DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 613

Axel Wendt

Objektraumbasierte simultane multisensorale Orientierung

München 2008

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

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5052 2

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 270, Hannover 2008

Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 613

Objektraumbasierte simultane multisensorale Orientierung

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

von

Dipl.-Ing. (FH) Axel Wendt

München 2008

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

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5052 2

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 270, Hannover 2008

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

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

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

e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission

Referent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke
Korreferenten:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Grün
	Dr.-Ing. Claus Brenner
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2007

© 2008 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 5052 2

Notationen

Orientierungsparameter:

t_X, t_Y, t_Z	Translationsparameter
$\mathbf{T}$	Translationsvektor
ω, ϕ, κ	Rotationsparameter
$\mathbf{R}(r_{11}, r_{12}, \cdots, r_{33})$	Rotationsmatrix

Objektraum:

$[X, Y, Z]$	Objektraumkoordinatensystem
$[X^S, Y^S, Z^S]$	Patchkoordinatensystem
$[X_i, Y_j]$	Rasterkoordinatensystem der Objektoberfläche
$[X_k, Y_l]$ bzw. $[k, l]$	Rasterkoordinatensystem der Bildsignale
$[dX, dY]$	Koordinatensystem innerhalb eines Oberflächenelementes
m_i, m_j	Skalare für die Transformation von $[X_i, Y_j]$ nach $[X^S, Y^S, Z^S]$
m_k, m_l	Skalare für die Transformation von $[X_k, Y_l]$ nach $[X^S, Y^S, Z^S]$
$G(X^S, Y^S)$	Funktion der Helligkeiten
$I(X^S, Y^S)$	Funktion der Intensitäten
$Z^S(X^S, Y^S)$	Funktion der Objektoberfläche

Bildraum:

$g(x^C, y^C)$	Funktion der Helligkeiten
$d(\phi, \theta)$	Funktion der Entfernungen
$i(\phi, \theta)$	Funktion der Intensitäten
$[x_r, y_c]$ bzw. $[r, c]$	Pixelkoordinatensystem
dx, dy	Koordinatensystem innerhalb eines Sensorelementes
$[x^C, y^C, z^C]$	Bild bzw. Sensorkoordinatensystem der photogrammetrischen Kamera
$[\phi, \theta]$	Bildkoordinatensystem des 3D-Laserscanners
$[x^L, y^L, z^L]$	Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners
m_{x^C}, m_{y^C}	Metrische Größen der Bildelemente des Helligkeitsbildes in Zeilen- und Spaltenrichtung
m_ϕ, m_θ	Metrische Größen der Bildelemente des Entfernungs- und Intensitätsbildes in Zeilen- und Spaltenrichtung
ϕ_{C_i}	Drehwinkel des Sensorkoordinatensystems der Kamera an der Stelle i zum Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners eines *kombinierten Messsystems*
t_0^g, t_1^g	Parameter der linearen Approximation der BRDF für die Helligkeitswerte
t_0^i, t_1^i	Parameter der linearen Approximation der BRDF für die Intensitätswerte

Sonstige:

ρ_{fc}	Kreuzkorrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß kandidierender Merkmalspaare
α	Parameter zur Beurteilung des Betrachtungswinkels
β	Parameter zur Beurteilung der Planarität

Kurzfassung

Die Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten bildgebender Messsysteme stellt eine der grundlegenden Aufgaben in der Photogrammetrie dar. Die Erhöhung der Automation, der Robustheit und der Genauigkeit ist dabei Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Bisher wird für die Orientierungsbestimmung in der Regel ein Bilddatentyp eines Messsystems verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit das Potential der Orientierungsbestimmung unter simultaner Verwendung multisensoraler Bilddaten erhöht werden kann. Die Orientierungsparameter werden ausschließlich anhand der Bildinformationen und ohne synthetische Markierungen bestimmt. Die Bilddaten werden z.B. durch die Kombination verschiedener Messsysteme und der Verwendung aktueller 3D-Laserscannersysteme zur Verfügung gestellt.

Für die Orientierungsbestimmung durch multisensorale Bilddaten wird in dieser Arbeit eine neue zweistufige, objektraumbasierte Methode vorgestellt und am Beispiel der Gebäudefassadenerfassung durch terrestrische bildgebende Messsysteme evaluiert. Die Gebäudefassaden können durch Aufnahmestandpunkte digitaler photogrammetrischer Kameras, 3D-Laserscanner und *kombinierter Messsysteme*, die aus einem 3D-Laserscanner und einer digitalen photogrammetrischen Kamera bestehen, aufgenommen werden. Die Messsysteme erzeugen Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder, die simultan radiometrische und geometrische Informationen zur Orientierungsbestimmung zur Verfügung stellen. Die Entfernungsbilder liefern direkt eine initiale Oberflächenapproximation.

In der ersten Stufe werden die Aufnahmestandpunkte durch ein merkmalsbasiertes Zuordnungsverfahren paarweise zueinander orientiert. In dem Verfahren müssen keine Näherungswerte für die Orientierungsparameter vorliegen. Stattdessen wird aber für die Merkmalsextraktion vorausgesetzt, dass von jedem Aufnahmestandpunkt ein Helligkeits- und Entfernungsbild vorliegt, wie es z.B. bei *kombinierten Messsystemen* der Fall ist. Die Merkmale werden durch die simultane Berücksichtigung von Helligkeits- und Entfernungsbildern detektiert und beschrieben. Durch eine robuste, in Anlehnung an die `RANSAC`-Methode entwickelte und modifizierte Zuordnungsstrategie, werden *konsistente Korrespondenzen* zwischen den Aufnahmestandpunkten bestimmt, mit denen in einem abschließenden Schritt die Parameter der *Äußeren Orientierung* bei bekanntem Maßstab berechnet werden.

In der zweiten Stufe werden die Aufnahmestandpunkte durch einen flächenbasierten Zuordnungsansatz, unter Voraussetzung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter, orientiert. Im Vergleich zu der ersten Stufe können hierbei beliebig viele Aufnahmestandpunkte von einer photogrammetrischen Kamera, einem 3D-Laserscanner und einem *kombinierten Messsystem* simultan einbezogen werden. Zudem wird die Objektoberfläche innerhalb der Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten-Quadrate simultan rekonstruiert, die damit eine optimale Oberflächenfunktion darstellt, um die Genauigkeit dieses flächenbasierten Orientierungsansatzes zu erhöhen.

Durch die experimentellen Untersuchungen wird die Funktionalität der beiden Stufen nachgewiesen und bewertet. Es wird deutlich, dass mit beiden Stufen der Methode Aufnahmestandpunkte mit stark perspektiv verzerrten Bildern orientiert werden können und dass die Genauigkeit der bestimmten Orientierungsparameter der ersten Stufe innerhalb des Konvergenzradius der zweiten Stufe fällt. Durch die Untersuchungen mit der zweiten Stufe wird weiter nachgewiesen, dass sich die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung durch die simultane Oberflächenrekonstruktion im Vergleich zu einer als konstant eingeführten Objektoberfläche erhöhen lässt, und dass sich die innere Genauigkeit der geschätzten Orientierungsparameter durch die zweite Stufe im Vergleich zur ersten Stufe steigern lässt. Auch wird die Möglichkeit der Orientierungsbestimmung zwischen individuellen Helligkeitsbildern und existierenden Entfernungs- und Intensitätsbildern von einem Laserscanner demonstriert und diskutiert.

Insgesamt zeigen die exemplarischen Untersuchungen anhand von zwei realen Datensätzen eines terrestrischen, kombinierten Messsystems vielversprechende Ergebnisse, die auf ein gesteigertes Potential der Orientierungsbestimmung durch die simultane Verwendung multisensoraler Bilddaten schließen lassen.

Schlagworte: *Orientierungsbestimmung, Bildzuordnung, Terrestrisches Laserscanning, Multisensorale Daten*

Abstract

Title: *Object-based simultaneous multi sensor orientation*

The estimation of orientation parameters for viewpoints of imaging sensor devices is a basic task in photogrammetry. As a consequence, a large variety of approaches to enhance the automation, robustness and accuracy of imaging sensor orientation can be found within the research literature. In this work, the potential of enhancing orientation estimation through the simultaneous use of multi sensor imagery is investigated. The orientation parameters will be estimated through the image information solely and without synthetic markers. The image data is provided e.g. by the combination of different measurement devices and the deployment of current 3-D laser scanning systems.

An object-based, two-step approach for orientation estimation of multi image sensor devices typically used for terrestrial surface recording is developed and evaluated. An example case is a building facade recorded with either photogrammetric cameras and a 3-D laser scanner, or a combined system comprising a laser scanner and camera. Such systems deliver brightness, range and intensity images and thus making simultaneously radiometric and geometric information for orientation estimation available. The range images are directly providing an initial object surface approximation.

In the first step of the approach, a newly developed pairwise feature-based orientation procedure is employed to estimate without approximate values the orientation parameters for two viewpoints from an image data set recorded with a combined system. As a precondition at least both a brightness and a range image must exist for each viewpoint. Object features are then detected and described through the simultaneous consideration of brightness and range images. The search for point correspondences between images is carried out using a modified version of the robust `RANSAC`-method and, at a final stage, the parameters of exterior orientation with known scale are then estimated with the detected consistent correspondences.

In the second step, the viewpoints are oriented through an area-based image matching approach which requires approximate values for the orientation parameters. In comparison to the first step, multiple viewpoints can be orientated simultaneously from a photogrammetric camera, 3-D laser scanner and combined systems. Additionally, the object surface will be reconstructed simultaneously within a least-squares adjustment, which forms an optimal surface modelling function to increase the orientation accuracy of this area-based image matching method.

The functionality of both orientation methods is demonstrated and evaluated through experimental testing. It is shown that with both steps of the approach, viewpoints with strong perspective images can be reliably oriented. It is also shown that the accuracy of the estimated orientation parameters from the first step constitute adequate initial approximate values for processing the second step. Further, the potential to increase the precision of the area-based approach through surface reconstruction in comparison to constantly introduced surfaces, as well as the accuracy of the orientation parameters from the first step is confirmed. Also, the possibility for orientation determination between individual brightness images and existing range and intensity images from a laser scanner is both demonstrated and discussed.

In all the experimental testings with the real data sets of a terrestrial, combined system are showing promising results and give rise to an increased potential for the orientation estimation through the simultaneous consideration of multi image data.

Keywords: *orientation estimation, image matching, terrestrial laser scanning, multi sensor data*

Inhaltsverzeichnis

Notationen **3**

Kurzfassung **5**

Abstract **6**

1 Einleitung **9**
1.1 Zielsetzung der Arbeit . . . 11
1.2 Gliederung . . . 12

2 Terrestrische Oberflächenerfassung **13**
2.1 Bildentstehung und Repräsentation . . . 13
2.2 Photogrammetrische Kamera . . . 14
2.3 3D-Laserscanner . . . 15
2.4 Kombiniertes Messsystem . . . 16

3 Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten **19**
3.1 Überblick . . . 19
3.2 Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren . . . 20
3.2.1 Merkmalsdetektion . . . 21
3.2.2 Merkmalsbeschreibung . . . 22
3.2.3 Korrespondenzanalyse . . . 24
3.3 Flächenbasierte Zuordnungsverfahren . . . 26
3.3.1 Objektraumbasierte Mehrbildzuordnung . . . 27
3.3.2 3D-Oberflächenzuordnung . . . 29
3.4 Verfahren zur simultanen Zuordnung multisensoraler Bilddaten . . . 30
3.5 Diskussion . . . 32

4 Eine neue objektraumbasierte Methode zur simultanen multisensoralen Orientierung **35**
4.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung . . . 35
4.1.1 Detektion von Merkmalspunkten . . . 37
4.1.2 Maßstabs- und rotationsinvariante Beschreibung der akzeptierten Merkmalspunkte . . . 39
4.1.3 Paarweise Korrespondenzsuche . . . 40
4.1.4 Orientierungsbestimmung . . . 41
4.1.5 Diskussion . . . 42
4.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung . . . 43
4.2.1 Funktionales Modell . . . 43
4.2.1.1 Repräsentation im Objektraum . . . 43
4.2.1.2 Abbildungen zwischen Objekt- und Bildraum . . . 47
4.2.2 Ausgleichungsansatz . . . 49
4.2.3 Ablauf der Methode . . . 56
4.2.4 Diskussion . . . 56

5 Experimentelle Untersuchungen **61**
5.1 Zielsetzung der Experimente . . . 61
5.2 Verwendete Datensätze . . . 62
5.2.1 Parameter des verwendeten *kombinierten Messsystems* . . . 62

5.2.2 Datensatz *Dresdner Frauenkirche* . . . 63
5.2.3 Datensatz *Verona Theater* . . . 65
5.3 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung . . . 65
5.3.1 Extraktion der Merkmalspunkte . . . 65
5.3.2 Korrespondenzsuche . . . 69
5.3.3 Diskussion . . . 73
5.3.3.1 Merkmalsdetektion . . . 73
5.3.3.2 Merkmalsbeschreibung . . . 73
5.3.3.3 Korrespondenzanalyse . . . 73
5.4 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung . . . 75
5.4.1 Wahl der Oberflächenausschnitte . . . 75
5.4.2 Gewichtsfestlegung . . . 77
5.4.3 Konvergenzkriterium . . . 79
5.4.4 Berechnungen . . . 79
5.4.5 Diskussion . . . 84
5.4.5.1 Genauigkeit der Orientierungsparameter im Vergleich zur Stufe 1 . . . 84
5.4.5.2 Simultane Oberflächenrekonstruktion . . . 87
5.4.5.3 Orientierung einzelner Helligkeitsbilder . . . 88
5.4.5.4 Analyse des Konvergenz- und Genauigkeitsverhaltens . . . 90
5.5 Bewertung . . . 92
5.5.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung . . . 92
5.5.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung . . . 93

6 Schlussbetrachtung und Ausblick **95**

Literaturverzeichnis **99**

A Ergebnisdarstellungen **107**
A.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung . . . 107
A.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung . . . 112
A.2.1 Ausgleichungsfall (1) . . . 115
A.2.2 Ausgleichungsfall (2) . . . 122
A.2.3 Ausgleichungsfall (3) . . . 124
A.2.4 Ausgleichungsfall (4) . . . 126
A.2.5 Ausgleichungsfall (5) . . . 127
A.2.6 Ausgleichungsfall (6) . . . 129

Danksagung **131**

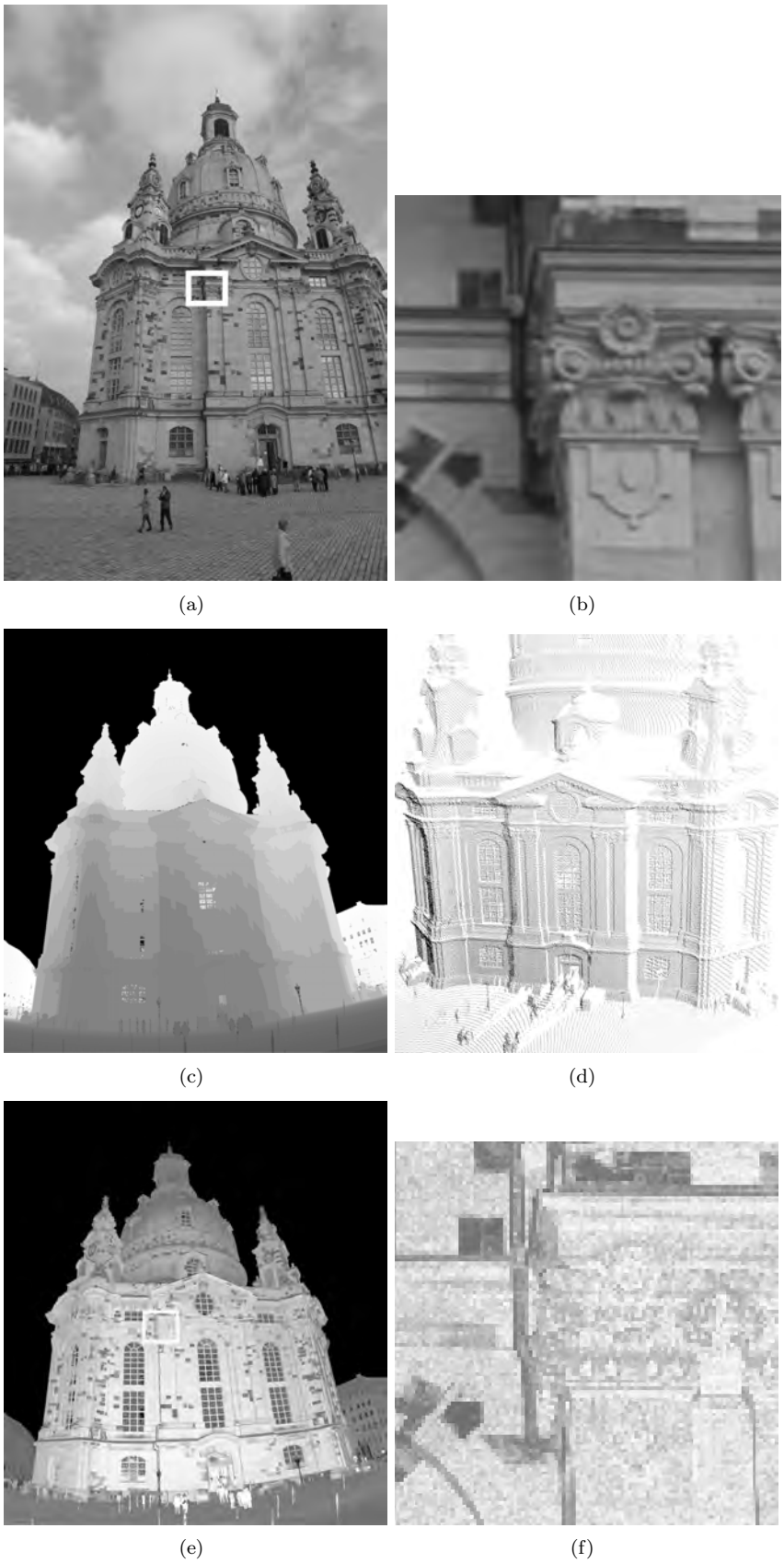
Lebenslauf **132**

1 Einleitung

Eine der grundlegenden Aufgaben der optischen 3D-Messtechnik ist die Erfassung der Form von statischen Objektoberflächen. Die Anwendungen reichen beispielsweise von der Vermessung des Mars (Heipke et al., 2005) bis hin zur Vermessung der Mikrotopographie einer Oberfläche (Hemmleb, 2002). In den letzten Jahren hat sich in der optischen 3D-Messtechnik ein enormer Fortschritt in der Entwicklung von Hard- und Software vollzogen, wodurch heute eine Vielzahl kommerzieller Messsysteme am Markt erhältlich ist, mit denen verschiedenste Forderungen an Messvolumen, Genauigkeit und Geschwindigkeit erfüllt werden können, siehe z.B. Häusler und Ettl (2004), Kersten et al. (2006). Auch werden diese Geräte kombiniert verwendet (Haala, 2005), um bestehende Vorteile einzelner Messsysteme gemeinsam zu nutzen, neue Möglichkeiten in der Erfassung und Auswertung zu schaffen und um die jeweiligen Nachteile zu minimieren.

Im Fokus dieser Arbeit steht die simultane Verarbeitung multisensoraler Bilddaten, die anhand terrestrischer Anwendungen evaluiert wird, bei denen beispielsweise Gebäudefassaden die zu erfassende Objektoberfläche darstellen. Gebäudefassaden werden in der Regel durch digitale photogrammetrische Kameras, 3D-Laserscanner und sogenannte *kombinierte Messsysteme*, die aus einem 3D-Laserscanner und einer digitalen photogrammetrischen Kamera bestehen, aufgenommen. Die photogrammetrische Kamera empfängt Intensitätswerte im sichtbaren Lichtspektrum, die im Weiteren als Helligkeiten, bzw. als Helligkeitsbild bezeichnet werden. Der 3D-Laserscanner dagegen misst polare Koordinaten und erzeugt ein Entfernungsbild, das die Geometrie der Objektszene abbildet. Zudem erzeugt der 3D-Laserscanner ein Intensitätsbild im Spektrum der Wellenlänge des Laserlichts, das auch als Nebenprodukt der Entfernungsmessung betrachtet wird und die Reflexionseigenschaften der Objektszene widerspiegelt. Durch die betrachteten Messsysteme werden also Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder erzeugt, aus denen direkt oder indirekt die Objektoberfläche abgeleitet werden kann. Neben der erfassten Geometrie stellt die Radiometrie zur Visualisierung und zur weiteren Analyse der Objektbereiche eine wichtige Information dar. Bevorzugt wird dafür das Helligkeitsbild und alternativ auch das Intensitätsbild verwendet. Digitalisierte Objektoberflächen werden als Grundlage für vielfältige Anwendungen und raumbezogene Planungen verwendet und dienen beispielsweise in der Denkmalspflege zur Dokumentation erhaltungswürdiger Gebäude (Böhler und Marbs, 2004), (Haala und Alshawabkeh, 2006) und in der Architektur zur Planung und Erstellung virtueller Realitäten (Becker et al., 2004).

In Abbildung 1.1 sind die Aufnahmen eines Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbild einer Kirchenfassade gegenübergestellt. Die Bilder sind aus einer ähnlichen Perspektive aufgenommen und sind zur Visualisierung des Bildinhalts grauwertkodiert. Der Informationsgehalt des Helligkeitsbildes ermöglicht aufgrund der Intensitätswerte im sichtbaren Spektrum rein visuell gute Interpretationsmöglichkeiten. Außerdem weist das Helligkeitsbild eine hohe geometrische Auflösung auf, das durch den Detailreichtum in der vergrößerten Darstellung in Abbildung 1.1 (b) deutlich wird. In der Vergrößerung wird aber auch sichtbar, dass zum einen Objektbereiche aufgrund der Aufnahmeperspektive verdeckt werden und zum anderen abhängig vom Verhältnis der Oberflächentopographie zum Sonnenstand, bzw. der Beleuchtungsquelle, Schatten auftreten. Im Entfernungsbild entsprechen dunkle Grauwerte kleinen Entfernungen und helle Grauwerte großen Entfernungen. Außerhalb des Messbereichs, bzw. abseits von reflektierenden Objektoberflächen, werden keine Entfernungen gemessen. Diese Bereiche werden im Bild durch den Grauwert Null dargestellt. In Abbildung 1.1 (d) sind die Polarkoordinaten als Punktwolke dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Perspektive wird deutlich, dass die Kanten im Entfernungsbild Unstetigkeiten in der erfassten Objektoberfläche der Gebäudefassade entsprechen. Wegen Verdeckungen und komplexer Oberflächentopographie ist es nicht möglich von einem Standpunkt die vollständige Geometrie zu erfassen. Zudem weisen die sprunghaften Grauwertunterschiede im Bereich der Fenster und Kanten in Abbildung 1.1 (c) auf fehlerhafte Entfernungsmessungen hin. Im Intensitätsbild enthalten die Oberflächenbereiche, die wenig Licht reflektieren, eine geringe Intensität und die Bereiche, die viel Licht reflektieren, eine hohe Intensität. Geringe Intensitäten sind durch dunkle Grauwerte und hohe Intensitäten durch helle Grauwerte dargestellt. In diesem Beispiel entsteht die höchste Intensität dort, wo der Normalenvektor der Objektoberfläche in Aufnahmerichtung zeigt. In Abbildung 1.1 (e) lässt sich auf der ebenen Fassade ein Zentrum mit der höchsten Intensität erahnen. Ausgehend von diesem Zentrum nimmt die Intensität bei zunehmenden Betrachtungswinkel radial ab. In Abbildung 1.1 (f) ist ein Ausschnitt des Intensitätsbildes vergrößert dargestellt, um diesen dem Helligkeitsbild 1.1 (b) gegenüber zu stellen und hinsichtlich des Informationsgehaltes zu vergleichen. Das Intensitätsbild weist eine geringere geometrische Auflösung auf und enthält zudem einen höheren Rauschanteil. Weiter sind im Intensitätsbild entlang der Kanten geringe Intensitätswerte festzustellen, die auf unzuverlässige Entfernungsmessungen (sog. *mixed points*) rückschließen lassen. Das Intensitätsbild kann somit auch zur Beurteilung der Entfernungswerte verwendet werden. Durch die Gegenüberstellung wird deutlich, dass die verschiedenen Bilddatentypen unterschiedliche Informationen enthalten, wodurch die simultane Verarbeitung multisensoraler Daten als sinnvoll erscheint und die neu entwickelte Methode motiviert ist.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Abbildung 1.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Bilder: (a) Helligkeitsbild. (b) Vergrößerter Ausschnitt des Helligkeitsbildes. (c) Entfernungsbild. (d) Darstellung des Entfernungsbildes als 3D-Punktwolke. (e) Intensitätsbild. (f) Vergrößerter Ausschnitt des Intensitätsbildes. (b) und (f) stellen den Informationsgehalt des Helligkeits- und Intensitätsbildes in einem gleichen Ausschnitt gegenüber.

Zur vollständigen Erfassung komplexer, gegliederter und großer Oberflächen sind mehrere Aufnahmestandpunkte notwendig. Dies ist zum einen durch die begrenzte und lückenhafte Erfassung von stark gegliederten Objekten und zum anderen durch die photogrammetrische Stereo- und Mehrbildauswertung begründet, bei der die auszuwertenden Oberflächenbereiche in den Bildern von mindestens zwei Aufnahmestandpunkte abgebildet sein müssen. Die Prozessierung von der Erfassung bis zur digitalisierten Objektoberfläche lässt sich durch folgende Schritte zusammenfassen:

1. Oberflächenerfassung von mehreren Aufnahmestandpunkten
2. Orientierung der Aufnahmestandpunkte
3. Rekonstruktion und Interpretation der Objektoberfläche

Zuerst werden Bilder von mehreren Aufnahmestandpunkten erzeugt. Jeder Aufnahmestandpunkt stellt ein lokales Koordinatensystem dar. Durch die Orientierung werden die lokalen Koordinatensysteme der einzelnen Aufnahmestandpunkte in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem überführt. Die Orientierung wird in der Fachdisziplin *Computer Vision* bzw. im Kontext von 3D-Laserscannerdaten auch als Registrierung bezeichnet. Zur Überführung der lokalen Koordinatensysteme sind jeweils drei Translationen, drei Rotationen und gegebenenfalls ein Maßstabsfaktor zu bestimmen, die den *Äußeren Orientierungen* der Aufnahmestandpunkten entsprechen. Erst dann lässt sich die Oberfläche des gesamten Objektes vollständig beschreiben. Transformationen zwischen den einzelnen Bilddaten sind möglich und die Objektoberfläche kann rekonstruiert und hinsichtlich weiterer Fragestellungen interpretiert werden.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur objektraumbasierten Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten unter simultaner Berücksichtigung von Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern. Mit dem Verfahren sollen Aufnahmestandpunkte orientiert werden, die mindestens einen Bilddatentyp enthalten und geometrische Informationen über die Objektoberfläche aufweisen. Die geometrischen Oberflächeninformationen sind entweder implizit für jeden Aufnahmestandpunkt durch ein Entfernungsbild gegeben oder liegen explizit im 3D-Objektraum vor, die durch näherungsweise gegebene Orientierungsparameter der Aufnahmestandpunkte in Bezug zu den Bilddaten stehen.

Aufgrund dieser unterschiedlichen zu berücksichtigenden Gegebenheiten wird eine zweistufige Vorgehensweise vorgeschlagen:

Stufe 1: In der Stufe 1 ist das Ziel durch einen neuen merkmalsbasierten Ansatz die Orientierungsparameter zwischen zwei Aufnahmestandpunkten robust zu bestimmen. In jedem Aufnahmestandpunkt liegt sowohl ein Entfernungsbild als auch ein radiometrisches Bild vor. Als radiometrisches Bild kann sowohl das Helligkeitsbild als auch das Intensitätsbild verwendet werden. Die geometrische Oberflächengeometrie ist damit implizit in jedem Aufnahmestandpunkt gegeben. Durch die simultane Berücksichtigung der geometrischen und radiometrischen Bildinformationen sollen dann automatisch Merkmale extrahiert und hinsichtlich der Aufnahmeperspektive und Maßstabsunterschiede invariant beschrieben werden, die für eine robuste paarweise Zuordnung von Aufnahmestandpunkten geeignet sind. Dabei werden grundsätzlich keine Näherungswerte für die Orientierungsparameter der Aufnahmestandpunkte vorausgesetzt. Liegen dennoch Näherungswerte für die Orientierungsparameter vor, sollen diese für eine Vereinfachung der Prozessierung genutzt werden. Für die Prozessierung in der Stufe 1 wird somit vorausgesetzt, dass:

- die Aufnahmestandpunkte sowohl Helligkeits- oder Intensitäts-, wie auch Entfernungsbilder enthalten und
- die Transformationen zwischen den Bilddaten eines Aufnahmestandpunktes durch Kalibrierung bekannt sind.

