1978 in Wien
Eltern: Karl Haring und Christa Haring (geb. Neuwirth)
Geschwister: Julia Haring
Familienstand: ledig

Schulbildung

1985-1989: Volksschule Julius-Meini-Gasse, 1160 Wien
1989-1997: Gymnasium Maroltingergasse, 1160 Wien
Juni 1997: Matura mit ausgezeichnetem Erfolg

Hochschulausbildung

1997-2003: Studium Vermessungswesen an der TU Wien
April 2000: 1. Diplomprüfung
2000-2003: 2. Studienabschnitt: Studienzweig Geoinformationswesen
2002-2003: Diplomarbeit „Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten“
Oktober 2003: 2. Diplomprüfung
November 2003: Verleihung des akademischen Grades Dipl.-Ing.
2003-2007: Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften an der TU Wien

Wissenschaftliche Anstellungen

seit Oktober 2003: Projektassistent am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien
seit Dezember 2003: Mitarbeiter des Christian-Doppler-Labors „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ am I.P.F.

Wien, am 08. Oktober 2007