Stufe 2: In der Stufe 2 ist das Ziel die *Äußeren Orientierungen* bei bekanntem Maßstab von zwei und mehr Aufnahmestandpunkten und bei simultaner Oberflächenrekonstruktion zu bestimmen. Neben Näherungswerten über die Oberflächengeometrie sind Näherungswerte für die Orientierungsparameter notwendig. Die neue Vorgehensweise in dieser zweiten Stufe soll an die Verfahren der objektraumbasierten Mehrbildzuordnung nach Ebner et al. (1987), Wrobel (1987a,b) und Helava (1988) anlehnen und diese neben den Helligkeitsbildern um Abbildungsgleichungen für die Entfernungs- und Intensitätsbilder funktional erweitern. Dabei sollen alle Bildstrahlen gemeinsam in einer Kleinsten-Quadrate Ausgleichung zur Orientierungsbestimmung Verwendung finden. Die Objektoberfläche dient als Bindeglied zur Fusion der einzelnen Bilddaten. Dadurch, dass die Oberfläche durch die multisensoralen Bilddaten

redundant erfasst ist, soll diese ebenfalls aus den Bildinformationen simultan bestimmt werden. Unter der Annahme, dass die durch eine Ausgleichung geschätzte Objektoberfläche die bestmögliche Bezugsfläche für eine flächenhafte Orientierungsbestimmung darstellt, ist die weitere Zielsetzung der Stufe 2 die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung zu erhöhen. Für die Prozessierung in der Stufe 2 wird vorausgesetzt, dass:

- Näherungswerte für die Orientierungsparameter der einzelnen Aufnahmestandpunkte im Objektraumkoordinatensystem vorliegen.

Die skizzierte zweistufige Orientierungsmethode impliziert ein sequentielles Vorgehen, was aber nicht Voraussetzung ist. Beide Stufen können als getrennte Verfahren zur Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten betrachtet werden. Das Ziel ist es, mit dieser neuen Methode die Automation, Robustheit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit durch die simultane Verwendung der multisensoralen Bildsignale gegenüber existierenden Methoden zu steigern.

1.2 Gliederung

In dem folgenden Kapitel 2 wird die Bildentstehung der Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder erläutert. Als Messsysteme werden photogrammetrische Kameras und 3D-Laserscanner sowie die Kombination der beiden Systeme berücksichtigt. Die Abbildungsfunktionen stellen die Grundlage für das funktionale Modell in Kapitel 4 dar und auch die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Datensätze beruhen auf die in diesem Kapitel 2 genannten Systeme.

Die Grundlagen der digitalen Bildzuordnung, auf die im Rahmen der entwickelten Methode Bezug genommen wird, werden in Kapitel 3 vorgestellt. Nach einer allgemeinen Einführung werden zum einen Verfahren zur Merkmalsdetektion, Beschreibung und Zuordnung und zum anderen die Verfahren zur flächen- und objektraumbasierten Bildzuordnung sowie die Grundlagen zur Oberflächenmodellierung im Objektraum erläutert. Dabei wird der derzeitige Stand der Entwicklung sowie aktuelle Forschungsarbeiten zur merkmals- und flächenbasierten digitalen Bildzuordnung dargestellt. Die Methoden werden nach den verwendeten Bilddatentypen unterteilt. Auch werden Ansätze diskutiert, die multisensorale Bilddaten simultan verwenden. Die in diesem Kapitel hervorgehobenen Verfahren werden hinsichtlich der Zielsetzungen der eigenen Methode beurteilt und fließen in die Entwicklung der neuen zweistufigen Methode ein.

In Kapitel 4 wird die Methode zur objektraumbasierten Orientierung multisensoraler Bilddaten erläutert. Es werden die einzelnen Prozessierungsschritte der ersten Stufe und das vollständige funktionale Modell der zweiten Stufe detailliert dargestellt. Weiter wird der Ausgleichungsansatz der zweiten Stufe hinsichtlich der getroffenen Annahmen zu den Unbekannten, der Gewichtsfestlegungen der unterschiedlichen Beobachtungsgruppen, der Struktur der Normalgleichungsmatrix und der Schätzung der unbekannten Parameter diskutiert.

In Kapitel 5 wird der experimentelle Nachweis der Funktionsfähigkeit der entwickelten Methode anhand von zwei realen Datensätzen erbracht. Insbesondere werden die Robustheit und Zuverlässigkeit der ersten Stufe und das Orientierungsverhalten sowie die Steigerung der Genauigkeit durch die simultane Oberflächenrekonstruktion der zweiten Stufe demonstriert und bewertet.

Eine abschließende Bewertung und Einordnung der entwickelten Methode erfolgt in Kapitel 6. Im Ausblick wird auf weiterführende Fragestellungen hingewiesen, die sich aus dieser Arbeit ergeben haben.

2 Terrestrische Oberflächenerfassung

Ein optisches, bildgebendes Messsystem erfasst berührungslos Objektoberflächen. Es besteht aus mindestens einem Sensor, welcher die an der Objektoberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung flächenhaft aufnimmt.

2.1 Bildentstehung und Repräsentation

Für die Beschreibung des physikalischen Entstehungsprozesses des Bildsignals im Sensor ist der Lichtstrahl von der Strahlungsquelle zur Objektoberfläche bis zum Sensor zu verfolgen. Nach z.B. Weisensee (1988) sind folgende Komponenten zu berücksichtigen:

- die Strahlungsquelle(n)
- das Reflexionsmodell der Objektoberfläche
- die Eigenschaften der von der Strahlung durchlaufenen Medien
- die Eigenschaften der Sensoren
- die Bildsignalverarbeitung im jeweiligen Sensor

Abhängig von der Anzahl, Art und Stärke der Strahlungsquellen trifft elektromagnetische Strahlung auf die Objektoberfläche auf, die in Abhängigkeit von dessen Eigenschaften reflektiert wird. Die Eigenschaften werden durch eine BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*) dargestellt, die das Reflexionsverhalten von Oberflächen eines Materials unter beliebigen Einfallswinkeln darstellt (Nicodemus et al. (1977), Schaepman-Strub et al. (2006)). Die BRDF ist je nach gewählter Genauigkeit sehr komplex und wird oftmals für die digitale Bildzuordnung durch eine analytische Funktion approximiert (lokales Beleuchtungsmodell). Der in Richtung des Sensors reflektierte Anteil wird in seiner Intensität weiter durch Absorption, Brechung und Beugung beeinflusst, was z.B. durch die Atmosphäre (Feuchtigkeit, Staub, ...), den Transmissionsgrad der Optik und die Digitalisierung im Sensor begründet ist. Weiterführende Beschreibungen sind z.B. Schenk (1999) zu entnehmen.

Abhängig vom Spektrum der elektromagnetischen Wellenlängen werden auch verschiedenartige Informationen des Objektraumes abgebildet. Das primäre Ziel ist es geometrische Informationen der Oberfläche des Objektes zu erfassen. Zudem geben die im sichtbaren Spektrum ebenfalls gewonnen RGB-Farbinformationen die für das menschliche Auge am besten interpretierbare Radiometrie wieder, die daher oftmals zur weiteren Analyse der erfassten Oberfläche verwendet wird. Die im Spektrum des infraroten und ultravioletten Lichtes erfassten Bildinformationen werden daher i.d.R. nur zur Bestimmung der geometrischen Form verwendet. Passive Sensoren setzen dabei voraus, dass genügend Strahlung vorhanden ist, die vom Objekt ausgestrahlt bzw. reflektiert wird. Aktive Sensoren dagegen senden von einer eigenen Strahlungsquelle elektromagnetische Strahlung aus.

Das im Sensor empfangene und quantisierte Bildsignal wird diskret durch ein Raster dargestellt. Jede Rasterzelle enthält einen Funktionswert des quantisierten Bildsignals. Das Bildraster entspricht einer Matrix und lautet für einen Sensor:

$$s(r,c) = \begin{vmatrix} s(0,0) & s(0,1) & \cdots & s(0,C-1) \\ s(1,0) & s(1,1) & \cdots & s(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(R-1,0) & s(R-1,1) & \cdots & s(R-1,C-1) \end{vmatrix} \tag{2.1}$$

mit $r = 0, 1, \cdots, R-1; r \in \mathbb{N}_0$ Elementen einer Bildzeile, $c = 0, 1, \cdots, C-1; c \in \mathbb{N}_0$ Elementen einer Bildspalte, R der maximalen Anzahl an Zeilen, C der maximalen Anzahl an Spalten und $s(r,c)$ den Funktionswerten der Stützstellen. $[r,c]$ stellt somit ein ganzzahliges Koordinatensystem der Bildelemente dar. Dieses entspricht dem Pixelkoordinatensystem, dessen Ursprung in der linken, oberen Ecke definiert ist. Das Pixelkoordinatensystem ist ein zweidimensionales, kartesisches Koordinatensystem, dessen Achsen orthogonal in Zeilen- und Spaltenrichtung der Bildmatrix verlaufen. Die Fläche einer Rasterzelle wird durch eine Interpolationsfunktion beschrieben. Durch die Bilinearinterpolation lässt sich der Funktionswert eines beliebigen Punktes (x_r, y_c); $x_r \in [0, R-1]; y_c \in [0, C-1]$ innerhalb der Zelle hinreichend genau angegeben, mit:

$$s(x_r, y_c) = (1-dx)(1-dy)s_{r,c} + (1-dx)(dy)s_{r,c+1} + (dx)(1-dy)s_{r+1,c} + (dx)(dy)s_{r+1,c+1} \tag{2.2}$$

und $dx = x_r - r, dx \in [0,1], dy = y_c - c, dy \in [0,1]$, den Koordinaten innerhalb einer Facette. Eine ausführliche Diskussion der Bilinearinterpolation und weiteren Interpolationsfunktionen hinsichtlich ihrer Approximation zur sinc-Funktion ist z.B. in Stenger (1984), Wiesel (1985) gegeben.

2.2 Photogrammetrische Kamera

Die photogrammetrische Kamera stellt ein passives Messsystem ohne eigene Strahlungsquelle dar und generiert Helligkeitsbilder. Die empfangenen und gespeicherten „Helligkeiten" resultieren aus der Bestrahlungsstärke der von der Objektoberfläche ausgehenden elektromagnetischen Strahlung. Im Rahmen der entwickelten Methode werden zentralperspektive Kameras mit flächenhaftem Sensor berücksichtigt. Sie erzeugen eine Momentaufnahme der Objektoberfläche. Die Abbildungseigenschaften einer zentralperspektiven Kamera werden neben dem Sensor im Wesentlichen durch das Objektiv definiert. Das Sichtfeld wird durch die Sensorgröße und durch die Kamerakonstante c^C des Objektivs begrenzt, s. Abbildung 2.1. Die Abbildungs-

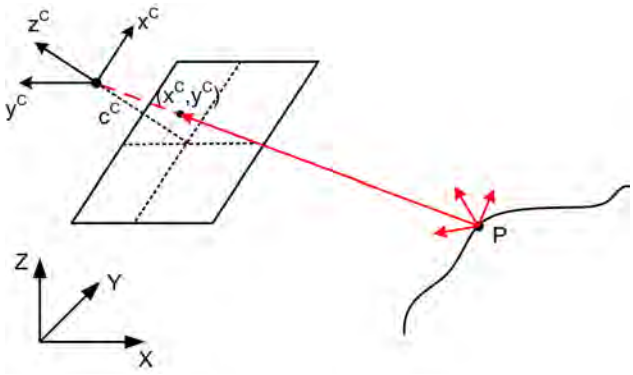


Abbildung 2.1: Prinzip der Bildentstehung einer zentralperspektiven Kamera

funktion wird durch die Kollinearitätsgleichungen formuliert. Sie lauten für einen auf den Bildhauptpunkt bezogenen Punkt (x^C, y^C):

$$x^C = -c^C \frac{r^C_{11}\Delta X + r^C_{21}\Delta Y + r^C_{31}\Delta Z}{r^C_{13}\Delta X + r^C_{23}\Delta Y + r^C_{33}\Delta Z} \tag{2.3}$$

und

$$y^C = -c^C \frac{r^C_{12}\Delta X + r^C_{22}\Delta Y + r^C_{32}\Delta Z}{r^C_{13}\Delta X + r^C_{23}\Delta Y + r^C_{33}\Delta Z} \tag{2.4}$$

und

$$\begin{aligned} \Delta X &= X - t^C_X \\ \Delta Y &= Y - t^C_Y \\ \Delta Z &= Z - t^C_Z \end{aligned} \tag{2.5}$$

mit $r^C_{11}, r^C_{12}, \ldots, r^C_{33}$ den Elementen der Rotationsmatrix und t^C_X, t^C_Y, t^C_Z den Elementen des Translationsvektors zur Berücksichtigung der *Äußeren Orientierung* der Kamera in Bezug zum $[X, Y, Z]$ Koordinatensystem. Unter Vernachlässigung von Verzeichnungskorrekturen wird ein Oberflächenpunkt $P(X, Y, Z)$ im Bildpunkt $(x^C, y^C, -c^C)$ im Bildkoordinatensystem $[x^C, y^C, z^C]$ des Helligkeitsbildes abgebildet. Das Bildkoordinatensystem ist ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem, dessen Ursprung im Projektionszentrum als Rechtssystem definiert ist. Die x^C-Achse ist in Zeilenrichtung r und die y^C-Achse in entgegengesetzter Spaltenrichtung c definiert.

Es wird angenommen, dass eine Kamera mit einem digitalen Sensor verwendet wird und somit ein digitales Helligkeitsbild vorliegt. Der Übergang der Bildkoordinaten (x^C, y^C) in das Pixelkoordinatensystem $[x_r, y_c]$ lautet:

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{R}{2} + \frac{x^C}{m_{x^C}} \\ y_c &= \frac{C}{2} - \frac{y^C}{m_{y^C}} \end{aligned} \tag{2.6}$$

mit m_{x^C} und m_{y^C} den metrischen Größen der Sensorelemente in Zeilen- und Spaltenrichtung des Pixelkoordinatensystems. Wird eine analoge photogrammetrische Kamera verwendet, so ist das analoge Helligkeitsbild für die weitere Auswertung zu digitalisieren und die dabei auftretenden Effekte zusätzlich in Gleichung (2.6) zu berücksichtigen (Schenk, 1999).

Das Bildsignal wird in der Kamera im Ortsbereich durch die Sensorelemente diskretisiert. In jedem Sensorelement wird die Signalamplitude quantisiert. Die resultierenden Funktionswerte entsprechen den Helligkeitswerten der Bildmatrix und lauten $g(r,c) \in [0, 2^b - 1]$; $b \in \mathbb{N}_0$. 2^b entspricht dabei der Farbtiefe bzw. $[0, 2^b - 1]$ dem Wertebereich mit dem die Amplitude linear quantisiert[1] wird. Sie werden auch als Grauwerte des Helligkeitsbildes bezeichnet. Bei RGB-Farbsensoren wird das Bildsignal $g_{\mathbf{RGB}}(r,c)$ getrennt in den Kanälen **R**ot, **G**rün, **B**lau $\{g_{\mathbf{R}}(r,c), g_{\mathbf{G}}(r,c), g_{\mathbf{B}}(r,c)\}$ registriert. Das Farbbild enthält die dreifache Datenmenge gegenüber einem S/W-Bild. Da aber ein S/W-Bild für die Orientierungsbestimmung und Oberflächenrekonstruktion ausreicht (Schenk, 1999), werden die Kanäle für die weitere Verarbeitung zu einem Kanal zusammengefasst. Nach McGlone (2004, S. 409) lautet eine mögliche Transformation der RGB-Farbwerte zu den S/W-Grauwerten:

$$g(r,c) = g_{\mathbf{R}}(r,c) \cdot 0.299 + g_{\mathbf{G}}(r,c) \cdot 0.587 + g_{\mathbf{B}}(r,c) \cdot 0.114 \tag{2.7}$$

Einen weiterführenden Überblick über Farbraumtransformationen und die standardisierten Farbmodelle *CIELAB* und *CIELUV* sind z.B. Gonzales und Woods (1992), Ohno (2000) zu entnehmen.

2.3 3D-Laserscanner

Ein 3D-Laserscanner ist als aktives Messsystem unabhängig von einer externen Beleuchtungsquelle und erzeugt Entfernungsbilder. Geräte aktueller Bauart stellen zudem Intensitätsbilder zur Verfügung. Laser sind Strahlungsquellen, in der Messtechnik u.a. im Spektrum des infraroten, sichtbaren und ultravioletten Lichtes, dessen Gemeinsamkeit im Entstehungsprozess der Strahlung liegt. Das Akronym Laser steht für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Die Strahlung wird durch eine Optik gerichtet und kohärent ausgestrahlt. Dadurch unterscheidet sich der Laser von klassischen Lichtquellen. Laser eignen sich u.a. für die reflektorlose Entfernungsmessung. Einen umfangreichen Überblick zur Messtechnik terrestrischer 3D-Laserscanner geben z.B. Kern (2003) und Rietdorf (2005).

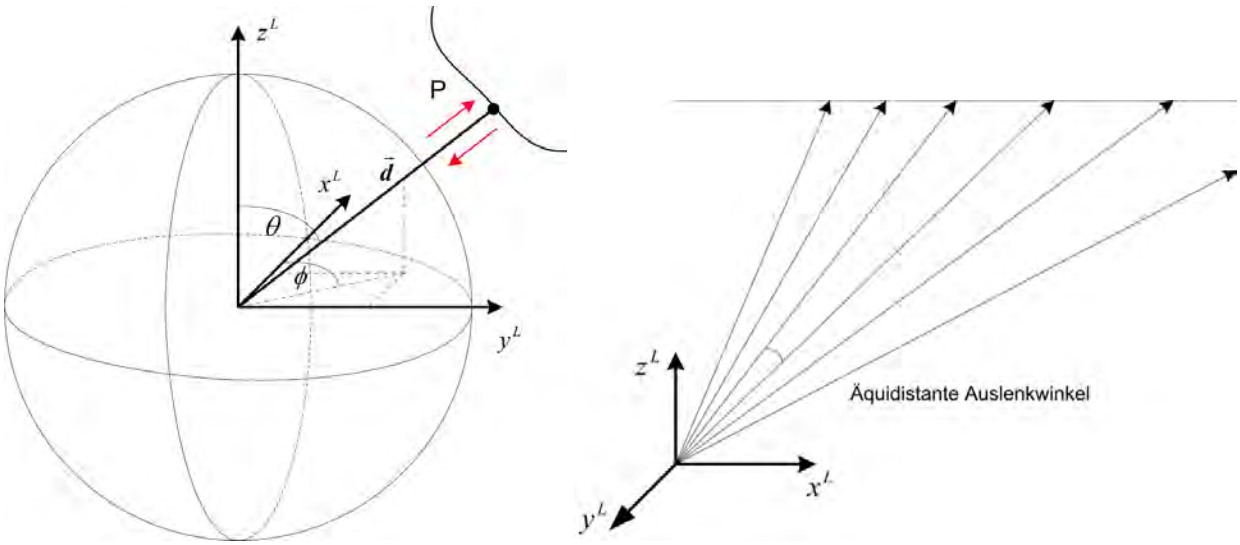
Die Datenerfassung mit einem 3D-Laserscanner gliedert sich in zwei wesentliche Aufgaben: Die optoelektronische Entfernungsmessung und die Ablenk- bzw. Abtastvorrichtung. Zur Entfernungsmessung wird das Laserlicht dabei als Trägerwelle benutzt und diesem ein Signal aufmoduliert (Kern, 2003). Die Verfahren zur Entfernungsmessung unterscheiden sich durch unterschiedliche Modulationsverfahren bei dem der Trägerwelle entweder ein gepulstes (Impulslaufzeitverfahren) oder kontinuierliches Signal (Phasendifferenzverfahren) aufmoduliert wird. Eine weitere Alternative stellt das Triangulationsverfahren dar, welches anstatt durch die Laufzeit- bzw. Phasendifferenzmessung, durch Parallaxenmessung und Vorwärtseinschneiden die Entfernung ableitet. Einen weiterführenden Überblick über die Entfernungsmesstechnik geben z.B. Kahlmann und Ingensand (2007). Die zweite Komponente des 3D-Laserscanners stellt die Abtastvorrichtung dar, die zur systematischen, flächenhaften Entfernungsmessung benötigt wird und mit dem Begriff *Scanner* assoziiert ist (Staiger, 2005). Das Entfernungs- und Intensitätsbild entsteht, indem an vorgegebenen Winkelpositionen die Entfernungsmessung durchgeführt und die Intensität des reflektierten Laserlichtes gemessen werden. Ein Entfernungsbild enthält demnach Funktionswerte im Wertebereich der minimal und maximal gemessenen Distanz, die unter Berücksichtigung der Winkelposition polare Koordinaten darstellen. Das Intensitätsbild enthält Funktionswerte, die z.B. im Wertebereich $[0, 1]$ skaliert vorliegen, und das Verhältnis der ausgesendeten zur empfangenen Bestrahlungsstärke angeben. Wird keine oder nur eine vernachlässigbar geringe Bestrahlungsstärke empfangen, liegen keine Messdaten vor und an dieser Winkel- bzw. Bildposition ist kein Funktionswert definiert.

Polare Abtastung

Die sequentielle Abtastung setzt voraus, dass das Objekt, die Umgebung und der Aufnahmestandpunkt während der Aufnahmezeit statisch sind. Das Prinzip der polaren Abtastung ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Aufgrund der polaren Abtastung bei gleichen Winkelinkrementen ergeben sich an ebenen Objektoberflächen, wie Gebäudefassaden, inhomogene Punktverteilungen (Abbildung 2.2 (b)). Die Punktabstände auf der Oberfläche sind nur dann identisch, wenn neben den konstanten Winkelinkrementen auch die gemessenen Entfernungen gleich groß sind. Dies trifft nur zu, wenn sich der 3D-Laserscanner im Zentrum einer Kugel befindet, oder näherungsweise die zu erfassende Oberflächenbereiche einen gleichen Aufnahmeabstand aufweisen.

Für die Beschreibung der Bildentstehung durch die polare Abtastung wird das Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners $[x^L, y^L, z^L]$ als Linkssystem eingeführt. Der Ursprung des Koordinatensystems ist im Zentrum des 3D-Laserscanners definiert. Die Entfernungswerte des Laserscanners werden als Distanzen d in

[1] Es existieren auch Sensoren die z.B. logarithmisch quantisieren.



(a) (b)

Abbildung 2.2: Polare Abtastung eines 3D-Laserscanners. (a) Definition des polaren Koordinatensystems. (b) Inhomogene Punktverteilungen an ebenen Objektoberflächen bei äquidistanten Auslenkwinkeln (nach Rietdorf (2005)).

die Richtung (ϕ, θ) relativ zum $[x^L, y^L, z^L]$ System ausgedrückt. ϕ ist der Winkel zwischen der x^L-Achse und dem Richtungsvektor $\vec{d}$, projiziert in die x^L, y^L Ebene und θ der Winkel zwischen $\vec{d}$ und der z^L-Achse. Analog dazu werden die Intensitätswerte i ebenfalls in Richtung (ϕ, θ) relativ zum $[x^L, y^L, z^L]$ System dargestellt. Die Winkel lassen sich durch die Sensorkoordinaten wie folgt beschreiben:

$$\phi = \arctan(\frac{y^L}{x^L}) \tag{2.8}$$

und

$$\theta = \arctan(\frac{\sqrt{(x^L)^2 + (y^L)^2}}{z^L}) \tag{2.9}$$

Die Abtastung erfolgt mit konstanten Winkelinkrementen m_ϕ und m_θ, die dem Maßstab in Zeilen- und Spaltenrichtung des Bildkoordinatensystems $[\phi, \theta]$ entsprechen. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems ist in der linken, oberen Ecke definiert. Die Bildpunkte der erzeugten Bilder repräsentieren Kugelkoordinaten. Die Transformation vom Bildkoordinatensystem des 3D-Laserscanners zum Pixelkoordinatensystem $[x_r, y_c]$ lautet:

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{\phi}{m_\phi} \\ y_c &= \frac{\theta}{m_\theta} \end{aligned} \tag{2.10}$$

2.4 Kombiniertes Messsystem

Nach Kersten et al. (2006) gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten eine Kamera und einen 3D-Laserscanner zu kombinieren:

- Integration: Die Integration einer Kamera in das Gehäuse eines Scanners bietet den Vorteil, dass beide Sensoren geschützt sind und dass die Kalibrierung der einzelnen Sensoren sowie deren Bezug zueinander über einen längeren Zeitraum unverändert bleibt. Die Kalibrierung führt in der Regel der Hersteller durch, sie wird aus Sicht des Anwenders als konstant angenommen. Bei der Integration besteht keine Möglichkeit die Kamera zu modifizieren, so dass beispielsweise das Objektiv der Kamera nicht für unterschiedliche Anwendungen angepasst werden kann. Auch ist nicht gewährleistet, dass ein solches System den Zugriff auf die vollständigen Bilddaten der Kamera zulässt. Integrierte Kameras kommen meist bei 3D-Laserscannern mit einem eingeschränkten Sichtfeld zum Einsatz. Mit ihnen lässt sich vergleichsweise schnell ein Übersichtsbild erzeugen, um dann den zu scannenden Bereich zu selektieren. Neben der Selektion von Objektbereichen wird das Kamerabild zur Einfärbung der 3D-Punktwolke genutzt.

- Adaption: Eine Kamera, die an einem 3D-Laserscanner adaptiert wird, kann individuell ausgewählt und den Anforderungen entsprechend modifiziert werden. Nachteilig ist, dass bei Manipulation der Kamera die Beziehung des Sensorkoordinatensystems der Kamera zum Sensorkoordinatensystem des Scanners neu kalibriert werden muss. Auch das Adaptieren der Kamera an den 3D-Laserscanner kann als Manipulation betrachtet werden. Eine Neukalibrierung erfolgt in Abhängigkeit von den geforderten Messgenauigkeiten und der Repositionierungsgenauigkeit der Kameraadaption. Adaptierte Kameras gewähren einen direkten Zugriff auf die Helligkeitsbilder.

Im Kontext dieser Arbeit entspricht ein *kombiniertes Messsystem* einem 3D-Laserscanner mit einer adaptierten photogrammetrischen Kamera. Bei einem *kombinierten Messsystem* wird angenommen, dass die *Äußere Orientierung* des Sensorkoordinatensystems $[x^C, y^C, z^C]$ der Kamera in dem Sensorkoordinatensystem $[x^L, y^L, z^L]$ des 3D-Laserscanners durch Kalibrierung bekannt ist, s. Abbildung 2.3. Somit sind beide Sensor-

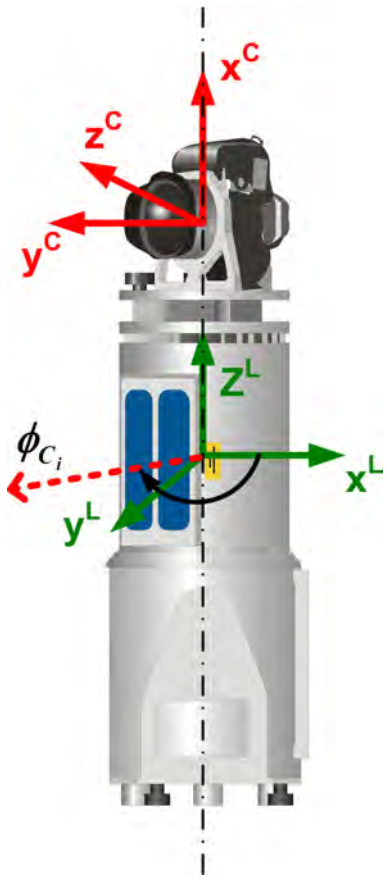


Abbildung 2.3: Koordinatensysteme eines kombinierten Messsystems (nach RIEGL (2007))

koordinatensysteme miteinander verknüpft. Ein Aufnahmestandpunkt des *kombinierten Messsystems* wird damit durch das Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners repräsentiert. Dadurch, dass die Kamera, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, ein begrenztes Sichtfeld aufweist, werden in einem Aufnahmestandpunkt des *kombinierten Messsystems* m Aufnahmen mit der Kamera an den Stellen ϕ_{C_i} mit $i = 1, \ldots, m$ durchgeführt. Durch die Summe der Helligkeitsbilder kann ebenfalls der vollständige Objektbereich erfasst werden, der durch das Sichtfeld des 3D-Laserscanners aufgenommen wird. Die Winkel ϕ_{C_i} stellen die m Positionen dar, die durch die x^L-Achse des Sensorkoordinatensystems und den in die x^L, y^L Ebene projizierten Hauptstrahl der photogrammetrischen Kamera definiert sind. Die Kamera ist in Abbildung 2.3 aufgrund eines ungleichen Seitenverhältnisses der Sensorfläche um 90 Grad gedreht adaptiert worden, um in Richtung des Winkels ϕ des 3D-Laserscanners einen großen Aufnahmewinkel der Kamera zu realisieren.

Die Beziehung des Sensorkoordinatensystems der Kamera an der Stelle ϕ_{C_i} zum Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners lautet:

$$\begin{pmatrix} x^L \\ y^L \\ z^L \end{pmatrix} = \mathbf{T}_C^L + \mathbf{R}_C^L \mathbf{R}_{\phi_{C_i}} \begin{pmatrix} x^C \\ y^C \\ z^C \end{pmatrix} \tag{2.11}$$

mit $\mathbf{T}_C^L$ dem Translationsvektor, $\mathbf{R}_C^L$ der Rotationsmatrix und $\mathbf{R}_{\phi_C}$ der individuellen Drehung der photogrammetrischen Kamera. $\mathbf{T}_C^L$ und $\mathbf{R}_C^L$ sind durch Kalibrierung gegeben, s. z.B. Wendt und Dold (2005), und der Rotationsanteil der Kameradrehung ist definiert mit:

$$\mathbf{R}_{\phi_C} = \begin{pmatrix} cos\phi_C & -sin\phi_C & 0 \\ sin\phi_C & cos\phi_C & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2.12}$$

3 Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten

Mit der Orientierungsbestimmung werden die Transformationsparameter zwischen den lokalen Koordinatensystemen der Aufnahmestandpunkte zu einem übergeordneten System ermittelt. Die Transformationsparameter umfassen drei Translationen $\mathbf{T}(t_X, t_Y, t_Z)$, drei Rotationen, die durch Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa)$ repräsentiert werden können, und gegebenenfalls einen Maßstabsfaktor m. Die Translationen geben die Position des lokalen Koordinatensystems zum Ursprung des übergeordneten Koordinatensystems, die Rotationen die elementaren Drehungen um die Koordinatenachsen des übergeordneten Systems im Ursprung des lokalen Koordinatensystems und der Maßstabsfaktor die Skalierung zwischen den Koordinatensystemen an, s. Abbildung 3.1. Liegt kein übergeordnetes Koordinatensystem vor, können die Orientierungsparameter auch

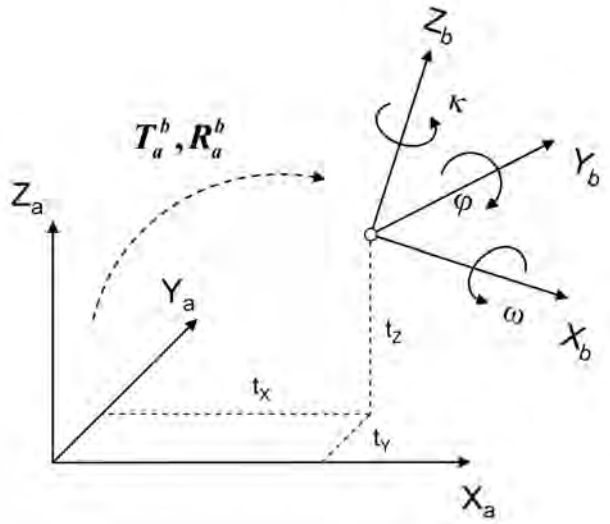


Abbildung 3.1: Orientierungsparameter (ohne Maßstab) zwischen zwei dreidimensionalen Koordinatensystemen

relativ zu einem Aufnahmestandpunkt bestimmt werden. Im Ursprung des lokalen Koordinatensystems des Aufnahmestandpunktes, auf den sich die *Äußeren Orientierungen* beziehen, wird das Datum der Orientierungsparameter definiert. Für die Orientierungsbestimmung existieren eine Vielzahl von Methoden, wie z.B. die direkte Sensororientierung, bei der die Orientierungsparameter durch Messungen inertialer Sensoren bestimmt werden (Schwarz et al. (1993), Grejner-Brzezinska (2001)). Für die direkte Sensororientierung von terrestrischen Messsystemen vergleiche hierzu Toth (1998), Talaya et al. (2004) und Schumacher und Böhm (2005).

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Verfahren berücksichtigt, die auf automatischer digitaler Bildzuordnung und 3D-Oberflächenzuordnung beruhen. Durch die Zuordnung wird im allgemeinen der geometrische Bezug zwischen zwei oder mehr Datensätzen der gleichen Objektszene von verschiedenen Zeitpunkten, Standpunkten oder Aufnahmesensoren hergestellt. Aus den korrespondierenden Merkmalen, die aus einem automatischen Zuordnungsverfahren resultieren, werden die Orientierungsparameter bestimmt. Für die Orientierung von Aufnahmestandpunkten durch digitale Bildzuordnung wird in dem folgenden Kapitel ein Überblick über die in diesem Kontext relevanten Verfahren gegeben und die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Lösung diskutiert. Weiter werden exemplarisch einige Verfahren vorgestellt, auf die für die Entwicklung und Einordnung des eigenen objektraumbasierten Ansatzes zur simultanen Verarbeitung multisensoraler Daten Bezug genommen wird. Einige Verfahren interpretieren die Polarkoordinaten der Entfernungsbilder als 3D-Punktwolke und orientieren diese direkt im Objektraum. Zur Verdeutlichung werden hierfür ebenfalls einige exemplarische Verfahren genannt.

3.1 Überblick

Die Grundlagen der digitalen Bildzuordnung wurden in der Photogrammetrie bereits in den sechziger Jahren entwickelt (Sharp et al., 1965). Mit dem Aufkommen von CCD-Sensoren Anfang der siebziger Jahre, vgl. Schlemmer (1996), sind Sensoren verfügbar, mit denen die digitale Bildzuordnung verstärkt Einzug in verschiedenste Disziplinen fand und heute operationell eingesetzt wird.

Die digitale Bildzuordnung ist der Prozess, Korrespondenzen in den Bildern einer Objektszene zu bestimmen. Die Grundlagen basieren auf der Theorie des menschlichen Sehens (Marr und Poggio (1979), Grimson (1981)), d.h. Stereo zu sehen, Tiefe zu bestimmen, Objekte zu erkennen und sich im Raum zu orientieren. Dhond und Aggarwal (1989), Barnard und Fischler (1982), Brown (1992), Heipke (1997) und Zitova und Flusser (2003) geben einen Überblick zu Verfahren zur automatischen Bildzuordnung, die z.B. in der Photogrammetrie (Bündelausgleichung), in der Fernerkundung (Aktualisierung und Integration von Informationen in ein Geographisches Informationssystem), in der Medizin (Kombination von Computertomographiedaten und Röntgendaten zur computergestützten Chirurgie), in der Kartographie (Kartenerstellung und Aktualisierung) und im Bereich *Computer Vision* (Autonome Navigation, Robotik) Anwendung finden. Einen weitreichenden Überblick zu Verfahren zur Orientierung von Aufnahmestandpunkten durch 3D-Laserscannerdaten geben z.B. Grün und Akca (2006) und Williams et al. (1999).

Nach Schenk (1999) lassen sich die Ansätze in Verfahren durch merkmalsbasierte Zuordnung, flächenbasierte Zuordnung und relationale Zuordnung einteilen. Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren detektieren zuerst Merkmale wie Punkte, Linien und Regionen unabhängig in allen Bildern. Die Korrespondenzen werden dann durch den Vergleich der Merkmalsbeschreibung und ihrem Ort innerhalb der Korrespondenzanalyse bestimmt. Flächenbasierte Zuordnungsverfahren vergleichen die Grauwerte der Bilder oder Bildausschnitte von zwei oder mehr Bildern, um homologe Bildpunkte zu bestimmen. Relationale Zuordnungsverfahren verwenden Strukturen, die sich aus den Beziehungen von Merkmalen und deren Beschreibungen bilden und stellen bezüglich des konzeptionellen Ansatzes die aufwendigste Methode zur digitalen Bildzuordnung dar.

Digitale Bildzuordnung - ein schlecht-gestelltes Problem

Bei der digitalen Bildzuordnung müssen nach McGlone (2004, S. 483) folgende Umstände berücksichtigt werden, die verdeutlichen, warum die Bildzuordnung ein schlecht-gestelltes Problem darstellt und unter Umständen zu keiner Lösung führt. Dass die mit den Bildern aufgenommene geometrische Objektoberfläche Stetigkeit aufweist und eindeutig definiert ist, wird an dieser Stelle vorausgesetzt. Die wichtigsten Punkte lauten:

- Unterschiedliche perspektive Verzerrung: Aufgrund der sich unterscheidenden Aufnahmestandorte erfährt die aufgenommene Objektoberfläche eine unterschiedliche perspektive Verzerrung. Die Verzerrung nimmt mit zunehmenden Winkel zwischen den Betrachtungsrichtungen zu. Wird die Verzerrung nicht adäquat durch geometrische Transformationen berücksichtigt, lassen sich nur erschwert Korrespondenzen bestimmen.

- Verdeckungen: Verdeckungen stellen Informationslücken in den Bildern dar und treten u.a. durch Höhendiskontinuitäten in der Oberflächentopographie auf. Im Allgemeinen können in diesen Bildbereichen keine, bzw. abhängig von der Umgebungsinformation nur unzuverlässig, homologe Punkte bestimmt werden.

- Grauwertdifferenzen: Durch unterschiedliche Aufnahmeperspektiven, eine veränderte Beleuchtungssituation zwischen den Aufnahmen (z.B. aufgrund unterschiedlicher Sonnenstände) und anisotropen Reflexionseigenschaften kommt es in den Bildern zu Unterschieden in den Grauwerten von gleichen Oberflächenpunkten. Werden die genannten Grauwertdifferenzen nicht adäquat durch radiometrische Transformationen berücksichtigt, werden keine oder systematisch falsche homologe Punkte ermittelt. Durch die Transformationen wird u.a. das Beleuchtungs- und Reflexionsmodell approximiert.

- Textur: Liegt keine oder sich wiederholende Textur vor, lassen sich homologe Punkte nicht oder nur mehrdeutig bestimmen. Eine gute Textur zeichnet sich durch einen starken Kontrast und eine eindeutige Struktur aus.

3.2 Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren

Für die merkmalsbasierte Zuordnung sind folgende Prozessierungschritte durchzuführen, s. auch Förstner (1986):

1. Merkmalsdetektion

2. Merkmalsbeschreibung

3. Korrespondenzanalyse

Die Merkmale entsprechen Informationen, die zur Orientierungsbestimmung detektiert und beschrieben werden. Innerhalb der Korrespondenzanalyse werden die konsistenten Merkmalskorrespondenzen bestimmt. Der Berechnungsaufwand in den einzelnen Prozessierungschritten richtet sich nach dem gewählten Verfahren. Je einfacher das Merkmal beschrieben wird, desto mehr Voraussetzungen, wie z.B. Näherungswerte, sind für die Korrespondenzsuche zu erfüllen. Nach Förstner (1991) sollten sich Merkmale eindeutig von Umgebenden unterscheiden, sie sollten invariant in Bezug zu geometrischen und radiometrischen Einflüssen und markant in Bezug zum Rauschen der Daten sein sowie Stabilität und Seltenheit aufweisen.

3.2.1 Merkmalsdetektion

Zur Detektion von lokalen Merkmalen in Bildern werden Interestoperatoren verwendet, wie sie z.B. von Moravec (1977), Dreschler (1981), Förstner (1986) und Harris und Stephens (1988) vorgestellt und z.B. von Luhmann und Altrogge (1986) und Ding et al. (2006) bewertet werden. Dabei werden innerhalb einer Maske der Größe R x C Pixel Attribute berechnet und mit Schwellwerten verglichen. Es wird meistens angenommen, dass R und C ungerade Werte sind, damit ein ganzzahliges Zentrum der Maske vorliegt, in dem durch den Vergleich mit Schwellwerten die Existenz eines Merkmales bewertet werden kann. Dieser Schritt wird für jeden Bildpunkt wiederholt, indem die Maske entlang der Achsen des Pixelkoordinatensystems verschoben wird. Im Folgenden wird exemplarisch ein gradientenbasierter Operator und ein Operator, der direkt auf die Grauwerte des Bildinhaltes zurückgreift, erläutert.

Förstner-Operator

Die Merkmalsextraktion mit dem Förstner-Operator (Förstner, 1986) wird als ein Ausgleichungsproblem formuliert. Unter der Annahme, dass das Grauwertfenster eines Punktes $f(r,c)$ eine um r_0, c_0 verschobene, mit mittelwertfreiem Rauschen $e(r,c)$ versehene Kopie des ursprünglichen Bildsignals $g(r,c)$ ist, gilt:

$$f(r,c) = g(r + r_0, c + c_0) + e(r,c) \tag{3.1}$$

Die Fragestellung lautet nun, wie genau $g(r,c)$ im Sinne einer Kleinsten-Quadrate-Bildzuordnung dem fiktiven Grauwertfenster $f(r,c)$ zugeordnet werden kann. Gesucht ist also die Genauigkeit von r_o und c_o, die sich bei der Zuordnung von $g(r,c)$ und $f(r,c)$ ergeben würde. Dass jedoch $f(r,c)$ nicht bekannt ist und deshalb die eigentliche Zuordnung nicht durchgeführt werden kann, ist dabei unerheblich. Die Genauigkeit ist in der bei der Ausgleichung von r_o und c_o anfallenden Kovarianzmatrix enthalten, die nur von $g(r,c)$ abhängt. Durch Linearisierung der Gleichung (3.1) an der Stelle r_0, c_0 erhält man:

$$v(r,c) = g(r,c) + g_r r_0 + g_c c_0 - f(r,c) \tag{3.2}$$

mit $v(r,c) = -e(r,c)$ den Verbesserungen und den Ableitungen nach den Grauwerten in den Achsrichtungen des Pixelkoordinatensystems $g_r = \partial g/\partial r$ und $g_c = \partial g/\partial c$. Zur Bestimmung der Unbekannten $x^T = [r_0, c_0]$ werden alle Beobachtungen $dg(r,c) = f(r,c) - g(r,c)$ innerhalb der betrachteten Maske berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Beobachtungen gleichgenau und unkorreliert sind. Das Ausgleichungsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate lautet in Matrizenschreibweise:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l} \tag{3.3}$$

mit der Designmatrix $\mathbf{A}[g_r, g_c]$ und dem Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$. Die Normalgleichungsmatrix lautet:

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \mathbf{N} = \begin{pmatrix} \Sigma g_r^2 & \Sigma g_r g_c \\ \Sigma g_r g_c & \Sigma g_c^2 \end{pmatrix} \tag{3.4}$$

woraus sich die Kovarianzmatrix der Unbekannten r_0 und c_0 durch Inversion ergibt:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1} \tag{3.5}$$

Je genauer die fiktive Zuordnung durchgeführt werden kann, desto markanter zeichnet sich ein Merkmalspunkt aus. Die Zuordnungsgenauigkeit entspricht der Größe der Fehlerellipse, die ausgedrückt mit den Elementen der Normalgleichungsmatrix lautet:

$$w = \frac{\det \mathbf{N}}{spur\mathbf{N}} = \frac{\Sigma g_r^2 \Sigma g_c^2 - (\Sigma g_r g_c)^2}{\Sigma g_r^2 + \Sigma g_c^2} \tag{3.6}$$

mit w > 0. Als weiteres Maß wird die Rundheit der Ellipse verwendet, welches mit dem Rundheitsfaktor q ausgedrückt wird:

$$q = 4\frac{\det \mathbf{N}}{spur(\mathbf{N})^2} = 4\frac{\Sigma g_r^2 \Sigma g_c^2 - (\Sigma g_r g_c)^2}{(\Sigma g_r^2 + \Sigma g_c^2)^2} \tag{3.7}$$

mit $0 \leq q \leq 1$. Ein markanter Punkt zeichnet sich durch einen Wert von q nahe 1 aus und einem möglichst großen Wert für w.

Neben der bisher beschriebenen Beurteilung einer optimalen Maskenposition beschreibt Förstner (1986) die sub-pixelgenaue Berechnung des Merkmalspunktes innerhalb der Maske z.B. durch die Bestimmung des gewichteten Gravitationszentrums.

SUSAN-Operator

Der SUSAN-Operator (Smith und Brady, 1997) erlaubt eine pixelgenaue Lokalisierung von Merkmalseckpunkten und Merkmalskantenpunkten. Smith und Brady (1997) empfehlen zudem eine runde Maske zu verwenden, um isotrope Verhältnisse bei der Merkmalsdetektion zu erreichen.

Zur Prüfung der Existenz eines Merkmals werden innerhalb der Maske alle Grauwerte mit dem zentralen Grauwert, dem Nukleus, verglichen und mit Hilfe eines Differenzschwellwertes auf Zugehörigkeit beurteilt. Anhand der Anzahl der zum Nukleus zugeordneten Grauwerte wird entschieden, ob ein Merkmalspunkt vorliegt und um welche Art es sich handelt. Die Gleichung zur Prüfung der Zugehörigkeit lautet:

$$v(r,c) = \begin{cases} 1, & \text{für} \quad |g(r,c) - g_0(r_0,c_0)| \leq t \\ 0, & \text{für} \quad |g(r,c) - g_0(r_0,c_0)| > t \end{cases} \quad mit \quad \begin{array}{l} r = 0,1,\ldots,R-1 \\ c = 0,1,\ldots,C-1 \end{array} \tag{3.8}$$

mit (r_0, c_0) der Position des zentralen Grauwertes g_0, (r, c) der Position der Grauwerte g der Bildelemente innerhalb der Maske, v dem Ergebnis des Vergleichs, t dem Differenzschwellwert, R der Maskenbreite und C der Maskenhöhe. Die Summe der Grauwertvergleiche ist gegeben mit:

$$n_{r_0,c_0} = \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} v(r,c) \tag{3.9}$$

Weiter wird n_{r_0,c_0} mit dem Schwellwert s verglichen:

$$R_{r_0,c_0} = \begin{cases} wahr, & wenn \quad n_{r_0,c_0} < s \\ falsch, & wenn \quad n_{r_0,c_0} \geq s \end{cases} \tag{3.10}$$

und ergibt R, die Antwort der Merkmalsprüfung an der Position (r_0, c_0). Für die Existenz eines gesuchten Merkmalspunktes muss n_{r_0,c_0} kleiner sein als die Hälfte der Anzahl der Bildelemente der Maskenfläche. s entspricht daher der Hälfte der Anzahl der Bildelemente innerhalb der Maske. Der Merkmalstyp wird somit durch den Schwellwert s definiert, während der Schwellwert t im Verhältnis des Bildkontrastes und des Bildrauschens gewählt wird. Mit t wird die Empfindlichkeit der Merkmalsfindung reguliert und über die Dichte der Merkmalspunkte im Bild entschieden.

Weitere Verfahren

In der dargestellten Form werden mit den genannten Operatoren Pixel bewertet und ggf. zu Merkmalspunkten deklariert. Die resultierenden Merkmalspunkte entsprechen den Maskenpositionen und sind durch die berechneten Attribute beschrieben. Dennoch sind diese *low-level* Merkmalspunkte nicht immer für die gewünschte Auswertung ausreichend. Z.B. betonen Luhmann und Altrogge (1986), Schenk (1999), dass die Extraktion von *high-level* Merkmalen (Linien, Kurven, Regionen) und eine wissens- und regelbasierte Vorgehensweise zu erweiterten Einsatzmöglichkeiten und besseren Ergebnissen führt.

Liegen Kenntnisse über die geometrischen Eigenschaften der abgebildeten Objektbereiche vor, lassen sich z.B. in Entfernungsbildern geometrische Primitive extrahieren. Verfahren zur Detektion von Merkmalen innerhalb einer Punktwolke zeigen z.B. Runne et al. (2001), Kern (2003). Sie erläutern wie mit halbautomatischen Verfahren Ebenen, Kugeln und weitere geometrische Primitive extrahiert werden, um sie als Merkmale zur Zuordnung zu verwenden. Vanden Wyngaerd und Van Gool (2002) nutzen die natürliche Krümmung von Oberflächen und extrahieren bitangente Kurven als Merkmale für die Zuordnung. Ihr Ansatz zur Verwendung von Kurven ist eine Erweiterung der Arbeit von Feldmar et al. (1994), der bitangente Punkte einer 3D-Oberfläche beschreibt. Die bitangenten Punktpaare entsprechen dem Merkmal und zeichnen sich dadurch aus, dass sie die gleiche Tangentialebene aufweisen, die auch als Bitangenteebene bezeichnet wird.

3.2.2 Merkmalsbeschreibung

Die Zielsetzung der Merkmalsbeschreibung ist es, eine Eindeutigkeit und Invarianz der detektierten Merkmalspunkte zu erreichen. Merkmale können geometrisch, z.B. durch die Distanz zwischen Merkmalspunkten,

radiometrisch, z.B. durch die Differenz zwischen Grauwerten und Varianzen von Grauwerten angrenzender Regionen, oder topologisch, z.B. durch die Eigenschaft, dass ein Merkmal in einem anderen enthalten ist, beschrieben werden. Auch die Attribute der eingeführten Detektionsverfahren stellen eine Merkmalsbeschreibung dar.

Eine einfache Beschreibung ist z.B. ein Grauwertfenster, welches den Merkmalspunkt umgibt. Liegt das Grauwertfenster geometrisch entzerrt vor und entspricht damit einer orthogonalen Projektion, stellt es eine maßstabsinvariante Beschreibung dar. Sind die Grauwertfenster weiterer Merkmalspunkte identisch ausgerichtet, z.B. entlang der Kernlinie, entspricht das Grauwertfenster zudem einer rotationsinvarianten Beschreibung. Weitere Verfahren zur Merkmalsbeschreibung werden im Folgenden vorgestellt.

SIFT-Verfahren

Lowe (2004) stellt eine Merkmalsbeschreibung vor, die detektierte Merkmalspunkte invariant hinsichtlich des Bildmaßstabes, der Rotation des Bildes, sowie partiell invariant zu Grauwertunterschieden und der Aufnahmeperspektive beschreibt. Lowe bezeichnet seinen Ansatz mit *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT). Die Merkmalsbeschreibungen basieren auf Bildgradienten, die relativ zum Bildmaßstab, der Kameraorientierung und den Merkmalspunktkoordinaten transformiert werden. Zur Erzeugung der Merkmalsbeschreibung wird zuerst die Größe und Orientierung der Bildgradienten innerhalb einer den Merkmalspunkt umgebenden Maske berechnet, die in Abbildung 3.2 (linke Seite) für jedes Bildelement durch die Pfeillänge (Gradientengröße) und Pfeilrichtung (Gradientenorientierung) dargestellt sind. Weiter werden mit der Größe und Orientierung

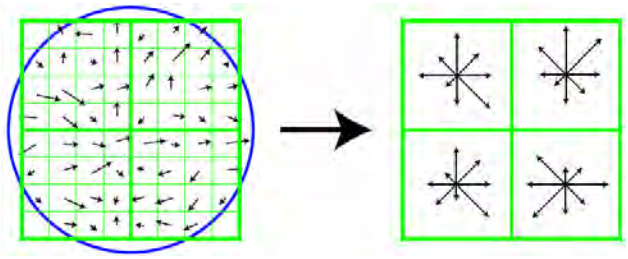


Abbildung 3.2: Lokale Merkmalspunktbeschreibung (Lowe, 2004)

der einzelnen Gradienten Orientierungs-Histogramme aufgestellt, die den Inhalt einer Region der verwendeten Maskengröße zusammenfassen. In Abbildung 3.2 (rechte Seite) ist der Merkmalspunkt mit insgesamt 4 Orientierungs-Histogrammen beschrieben, die aufsummierte Gradientenrichtungen und Gradientengrößen einer Region in jeweils acht Richtungen repräsentieren. Die Pfeillänge stellt die Größe der aufsummierten Gradienten dar, die innerhalb der Gradientenrichtung wirken. Die Gradienten werden durch ein allgemeines arithmetisches Mittel berechnet und dabei mit einer Gauß'schen Funktion gewichtet, die in Abbildung 3.2 (linke Seite) durch einen Kreis dargestellt ist. Gradienteninformationen außerhalb des Kreises haben keinen Einfluss. Eine weitere Variante des SIFT-Verfahrens stellt Bay (2006) vor, mit dem sich die Merkmalsbeschreibungen beschleunigt berechnen lassen. Diese als SURF-Verfahren bezeichnete Variante beruht auf der Verwendung von Integralbildern und vereinfacht die Wesentlichen Schritte des SIFT-Verfahrens.

Spin Image

Analog zur invarianten Beschreibung durch das SIFT-Verfahren stellen Johnson und Hebert (1998, 1999) einen Ansatz vor, bei dem in einem *Triangulated Irregular Network* (TIN) Merkmale rotationsinvariant beschrieben werden. Jeder Knotenpunkt des TIN wird als potentieller Merkmalspunkt betrachtet, für den eine Merkmalsbeschreibung in Form eines Bildes generiert wird. Dabei werden die Krümmungseigenschaften der Objektoberfläche rotationsinvariant beschrieben. Johnson und Hebert (1998) bezeichnen das Bild als *Spin Image* für dessen Generierung zuerst die Tangentialebene im Merkmalspunkt als Bezugsebene berechnet wird. Die 3D-Koordinaten des Merkmalspunktes und der Normalenvektor n der Tagentialebene bilden die Basis, auf die sich die Positionen der umliegenden Punkte mit zwei Parametern (α, β) beziehen, s. Abbildung 3.3. Durch Akkumulation dieser Parameter in einem 2D-Array wird das *Spin Image* generiert. Ein umliegender Punkt wird durch den Parameter α, der den senkrechten Abstand zum Normalenvektor darstellt, und den Parameter β, der den senkrechten Abstand zur Tangentialebene darstellt, beschrieben. (α, β) entsprechen zylindrischen Koordinaten und werden durch

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\|\vec{X} - \vec{P}\|^2 - (\vec{n} \cdot (\vec{X} - \vec{P}))^2} \\ \beta &= \vec{n} \cdot (\vec{X} - \vec{P}) \end{aligned} \tag{3.11}$$

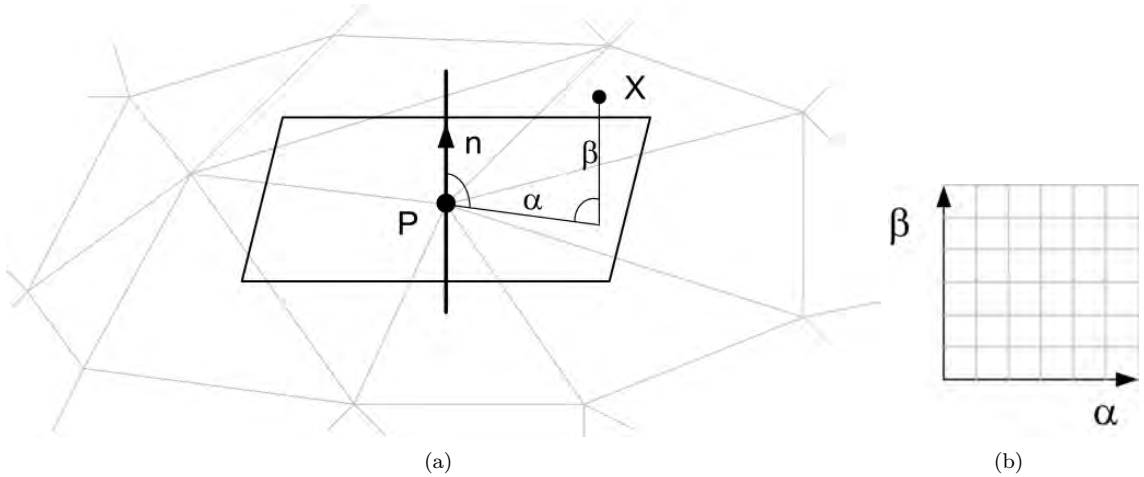


Abbildung 3.3: Spin Image (nach Johnson und Hebert (1998)). (a) Tangentialebene eines Oberflächenpunktes P. (b) Bilddarstellung des Parameterraums.

bestimmt. Der Begriff *Spin Image* stammt von der zylindrischen Symmetrie der Bezugsbasis zur Berechnung von (α, β), die keinen Einfluss auf die Koordinaten im Parameterraum hat. Die Konsequenz der zylindrischen Symmetrie ist, dass 3D-Punkte identische Koordinaten (α, β) haben, die auf einem Kreis liegen, dessen Mittelpunkt im Normalenvektor der Basis liegt und der parallel zur Tangentialebene verläuft.

Weitere Verfahren

Anstatt die Krümmungseigenschaften zu quantifizieren und als Merkmalsbeschreibung zu nutzen stellen Gelfand et al. (2005) einen Ansatz zur Merkmalsbeschreibung durch Volumenanteile vor. Wieder wird jeder Knotenpunkt eines TIN als möglicher Merkmalspunkt betrachtet und das Volumen der lokalen Oberflächenstruktur mit Hilfe eines Integrals quantifiziert.

Eine Variante zur Beschreibung der gesamten Punktwolke durch ein globales Merkmal stellt das *Extended Gaussian Image* nach Horn (1984) dar. Dold (2005) und Makadia et al. (2006) zeigen, wie sie mit Hilfe der Ausrichtung und Verteilung der Normalenvektoren an der Objektoberfläche den Aufnahmestandpunkt in Form eines *Extended Gaussian Image* beschreiben, um die Rotationsparameter zwischen Aufnahmestandpunkten zu bestimmen. Zur gemeinsamen Bestimmung der Rotations- und Translationsparameter stellen Brenner und Dold (2007) ein Verfahren vor, welches aus den Punktwolken zuerst planare Elemente extrahiert, womit die Punktwolke ebenfalls global beschrieben wird, und aus diesen schließlich die Orientierungsparameter abgeleitet werden.

3.2.3 Korrespondenzanalyse

Durch die Korrespondenzanalyse sind konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen den Bildern von zwei oder mehr Aufnahmestandpunkten zu bestimmen. Die Konsistenz wird im Allgemeinen durch den Vergleich der Merkmalsbeschreibungen beurteilt. Dabei können im Wesentlichen folgende Probleme auftreten:

- Keine Suchraumeinschränkung: Korrespondenzen von Merkmalskandidaten werden ohne Einschränkung des Suchraumes durch Näherungswerte in allen Kombinationen gesucht. Im Allgemeinen ist demnach der Suchraum polynomiell[1] groß, liegen aber z.B. mehrdimensionale Merkmalsbeschreibungen vor, die gleichzeitig betrachtet werden sollen, oder von einem initialen bzw. aktuellen Zustand abhängig sind und somit variieren, lassen sich in der Regel in diesem nun sehr großen Suchraum (exponentiell) nicht mehr alle Kombinationen prüfen. Daher werden heuristische und stochastische Methoden zur Lösung dieser Aufgabe vorgeschlagen, mit denen die Lösung der Korrespondenzanalyse approximiert wird. Für weiterführende Literatur zu Methoden wie *Hill-Climbing* Heuristiken und *Simulated Annealing* siehe z.B. Press et al. (1992). Einen ausführlichen Überblick zur Orientierung von Entfernungsbildern mit Hilfe von *Genetischen Algorithmen* geben Silva et al. (2005). Werden die Beziehungen zwischen Merkmalen ebenfalls berücksichtigt, bietet sich zur Lösung auch das Verfahren der *Relationalen Zuordnung* an, wie sie z.B. Vosselman (1992) für die Bildzuordnung verwendet.

[1] Für die Korrespondenzanalyse werden k Korrespondenzen in der Menge von n Merkmalspunkten gesucht. Der Suchraum ist somit polynomiell mit n^k.

- Mehrdeutigkeiten: Im Fall von fehlenden, unzureichenden oder sich wiederholenden Merkmalsbeschreibungen kann das Ziel anstelle der Findung des globalen Minimums die Abgrenzung eines Bereiches von möglichen Merkmalskorrespondenzen mit potentiellen lokalen Minima sein. Das wird beispielsweise mit der *Cluster Analyse* (z.B. Siirtola (2004)) oder mit *Neuronalen Netzen* (z.B. Ritter et al. (2005), Harston (1991)) erreicht.
- Grobe Fehler: In diesem Kontext sind die Merkmalspunkte eines Aufnahmestandpunktes als grobe Fehler zu betrachten, die in den weiteren Aufnahmestandpunkten nicht enthalten sind, z.B. aufgrund ihrer Lage außerhalb des Überlappungsgebietes.

Im Folgenden wird die `RANSAC`-Methode als ein Beispiel für die Korrespondenzanalyse von Merkmalen ohne Einschränkung des Suchraums vorgestellt. Die Lösung der Merkmalskorrespondenzen wird dabei durch ein globales Kriterium beurteilt.

`RANSAC`-Methode

Die `RANSAC`-Methode (*Random Sample Consensus*) wurde von Fischler und Bolles (1981) vorgestellt mit dem Ziel, eine hohe Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* von Merkmalspunkten zu finden. Die Methode ist robust, da sie auch Datensätze mit einer signifikanten Anzahl grober Fehler richtig interpretieren kann (Fischler und Bolles, 1981). Die Prozessierung verläuft iterativ und gliedert sich für jede Iteration in folgende Schritte, s. auch Hartley und Zissermann (2003):

- Zufällige Auswahl einer minimalen Anzahl von Merkmalskorrespondenzen
- Bestimmung der Orientierungsparameter
- Beurteilung der Lösung durch geometrische Konsistenzprüfung

In jeder Iteration werden die Orientierungsparameter zwischen den Aufnahmestandpunkten durch die zufällige Auswahl der minimalen Anzahl von Merkmalskorrespondenzen bestimmt. Die berechneten Orientierungsparameter stellen den Lösungsvorschlag der aktuellen Iteration dar, der im letzten Prozessierungsschritt durch die geometrische Konsistenzprüfung beurteilt wird. Statistisch wird mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nach einer bestimmten Anzahl von Iterationen die gesuchte Lösung durch eine zufällige Auswahl von Merkmalskorrespondenzen erreicht. Für die Durchführung der Methode werden insgesamt zwei bzw. drei Parameter spezifiziert:

- Das Fehlermaß zur Beurteilung der geometrische Konsistenzprüfung
- Die Anzahl der erwarteten *konsistenten Korrespondenzen*
- Die maximale Anzahl der durchzuführenden Iterationen

Der erste Parameter, das Fehlermaß, wird in Abhängigkeit der Genauigkeit der detektierten Merkmalspunkte spezifiziert. Wird das Fehlermaß zu groß gewählt, lässt es Raum für eine Anzahl ähnlicher Lösungen. Wird die erwartete Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* erreicht, hat die Berechnung konvergiert. Kann dagegen keine Aussage über die Anzahl der erwarteten *konsistenten Korrespondenzen* getroffen werden, wird die maximale Anzahl der Iterationen durchgeführt, die durch den dritten Parameter spezifiziert ist. Die Iteration mit der höchsten Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* entspricht dann der Lösung, dem Konsens. Das Ergebnis der `RANSAC`-Methode stellen die bestimmten *konsistenten Korrespondenzen* dar.

Eine Erweiterung der Methode schlagen Michaelsen und Stilla (2003); Michaelsen et al. (2006) vor, die sie als `GOODSAC`-Methode bezeichnen. Das Prinzip des *Good Sample Consensus* ist für Datensätze entworfen worden, bei denen eine Bewertung der Konsistenz anhand lokaler Merkmalsbeschreibungen möglich ist. In diesem Fall wird die zufällige Auswahl von Merkmalskorrespondenzen durch eine kontrollierte Suche nach korrespondierenden Merkmalen ersetzt. Dabei wird systematisch die Ähnlichkeit zwischen den Merkmalsbeschreibungen der Merkmalspunkte bestimmt und die Korrespondenzen mit der höchsten Ähnlichkeit ermittelt. Mit der kontrollierten Suche lässt sich im Vergleich zur `RANSAC`-Methode Rechenzeit einsparen. Außerdem wird die Lösung der `GOODSAC`-Methode nicht nur anhand der Anzahl der konsistenten Korrespondenzen, sondern ebenfalls durch weitere Beurteilungskriterien, wie z.B. die Ähnlichkeit der Merkmalsbeschreibungen, bewertet.

3.3 Flächenbasierte Zuordnungsverfahren

Bei flächenhaften Zuordnungsverfahren werden die Grauwerte von Bildern oder Bildausschnitten zugeordnet.

Block-Matching

Werden potentielle Merkmalspunkte durch Bildausschnitte beschrieben, lässt sich die Ähnlichkeit der Merkmalsbeschreibungen durch das Block-Matching bestimmen. Ein gängiges Verfahren des Block-Matching ist die Berechnung der Korrelation zwischen Bildausschnitten, s. z.B. Ackermann (1983, 1984), Förstner (1982) sowie Claus (1983), Boochs (1984). Der Kreuzkorrelationskoeffizient ρ_{fc} quantifiziert die radiometrische Ähnlichkeit der Bildausschnitte durch:

$$\rho_{fc} = \frac{\sigma_{fc}}{\sigma_f \cdot \sigma_c} \qquad \rho_{fc} \in [-1, 1] \tag{3.12}$$

mit

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}(g_f(r,c) - \bar{g}_f)^2} \tag{3.13}$$

der Standardabweichung des ersten Bildausschnittes,

$$\sigma_c = \sqrt{\sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}(g_c(r,c) - \bar{g}_c)^2} \tag{3.14}$$

der Standardabweichung des zweiten Bildausschnittes und

$$\sigma_{fc} = \sum_{r=1}^{R}\sum_{c=1}^{C}(g_f(r,c) - \bar{g}_f) \cdot (g_c(r,c) - \bar{g}_c)) \tag{3.15}$$

dessen Kovarianz. $\bar{g}_f$ und $\bar{g}_c$ entsprechen den mittleren Grauwerten der zu vergleichenden Bildausschnitte. Bildausschnitte mit einem Korrelationskoeffizient von 1 sind identisch.

Das Verfahren ist auf Maßstabsunterschiede bis ca. 30% und Rotationen bis ca. 20° in den Bildern beschränkt (Förstner, 1985). Wird diese Voraussetzung nicht erfüllt, weisen die Bildausschnitte nur wenig Korrelation auf. Das Verfahren eignet sich demnach gut zur Zuordnung von Bildern, die dem Stereonormalfall entsprechen oder diesen hinreichend approximieren. Eine Verbesserung stellt die Berücksichtigung geometrischer Transformation dar, die Translationen, Rotationen, Scherungen oder auch die Berücksichtigung des Oberflächenmodells beinhalten. Die Transformation kann z.B. durch eine 6 Parameter (Affin-) Transformation nach der Methode der Kleinsten-Quadrate geschehen, s. z.B. (Förstner, 1982; Ackermann, 1983; Grün, 1985). In diesem Fall werden Bildausschnitte unter Berücksichtigung von zwei Translationen, zwei Maßstäben sowie einer Scherung und einer Rotation bestmöglichst angepasst, wodurch ein hohes Genauigkeitspotential von ca. 0,1 Pixel (Förstner, 1985) oder besser erreicht wird.

Liegt aufgrund von Näherungswerten die geometrische Beziehung des Bildes zum Oberflächenmodell vor, lässt sich der Bildausschnitt differentiell entzerren. Der Bildausschnitt repräsentiert damit ein Orthophoto und ist frei von geometrischen Verzerrungen. Die Berücksichtigung der Objektoberfläche nehmen z.B. Norvelle (1992), Schenk und Toth (1992) vor.

Weitere Verfahren

Der *Optische Fluss* (engl. *optical flow*) (Horn und Schunck, 1981; Lucas und Kanade, 1981; Klette et al., 1996) stellt eine Verallgemeinerung zum Kleinsten-Quadrate Verfahren dar und gibt die relative Geschwindigkeit für jeden Bildpunkt zwischen zwei Bildern einer Bildfolge an. Aus dem *Optischen Fluss* resultiert also ein Vektorfeld, welches die Beziehung zwischen den korrespondierenden Bildpunkten von zwei Bildern repräsentiert. Die auftretenden Geschwindigkeiten bzw. Bewegungswahrnehmungen in den Bildern von zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten lassen sich z.B. durch Bewegungen der Szenenobjekte, nicht formfeste Szenenobjekte, sich ändernden Lichtverhältnissen, veränderte Schattenwurfsituation und unterschiedliche Oberflächenreflektanz (bei sich ändernder Normalenrichtung zur Lichtquelle) begründen. Aufgrund der genannten verschiedenen Gründe von Bewegungswahrnehmungen ist die Approximation lokaler Verschiebungsfelder durch den *Optischen Fluss* in Teilen unzuverlässig. Im Gegensatz zur Kleinsten-Quadrate Methode, die eine gleichbleibende Nachbarschaft der Bildpunkte in der Muster- und Suchmatrix impliziert, lässt der *Optische Fluss* auch eine sich ändernde Nachbarschaft zu. Jeder Bildpunkt wird individuell betrachtet. Zur Stabilisierung des Vektorfeldes werden glättende Bedingungsgleichungen berücksichtigt. Es existieren ver-

schiedene Lösungen, die Verfahren von Horn und Schunck (1981) und Lucas und Kanade (1981) stellen zwei Lösungsvorschläge zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes dar, s. auch Hahn und Pross (1992).

Für die Zuordnung von 3D-Objektoberflächen stellen Litke et al. (2005) ein Verfahren nach dem Variationsprinzip vor. Anstatt die Oberflächen direkt im 3D-Raum zu verwenden, betrachten sie diese in einem 2D-Parameterraum, um die Verfahren der digitalen Bildzuordnung anwenden zu können. Als Zuordnungskriterium wird beispielsweise die Oberflächenkrümmung vorgeschlagen, dessen Diskrepanzen in der Startkonstellation als Energie formuliert zu minimieren sind. Durch die Formulierung im 2D-Raum bewerten Litke et al. (2005) ihren Ansatz als einfacher in der Korrespondenzanalyse und schneller im Vergleich zur Formulierung im 3D-Raum.

Die Zuordnung von Bilddaten zu Objektoberflächen zeigen Strunz (1993), Ebner und Strunz (1988) und Rosenholm und Torlegard (1988). Sie demonstrieren, wie mit Hilfe digitaler Geländemodelle die absolute Orientierung von Stereobildmodellen bestimmt werden kann. In den Beobachtungsgleichungen fließen die ersten Ableitungen des Geländemodells ein. Es zeigt sich, dass mit Hilfe flächenhafter Daten eine vergleichbare und abhängig von den Daten auch eine bessere Orientierungsbestimmung möglich ist, wie sie ansonsten durch natürliche und signalisierte Passpunkte erreicht werden kann.

In einem Ansatz zur Mehrbildzuordnung verwendet Neugebauer (2001, 1997) Entfernungsbilder. Er demonstriert, wie durch die Berücksichtigung der Aufnahmerichtung Hinterschneidungen und Verdeckungen der Objektoberfläche detektiert werden können. Zur Orientierungsbestimmung werden die quadratischen Entfernungsabstände in Aufnahmerichtung der überlappenden Entfernungsbilder minimiert.

3.3.1 Objektraumbasierte Mehrbildzuordnung

Die objektraumbasierte Mehrbildzuordnung wurde erstmals von Ebner et al. (1987), Wrobel (1987a,b) und Helava (1988) vorgestellt und im Wesentlichen von Heipke (1990), Schneider (1991), Weisensee (1992), Kempa (1995), Tsay (1996) und Schlüter (1999) untersucht und nach verschiedenen Aspekten weiterentwickelt.

Dem Verfahren wird ein Modell der Bildentstehung bzw. der Inversion des Entstehungprozesses zugrundegelegt, das den Bezug zwischen einem Grauwert des Bildes und seinem korrespondierenden Oberflächenelement (Surfel) herstellt. Durch die inverse Formulierung der Bildentstehung findet die Bildzuordnung im Objektraum unter Hinzunahme eines geometrischen und radiometrischen Näherungsmodells nach der Methode der Kleinsten-Quadrate statt. Im funktionalen Modell wird die Beziehung eines Grauwertes G eines Oberflächenelementes zu den Grauwerten g in den aufgenommen Bildern durch deren Abbildungsfunktionen formuliert, s. Abbildung 3.4. Die Grauwerte g sind Funktionen ihrer Bildkoordinaten, die wiederum Funk-

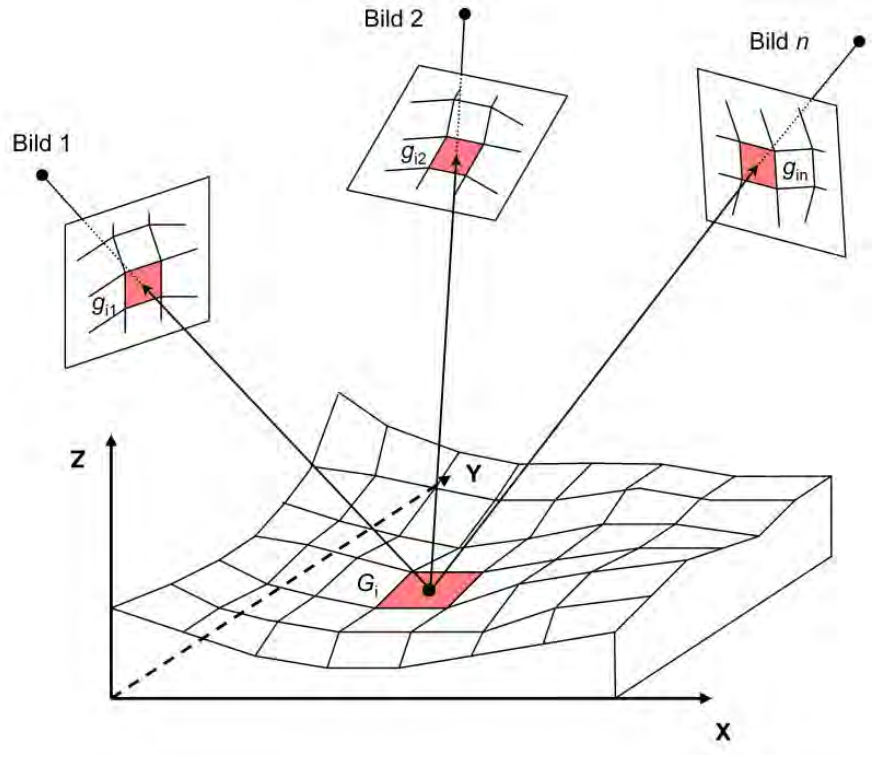


Abbildung 3.4: Objektraumbasierte Mehrbildzuordnung (nach Luhmann (2003))

tionen von den Parametern der *Äußeren Orientierungen* $\mathbf{T}, \mathbf{R}$ und der Oberflächenfunktion $Z(X,Y)$ sind. Es gilt:

$$G(X,Y) = g^j(\mathbf{T}^j, \mathbf{R}^j, Z(X,Y)), \qquad j = [1,n] \tag{3.16}$$

für n beteiligte Bilder, wobei g eine Funktion von $\mathbf{T}^j, \mathbf{R}^j$ und $Z(X,Y)$ ist. Zur Einhaltung von Gleichung (3.16) wird ein lokales Beleuchtungsmodell berücksichtigt. Das Modell wird linear durch eine Konstante t_0 und einen Maßstabsfaktor t_1 approximiert. Es gilt:

$$G(X,Y) = t_0 + t_1 \cdot g^j(x^C, y^C), \qquad j = [1,n] \tag{3.17}$$

Gleichung (3.17) wird für jedes betrachtete Oberflächenelement des behandelten Oberflächenbereiches angewandt. Zur Lösung der nichtlinearen Gleichungen sind Näherungswerte für die zu schätzenden Unbekannten notwendig. Der Algorithmus wurde primär für die Oberflächenrekonstruktion aus multiplen Bildern entwickelt. In diesem Fall ist an erster Stelle die Oberflächenfunktion Z zu schätzen. Da die Oberflächenfunktion im Objektraum nur approximiert vorliegt, sind ebenfalls keine Grauwerte G und keine Angaben über die radiometrische Anpassung der Helligkeitswerte präsent. Diese werden in diesem Zuge ebenfalls in der Ausgleichung simultan mitgeschätzt. Die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$v_{g^j} = G(X,Y)^0 + dG - (t_0^0 + dt_0 + (t_1^0 + dt_1) \cdot g^j(x^{C,0} + dx^C, y^{C,0} + dy^C)), \qquad j = [2,n] \tag{3.18}$$

mit denen durch eine vermittelnde Ausgleichung die Unbekannten geschätzt werden können.

Kempa (1995) demonstriert neben der Oberflächenrekonstruktion die simultane Bestimmung der *Äußeren Orientierung*, indem das funktionale Modell zusätzlich nach den Orientierungsparametern abgeleitet wird. Der funktionale Ansatz dieses Verfahrens zeichnet sich durch seine Offenheit aus, jegliche objektbezogenen Informationen verschiedener Sensoren mit heranzuziehen.

Modellbildung im Objektraum durch die *Finite Elemente Methode*

Bei der Diskretisierung durch die *Finite Elemente Methode* wird der betrachtete Oberflächenausschnitt in Elemente mit endlicher Größe und endlicher Anzahl zerlegt. Als Elemente kommen grundsätzlich Dreiecke, Vierecke oder auch beliebige n-Ecke in Frage, die geradlinig oder krummlinig die Oberfläche beschreiben. In jedem Element wird die Oberflächenfunktion durch ein zweidimensionales Polynom beschrieben, welches ein ebener, bilinearer, quadratischer oder höhergradiger Interpolant sein kann. Das Polynom bezieht sich auf zwei unabhängige Parameter, die in der Parameterfläche des *Finiten Elementes* definiert sind. Für die Wahl des Interpolanten gilt, dass je größer die Fläche des *Finiten Elementes* ist, desto höhergradig muss das Polynom sein, um die Objektoberfläche adäquat zu approximieren. Der Funktionsverlauf wird durch die Funktionswerte in den Stützstellen der *Finiten Elemente* ausgedrückt.

Hinsichtlich der objektraumbasierten Mehrbildzuordnung wird die Modellierung im Allgemeinen durch ein Raster vorgenommen. Beim Raster entsprechen die *Finiten Elemente* Rasterelemente gleicher Größe die systematisch und gleichmäßig im Objektraum ausgerichtet sind. Abbildung 3.5 zeigt das Beispiel eines Rasterelementes. Für das Element ist ein gradliniger Funktionsverlauf zwischen den Stützstellen skizziert und repräsentiert damit die bilineare Interpolationsfunktion. Positionen auf der Oberfläche innerhalb eines

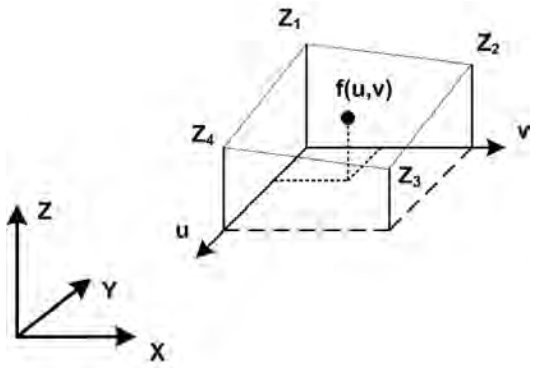


Abbildung 3.5: Beispiel eines Rasterelements

Finiten Elementes werden durch zwei unabhängige Parameter bestimmt. Ein Funktionswert der Oberfläche innerhalb des Rasterelementes an der Stelle (u,v) lautet $f(u,v)$ und wird aus den vier umliegenden Funktionswerten der Stützstellen ermittelt.

Neben der geometrischen Oberfläche werden zudem die Funktionswerte der Bildsignale im Objektraum dargestellt. In der Regel wird dazu ebenfalls entsprechend ein Raster verwendet. Der Stützstellenabstand wird der Auflösung der in den Objektraum projizierten Bildelementen angepasst. Wrobel (1987a), Weisensee (1992), Schlüter (1999) führen für die Darstellung ebenfalls ein Finite Elemente Modell ein, Ebner et al. (1987), Heipke (1990), Schneider (1991) dagegen zeigen, wie eine auf die Stützstellen reduzierte Darstellung ausreicht, ohne diese in einen funktionalen Bezug zueinander zu stellen.

Stabilisierende Bedingungsgleichungen

Wird im Rahmen der digitalen Bildzuordnung die Oberfläche rekonstruiert, können aufgrund des schlechtgestellten Problems stabilisierende Bedingungsgleichungen notwendig werden. Fehlende Informationen in den Bildern können bei der Oberflächenrekonstruktion durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen dazu führen, dass für Oberflächenbereiche keine bzw. nur eine instabile Lösung gefunden wird. Dies führt zu einer schlecht konditionierten Normalgleichungsmatrix oder gar zu Singularitäten. Die stabilisierenden Bedingungsgleichungen, die im Sinne der Ausgleichung als zusätzliche Beobachtungsgleichungen betrachtet werden, regularisieren die Normalgleichungsmatrix und erhöhen dessen Kondition. Diese Vorgehensweise ist ganz allgemein für Aufgaben der Oberflächenrekonstruktion gebräuchlich, vgl. z.B. Grimson (1981), Ebner et al. (1987), Wrobel (1987a), Terzopoulos (1988), Heipke (1990), Schneider (1991), Weisensee (1992), Schlüter (1999).

Die im Folgenden eingeführten Bedingungsgleichungen approximieren die Zielfunktion der zu rekonstruierenden geometrischen Objektoberfläche und wirken krümmungsminimierend. Die Gleichungen lauten in ihrer diskreten Form wie folgt:

$$C_X = Z_{i,j-1} - 2Z_{i,j} + Z_{i,j+1} \tag{3.19}$$

$$C_Y = Z_{i-1,j} - 2Z_{i,j} + Z_{i+1,j} \tag{3.20}$$

$$C_{X,Y} = Z_{i,j} - Z_{i+1,j} - Z_{i,j+1} + Z_{i+1,j+1} \tag{3.21}$$

und stellen die Funktionswerte benachbarter Stützstellen zueinander in Beziehung. Nach Abbildung 3.6 repräsentiert C_X die Bedingungsgleichung in Richtung der X_i-Achse und C_Y in Richtung der Y_j-Achse des Rasterkoordinatensystems der Objektoberfläche mit der Forderung, dass die Funktionswerte der Stützstellen auf einer Geraden liegen. $C_{X,Y}$ wirkt diagonal dazu und fordert, dass die Funktionswerte der Stützstellen in einer Ebene liegen.

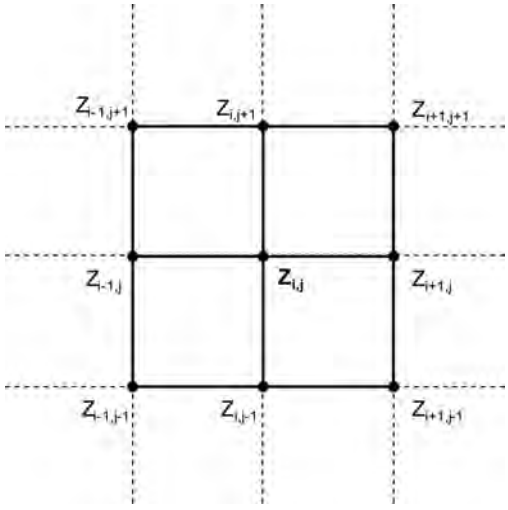


Abbildung 3.6: Stabilisierende Bedingungsgleichungen

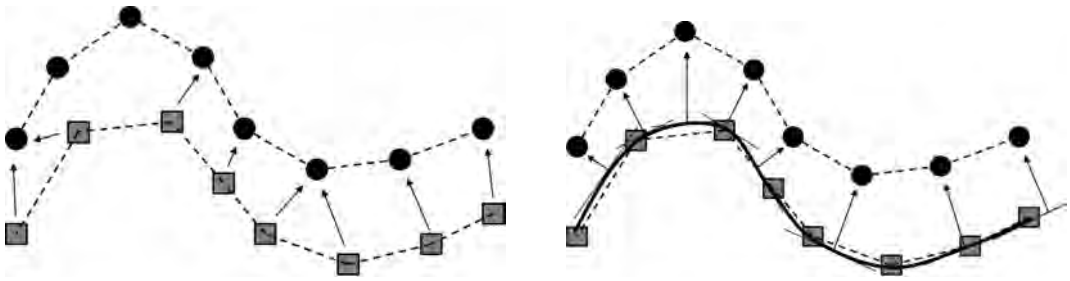
3.3.2 3D-Oberflächenzuordnung

Für die flächenhafte Zuordnung von 3D-Oberflächen sind eine Vielzahl von Verfahren veröffentlicht, die auf dem Prinzip des *Iterative Closest Point* (ICP)-Algorithmus basieren, der von Besl und McKay (1992), Chen und Medioni (1992) und Zhang (1994) entwickelt wurde. Mit dem Algorithmus lassen sich zwei Punktwolken

im Objektraum unter der Voraussetzung zuordnen, dass die erste Wolke $\mathbf{P}$ eine Teilmenge[2] der zweiten Wolke $\mathbf{Q}$ ist ($\mathbf{P} \in \mathbf{Q}$). Es werden zuerst korrespondierende Oberflächenpunkte bestimmt, aus denen dann die Orientierungsparameter ermittelt werden, sodass die Quadratsumme der Abstände minimiert wird. Die Idee von Besl und McKay (1992) und Zhang (1994) ist, dass der am nächsten gelegene Punkt das korrespondierende Oberflächenelement approximiert, s. Abbildung 3.7 (a). Chen und Medioni (1992) dagegen greifen die Punkt-zu-Ebene Formulierung auf, die erstmals von Potmesil (1983) vorgestellt wurde, s. Abbildung 3.7 (b). Dabei wird der Abstand eines Punktes in Normalenrichtung $\mathbf{n}_i$ zur Tangentialebene des am nächsten gelegenen Oberflächenelementes nach folgender Gleichung minimiert:

$$\sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{n}_i(\mathbf{T} + \mathbf{R}\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i)\|^2 \rightarrow min \tag{3.22}$$

mit $\mathbf{p}_i \in \mathbf{P}$ und $\mathbf{q}_i \in \mathbf{Q}$. Zur Lösung von Gleichung (3.22) werden in jeder Iteration zuerst die korrespondierenden Punktpaare $\mathbf{p}, \mathbf{q}$ ermittelt und im Anschluss die Orientierungsparameter $\mathbf{T}, \mathbf{R}$ bestimmt. Beide



(a) (b)

Abbildung 3.7: Korrespondenzen (a) Punkt-zu-Punkt (b) Punkt-zu-Ebene (Wendt und Weisensee, 2003)

Verfahren betrachten in ihrer einfachsten Form eine der beiden 3D-Objektoberflächen, als eine unstrukturierte Punktwolke, s. Abbildung 3.7, dessen Punkte keinen Bezug zueinander haben. Oftmals aber weisen beide Punktwolken Topologie auf, womit sich das Kriterium zur Bestimmung von Korrespondenzen erweitern lässt. Neben der *Euklidischen Distanz* werden zusätzliche Attribute der Oberfläche berücksichtigt, die schneller zur Konvergenz der Zuordnung und zu einer verbesserten Korrespondenzanalyse führen. Godin et al. (2001) gibt jedem Entfernungswert hinsichtlich der Orientierungsparameter invariante Attribute, wie z.B. die Oberflächenkrümmung, und verwendet den *Iterative Closest Compatible Point* (ICCP)-Algorithmus für die 3D-Oberflächenzuordnung. Ein Punkt ist kompatibel, wenn die Werte der assozierten und invarianten Attribute übereinstimmen. Der ICCP-Algorithmus minimiert die Distanz zwischen der Tangentialebene eines Punktes zu seinem kompatiblen Punkt. Weitere Verfahren und Beurteilungen einzelner ICP-Methoden sind Rusinkiewicz und Levoy (2001) zu entnehmen.

Eine Erweiterung hinsichtlich der Oberflächenbeschreibung ist in Grün und Akca (2006) gegeben. Dabei wird die Punktwolke durch mehrere Oberflächenausschnitte repräsentiert. Das Zuordnungsproblem wird hierbei durch die Methode der Kleinsten-Quadrate nach Grün (1985) formuliert, wobei der quadratische Abstand zwischen den Oberflächenausschnitten in Normalenrichtung minimiert wird.

3.4 Verfahren zur simultanen Zuordnung multisensoraler Bilddaten

In diesem Abschnitt werden die Verfahren vorgestellt, die zur Detektion und Beschreibung von Merkmalen simultan multisensorale Bilddaten verwenden. Die Voraussetzung dafür ist, dass multisensorale Bilddaten in jedem Aufnahmestandpunkt vorliegen, wie es z.B. bei einem *kombinierten Messsystem* der Fall ist. Die Verfahren stellen Erweiterungen der bisher genannten Methoden dar. Im Folgenden werden die Wesentlichen Verfahren für die merkmalsbasierte und flächenbasierte Zuordnung bei simultaner Verwendung multisensoraler Bilddaten genannt.

Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren

Für Datensätze kombinierter Messsysteme schlagen Al-Manasir und Fraser (2006) aufgrund der hohen Auflösung der Helligkeitsbilder die Orientierung der Aufnahmestandpunkte durch Einzelpunktmessung im Helligkeitsbild vor. Sie begründen ihre Vorgehensweise damit, dass neben der hohen Auflösung des Helligkeitsbildes

[2]Die Punktwolken von Messungen unterschiedlicher Aufnahmestandpunkten decken einen identischen Oberflächenbereich vollständig ab. Die Koordinatentripel der Punktwolken innerhalb der Teilmenge sind aber im Allgemeinen unterschiedlich.

in diesem zudem zuverlässig und genau Punkte entlang von Oberflächenkanten ermittelt werden können. Durch die Geometrie der Entfernungsbilder leiten sie die 3D-Koordinaten der Einzelpunktmessungen ab, die als Näherungswerte innerhalb einer Bündelausgleichung eingeführt werden.

Vanden Wyngaerd und Van Gool (2003) stellen einen merkmalsbasierten Ansatz vor, in dem durch einen Interest-Operator Punkte in einem Helligkeitsbild detektiert werden und dessen 3D-Position aus geometrischen Informationen (Entfernungsbilder, 3D-Punktwolken) zum Objektraum abgeleitet werden. Die Punkte werden rotationsinvariant durch abgeleitete Größen aus der Textur des Helligkeitsbildes beschrieben. Hervorzuheben ist, dass sich durch die Beschreibung mit der Textur Mehrdeutigkeiten in der Zuordnung reduzieren und sich damit ebenfalls Oberflächen orientieren lassen, die keine oder nur geringe geometrische Struktur aufweisen.

Eine Erweiterung der Beschreibung von *Spin Images* unter Berücksichtigung der Textur von z.B. Intensitätsbildern stellen Brusco et al. (2005) vor. Die Voraussetzung dafür ist, dass den Punkten der 3D-Punktwolke ein zusätzlicher Farbwert zugewiesen ist. Die Beschreibung der umliegenden Punkte in Bezug zu dem Merkmalspunkt wird um den Farbwert g erweitert. Die erweiterten zylindrischen Koordinaten lauten somit: (α, β, g).

Flächenbasierte Zuordnungsverfahren

Wie schon in Kapitel 3.3.2 erläutert, wird durch den ICCP-Algorithmus nicht die Distanz zum nächsten 3D-Punkt, sondern zum nächsten kompatiblen 3D-Punkt minimiert, wodurch das Iterationsverfahren der Zuordnung beschleunigt wird. Die Zuordnungsmethode ist, trotz der Berücksichtigung zusätzlicher Oberflächenattribute, auf Datensätze beschränkt, die keine Mehrdeutigkeiten in der Oberflächengeometrie aufweisen. Für die Zuordnung von Datensätzen einer Ebene oder Kugel, die in der Orientierungsbestimmung Mehrdeutigkeiten aufweisen, ist es möglich, als weitere Information eines 3D-Punktes einen RGB-Farbwert oder Helligkeitswert zu verwenden (Johnson und Kang, 1997). Unter Berücksichtigung des Helligkeitswertes lassen sich die Mehrdeutigkeiten des Datensatzes minimieren und eine eindeutige Lösung der Zuordnung erreichen.

In Anlehnung an das Verfahren des *Optischen Flusses* zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes zwischen zwei Helligkeitsbildern stellt Weik (1997) einen Ansatz vor, der für die Korrespondenzsuche von 3D-Punkten der Entfernungsbilder die Gradienten des Helligkeitsbildes verwendet. In jedem Aufnahmestandpunkt ist ein Helligkeits- und Entfernungsbild vorhanden, wodurch jedem Pixel im Helligkeitsbild eine 3D-Koordinate zugeordnet werden kann. Für die Bestimmung der konsistenten Korrespondenzen werden die 3D-Punkte (Pixel des Helligkeitsbildes) des zu orientierenden Aufnahmestandpunktes in das Helligkeitsbild des anderen Aufnahmestandpunktes projiziert und dort die Differenz der Helligkeitswerte gebildet. Das Verfahren setzt somit Näherungswerte für die *Äußere Orientierung* zwischen zwei Aufnahmestandpunkten voraus. Mit Hilfe der Differenz der Helligkeitswerte und den Gradienten an der Position im Helligkeitsbild werden nach den Regeln zur Berechnung des *Optischen Flusses* die Positionen der korrespondierenden Punkte linear geschätzt. Im Anschluss an die Korrespondenzsuche werden die Orientierungsparameter des Aufnahmestandpunktes bestimmt, sodass die Quadratsumme der *Euklidischen Distanz* zwischen den korrespondierenden 3D-Punkten minimiert wird.

In der von Pulli (1997) vorgestellten Methode werden keine Näherungswerte für die Orientierungsparameter der Aufnahmestandpunkte vorausgesetzt, stattdessen werden sie innerhalb der Methode durch das `RANSAC`-Verfahren erzeugt. Jedem Bildelement des Helligkeitsbildes ist eine 3D-Koordinate zugewiesen. Aus einer minimalen Anzahl zufällig gesetzter Korrespondenzen werden die Näherungswerte der Orientierungsparameter bestimmt. Zur Beurteilung der Orientierungsparameter werden die Helligkeitswerte beider Aufnahmestandpunkte und die Differenzen der 3D-Koordinaten verglichen. Der Zuordnungsprozess wird mehrmals wiederholt und das beste Ergebnis gespeichert. In einem weiteren Schritt werden die Differenzen der 3D-Koordinaten nach der Methode der Kleinsten-Quadrate minimiert.

Für die Zuordnung im Objektraum stellt Akca (2005) ein Verfahren vor, welches neben den geometrischen Abständen zwischen zwei Oberflächenfunktionen zusätzliche Bedingungen im Rahmen einer Kleinsten-Quadrate Ausgleichung einbezieht. Es wird demonstriert, wie die Intensitätswerte des 3D-Laserscanners als Quasi-Oberfläche im Objektraum definiert sind und die quadratischen Abstände zwischen Quasi-Oberflächenfunktionen simultan zu den quadratischen Abständen von geometrischen Oberflächenfunktionen zur 3D-Oberflächenzuordnung minimiert werden. Durch die direkte Betrachtung der Oberflächen im Objektraum wird die Aufnahmerichtung in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

3.5 Diskussion

Die genannten Zuordnungsverfahren unterteilen sich in:

- Merkmals- oder flächenbasierte Verfahren
- Verwendung von lokalen oder globalen Merkmalen
- Merkmalsdefinition im Objekt- oder Bildraum
- Multiple oder paarweise Orientierung von Aufnahmestandpunkten
- Simultane oder individuelle Verwendung multisensoraler Daten
- Einbeziehung von Näherungswerten

Sie sind hinsichtlich ihrer Robustheit, ihrer Genauigkeit, ihres Automationsgrades und ihrer Prozessierungsgeschwindigkeit (z.B. für Echtzeit-Applikationen) optimiert. Mit jedem Verfahren kann die Zuordnung für eine bestimmte Anzahl von Fällen erreicht werden. Außerdem sind in jedem Verfahren Prozessierungsparameter zu berücksichtigen, die über den Erfolg der Zuordnung entscheiden und hinsichtlich der zu berücksichtigenden Gegebenheiten (s. Abschnitt 3.1) zu setzen sind. Hinzu kommt, dass aufgrund des schlecht-gestellten Problems keine Lösung garantiert werden kann. Die Prozessierungsparameter können nicht vollautomatisch gesetzt werden. Eine autonome Prozessierung der Bildzuordnungsverfahren ist im Allgemeinen nur für eingeschränkte Fälle zuverlässig möglich.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse der genannten Verfahren zusammengefasst:

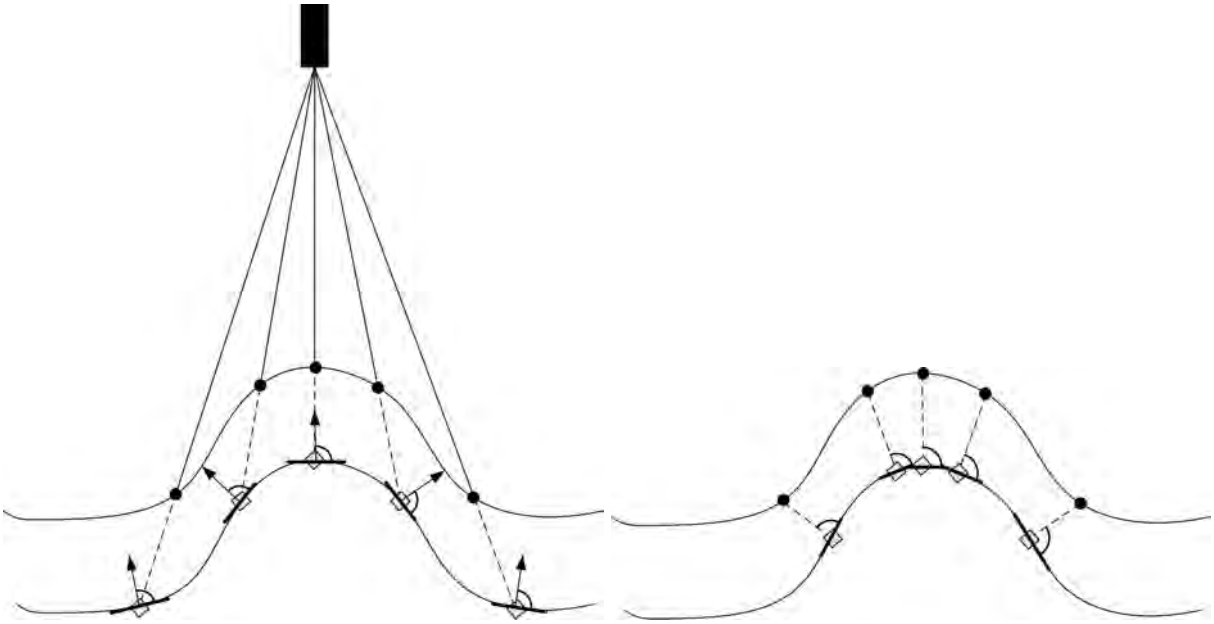
Merkmalsbasierte Zuordnungsverfahren

- Für die merkmalsbasierte Zuordnung sind die Merkmale und Merkmalsbeschreibungen abhängig vom Informationsgehalt der Bilddaten zu wählen.
- Je weniger Vorkenntnisse bekannt sind, wie z.B. Näherungswerte für die Orientierungsparamter, desto aufwendiger müssen Merkmale beschrieben werden, damit sie eindeutig im gesamten, uneingeschränkten Suchraum sind. Aufgrund der damit verbundenen Komplexität können mehr Fehlzuordnungen auftreten.
- Der Erfolg hängt von der Eindeutigkeit der Verknüpfungsinformation ab.
- Die Genauigkeit der aus den konsistenten Korrespondenzen abgeleiteten Orientierungsparameter resultiert aus der Detektionsgenauigkeit der Merkmale und der Verteilung der Merkmalskorrespondenzen im 3D-Raum.
- Bei der Verwendung multisensoraler Bilddaten wird die Eindeutigkeit der Merkmalsbeschreibungen bei der Zuordnung von Entfernungsbildern oder 3D-Punktwolken durch die Hinzunahme von Textur erhöht. Die Vorgehensweise in der Prozessierungsstrategie ist dabei oftmals jene, dass die Merkmalspositionen aus den Entfernungsdaten extrahiert werden und erst für die Merkmalsbeschreibungen die Textur hinzugezogen wird. Die im Allgemeinen höhere Auflösung des Helligkeitsbildes wird dabei nicht für eine höhere Genauigkeit bei der Merkmalsextraktion genutzt.
- Merkmale in den Entfernungsdaten werden durch markante Kanten und Krümmungen bestimmt. Entfernungsbilder von terrestrischen 3D-Laserscannern liefern genau in diesen Bereichen ungenaue Messergebnisse.

Flächenbasierte Zuordnungsverfahren

- Die flächenbasierten Verfahren sind im Vergleich zu den merkmalsbasierten Verfahren sensibler hinsichtlich Helligkeits- und Kontrastunterschieden in den Bildinformationen von Helligkeitsbildern.
- Durch die simultane Rekonstruktion der Objektoberfläche innerhalb der Bildzuordnung wird eine ausgeglichene Bezugsfläche hinsichtlich der Einpassung der zu berücksichtigenden Daten erzeugt.
- Aufgrund möglicher Informationslücken in den Bildern sind zur Oberflächenrekonstruktion stabilisierende Bedingungsgleichungen notwendig. Mit der Wahl der Bedingungsgleichung, z.B. Glattheitsbedingung, wird eine Annahme über die Oberflächengestalt getroffen.

- Im Gegensatz zu den Verfahren zur Orientierungsbestimmung von Kamerastandpunkten, wird bei vielen Verfahren zur Orientierungsbestimmung von Laserscannerstandpunkten nicht das Entfernungsbild sondern die 3D-Punktwolke im Objektraum betrachtet. Dadurch bleibt die Aufnahmerichtung unberücksichtigt, die in Abbildung 3.8 (a) für die Definition korrespondierender Oberflächenelmente herangezogen wird. In Abbildung 3.8 (b) werden die korrespondierenden Elemente in Richtung der Oberflächennormale definiert. Neben der Tatsache, dass unterschiedliche Oberflächenelemente als Korrespondenzen verwendet werden, fließen die Beobachtungen in Abbildung 3.8 (a) in Abhängigkeit ihres Betrachtungswinkels in das Zuordnungsverfahren ein. Bildstrahlen die einen schrägen Eintreffwinkel aufweisen haben damit ein geringeres Gewicht als Bildstrahlen die in Richtung der Oberflächennormale auftreffen. In Abbildung 3.8 (b) werden dagegen alle Korrespondenzen gleichgewichtet betrachtet.



(a) (b)

Abbildung 3.8: Definition korrespondierender Oberflächenelemente. (a) Definition durch die Aufnahmerichtung. (b) Definition durch den kürzesten Abstand in Normalenrichtung

- Weiter ist bei den genannten Verfahren zur Orientierungsbestimmung unter der Verwendung multisensoraler Daten festzustellen, dass die Datenarten priorisiert werden. Die als sekundäre Daten deklarierte Datenarten haben oftmals nur einen unterstützenden Nutzen. Sie werden als Attribut zur Beschreibung detektierter Merkmale verwendet oder dienen zur verbesserten Korrespondenzsuche bei den flächenhaften Verfahren.

Die bisherigen Verfahren zur Orientierungsbestimmung durch multisensorale Bilddaten benutzen im Allgemeinen die zusätzlichen Bildinformationen zur Erhöhung der Robustheit. Bei den merkmalsbasierten Verfahren wird z.B. ein Merkmalspunkt durch Attribute aus multisensoralen Daten beschrieben, aber dessen Position nur durch Verwendung einer Bilddatenart detektiert. Bei den flächenbasierten Verfahren steht ebenfalls die Robustheit im Vordergrund, die z.B. dadurch erreicht wird, dass die am nächsten gelegenen kompatiblen Bildstrahlen oder 3D-Punkte, die mehrere Kriterien simultan erfüllen müssen, als Korrespondenzen verwendet werden und nicht die Kompatibilität anhand eines einzelnen Kriteriums beurteilt wird. Durch diese Vorgehensweise liegt ein höherer Konvergenzradius und damit eine höhere Robustheit des Verfahrens vor.

4 Eine neue objektraumbasierte Methode zur simultanen multisensoralen Orientierung

Die objektraumbasierte Methode zur simultanen Orientierung multisensoraler Bilddaten gliedert sich in zwei Stufen. Im Vergleich zueinander ist die erste Stufe hinsichtlich ihrer Robustheit und die zweite Stufe hinsichtlich ihrer Genauigkeit ausgerichtet.

Mit der ersten Stufe lassen sich jeweils zwei Aufnahmestandpunkte merkmalsbasiert und ohne Voraussetzung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter robust zueinander orientieren. Die Merkmale werden durch simultane Verwendung multisensoraler Bilddaten eines Standpunktes detektiert und im Objektraum beschrieben. Durch die simultane Verwendung der multisensoralen Bilddaten ist dabei eine hohe Detektionsgenauigkeit des Merkmalspunktes und eine robuste Merkmalsbeschreibung zu erwarten. Im Gegensatz zu den umfangreichen Berechnungen zur rotationsinvarianten Merkmalsbeschreibung, z.B. durch das SIFT-Verfahren, wird in diesem Fall die Kenntnis über das terrestrische Messsystem genutzt, wodurch sich der Suchraum um einen Rotationsparameter einschränken lässt. Dadurch ist es möglich, mit geringem Berechnungsaufwand eine rotationsinvariante Merkmalsbeschreibung zu erzeugen. Zur Korrespondenzanalyse wird das Prinzip der `GOODSAC`-Methode aufgegriffen und für den Fall der simultanen Zuordnung multisensoraler Bilddaten modifiziert.

In der zweiten Stufe wird angenommen, dass Näherungswerte für die Aufnahmestandpunkte vorliegen. Die Orientierungsparameter werden durch einen flächenhaften Ansatz unter simultaner Verwendung multisensoraler Bilddaten nach der Methode der Kleinsten-Quadrate geschätzt. Innerhalb der Methode wird konzeptionell keine Bildinformation der anderen untergeordnet. Die Oberfläche wird zur Erhöhung der Zuordnungsgenauigkeit simultan rekonstruiert. Die Entfernungsdaten stellen neben den anderen Bilddaten ebenfalls eine Beobachtungsgruppe zur Orientierungsbestimmung bei simultaner Oberflächenrekonstruktion dar und geben eine Approximation der 3D-Objektoberfläche vor. Durch die Approximation der 3D-Objektoberfläche wird für die Oberflächenparameter innerhalb der simultanen Oberflächenrekonstruktion nur ein geringer Konvergenzradius benötigt, der in Abhängigkeit der Genauigkeit der Entfernungsdaten zu betrachten ist. Der Konvergenzradius der gesamten Ausgleichung bezieht sich demnach im Wesentlichen auf die Parameter der *Äußeren Orientierungen* der Aufnahmestandpunkte. Im Gegensatz zur ersten Stufe, wo die multisensoralen Bilddaten von jedem Aufnahmestandpunkt vorliegen, können die Bilddaten von jeweils individuellen Aufnahmestandpunkten berücksichtigt werden. Durch die simultane Oberflächenrekonstruktion im Ausgleichungsmodell sind die Beobachtungen der unterschiedlichen Bilddaten miteinander verknüpft. Innerhalb der Oberflächenrekonstruktion können stabilisierende Bedingungsgleichungen berücksichtigt werden, um Verdeckungen und weiteren Effekten aufgrund perspektiver Aufnahmestandpunkten entgegen zu wirken. Dadurch lassen sich auch Aufnahmestandpunkte mit stark perspektiv verzerrten Bildern verknüpfen, wie sie bei Anwendungen mit terrestrischen 3D-Laserscannern auftreten. Die Berücksichtigung der stabilisierenden Bedingungsgleichungen zur Überbrückung texturloser Bildbereiche in den Helligkeits- oder Intensitätsbildern ist aufgrund der Daten der Entfernungsbilder nicht notwendig.

Grundsätzlich sind beide Stufen getrennt voneinander zu betrachten, da sie eigenständige Methoden zur Orientierungsbestimmung darstellen. Liegen Datensätze *kombinierter Messsysteme* vor und werden beide Stufen nacheinander durchlaufen, um die maximale Orientierungsgenauigkeit zu erreichen, entspricht die zweistufige Methode einer vollautomatischen Strategie zur Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten.

4.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung

In diesem Kapitel wird ein merkmalsbasiertes Verfahren hergeleitet, welches die Orientierungsparameter von zwei Aufnahmestandpunkten *kombinierter Messsysteme* zueinander bestimmt. Das Verfahren setzt voraus, dass in einem Aufnahmestandpunkt multisensorale Bilddaten enthalten sind. Dabei werden keine Näherungswerte[1] für die Orientierungsparameter benötigt. Die Aufnahmestandpunkte werden paarweise zueinander orientiert, indem von jedem Standpunkt Merkmale extrahiert und dessen Korrespondenzen durch einen Zuordnungsprozess ermittelt werden.

Ein Überblick über die einzelnen Prozessierungsschritte des merkmalsbasierten Zuordnungsverfahrens ist in Abbildung 4.1 gegeben: Von jedem Standpunkt liegt ein Entfernungsbild und ein Helligkeitsbild vor. Unter

[1] Im Rahmen der Prozessierung der Merkmalsbeschreibungen wird eine Strategie vorgeschlagen, die auf der Annahme beruht, dass das verwendete *kombinierte Messsystem* lotrecht steht und damit die Kenntnis von einem Rotationswinkel impliziert. Dennoch wird die merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung im Allgemeinen als ein Verfahren eingestuft, welches ohne Näherungswerte auskommt, s. auch Abschnitt 4.1.5.

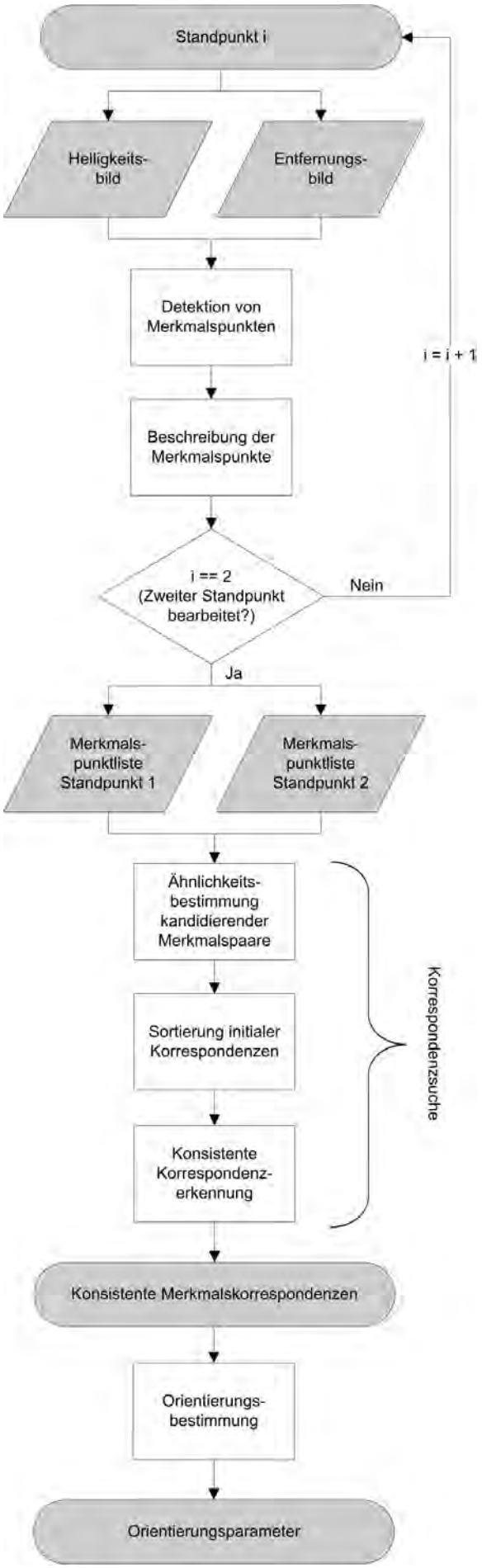


Abbildung 4.1: Prozessierungsschritte der merkmalsbasierten Orientierungsbestimmung

simultaner Berücksichtigung der beiden Bilder werden die potentiellen Merkmalspunkte detektiert. In einem weiteren Schritt werden sie invariant hinsichtlich ihrer Aufnahmeperspektive und des Bildmaßstabes mit Hilfe der Textur des Helligkeitsbildes beschrieben. Sind die Merkmalspunkte beider Aufnahmestandpunkte extrahiert, liegen sie unsortiert in zwei Listen vor. Aus den Listen werden innerhalb der Korrespondenzsuche *konsistente Korrespondenzen* der Merkmale bestimmt. In dem Zuordnungsprozess wird zuerst eine Ähnlichkeitsbestimmung über alle kandidierenden Merkmalspaare mit Hilfe der Merkmalsbeschreibung durchgeführt. Die Paare mit der höchsten Ähnlichkeit dienen zur Bestimmung der Orientierungsparameter innerhalb der `RANSAC`-Methode zur Erkennung der *konsistenten Korrespondenzen*. Aus den *konsistenten Korrespondenzen* werden abschließend die Orientierungsparameter zwischen den beiden Aufnahmestandpunkten durch eine vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten-Quadrate bestimmt.

4.1.1 Detektion von Merkmalspunkten

Zur Detektion eines Merkmalspunktes müssen die Eigenschaften des Merkmals definiert werden. Der gesuchte Merkmalspunkt soll einem durch einen Interest-Operator bestimmten Punkt im Helligkeitsbild entsprechen, zur Vermeidung von Verdeckungen im Objektraum im Bereich von planarer Oberflächengeometrie liegen und vom Aufnahmestandpunkt aus gut sichtbar sein, um eine bestmögliche Merkmalsbeschreibung durch das Helligkeitsbild zu gewährleisten. Die Planarität (Gleichung 4.3) wird durch eine maximal zulässige Standardabweichung einer Ebenenausgleichung aus den 3D-Punkten innerhalb eines zu wählenden Oberflächenbereiches und die Sichtbarkeit wird durch die Einführung eines maximal zulässigen Betrachtungswinkels (Gleichung 4.4) definiert. Stark perspektiv verzerrte Merkmalspunkte in den Bilddaten werden damit ausgeschlossen. Eine gute Sichtbarkeit ist die Voraussetzung für eine eindeutige Merkmalsbeschreibung und damit erfolgreiche Korrespondenzanalyse. Die Prüfung der Kriterien erfolgt sequentiell, wofür folgende Prozessierungsschritte durchlaufen werden:

1. Detektion von Merkmalspunkten im Helligkeitsbild
2. Prüfung der Planarität
3. Prüfung des Betrachtungswinkels

Besteht das *kombinierte Messsystem* (s. Kapitel 2.4) aus einer zentralperspektiven Kamera und einem Panorama-Laserscanner, entspricht das Sichtfeld der Kamera eine Untermenge des Sichtfeldes des Laserscanners. Daher ist es sinnvoll, zuerst im Helligkeitsbild mit Hilfe eines Interest-Operators Merkmalspunkte zu detektieren und im Anschluss daran die Prüfung der Planarität und des Betrachtungswinkels vorzunehmen. Die durch den Interest-Operator detektierten Merkmalspunkte werden als *initiale Merkmalspunkte* und die resultierenden Merkmalspunkte nach der Prüfung auf Planarität und des Betrachtungswinkels als *akzeptierte Merkmalspunkte* eines Standpunktes bezeichnet.

Initiale Merkmalspunkte

Die Detektion von Merkmalspunkten ist grundsätzlich durch beliebige Interest-Operatoren möglich und ist für die Herleitung dieses merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren unbedeutend. Abhängig von den jeweils zu wählenden Schwellwerten und Berechnungsgrößen lässt sich die Empfindlichkeit der Operatoren bestimmen. Die Größen werden in Abhängigkeit der vorliegenden Textur und der erwarteten Anzahl an Interestpunkten gewählt. Die Entscheidung, mit welchem Operator die *initialen Merkmalspunkte* detektiert werden, wird erst bei der Prozessierung der Datensätze getroffen.

Akzeptierte Merkmalspunkte

Zur Bestimmung der Planarität und des Betrachtungswinkels wird im Objektraum eine Tangentialebene an der Stelle des Schnittpunktes $\mathbf{P}$ des Bildstrahls des *initialen Merkmalspunktes* mit der 3D-Objektoberfläche berechnet, s. Abbildung 4.2. Zur Berechnung dieser 3D-Position wird die *Äußere Orientierung* zwischen dem Helligkeits- und Entfernungsbild, die bei einem *kombinierten Messsystem* durch Kalibrierung in Gleichung (2.11) gegeben ist, vorausgesetzt. Da sich beide Bildorientierungen im gleichen Koordinatensystem befinden, lassen sich über die Abbildungsgleichungen der Kamera die 3D-Punkte des Entfernungsbildes (3D-Punktwolke) in das Helligkeitsbild projizieren. Im Helligkeitsbild werden um den Merkmalspunkt $\mathbf{p}$ innerhalb einer Maske von R x C Pixel die Punkte gewählt, aus denen die 3D-Position bestimmt wird. Die Größe der Maske definiert den Bereich in dem die Forderung der Planarität und des Betrachtungswinkels eingehalten werden muss. Die 3D-Position $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ wird durch ein allgemeines arithmetisches Mittel mit entfernungsabhängiger Gewichtung bestimmt, durch:

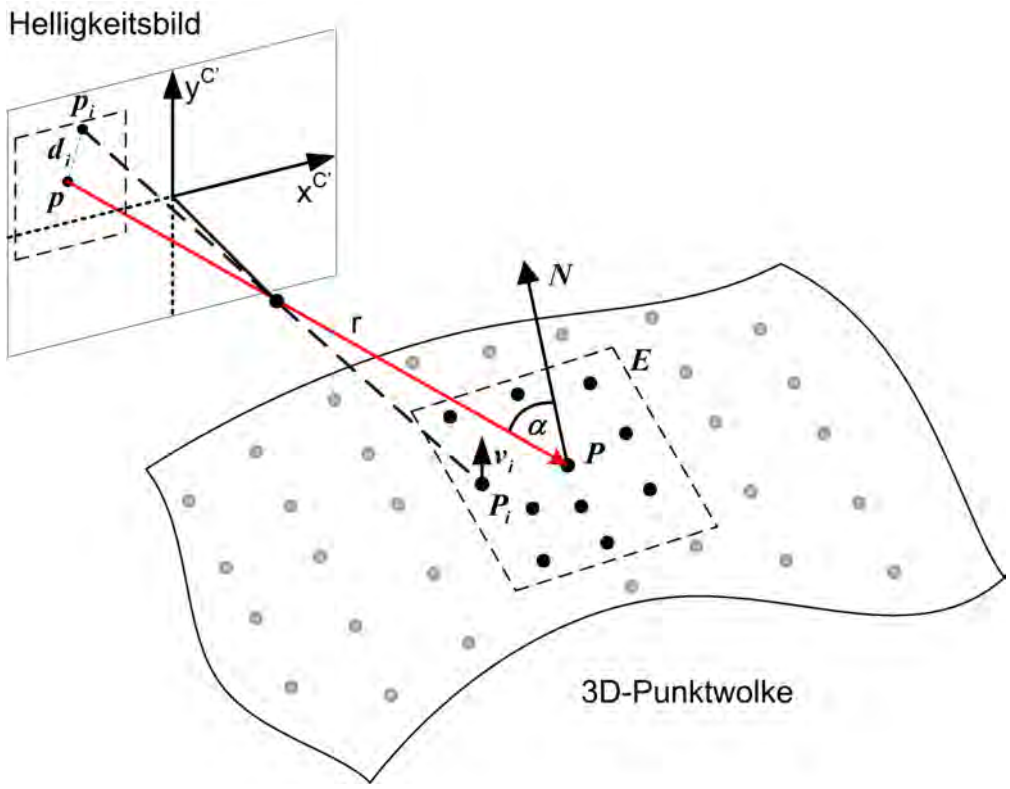


Abbildung 4.2: Tangentialebene eines Merkmalspunktes im 3D-Objektraum

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} d_i} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{n} d_i X_i \\ \sum_{i=1}^{n} d_i Y_i \\ \sum_{i=1}^{n} d_i Z_i \end{pmatrix} \tag{4.1}$$

mit

$$d_i = |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}| \tag{4.2}$$

den Distanzen im Bildraum zwischen den projizierten Punkten $\mathbf{p}_i$ und dem *initalen Merkmalspunkt* $\mathbf{p}$. Neben der 3D-Position wird aus den Punkten innerhalb der Maske die Tangentialebene E ermittelt. E wird mit $n > 3$ Punkten durch eine Ebenenausgleichung nach der Methode der Kleinsten-Quadrate geschätzt. Durch die Größe der Standardabweichung der Gewichtseinheit der Ebenenausgleichung wird die Planarität beurteilt. Der Betrachtungswinkel wird durch den Schnittwinkel der Ebenennormalen mit dem Richtungsvektor des Bildstrahls bestimmt. Die ausgleichende Ebene E ist in der Hesse'schen Normalform durch einen Punkt $\mathbf{P}$ auf der Ebene und dem Einheitsnormalenvektor $\mathbf{N}, |\mathbf{N}| = 1$ durch $E : \mathbf{N} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{P}) = 0$ definiert, wobei $\mathbf{X}$ einen beliebigen Punkt der Ebene repräsentiert. Weiter ist der lotrechte Abstand v_i eines Punktes $\mathbf{P}_i$ zur Ebene (vgl. Abbildung 4.2) mit $v_i = |\mathbf{N} \cdot (\mathbf{P}_i - \mathbf{P})|$ gegeben. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 der Ebenenausgleichung entspricht dem Maß der vorliegenden Rauigkeit β und lautet

$$\beta = \sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{v}}{n - u}} \tag{4.3}$$

mit $\mathbf{v}$ als Vektor der Residuen, die den Abständen von n Punkten entsprechen und u als Anzahl der Unbekannten (u=3). Der Betrachtungswinkel α zwischen dem Normalvektor $\mathbf{N}$ der Tangentialebene und dem Bildstrahl $\mathbf{r}$ des *initialen Merkmalspunktes* wird durch

$$\alpha = \sphericalangle(\mathbf{N}, \mathbf{r}) = \arccos\left(\frac{< \mathbf{N}, \mathbf{r} >}{|\mathbf{N}| \cdot |\mathbf{r}|}\right) \tag{4.4}$$

ermittelt. Der Schwellwert für β zur Prüfung der Planarität richtet sich nach der Oberflächentopographie der aufgenommenen Objektoberfläche innerhalb des zu berücksichtigenden Oberflächenbereiches. Für den Schwellwert α zur Prüfung des maximal zulässigen Betrachtungswinkels wird für eine ähnliche Anforderung

zur Generierung von *Spin images* (Kapitel 3.2.2) eine Größenordnung von 60 Grad empfohlen (Johnson und Hebert, 1998). Der Wert wird auch hier verwendet. Liegen α und β innerhalb der gewählten Schwellwerte, werden diese *akzeptierten Merkmalspunkte* im Weiteren maßstabs- und rotationsinvariant beschrieben.

4.1.2 Maßstabs- und rotationsinvariante Beschreibung der akzeptierten Merkmalspunkte

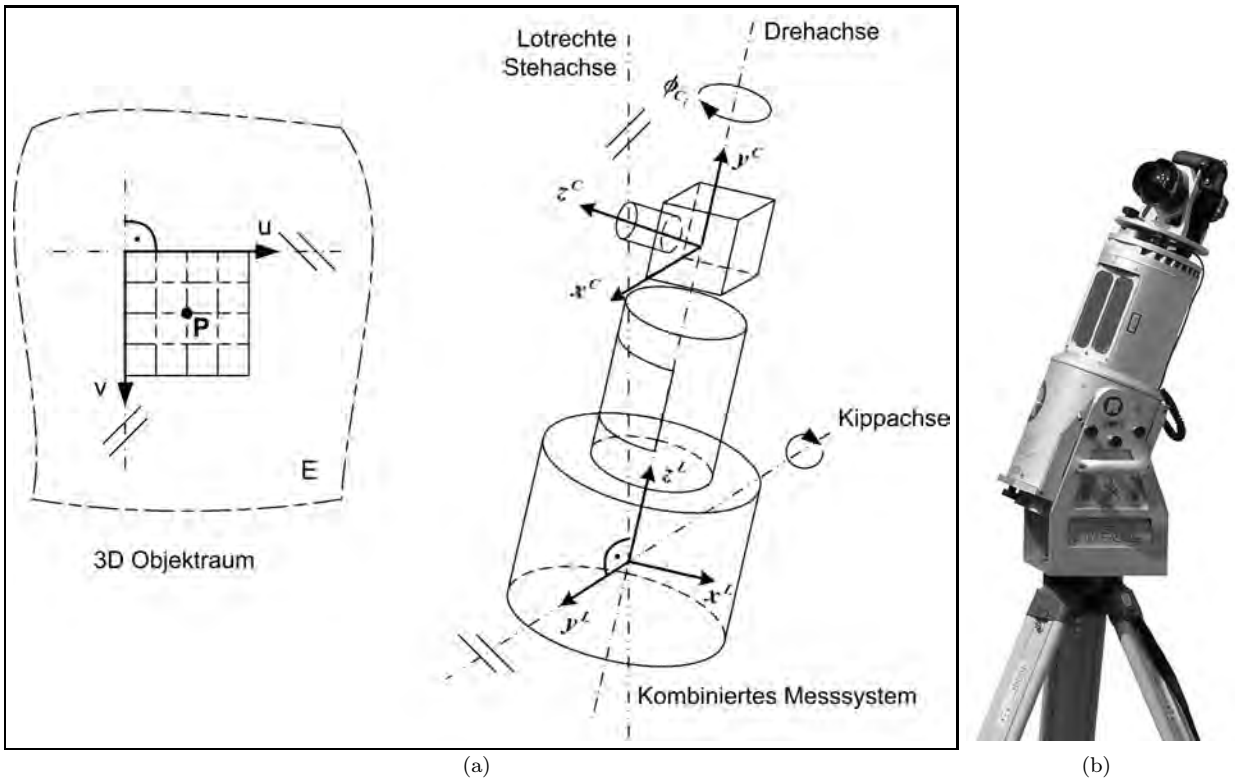
Die Merkmalsbeschreibung entspricht einem Bildausschnitt des Helligkeitsbildes, welcher auf der Tangentialebene des *akzeptierten Merkmalspunktes* im Objektraum entzerrt wird. Aufgrund der Merkmalsdefinition liegt im Objektraum ausreichend Planarität und Textur vor. Die beschreibenden Bildausschnitte werden für den Ähnlichkeitsvergleich in der Korrespondenzsuche herangezogen und daher das Bildraster jeweils in gleicher Größe definiert. Für die maßstabs- und rotationsinvariante Beschreibung ist es notwendig, dass die Bildausschnitte

- eine identische Auflösung besitzen
- und identisch im Objektraum ausgerichtet sind.

Die identische Auflösung wird durch einen konstanten Maßstabsfaktor m realisiert, der aus den unterschiedlichen Auflösungen ΔX_1, ΔX_2 der Helligkeitsbilder beider Aufnahmestandpunkte am Objekt ermittelt wird, durch:

$$m = \frac{\Delta X_1 + \Delta X_2}{2} \tag{4.5}$$

Die Auflösungen am Objekt sind in jedem Standpunkt bekannt, da sowohl die *Innere Orientierung* der Kamera als auch der Abstand zum Objekt durch das jeweilige Entfernungsbild gegeben ist. Für die identische Bildrasterausrichtung im Objektraum sind zusätzliche Kenntnisse über die Aufnahmesituation zu berücksichtigen, s. Abbildung 4.3. Für die einheitliche Bildrasterausrichtung wird die Tatsache genutzt, dass ein *kombiniertes Messsystem* bei der Aufnahme lotrecht steht und maximal um eine horizontale Achse gekippt wird. Nach dem in Abbildung 4.3 skizzierten Systemaufbau ist die Kippachse des Messsystems horizontal ausgerichtet.



(a) (b)

Abbildung 4.3: Das Prinzip der eindeutigen Bildrasterausrichtung im Objektraum. (a) Projektion der Kippachse des kombinierten Messsystems auf die Tangentialebene des akzeptierten Merkmalspunktes. (b) Beispiel eines gekippten kombinierten Messsystems (RIEGL Z420i).

Die Kippachse liefert die gemeinsame Ausrichtungsachse für die Bildraster. Dazu wird die Kippachse auf die Tangentialebene E projiziert und ergibt die Achse u, $(u \parallel y^L)$. Senkrecht dazu stellt v die zweite Achse des Bildrasters dar, $(v \perp u)$. Der Ursprung des Bildrasterkoordinatensystems ist in der oberen linken Ecke definiert, dessen Achsen orthogonal zueinander verlaufen. Durch die horizontale Ausrichtung der Kippachse beider Aufnahmestandpunkte reduzieren sich die Orientierungsparameter von ursprünglich sechs auf zwei Rotationen und drei Translationen. Innerhalb dieses reduzierten Parameterraums entsprechen die identisch ausgerichteten Bildausschnitte maßstabs- und rotationsinvarianten Merkmalsbeschreibungen. Das Zentrum des Bildausschnittes wird im Punkt **P** auf der Tangentialebene mit einer ungeraden Stützstellenanzahl definiert. Auf das Raster wird der korrespondierende Ausschnitt des Helligkeitsbildes entzerrt und resampled. Durch die entzerrten Bildausschnitte in adäquater Größe mit ausgeprägter Texturinformation wird eine zuverlässige Ähnlichkeitsbewertung *kandidierender Korrespondenzen* ermöglicht, die für die paarweise Korrespondenzsuche vorausgesetzt wird.

4.1.3 Paarweise Korrespondenzsuche

In diesem Abschnitt wird eine Strategie auf der Basis der `RANSAC`-Methode für das Auffinden *konsistenter Korrespondenzen* beschrieben, die aus den Merkmalspunktlisten der beiden Standpunkte gewonnen werden, s. Abbildung 4.1.

Zuerst werden die Korrespondenzen mit der höchsten Ähnlichkeit anhand der Merkmalsbeschreibungen ermittelt. Dabei wird von jedem Merkmalspunkt der ersten Liste die Ähnlichkeit zu jedem Merkmalspunkt der zweiten Liste ermittelt. Die Kombination mit der höchsten Ähnlichkeit entspricht einer *initialen Korrespondenz*, die einen potentiellen Kandidaten für eine *konsistente Korrespondenz* darstellt. Aufgrund von möglichen Mehrdeutigkeiten in den Merkmalsbeschreibungen können *initiale Korrespondenzen* auch keinen *konsistenten Korrespondenzen* entsprechen. Auch gilt, dass je höher die Ähnlichkeit des initialen Merkmalspaares ist, desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine *konsistente Korrespondenz* handelt. Daher werden die *initialen Korrespondenzen* nach ihrer Ähnlichkeit sortiert und nur die Korrespondenzen für die initiale Orientierungsbestimmung in der `RANSAC`-Methode verwendet, die eine maximale Ähnlichkeit aufweisen. Der Schwellwert für die maximale Ähnlichkeit ist in Abhängigkeit der Merkmalsbeschreibungen zu wählen, sodass genügend *initiale Korrespondenzen* für die Prozessierung mit der `RANSAC`-Methode zur Verfügung stehen.

Ähnlichkeitsmaß kandidierender Merkmalspaare

Für die Quantifizierung der Ähnlichkeit kandidierender Korrespondenzen wird ein Maß eingeführt, welches auf der Grundlage der Merkmalsbeschreibung berechnet wird. Die Berechnung der Ähnlichkeit geschieht mit Hilfe der entzerrten Bildausschnitte der Merkmalsbeschreibungen *akzeptierter Merkmalspunkte*. Aufgrund ihrer gleichen Größe und Auflösung, sowie identischer Bildrasterausrichtung sind die Ausschnitte direkt miteinander vergleichbar. Die Ähnlichkeit wird durch den Kreuzkorrelationskoeffizienten $\rho_{fc} \in [-1, 1]$ bestimmt, der die radiometrische Ähnlichkeit der Bildausschnitte quantifiziert, s. Kapitel 3.3.

Konsistente Korrespondenzerkennung

Die Korrespondenzerkennung aus den Merkmalspunktlisten beider Aufnahmestandpunkte erfolgt nach der `RANSAC`-Methode. Die Methode wird dahingehend modifiziert, dass für die zufällige Auswahl der minimalen Anzahl von Beobachtungen die *initialen Korrespondenzen* mit dem definierten Mindestmaß an Ähnlichkeit herangezogen werden, wie sie im vorherigen Abschnitt erläutert wurden. Es werden somit nicht beliebige Kombinationen zwischen den Merkmalspunktlisten verwendet, sondern nur eine Auswahl von drei *initialen Korrespondenzen* einbezogen, aus denen die Orientierungsparameter bestimmt werden, s. Abschnitt 4.1.4.

Zur Beurteilung der aktuellen Iteration innerhalb der Methode werden mit Hilfe der berechneten Orientierungsparameter alle Merkmalspunkte der Aufnahmestandpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und für jeden Merkmalspunkt des ersten Aufnahmestandpunktes der nächstgelegenen Merkmalspunkt des zweiten Aufnahmestandpunktes gesucht. Die Beurteilung wird damit unabhängig von den bestehenden *initialen Korrespondenzen* vorgenommen. Durch die *Euklidische Distanz* zwischen den Punkten und einem definierten Schwellwert wird dessen Konsistenz geprüft. Anhand der Anzahl der *konsistenten Korrespondenzen* wird die Lösung der aktuellen Iteration beurteilt. Die Iteration innerhalb der Korrespondenzerkennung mit der höchsten Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* entspricht dem Ergebnis. Aus den *konsistenten Korrespondenzen* werden abschließend die Orientierungsparameter zwischen den Aufnahmestandpunkten durch eine Kleinste-Quadrate Ausgleichung bestimmt, auf die im Folgenden eingegangen wird.

4.1.4 Orientierungsbestimmung

Die Merkmalspunkte der *konsistenten Korrespondenzen* liegen in zwei unterschiedlichen Standpunktkoordinatensystemen vor. Das Koordinatensystem des ersten Aufnahmestandpunktes entspricht dem Startsystem, das Koordinatensystem des zweiten Aufnahmestandpunktes dem Zielsystem. Die Orientierungsparameter werden aus den *konsistenten Korrespondenzen* durch eine vermittelnde Ausgleichung, eine 3D-Helmert-Transformation ohne Maßstab, bestimmt. Sie beschreibt die Transformation zwischen den Koordinatensystemen durch drei Translationen $\mathbf{T}(t_X, t_Y, t_Z)$ zum Ursprung des Startsystems und drei Rotationen $\mathbf{R}(r_{11}, r_{12}, \cdots, r_{33})$ um die Koordinatenachsen des Startsystems. Die Transformation eines Punktes i vom Startsystem $P_{S_i}(X_S, Y_S, Z_S)$ in das Zielsystem $P_{Z_i}(X_Z, Y_Z, Z_Z)$ lautet:

$$P_{Z_i} = \mathbf{T} + \mathbf{R} \cdot P_{S_i} \tag{4.6}$$

Jede *konsistente Korrespondenz* liefert somit drei Verbesserungsgleichungen

$$\begin{aligned} \hat{v}_{X_{Z_i}} &= X_{Z_i} - (\hat{t}_X + \hat{r}_{11} \cdot X_{S_i} + \hat{r}_{12} \cdot Y_{S_i} + \hat{r}_{13} \cdot Z_{S_i}) \\ \hat{v}_{Y_{Z_i}} &= Y_{Z_i} - (\hat{t}_Y + \hat{r}_{21} \cdot X_{S_i} + \hat{r}_{22} \cdot Y_{S_i} + \hat{r}_{23} \cdot Z_{S_i}) \\ \hat{v}_{Z_{Z_i}} &= Z_{Z_i} - (\hat{t}_Z + \hat{r}_{31} \cdot X_{S_i} + \hat{r}_{32} \cdot Y_{S_i} + \hat{r}_{33} \cdot Z_{S_i}) \end{aligned} \tag{4.7}$$

die zur Bestimmung der Orientierungsparameter nach der Methode der Kleinsten-Quadrate verwendet werden. Wird die Rotationsmatrix durch Quaternionen bzw. durch ein Einheitsquaternion (McGlone, 2004, S. 49) dargestellt, entsprechen die resultierenden Verbesserungsgleichungen (4.7) bilinearen Funktionen. Die Definition der Rotationsmatrix durch ein Einheitsquaternion ist eindeutig und es treten keine Singularitäten auf. Im Gegensatz zu der Repräsentation der Rotationsmatrix durch Eulerwinkel, lassen sich bei der Repräsentation durch ein Einheitsquaternion die zu schätzenden Orientierungsparameter von beliebigen initialen Startwerten bestimmen. Eine Ausnahme stellen initiale Startwerte dar, die einer Spiegelung der Punkttripel des Startsystems zum Zielsystem entsprechen, also einer Verdrehung von genau 180° um mindestens eine Rotationsachse (s. Abbildung 4.4). In diesem Fall wird keine bzw. eine fehlerhafte Lösung gefunden.

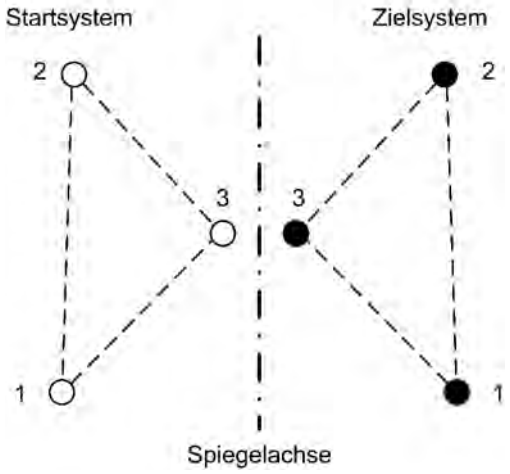


Abbildung 4.4: Gespiegelte Punkttripel als Sonderfall der initialen Rotationsparameter zur Orientierungsbestimmung

Die Güte der Näherungswerte wirkt sich somit nur auf die Anzahl der Iterationen der Lösung aus. Für die im vorherigen Kapitel angesprochene Orientierungsbestimmung aus drei *initialen Korrespondenzen* wird als Näherungswert für die Rotationsmatrix, die für das iterative Lösungsschema der Kleinsten-Quadrate Methode benötigt werden, die Einheitsmatrix verwendet. Es wird vorausgesetzt, dass die Einheitsmatrix die initiale Rotationsmatrix adäquat approximiert, da im betrachteten Fall von Datensätzen terrestrischer *kombinierter Messsysteme* die Blickrichtung (initiale Rotation) in den einzelnen Aufnahmestandpunkten jeweils zum Objekt gerichtet ist. Durch die „ähnliche“ Ausrichtung sind geringe Änderungen in den Rotationsparametern zwischen den Aufnahmestandpunkten zu erwarten. Alternativ bieten direkte Lösungen (sog. *closed-form solutions*), die ohne Iterationen und ohne Näherungswerte für die Rotationsparameter auskommen eine weitere Lösungsmöglichkeit. Sie sind für den Fall von drei Punktkorrespondenzen z.B. von Horn (1987), Wang und Jepson (1994) publiziert worden.

Weiter ist zu erwähnen, dass durch die minimale Anzahl an korrespondierenden Punkten Singularitäten im Normalgleichungssystem auftreten können, z.B. wenn die drei Punkte auf einer Linie liegen und damit die Bestimmung der Orientierungsparameter nicht lösbar ist. Innerhalb der `RANSAC`-Methode wird diese Iteration dann abgebrochen und eine neue zufällige Auswahl von *initialen Korrespondenzen* ermittelt.

Für die endgültige Bestimmung der Orientierungsparameter aus allen ermittelten *konsistenten Korrespondenzen* werden die Näherungswerte der Iteration aus der Lösung der RANSAC-Methode verwendet. Für eine robuste Orientierungsbestimmung werden deutlich mehr als drei ($i \gg 3$) *konsistente Korrespondenzen* und dessen gleichmäßige Verteilung im gesamten Überlappungsbereich der Aufnahmestandpunkte angestrebt.

4.1.5 Diskussion

Das vorgestellte merkmalsbasierte Konzept entspricht einem Rahmen zur objektraumbasierten Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten *kombinierter Messsysteme* und kommt ohne Näherungswerte für die Orientierungsparameter aus. Das Helligkeits- und Entfernungsbild eines Standpunktes wird zur Detektion und Beschreibung der Merkmalspunkte simultan verwendet. Die Schwellwerte für die Merkmalsdetektion und Merkmalsbeschreibung sowie die Schwellwerte für die paarweise Korrespondenzfindung werden abhängig von dem verwendeten Datensatz gewählt. In der Methode wird die Eigenschaft eines *kombinierten Messsystems*, die durch Kalibrierung bekannten Orientierungsparameter zwischen der photogrammetrischen Kamera und dem 3D-Laserscanner, genutzt, um robust und mit einer einfachen Merkmalspunktbeschreibung die Orientierungsparameter zwischen zwei Aufnahmestandpunkten zu bestimmen. Es ist anzumerken, dass Helligkeitsbildern, die in der Regel eine höhere Auflösung und ein geringeres Bildrauschen aufweisen, der Vorzug gegeben wird, sich aber grundsätzlich auch das Intensitätsbild des 3D-Laserscanners für die Prozessierung eignet. Eine mögliche simultane Verwendung beider radiometrischer Bilder wird aufgrund der geringeren Auflösung des Intensitätsbildes weder für die Merkmalsdetektion noch für die Merkmalsbeschreibung durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Prozessierungsschritte ergänzend bewertet und hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit diskutiert.

Detektion der Merkmalspunkte: Durch das Ausschließen von Merkmalspunkten außerhalb geometrisch planarer Objektoberflächenbereiche haben auftretende Fehler in den Entfernungsbildern entlang von Ecken und Kanten einer Objektoberfläche keinen Einfluss auf die Lösung der Orientierungsaufgabe.

Für die Detektion von Merkmalspunkten im Helligkeitsbild wird vorgeschlagen Interest-Operatoren in der dargestellten Form, wie z.B. den Förstner-Operator oder SUSAN-Operator, mit einer Detektionsgenauigkeit von einem Pixel einzusetzen, wodurch das Verfahren aber von vornherein auf eine pixelgenaue Merkmalspunktzuordnung eingeschränkt wird. Die Einschränkung wirkt sich proportional zum Bildmaßstab auf die Bestimmung der 3D-Position im Objektraum aus und nimmt somit auch Einfluss auf den entzerrten Bildausschnitt der Merkmalsbeschreibung. Zur Minimierung der genannten Genauigkeitseinschränkungen kann für die Merkmalsdetektion ein Interest-Operator mit Subpixelgenauigkeit verwendet werden.

Merkmalsbeschreibung: Für die Entzerrung des Bildausschnittes auf der Tangentialebene im Objektraum wird vorausgesetzt, dass die Objektoberfläche planar ist. Streng genommen kann diese Voraussetzung bei einer Freiformoberfläche nicht erfüllt werden. Der Ausschnitt approximiert somit lediglich ein Orthophoto und stellt damit eine Ungenauigkeit in der Merkmalsbeschreibung dar. Abhilfe schafft die lokale Modellierung der Objektoberfläche mit Hilfe der geometrischen Informationen des Entfernungsbildes und einer anschließenden differentiellen Entzerrung des Bildausschnittes. Der differentiell entzerrte Bildausschnitt entspricht dann einem Orthophoto.

Die maßstabs- und rotationsinvariante Beschreibung der Merkmale durch einen entzerrten Bildausschnitt ist nur möglich, wenn eine identische Bildrasterausrichtung realisiert werden kann. Die Merkmalsbeschreibung ist somit nur bedingt flexibel und abhängig von dem verwendeten Messsystem realisierbar. Um die Merkmalsbeschreibung zu verallgemeinern, wird auf die genannten Verfahren in Kapitel 3 (z.B. Lowe (2004), Bay (2006)) verwiesen, die maßstabs- und rotationsinvariante Merkmalspunktbeschreibungen im vollständigen 6-Parameterraum durch eine umfangreiche Prozessierung vorstellen. Mit diesen Verfahren lassen sich allerdings nicht die Eigenschaften von *kombinierten Messsystemen* bzw. die Aufnahmesituation bei der Datenerfassung zur Reduzierung des Parameterraums adäquat berücksichtigen.

Ähnlichkeitsmaß kandidierender Merkmalspaare: Der verwendete Kreuzkorrelationskoeffizient ist als Ähnlichkeitsmaß streng genommen nur dann geeignet, wenn keine Maßstabsunterschiede und Rotationen in den Bildausschnitten auftreten. Abweichungen zu den Forderungen führen zu einem geringeren Korrelationskoeffizienten und damit zu Ungenauigkeiten in der Interpretation des Ähnlichkeitsmaßes. Die Effekte, die durch die Approximation des Orthophotos durch den entzerrten Bildausschnitt auftreten können, lassen sich wie in Kapitel 3.3 z.B. durch eine 6-Parameter-Affin-Transformation minimieren. Dadurch, dass keine Reflexionsfunktion berücksichtigt wird verursachen Glanzlichter und Kontrastunterschiede Ungenauigkeiten bzw. ein fehlerhaftes Ähnlichkeitsmaß.

Auch soll zur Diskussion gestellt werden, dass für die Beurteilung der Ähnlichkeit in diesem Ansatz nur eine lokale Merkmalsbeschreibung verwendet wird. Ergänzend können weitere lokale Beschreibungen (z.B. mit Hilfe des Intensitätsbildes) einbezogen werden oder zusätzlich globale Merkmalsbeschreibungen (z.B. die relative Beziehung von Merkmalspunkten) formuliert werden.

Paarweise Korrespondenzsuche: Für die paarweise Korrespondenzsuche wird mit Hilfe der Merkmalsbeschreibung und der Größe des Ähnlichkeitsmaßes eine Vorauswahl getroffen, die zur Bestimmung der *konsistenten Korrespondenzen* genutzt wird. Diese Maßnahme stellt eine Beschleunigung der Korrespondenzsuche innerhalb der verwendeten `RANSAC`-Methode dar. Es soll aber darauf hingewiesen werden, dass diese Spezifikation auch eine Einschränkung darstellen kann: Zum einen werden nur die *initialen Korrespondenzen* und Merkmalskombinationen mit einem definierten Mindestmaß an Ähnlichkeit für die zufällige Auswahl der minimalen Anzahl von Beobachtungen verwendet, wodurch auch ggf. mögliche *konsistente Korrespondenzen* ausgeschlossen werden, und zum anderen werden die Datensätze, bei denen selbst die *initialen Korrespondenzen* mit der höchsten Ähnlichkeit nur einen geringen Ähnlichkeitswert aufweisen, unzuverlässig prozessiert. Der zuletzt genannte Fall kann nur durch zusätzliche Merkmalsbeschreibungen aufgefangen werden, wofür sich dann Verfahren wie z.B. das *Relationale Matching* besser für die Korrespondenzsuche eignen.

4.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung

In diesem Kapitel wird eine Methode zur flächenhaften Orientierung multisensoraler Bilddaten vorgestellt. Die Methode entspricht einem allgemeinen Ansatz zur simultanen Orientierung von Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern von photogrammetrischen Kameras, 3D-Laserscannern und *kombinierten Messsystemen* und basiert auf dem Prinzip der objektraumbasierten Mehrbildzuordnung nach der Methode der Kleinsten-Quadrate (vgl. Kapitel 3.3.1). Die Bildstrahlen der Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder werden simultan in der Ausgleichung zur Orientierungsbestimmung verwendet. In dem Ansatz wird neben der Orientierungsbestimmung auch die Objektoberfläche simultan rekonstruiert. Für die Prozessierung wird angenommen, dass sowohl Näherungswerte für die *Äußeren Orientierungen* der Aufnahmestandpunkte, als auch Näherungswerte für die Objektoberfläche vorliegen.

Im Folgenden wird das funktionale Modell hergeleitet und der Ausgleichungsansatz zur Bestimmung der Orientierungsparameter und den Parametern der Objektoberfläche erläutert. Im Ausgleichungsansatz werden die Unbekannten definiert, die Linearisierung der Verbesserungsgleichungen und die Lösung der Normalgleichungen nach der Methode der Kleinsten-Quadrate diskutiert. Des Weiteren wird die Vorgehensweise bei der Homogenisierung der einzelnen Beobachtungsgruppen und die Beseitigung des Rangdefekts durch die Datumsfestlegung beschrieben.

4.2.1 Funktionales Modell

Zur Beschreibung des funktionalen Modells sind die Modellierung des Objektraumes mit der Definition der Oberfläche, ihrer überlagerten Bildsignale sowie die sensorspezifischen Abbildungsfunktionen zwischen den Objektraum und Bildraum einzuführen, vgl. Abbildung 4.5.

Die Abbildung 4.5 zeigt einen Ausschnitt der Objektoberfläche Z^S im Objektraum. Ein Oberflächenelement an der Stelle X^S, Y^S enthält neben dem Z^S-Wert einen Helligkeitswert G und einen Intensitätswert I. Das Oberflächenelement wird über die sensorspezifischen Abbildungsfunktionen in den Bildräumen der Sensoren abgebildet. Als Sensoren werden polarabbildende 3D-Laserscanner und zentralperspektive photogrammetrische Kameras berücksichtigt.

4.2.1.1 Repräsentation im Objektraum

Für die Repräsentation im Objektraum werden insgesamt vier Koordinatensysteme sowie die Darstellungen der Objektraummodelle eingeführt, deren Definitionen und Beziehungen in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Koordinatensysteme im Objektraum

Die zu berücksichtigenden vier Koordinatensysteme lauten:

- Objektraumkoordinatensystem $[X, Y, Z]$
- Patchkoordinatensystem $[X^S, Y^S, Z^S]$
- Rasterkoordinatensystem der Objektoberfläche $[X_i, Y_j]$

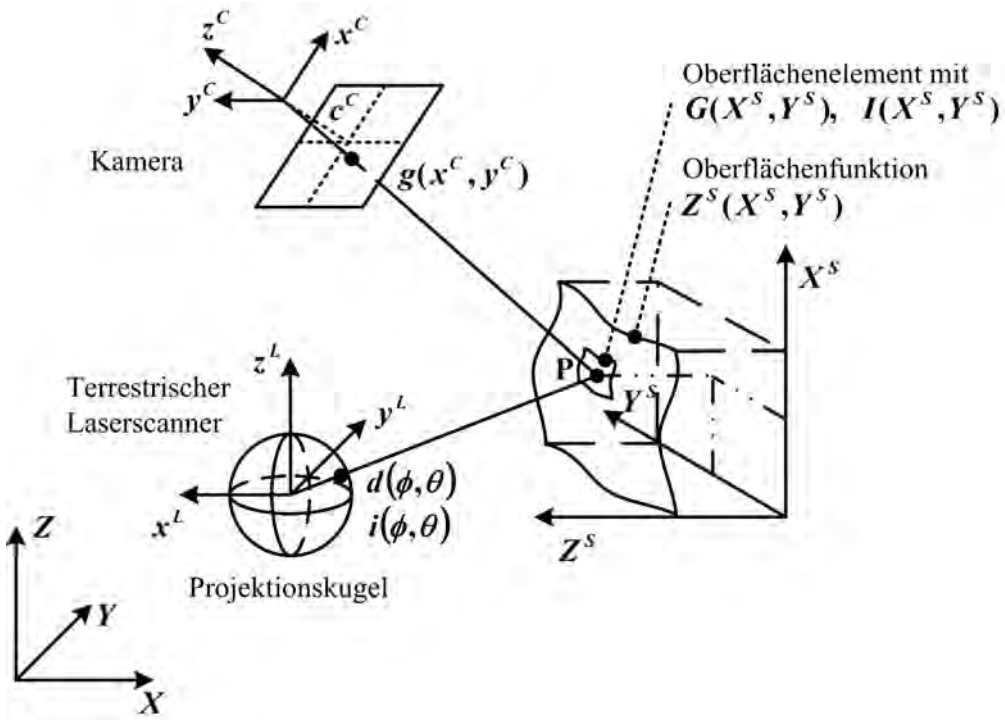


Abbildung 4.5: Parameter des funktionalen Modells

- Rasterkoordinatensystem pro überlagertes Bildsignal $[X_k, Y_l]$

Der dreidimensionale Objektraum ist im Objektraumkoordinatensystem $[X, Y, Z]$ definiert und stellt das zentrale Koordinatensystem dar. Es entspricht einem kartesischen Koordinatensystem. Der Ursprung des Rechtssystems sowie dessen Achsenausrichtung ist in der Regel am Objekt definiert oder durch einen Aufnahmestandpunkt vorgegeben. Auf $[X, Y, Z]$ beziehen sich die *Äußeren Orientierungen* der Sensorstandpunkte sowie die Objektoberfläche.

Das Patchkoordinatensystem $[X^S, Y^S, Z^S]$ ist ebenfalls ein dreidimensionales, kartesisches Rechtssystem. Jeder Oberflächenausschnitt wird in einem individuellen Patchkoordinatensystem dargestellt, das aufgrund der Wahl des Oberflächenausschnittes im Objektraum definiert ist. Die Notwendigkeit individueller Patchkoordinatensysteme wird bei der Einführung und der simultanen Betrachtung mehrerer Oberflächenausschnitte deutlich, s. Abbildung 4.7. Der Bezug des Patchkoordinatensystems zum dreidimensionalen Objektraumkoordinatensystem ist durch eine 3D-Helmert-Transformation ohne Maßstab gegeben:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \mathbf{T} + \mathbf{R} \begin{pmatrix} X^S \\ Y^S \\ Z^S(X^S, Y^S) \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

$\mathbf{T}$ enthält 3 Translationen und $\mathbf{R}$ 3 Rotationen, die per Definition des Patchkoordinatensystems im Objektraum bekannt sind.

Die Objektoberfläche wird durch ein Raster mit $I \times J$ Stützstellen diskretisiert und im Rasterkoordinatensystem $[X_i, Y_j]$ angegeben. Es ist ein zweidimensionales Koordinatensystem in der X^S, Y^S-Ebene des Patchkoordinatensystems. Der Ursprung des Rasterkoordinatensystems liegt im Ursprung des Patchkoordinatensystems. Die Achse X_i verläuft in Richtung der X^S Achse und Y_j in Richtung der Y^S Achse. Jede ganzzahlige Koordinate $(X_i, Y_j); X_i = 0, 1, \ldots, I-1; Y_j = 0, 1, \ldots, J-1; X_i, Y_j \in \mathbb{N}_0$ entspricht der Position einer Rasterstützstelle. Beliebige Positionen innerhalb des Rasters werden durch die Koordinaten $(X_i, Y_j); X_i \in [0, I-1]; Y_j \in [0, J-1]$ ausgedrückt. Die Transformation vom Rasterkoordinatensystem der Objektoberfläche in das Patchkoordinatensystem des Oberflächenausschnittes lautet:

$$\begin{matrix} X^S \\ Y^S \end{matrix} = \begin{matrix} m_i \cdot X_i \\ m_j \cdot Y_j \end{matrix} \tag{4.9}$$

Mit dem Skalar m_i in Koordinatenrichtung X_i und dem Skalar m_j in Richtung Y_j. Die Skalare geben die Größe des Rasterstützstellenabstandes in Richtung der entsprechenden Koordinatenachsen an.

Die unterschiedlichen Rasterkoordinatensyteme der überlagerten Bildsignale des Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildes der Objektoberfläche werden im Rahmen der Herleitung stellvertretend durch ein

Raster mit $K \times L$ Stützstellen im Rasterkoordinatensystem $[X_k, Y_l]$ dargestellt. Der Ursprung des Rasterkoordinatensystems liegt auch hier im Ursprung des Patchkoordinatensystems. Die Achsen X_k, Y_l verlaufen kollinear zu X^S, Y^S. Jede Position $(X_k, Y_l); X_k = 0, 1, \ldots, K-1; Y_l = 0, 1, \ldots, L-1; X_k, Y_l \in \mathbb{N}_0$ entspricht ganzzahligen Koordinaten einer Rasterstützstelle.

Die Beziehung des Rasterkoordinatensystems der überlagerten Bildsignale zum Patchkoordinatensystem wird durch den Skalar m_k in Richtung X_k und den Skalar m_l in Richtung Y_l hergestellt und lautet:

$$\begin{array}{c} X^S \\ Y^S \end{array} = \begin{array}{c} m_k \cdot X_k \\ m_l \cdot Y_l \end{array} \tag{4.10}$$

Die Skalare geben wiederum die Größe des Rasterstützstellenabstandes in Richtung der entsprechenden Koordinatenachsen an.

Darstellung der Objektraummodelle

Im Folgenden werden die geometrische Oberflächenfunktion durch die Finite-Elemente-Methode sowie die Rasterstützstellen der überlagerten Bildsignale dargestellt, s. Abbildung 4.6. Im Gegensatz zur flächenhaften Beschreibung der geometrischen Objektoberfläche werden die Bildsignale nicht als Fläche sondern durch ein Stützstellenraster repräsentiert. Eine flächenhafte Beschreibung ist nicht notwendig, da die Abbildungsfunktionen der Bildsignale zwischen Objektraum und Bildraum an den Knotenpunkten (ganzzahligen Koordinaten der Stützstellen im Rasterkoordinatensystem $[X_k, Y_l]$) formuliert werden (s. Kapitel 4.2.1.2) und im Ausgleichungsansatz die Ableitungen der Bildsignale im Bildraum formuliert werden (s. Kapitel 4.2.2).

In Abbildung 4.6 (a) ist ein geometrisches Raster von 5×5 Stützstellen dargestellt. Zur Bestimmung der Objektoberfläche (Funktionswerte der Rasterstützstellen) innerhalb der Ausgleichung werden in diesem Fall 3×3 Stützstellen eines Bildsignales, welche innerhalb eines geometrischen Rasterelementes der Objektoberfläche liegen, verwendet. Positionen auf der Oberfläche innerhalb eines Rasterelementes werden durch die Bilinearinterpolation beschrieben, s. Abbildung 4.6 (b). Der Funktionswert lässt sich, analog zu Gleichung (2.2) für einen Punkt innerhalb des Bildrasters, an der Stelle (X_k, Y_l) innerhalb des Rasterelementes aus den vier umliegenden Stützstellen interpolieren und lautet:

$$Z^S(X_k, Y_l) = a_{i,j} Z^S_{i,j} + a_{i,j+1} Z^S_{i,j+1} + a_{i+1,j} Z^S_{i+1,j} + a_{i+1,j+1} Z^S_{i+1,j+1} \tag{4.11}$$

mit den Faktoren

$$\begin{array}{lcl} a_{i,j} & = & (1 - dX)(1 - dY) \\ a_{i,j+1} & = & (1 - dX)dY \\ a_{i+1,j} & = & dX(1 - dY) \\ a_{i+1,j+1} & = & dX \cdot dY \end{array} \tag{4.12}$$

und $dX = X_k - X_i, dY = Y_l - Y_j$ an den Stützstellen $Z^S_{i,j}, \ldots, Z^S_{i+1,j+1}$. (X_k, Y_l) entspricht der Position (k, l), die durch die Gleichung (4.10) ins Rasterkoordinatensystem der Objektoberfläche überführt wird. Die Summe der Flächenanteile $a_{i,j}, \ldots, a_{i+1,j+1}$ ist gleich 1.

Die Größe der Skalare m_k und m_l, die dem Rasterstützstellenabstand der Bildsignale entsprechen, werden in Abhängigkeit des mittleren Bildmaßstabes $\bar{m}_b$ der zu berücksichtigenden Helligkeitsbilder und der mittleren Pixelgröße $\Delta\bar{x}'$ in Richtung der ins Bild projizierten k-Achse und $\Delta\bar{y}'$ in Richtung der ins Bild projizierten l-Achse ermittelt:

$$\begin{array}{l} m_k = \bar{m}_b \cdot \Delta\bar{x}' \\ m_l = \bar{m}_b \cdot \Delta\bar{y}' \end{array} \tag{4.13}$$

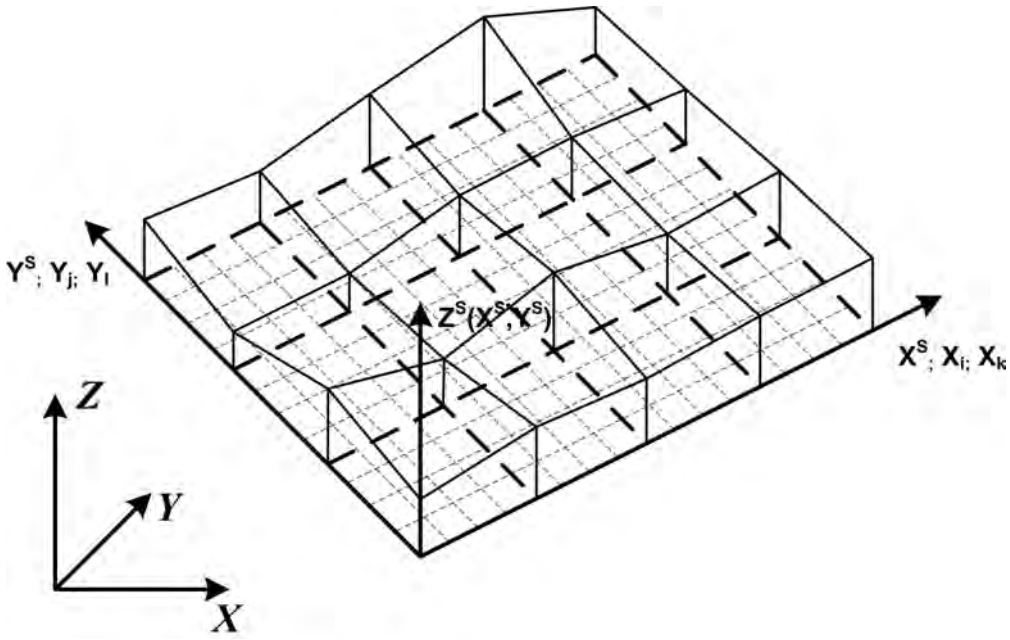
Analog dazu werden die Größen aus den Entfernungs- und Intensitätsbildern durch die mittleren Winkelinkremente $\Delta\bar{\phi}$ und $\Delta\bar{\theta}$ sowie der mittleren Entfernung $\bar{d}$ nach der Bogenformel ermittelt:

$$\begin{array}{l} m_k = \bar{d} \cdot \Delta\bar{\phi} \\ m_l = \bar{d} \cdot \Delta\bar{\theta} \end{array} \tag{4.14}$$

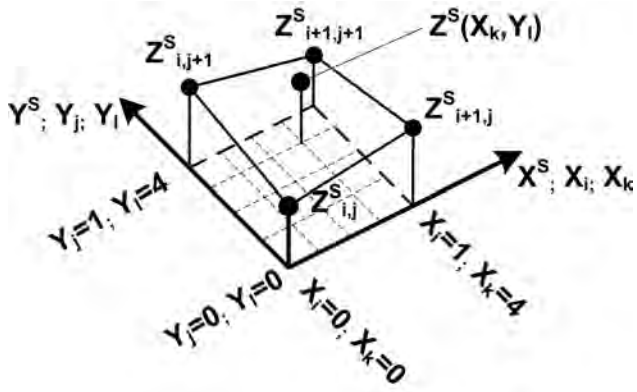
Im Allgemeinen ist $m_k = m_l$ zu setzen, da die originären Bilddaten in der Regel eine identische Auflösung in Zeilen- und Spaltenrichtung aufweisen.

Die eingeführten Maßstäbe m_i und m_j zur Transformation vom Rasterkoordinatensystem $[X_i, Y_j]$ zum Patchkoordinatensystem $[X^S, Y^S, Z^S]$ ergeben sich aus der Anzahl und dem Abstand der Rasterstützstellen innerhalb eines geometrischen Rasterelements im Finite-Elemente-Modell. Es gilt:

$$\begin{array}{l} m_i = m_k \cdot (n - 1) \\ m_j = m_l \cdot (m - 1) \end{array} \tag{4.15}$$



(a)



(b)

Abbildung 4.6: Diskretisierung durch ein Finite-Elemente-Modell. (a) Raster der Objektoberfläche $[X_i, Y_j]$ und das Raster der überlagerten Bildsignale $[X_k, Y_l]$. (b) Einzelnes Rasterelement der geometrischen Oberfläche mit $n \times m$ Rasterstützstellen eines überlagerten Bildsignals (n=5, m=5).

mit n der Anzahl der Rasterstützstellen in Richtung der X_k-Achse und m der Anzahl der Rasterstützstellen in Richtung der Y_l-Achse.

Repräsentation durch mehrere Oberflächenausschnitte

Bisher ist die Beschreibung der Objektoberfläche auf einen Ausschnitt durch ein Finite-Elemente-Modell begrenzt, vgl. Abbildung 4.5. Für große und komplexe Objektoberflächen werden im Weiteren mehrere Ausschnitte eingeführt, die im Rahmen der Auswertung simultan berücksichtigt werden können, s. Abbildung 4.7. Neben den mehrfachen Ausschnitten ist die Aufnahmekonstellation von zwei Kamerastandpunkten und einem Laserscannerstandpunkt dargestellt, wie sie beispielsweise im Rahmen einer Auswertung vorliegen kann. In Abbildung 4.7 wird die simultane Verknüpfung der Bilddaten zu mehreren Oberflächenausschnitten

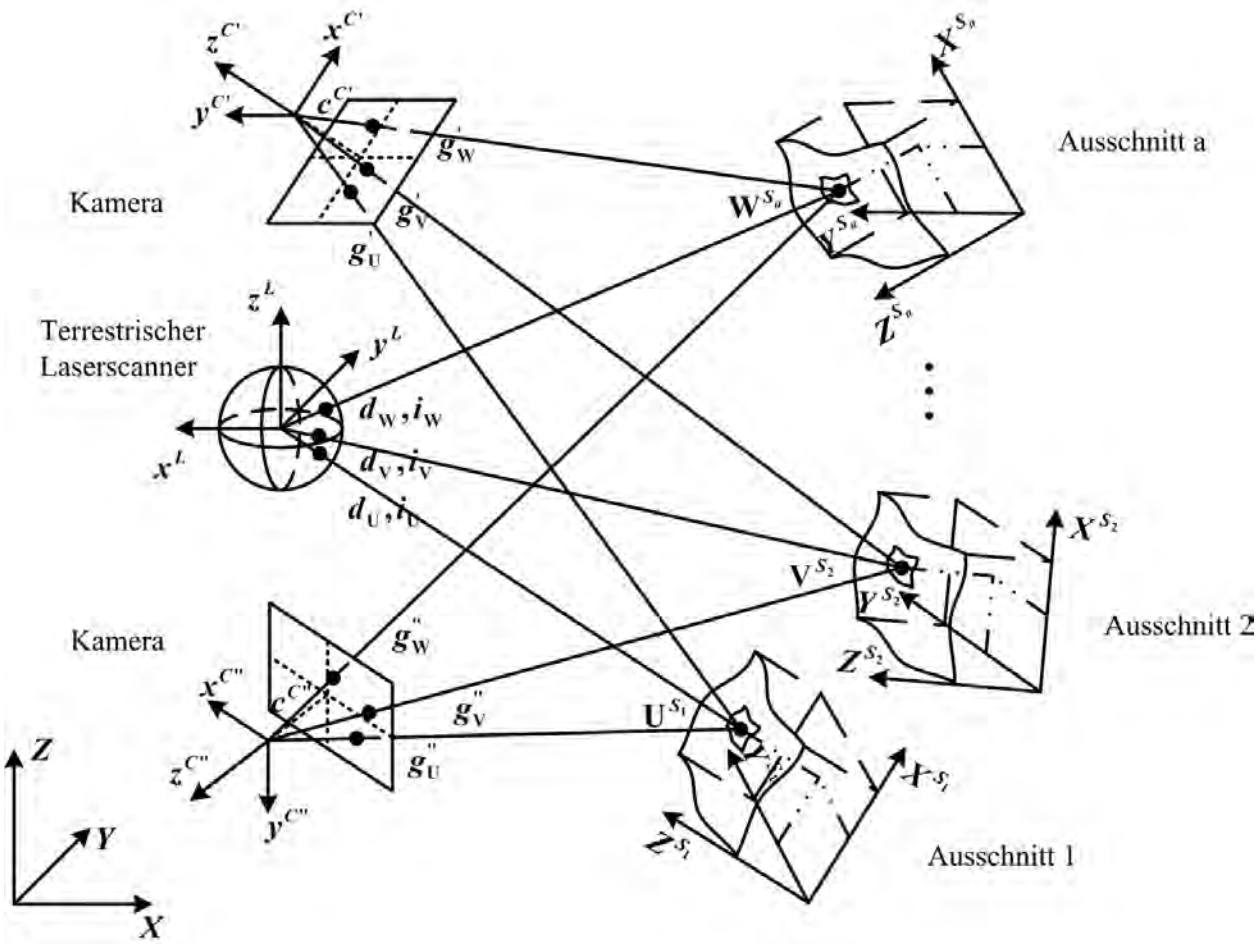


Abbildung 4.7: Simultane Verwendung mehrfacher Oberflächenausschnitte

demonstriert, was durch die Punkte $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ mit ihren korrespondierenden Bildpunkten verdeutlicht ist.

Jeder Ausschnitt p, mit $p = 1, \ldots a; p \in \mathbb{N}$, repräsentiert einen Teil der Objektoberfläche im Patchkoordinatensystem $[X^{S_p}, Y^{S_p}, Z^{S_p}]$. Der Bezug des Patchkoordinatensystems zum Objektraumkoordinatensystem ist per Definition durch $\mathbf{T}^{S_p}$ und $\mathbf{R}^{S_p}$ gegeben. Dazu werden jeweils die Oberflächenelemente vom individuellen Patchkoordinatensystem in das gemeinsame Objektraumkoordinatensystem überführt. Damit lautet beispielsweise die Transformation des Punktes V^{S_2} vom zweiten Patchkoordinatensystem $[X^{S_2}, Y^{S_2}, Z^{S_2}]$ zum Objektraumkoordinatensystem wie folgt:

$$\mathbf{V} = \mathbf{T}^{S_2} + \mathbf{R}^{S_2} \cdot \mathbf{V}^{S_2} \tag{4.16}$$

Die Größe und Ausrichtung eines Oberflächenausschnittes kann individuell gewählt werden.

4.2.1.2 Abbildungen zwischen Objekt- und Bildraum

Die Abbildungsfunktion beschreibt den Signalverlauf der Bildentstehung. Ausgehend von einem Oberflächenelement im Objektraum wird der Strahlengang bis zu seinem korrespondierenden Bildelement im Bildraum beschrieben. Die *Äußere Orientierung* des Aufnahmestandpunktes mit Bezug zum Objektraum ist mit $O^C(\mathbf{T}^C, \mathbf{R}^C)$ für das Helligkeitsbild und $O^L(\mathbf{T}^L, \mathbf{R}^L)$ für das Entfernungs- und Intensitätsbild gegeben.

Die Parameter der Orientierung enthalten drei Translationen $\mathbf{T}(t_X, t_Y, t_Z)$ und drei Rotationen um die X, Y und Z-Achse. Die Rotationen sind in der Rotationsmatrix $\mathbf{R}(r_{11}, r_{12}, \cdots, r_{33})$ enthalten und setzten sich aus akkumulierten Elementardrehungen zusammen.

Die für die vollständige Beschreibung der Abbildungsgleichungen noch einzuführenden Koordinatensysteme sind das:

- Bild- bzw. Sensorkoordinatensystem der Kamera $[x^C, y^C, z^C]$
- Bildkoordinatensystem des Laserscanners $[\phi, \theta]$
- Sensorkoordinatensystem des Laserscanners $[x^L, y^L, z^L]$

Jedes 2D-Bildelement im Pixelkoordinatensystem $[r, c]$ steht über die *Innere Orientierung* mit dem jeweiligen Bildkoordinatensystem und Sensorkoordinatensystem (s. Kapitel 2) sowie über die *Äußere Orientierung* mit dem Objektraum in Bezug und wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

Zentralperspektive Abbildungsfunktion

Das Helligkeitsbild der Kamera entspricht einer zentralperspektiven Abbildung der Objektraumoberfläche. Die Beziehung eines Helligkeitswertes $g(x^C, y^C)$ zu seinem korrespondierenden Grauwert $G(X^S, Y^S)$ eines Oberflächenelementes an der Stelle (X^S, Y^S) des Oberflächenausschnittes ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Transformation dieser Position vom Patchkoordinatensystem zum Objektraumkoordinatensystem ist durch Gleichung (4.8) gegeben. $g(x^C, y^C)$ ist eine Funktion der Bildkoordinaten, welche wiederum in Abhängigkeit zu den Objektkoordinaten und der Sensororientierung durch die Kollinearitätsgleichungen stehen. Es gilt:

$$g(x^C, y^C) = G(X^S, Y^S) \tag{4.17}$$

mit den Kollinearitätsgleichungen (s. Gleichungen (2.3), (2.4) und (2.5)) unter Vernachlässigung von Korrekturtermen für die Hauptpunktlage und den optischen Verzeichnungen:

$$\begin{aligned} x^C &= -c^C \frac{r^C_{11}\Delta X + r^C_{21}\Delta Y + r^C_{31}\Delta Z}{r^C_{13}\Delta X + r^C_{23}\Delta Y + r^C_{33}\Delta Z} \\ y^C &= -c^C \frac{r^C_{12}\Delta X + r^C_{22}\Delta Y + r^C_{32}\Delta Z}{r^C_{13}\Delta X + r^C_{23}\Delta Y + r^C_{33}\Delta Z} \\ \Delta X &= X - t^C_X \\ \Delta Y &= Y - t^C_Y \\ \Delta Z &= Z - t^C_Z \end{aligned} \tag{4.18}$$

Zur Erfüllung von Gleichung (4.17) müssen die bei der Bildentstehung (s. Kapitel 2) angesprochenen radiometrischen Einflüsse funktional berücksichtigt werden. Die funktionale Berücksichtigung soll nur eine lokale Gültigkeit haben, weshalb eine lineare Approximation als ausreichend angesehen wird. Gleichung (4.17) erweitert sich zu:

$$t^g_0 + t^g_1 \cdot g(x^C, y^C) = G(X^S, Y^S) \tag{4.19}$$

mit der Konstanten t^g_0 und dem Maßstabsfaktor t^g_1. Bezogen auf die korrespondierenden Bildausschnitte von Helligkeitsbildern eines Oberflächenausschnittes entspricht die lineare Approximation einer Histogrammverschiebung und Streckung der Helligkeitswerte.

Polare Abbildungsfunktion

Das Entfernungs- und Intensitätsbild des terrestrischen Laserscanners entspricht einer polaren Abbildung der Objektoberfläche. Die Beziehung eines Entfernungswertes $d(\phi, \theta)$ zu seinem korrespondierenden Oberflächenelement $Z^S(X^S, Y^S)$ wird durch die *Euklidische Distanz* s zwischen dem beobachteten Oberflächenelement und dem Ursprung des Sensorkoordinatensystems des 3D-Laserscanners nach folgender Gleichung (4.21) ausgedrückt:

$$d(\phi, \theta) = s \tag{4.20}$$

und

$$s = \sqrt{(X - t^L_X)^2 + (Y - t^L_Y)^2 + (Z - t^L_Z)^2} \tag{4.21}$$

mit (s. Gleichungen (2.8) und (2.9)):

$$\begin{aligned}\phi &= \arctan(\tfrac{y^L}{x^L}) \\ \theta &= \arctan(\tfrac{\sqrt{(x^L)^2+(y^L)^2}}{z^L})\end{aligned} \tag{4.22}$$

Durch Gleichung (4.8) sind die Objektraumkoordinaten (X, Y, Z) mit den Koordinaten der Oberflächenfunktion $(X^S, Y^S, Z^S(X^S, Y^S))$ verknüpft. Weiter ist nach den Gleichungen (4.22) für die Beziehung des Entfernungswertes d zur Oberflächenfunktion im Objektraum die Transformation zwischen dem Sensorkoordinatensystem des Laserscanners und dem Objektraumkoordinatensystem notwendig:

$$\begin{aligned}&\begin{pmatrix} x^L \\ y^L \\ z^L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R^L} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^L_{11}\Delta X + r^L_{21}\Delta Y + r^L_{31}\Delta Z \\ r^L_{12}\Delta X + r^L_{22}\Delta Y + r^L_{32}\Delta Z \\ r^L_{13}\Delta X + r^L_{23}\Delta Y + r^L_{33}\Delta Z \end{pmatrix} \\ &\Delta X = X - t^L_X \\ &\Delta Y = Y - t^L_Y \\ &\Delta Z = Z - t^L_Z\end{aligned} \tag{4.23}$$

Die Beziehung eines Intensitätswertes $i(\phi, \theta)$ zu seinem korrespondierenden Intensitätswert $I(X^S, Y^S)$ eines Oberflächenelementes (X^S, Y^S) im Objektraum lautet:

$$i(\phi, \theta) = I(X^S, Y^S) \tag{4.24}$$

Der Intensitätswert i ist ebenfalls eine Funktion der Bildkoordinaten ϕ, θ, wodurch die Gleichungen (4.22) und (4.23) übertragbar in die funktionale Beschreibung von Gleichung (4.24) sind. Die bisher noch unberücksichtigten radiometrischen Einflüsse der Intensität bei der Bildentstehung, werden ebenfalls linear approximiert:

$$t^i_0 + t^i_1 \cdot i(\phi, \theta) = I(X^S, Y^S) \tag{4.25}$$

mit der Konstanten t^i_0 und dem Maßstabsfaktor t^i_1. Gleichung (4.25) entspricht analog zu Gleichung (4.19) einer Histogrammverschiebung und Streckung.

Berücksichtigung *kombinierter Messsysteme*

Bei dem in Kapitel 2.4 eingeführten *kombinierten Messsystem* ist die photogrammetrische Kamera im Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners durch eine konstante *Äußere Orientierung* und ihrem aktuellen Rotationswinkel ϕ_{C_i} definiert. Die Kollinearitätsgleichungen (4.18) für die Helligkeitswerte der zentralperspektiven Kamera erweitern sich dadurch nach Gleichung (2.11) zu:

$$\begin{pmatrix} x^C \\ y^C \\ z^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^L_C \mathbf{R}_{\phi_{C_i}} \end{pmatrix}^T \left(\begin{pmatrix} \mathbf{R^L} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} X - t^L_X \\ Y - t^L_Y \\ Z - t^L_Z \end{pmatrix} - \mathbf{T}^L_C \right) \tag{4.26}$$

wodurch die Orientierung des Kamerasensors $(\mathbf{T}^L_C, \mathbf{R}^L_C)$ mit seiner aktuellen Rotation $\mathbf{R}_{\phi_{C_i}}$ um die z^L-Achse des 3D-Laserscanners im Sensorkoordinatensystem $[x^L, y^L, z^L]$ des 3D-Laserscanners beschrieben wird. Die Beziehung des Sensorkoordinatensystems des 3D-Laserscanners $[x^L, y^L, z^L]$ und des Objektraumkoordinatensystems $[X, Y, Z]$ ist durch Gleichung (4.23) gegeben. Die Abbildungsfunktionen des Entfernungs- und Intensitätsbildes bleiben unberührt.

4.2.2 Ausgleichungsansatz

Nachdem die funktionale Beziehung zwischen den zu berücksichtigenden Parametern im vorherigen Kapitel detailliert erläutert wurde, wird nun der Ausgleichungsansatz diskutiert. Es werden die unbekannten Parameter definiert, die simultan im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der Kleinsten-Quadrate geschätzt werden. Die unbekannten Parameter können in Abhängigkeit zu der zu untersuchenden Fragestellung und zu den verwendeten Beobachtungsgruppen variieren. Weiter werden die linearisierten Verbesserungsgleichungen angegeben, die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Gewichtsverhältnisse der Beobachtungsgruppen wird diskutiert. Zur Bestimmung der unbekannten Parameter mit Hilfe der linearisierten Verbesserungsgleichungen wird auf die Datumsfestlegung sowie die Lösung des Normalgleichungssystems eingegangen. Abschließend wird ein schematischer Ablauf skizziert, der die Vorgehensweise zur flächenbasierten Orientierungsbestimmung multisensoraler Bilddaten beschreibt.

Unbekannte Parameter des funktionalen Modells

Die ursprünglichen Messgrößen der digitalen Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder sind mit den in Tabelle 4.1 aufgeführten Parametern verknüpft, die situationsabhängig als unbekannte Parameter betrachtet werden können. In Tabelle 4.1 ist der Fall, der in dieser Arbeit als Allgemeinfall betrachtet wird, dargestellt.

Parameter	Annahme
Äußere Orientierung $O(\mathbf{T}, \mathbf{R})$	unbekannt
Sensorparameter	bekannt
Oberflächenfunktion $Z^S(X^S, Y^S)$	unbekannt
Helligkeitswert $G(X^S, Y^S)$	unbekannt
Intensitätswert $I(X^S, Y^S)$	unbekannt

Tabelle 4.1: Allgemeinfall des Ausgleichungsansatzes

- Die *Äußeren Orientierungen* der Aufnahmestandpunkte von photogrammetrischen Kameras, 3D-Laserscannern und *kombinierten Messsystemen* werden als unbekannte Parameter betrachtet. Der Maßstab ist bekannt.
- Die Sensorparameter mit den *Inneren Orientierungen* zur Beschreibung der Abbildungseigenschaften der einzelnen Sensoren inklusive der *Äußeren Orientierungen* zwischen der Kamera und dem 3D-Laserscanner bei *kombinierten Messsystemen* werden als durch Kalibrierung bekannte Parameter angenommen.
- Die Parameter der Objektoberfläche werden als unbekannte Parameter eingeführt. Es wird angenommen, dass die Bilddaten ausreichende Informationen für eine zuverlässige Bestimmung enthalten. Optional können stabilisierenden Bedingungsgleichungen für die Oberflächenrekonstruktion als zusätzliche Beobachtungen berücksichtigt werden.
- Die radiometrischen Modelle der Helligkeits- und Intensitätswerte der überlagerten Bildsignale der Objektoberfläche (Funktionswerte der Stützstellenraster) werden als unbekannte Parameter eingeführt.

Die Funktionen zur Verknüpfung der Parameter lauten für das Helligkeitsbild nach den Gleichungen (4.18) und (4.8)

$$x^C, y^C = f(Z^S(X^S, Y^S), O^C) \tag{4.27}$$

bzw. unter Berücksichtigung der Gleichung (4.26) für die unbekannten Orientierungsparameter des Aufnahmestandpunktes eines *kombinierten Messsystems*

$$x^C, y^C = f(Z^S(X^S, Y^S), O^L) \tag{4.28}$$

mit der Beziehung des Bildkoordinatensystems zum Pixelkoordinatensystem nach der Gleichung (2.6)

$$x_r, y_c = f(x^C, y^C) \tag{4.29}$$

und der Interpolationsfunktion im Bildraum des Helligkeitsbildes nach den Gleichungen (4.19) und (2.2)

$$g(x_r, y_c) = f(t_0^g, t_1^g, g_{r,c}, g_{r+1,c}, g_{r,c+1}, g_{r+1,c+1}) \tag{4.30}$$

Die Funktionen zur Verknüpfung der Parameter lauten für das Entfernungs- und Intensitätsbild nach den Gleichungen (4.22), (4.23) und (4.8)

$$\phi, \theta = f(Z^S(X^S, Y^S), O^L) \tag{4.31}$$

mit der Beziehung des Bildkoordinatensystems zum Pixelkoordinatensystem nach der Gleichung (2.10)

$$x_r, y_c = f(\phi, \theta) \tag{4.32}$$

und der Interpolationsfunktion im Bildraum des Entfernungsbildes nach der Gleichung (2.2)

$$d(x_r, y_c) = f(d_{r,c}, d_{r+1,c}, d_{r,c+1}, d_{r+1,c+1}) \tag{4.33}$$

und der *Euklidischen Distanz* zwischen dem Projektionszentrum des 3D-Laserscanners und dem korrespondierenden Oberflächenelement nach den Gleichungen (4.21), (4.23) und (4.8)

$$s = f(Z^S(X^S, Y^S), \mathbf{T}^L) \tag{4.34}$$

und der Interpolationsfunktion im Bildraum des Intensitätsbildes nach den Gleichungen (4.25) und (2.2)

$$i(x_r, y_c) = f(t_0^i, t_1^i, i_{r,c}, i_{r+1,c}, i_{r,c+1}, i_{r+1,c+1}) \tag{4.35}$$

sowie für die Oberflächenrekonstruktion nach der Gleichung (4.11)

$$Z^S(X^S, Y^S) = f(Z_{i,j}^S, Z_{i+1,j}^S, Z_{i,j+1}^S, Z_{i+1,j+1}^S) \tag{4.36}$$

Die für die Oberflächenrekonstruktion optional einzuführenden stabilisierenden Bedingungsgleichungen (3.19), (3.20) und (3.21) lauten:

$$C_{X^S} = f(Z_{i,j}^S, Z_{i,j-1}^S, Z_{i,j+1}^S) \tag{4.37}$$

$$C_{Y^S} = f(Z_{i,j}^S, Z_{i-1,j}^S, Z_{i+1,j}^S) \tag{4.38}$$

$$C_{X^S,Y^S} = f(Z_{i,j}^S, Z_{i+1,j+1}^S, Z_{i+1,j}^S, Z_{i,j+1}^S) \tag{4.39}$$

Daraus resultieren die folgenden Verbesserungsgleichungen:

$$\widehat{v}_g = \widehat{G}(X^S, Y^S) - g(\widehat{t}_0^g, \widehat{t}_1^g, \widehat{O}^C, \widehat{Z}^S(X^S, Y^S)) \tag{4.40}$$

bzw.

$$\widehat{v}_g = \widehat{G}(X^S, Y^S) - g(\widehat{t}_0^g, \widehat{t}_1^g, \widehat{O}^L, \widehat{Z}^S(X^S, Y^S)) \tag{4.41}$$

und

$$\widehat{v}_d = s(\widehat{T}^L, \widehat{Z}^S(X^S, Y^S)) - d(\widehat{O}^L, \widehat{Z}^S(X^S, Y^S)) \tag{4.42}$$

$$\widehat{v}_i = \widehat{I}(X^S, Y^S) - i(\widehat{t}_0^i, \widehat{t}_1^i, \widehat{O}^L, \widehat{Z}^S(X^S, Y^S)) \tag{4.43}$$

$$\widehat{v}_{C_{X^S}} = \widehat{Z}_{i,j-1}^S - 2\widehat{Z}_{i,j}^S + \widehat{Z}_{i,j+1}^S \tag{4.44}$$

$$\widehat{v}_{C_{Y^S}} = \widehat{Z}_{i-1,j}^S - 2\widehat{Z}_{i,j}^S + \widehat{Z}_{i+1,j}^S \tag{4.45}$$

$$\widehat{v}_{C_{X^S,Y^S}} = \widehat{Z}_{i,j}^S - \widehat{Z}_{i+1,j}^S - \widehat{Z}_{i,j+1}^S + \widehat{Z}_{i+1,j+1}^S \tag{4.46}$$

mit $\widehat{v}_g$, $\widehat{v}_d$, $\widehat{v}_i$ den Verbesserungen eines Oberflächenpunktes für ein Bild und den Verbesserungen $\widehat{v}_{C_{X^S}}$, $\widehat{v}_{C_{Y^S}}$, $\widehat{v}_{C_{X^S,Y^S}}$ der stabilisierenden Bedingungsgleichungen.

Linearisierte Beobachtungsgleichungen

Gleichungen (4.40), bzw. (4.41) sowie (4.42) und (4.43) werden nach den Unbekannten linearisiert und lauten unter Vernachlässigung der Restglieder für die Beobachtung eines Helligkeitsbildes

$$\widehat{v}_g = \widehat{G}(X^S, Y^S) - \left(\widehat{t}_0^g + \widehat{t}_1^g \cdot g(x^0) + \sum_{i=1}^{6} \frac{\partial g}{\partial O_i^C} \widehat{d}_{O_i^C} + \frac{\partial g}{\partial Z^S(X^S, Y^S)} \widehat{d}_{Z^S(X^S,Y^S)} \right) \tag{4.47}$$

mit

$$\widehat{d}_{O_i^C} = \widehat{O}_i^C - O_i^{0,C} \tag{4.48}$$

und

$$\widehat{d}_{Z^S(X^S,Y^S)} = \widehat{Z}^S(X^S, Y^S) - Z^{0,S}(X^S, Y^S) \tag{4.49}$$

den Differenzen zwischen den ausgeglichenen Unbekannten und den Näherungswerten. Da g jedoch als Funktion der Pixelkoordinaten x_r, y_c gegeben ist, lauten die vollständigen Differentiale nach Anwendung der Kettenregel

$$\frac{\partial g}{\partial O_i^C} = \frac{\partial g}{\partial x_r}\frac{\partial x_r}{\partial x^C}\frac{\partial x^C}{\partial O_i^C} + \frac{\partial g}{\partial y_c}\frac{\partial y_c}{\partial y^C}\frac{\partial y^C}{\partial O_i^C} \tag{4.50}$$

und

$$\begin{aligned}\frac{\partial g}{\partial Z^S(X^S,Y^S)} = &\left[\frac{\partial g}{\partial x_r}\frac{\partial x_r}{\partial x^C}\frac{\partial x^C}{\partial Z_{i,j}^S} + \frac{\partial g}{\partial y_c}\frac{\partial y_c}{\partial y^C}\frac{\partial y^C}{\partial Z_{i,j}^S}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z_{i,j}^S} + \\ &\left[\cdots\frac{\partial x^C}{\partial Z_{i,j+1}^S} + \cdots\frac{\partial y^C}{\partial Z_{i,j+1}^S}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z_{i,j+1}^S} + \\ &\left[\cdots\frac{\partial x^C}{\partial Z_{i+1,j}} + \cdots\frac{\partial y^C}{\partial Z_{i+1,j}}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z_{i+1,j}^S} + \\ &\left[\cdots\frac{\partial x^C}{\partial Z_{i+1,j+1}^S} + \cdots\frac{\partial y^C}{\partial Z_{i+1,j+1}^S}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z_{i+1,j+1}^S}\end{aligned} \tag{4.51}$$

und für die Beobachtungen eines Entfernungsbildes

$$\begin{aligned}\widehat{v}_d = &\left(s(x^0) + \sum_{i=1}^{3}\frac{\partial s}{\partial T_i^L}\widehat{d}_{T_i^L} + \frac{\partial s}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}\widehat{d}_{Z^S(X^S,Y^S)}\right) - \\ &\left(d(x_0) + \sum_{i=1}^{6}\frac{\partial d}{\partial O_i^L}\widehat{d}_{O_i^L} + \frac{\partial d}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}\widehat{d}_{Z^S(X^S,Y^S)}\right)\end{aligned} \tag{4.52}$$

unter Berücksichtigung von Gleichung (4.49) sowie

$$\widehat{d}_{O_i^L} = \widehat{O}_i^L - O_i^{0,L} \tag{4.53}$$

und

$$\widehat{d}_{T_i^L} = \widehat{T}_i^L - T_i^{0,L}. \tag{4.54}$$

Die Beobachtung d ist wiederum eine Funktion der Pixelkoordinaten x_r, y_c des Entfernungsbildes. Die Differentiale lauten:

$$\begin{aligned}\frac{\partial d}{\partial O_i^L} = &\frac{\partial d}{\partial x_r}\frac{\partial x_r}{\partial \phi}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x^L}\frac{\partial x^L}{\partial O_i^L} + \frac{\partial \phi}{\partial y^L}\frac{\partial y^L}{\partial O_i^L}\right) + \\ &\frac{\partial d}{\partial y_c}\frac{\partial y_c}{\partial \theta}\left(\frac{\partial \theta}{\partial x^L}\frac{\partial x^L}{\partial O_i^L} + \frac{\partial \theta}{\partial y^L}\frac{\partial y^L}{\partial O_i^L} + \frac{\partial \theta}{\partial z^L}\frac{\partial z^L}{\partial O_i^L}\right)\end{aligned} \tag{4.55}$$

und

$$\frac{\partial d}{\partial Z^S(X^S,Y^S)} = \left[\frac{\partial d}{\partial x_r}\frac{\partial x_r}{\partial \phi}\left(\frac{\partial \phi}{\partial x^L}\frac{\partial x^L}{\partial Z^S_{i,j}} + \frac{\partial \phi}{\partial y^L}\frac{\partial y^L}{\partial Z^S_{i,j}}\right) + \right.$$
$$\left.\frac{\partial d}{\partial y_c}\frac{\partial y_c}{\partial \theta}\left(\frac{\partial \theta}{\partial x^L}\frac{\partial x^L}{\partial Z^S_{i,j}} + \frac{\partial \theta}{\partial y^L}\frac{\partial y^L}{\partial Z^S_{i,j}} + \frac{\partial \theta}{\partial z^L}\frac{\partial z^L}{\partial Z^S_{i,j}}\right)\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i,j}} +$$
$$\left[\cdots\frac{\partial x^L}{\partial Z^S_{i,j+1}} + \cdots\frac{\partial y^L}{\partial Z^S_{i,j+1}} + \cdots\frac{\partial z^L}{\partial Z^S_{i,j+1}}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i,j+1}} +$$
$$\left[\cdots\frac{\partial x^L}{\partial Z^S_{i+1,j}} + \cdots\frac{\partial y^L}{\partial Z^S_{i+1,j}} + \cdots\frac{\partial z^L}{\partial Z^S_{i+1,j}}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i+1,j}} +$$
$$\left[\cdots\frac{\partial x^L}{\partial Z^S_{i+1,j+1}} + \cdots\frac{\partial y^L}{\partial Z^S_{i+1,j+1}} + \cdots\frac{\partial z^L}{\partial Z^S_{i+1,j+1}}\right]\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i+1,j+1}} \quad (4.56)$$

Für die Beobachtungen eines Intensitätsbildes gilt:

$$\widehat{v}_i = \widehat{I}(X^S,Y^S) - \left(\widehat{t}^i_0 + \widehat{t}^i_1 \cdot i(x^0) + \sum_{i=1}^{6}\frac{\partial i}{\partial O^L_i}\widehat{d}_{O^L_i} + \frac{\partial i}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}\widehat{d}_{Z^S(X^S,Y^S)}\right) \quad (4.57)$$

unter Berücksichtigung der Gleichungen (4.49) und (4.53). Die Differentiale lauten analog zum Entfernungswert d entsprechend den Gleichungen (4.55) und (4.56). Weiter sind $g(x^0)$, $s(x^0)$, $d(x^0)$, $i(x^0)$ die Funktionen der Näherungswerte der Unbekannten für jeweils $1,\ldots,u,v,w$ Verbesserungssgleichungen.

Die Differentiale der Gleichungen (4.47), (4.52) und (4.57) lassen sich wie folgt interpretieren und berechnen:

- $\frac{\partial g}{\partial x_r}$, $\frac{\partial g}{\partial y_c}$ und $\frac{\partial d}{\partial x_r}$, $\frac{\partial d}{\partial y_c}$ und $\frac{\partial i}{\partial x_r}$, $\frac{\partial i}{\partial y_c}$ sind die Komponenten des Ortsgradienten der Funktionswerte der jeweiligen Bildsignale in Richtung des Pixelkoordinatensystems.
- $\frac{\partial x_r}{\partial x^C}$, $\frac{\partial y_c}{\partial y^C}$ und $\frac{\partial x_r}{\partial \phi}$, $\frac{\partial y_c}{\partial \theta}$ entsprechen nach Gleichung (2.6) und (2.10) den Faktoren $\frac{1}{m_{xC}}$, $\frac{1}{m_{yC}}$ sowie $\frac{1}{m_\phi}$ und $\frac{1}{m_\theta}$.
- $\frac{\partial \phi}{x^L}$, $\frac{\partial \phi}{y^L}$ und $\frac{\partial \theta}{x^L}$, $\frac{\partial \theta}{y^L}$, $\frac{\partial \theta}{z^L}$ sind berechenbar aus Gleichung (4.22).
- $\frac{\partial x^C}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$, $\frac{\partial y^C}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$ sowie $\frac{\partial x^C}{\partial O^C_i}$ und $\frac{\partial y^C}{\partial O^C_i}$ sind die Differentialquotienten der zentralperspektiven Abbildungsgleichungen der Kamera und
- $\frac{\partial s}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$, $\frac{\partial x^L}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$, $\frac{\partial y^L}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$, $\frac{\partial z^L}{\partial Z^S(X^S,Y^S)}$ sowie $\frac{\partial s}{\partial O^L_i}$, $\frac{\partial x^L}{\partial O^L_i}$, $\frac{\partial y^L}{\partial O^L_i}$, $\frac{\partial z^L}{\partial O^L_i}$ sind die Differentialquotienten der polaren Abbildungsgleichung.
- $\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i,j}}$, $\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i,j+1}}$, $\frac{\partial Z(X,Y)}{\partial Z^S_{i+1,j}}$, $\frac{\partial Z^S(X^S,Y^S)}{\partial Z^S_{i+1,j+1}}$ entsprechen nach Gleichung (4.11) den Faktoren $a_{i,j}$, $a_{i,j+1}$, $a_{i+1,j}$, $a_{i+1,j+1}$. Sie sind für identische Positionen der Rasterstützstellen (X_k,Y_l) auf andere Rasterelemente des Objektoberflächenmodells übertragbar.

Gewichtsverhältnisse und Homogenisierung der Beobachtungsgruppen

Die Beobachtungen innerhalb einer Beobachtungsgruppe werden als unkorreliert und gleichgewichtet betrachtet. Die Funktionswerte der Beobachtungen der einzelnen Gruppen liegen in unterschiedlichen Größenordnungen mit unterschiedlichen Einheiten vor. Um eine Gewichtsanpassung zwischen den Gruppen durchzuführen oder diese als gleichgewichtet verwenden zu können, müssen sie auf ein gemeinsames Niveau gebracht werden. Die Forderung der Homogenisierung lautet, dass die Standardabweichungen der Gewichtseinheit für jede Beobachtungsgruppe identisch sind:

$$\sqrt{\frac{\mathbf{v}_g^T p_g \mathbf{v}_g}{n_g - u}} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_d^T p_d \mathbf{v}_d}{n_d - u}} = \sqrt{\frac{\mathbf{v}_i^T p_i \mathbf{v}_i}{n_i - u}} \quad (4.58)$$

Die Homogenisierung erfolgt durch die relativen Gewichte p_g, p_d, p_i die sich aus den Genauigkeitsverhältnissen der Einzelbeobachtungen ergeben. Mit der Standardabweichung der Helligkeitswerte σ_0^g, der Standardabweichung der Entfernungswerte σ_0^d und der Standardabweichung der Intensitätswerte σ_0^i lauten die relativen Gewichte:

$$p_g = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^g}\right)^2$$
$$p_d = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^d}\right)^2 \tag{4.59}$$
$$p_i = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^i}\right)^2$$

mit der homogenen Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0. Die durch die Gewichte p_g, p_d, p_i homogenisierten quadratischen Verbesserungen sind dimensionslos (Kraus, 1996, S. 45). Sind die Genauigkeiten der Einzelbeobachtungen nicht oder nur sehr ungenau bekannt können sie durch die Varianz-Kovarianz-Komponentenschätzung bestimmt werden, s. z.B. Koch (1997) und Förstner (1979). Mit der Varianz-Kovarianz-Komponentenschätzung werden die relativen Gewichtsverhältnisse durch einen iterativen Ausgleichungsprozess bestimmt, der gesondert vor jeder Iteration der ausgleichenden Parameterschätzung durchgeführt wird. Die zuverlässige Bestimmung der Gewichtsverhältnisse setzt voraus, dass keine systematischen Abweichungen und keine groben Fehler in den Beobachtungen vorliegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Homogenisierung der Beobachtungsgruppen nicht durch die Varianz-Kovarianz-Komponentenschätzung sondern durch das Abschätzen einer mittleren Einzelgenauigkeit pro Gruppe durchgeführt. Für die Abschätzung fließen die Genauigkeiten der Kalibrierung und weitere Herstellerangaben zu den verwendeten Messsystemen ein. Sind die Beobachtungsgruppen homogenisiert, lässt sich ausgehend von diesem Niveau der Einfluß der Gruppen innerhalb der Ausgleichung kontrollieren, indem ein weiterer Faktor a_g, a_d, a_i für das Gewicht jeder Beobachtungsgruppe berücksichtigt wird. Damit erweitert sich Gleichung (4.59) zu:

$$p_g = a_g \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^g}\right)^2$$
$$p_d = a_d \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^d}\right)^2 \tag{4.60}$$
$$p_i = a_i \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_0^i}\right)^2$$

Berechnung der Unbekannten

Die Parameterschätzung erfolgt nach der Methode der Kleinsten-Quadrate nach vermittelnden Beobachtungen. Mit Hilfe der linearisierten Verbesserungsgleichungen aus Kapitel 4.2.2 lässt sich das folgende Gauß-Markoff Modell aufstellen:

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \tag{4.61}$$

$\mathbf{v}$ umfasst alle Verbesserungen der Beobachtungen. Die Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}$ enthält die partiellen Ableitungen der Verbesserungsgleichungen, der Unbekanntenvektor $\mathbf{x}$ enthält alle Unbekannten der Orientierungsparameter der verwendeten Aufnahmestandpunkte und die der Funktionswerte der Rasterstützstellen aller Objektoberflächenausschnitte mit dessen Rastermodellen der überlagerten Bildsignale. $\mathbf{l}$ stellt den Vektor der Beobachtungen g, d und i und optional von C_X, C_Y, C_Z dar.

Alle Beobachtungen einer Gruppe werden als gleichgenaue, unkorrelierte und normalverteilte Zufallswerte betrachtet. Im stochastischen Modell treten somit keine Kovarianzen auf und die Varianzen einer Beobachtungsgruppe sind gleich groß. Die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ definiert sich wie folgt:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_g & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_d & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{P}_i \end{bmatrix} \tag{4.62}$$

mit

$\mathbf{P}_g$ = Gewichtsmatrix der Helligkeitsbeobachtungen
$\mathbf{P}_d$ = Gewichtsmatrix der Entfernungssbeobachtungen
$\mathbf{P}_i$ = Gewichtsmatrix der Intensitätsbeobachtungen

wobei nur die Elemente der Hauptdiagonalen besetzt sind. Die Unbekannten und deren Standardabweichungen werden durch folgende Formeln berechnet, s. z.B. Niemeier (2002):

$$
\begin{aligned}
\mathbf{N} &= \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} \\
\mathbf{n} &= \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l} \\
\widehat{\mathbf{x}} &= \mathbf{N}^{-1}\mathbf{n} \\
\widehat{\mathbf{v}} &= \mathbf{A}\widehat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \\
\widehat{s}_0 &= \sqrt{\frac{\hat{v}_g^T P_g \hat{v}_g + \hat{v}_g^T P_g \hat{v}_g + \hat{v}_i^T P_i \hat{v}_i}{n-u}} \\
\mathbf{K}_{\hat{x}\hat{x}} &= \widehat{s}_0 \mathbf{N}^{-1}
\end{aligned}
\tag{4.63}
$$

mit $\mathbf{N}$ der Normalgleichungsmatrix, $\mathbf{n}$ dem Absolutvektor, $\widehat{\mathbf{x}}$ dem geschätzten Unbekanntenvektor, $\widehat{\mathbf{v}}$ dem Verbesserungsvektor, $\widehat{s}_0$ der Standardabweichung der Gewichtseinheit und $\mathbf{K}_{\hat{x}\hat{x}}$ der Kovarianzmatrix der Unbekannten. Die Anzahl der Beobachtungen n ergibt sich aus der Summe der Beobachtungsanzahl pro Gruppe mit $n = n_g + n_d + n_i$.

Analyse des Normalgleichungssystems

Abbildung 4.8 zeigt eine Normalgleichungsmatrix, die sich aus der Orientierungsbestimmung von drei Aufnahmestandpunkten mit Helligkeits-, Intensitäts- und Entfernungsbildern bei simultaner Oberflächenrekonstruktion ergibt. Der Objektraum ist mit 3 x 3 Oberflächenstützstellen und 10 x 10 Oberflächenelementen für alle Bildsignale dargestellt. Zur Datumsfestlegung werden die Orientierungsparameter von einem Aufnahmestandpunkt festgehalten, sodass in der Normalgleichungsmatrix nur die Orientierungsparameter der verbleibenden zwei Aufnahmestandpunkte dargestellt sind. Die Parameter t_0^g, t_1^g und t_0^i, t_1^i zur linearen Approximation der BRDF werden bei der Darstellung der Normalgleichungsmatrix vernachlässigt.

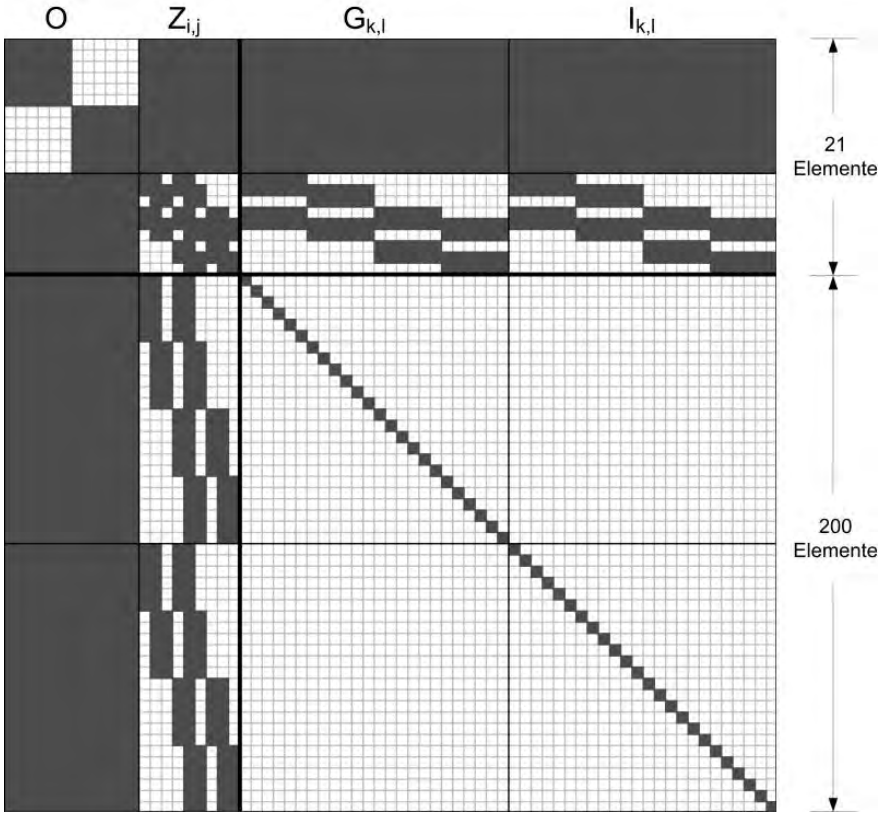


Abbildung 4.8: Struktur der Normalgleichungsmatrix

Um die Blockstruktur und die Anzahl der Nullelemente bei der Auflösung der Normalgleichungsmatrix auszunutzen, werden folgende Submatrizen eingeführt. Mit Gleichung (4.63) ergibt sich:

$$
\begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} \tag{4.64}
$$

mit

$\mathbf{x}_1$ = Orientierungsparameter, Stützstellen der Objektoberfläche
$\mathbf{x}_2$ = Stützstellen der Helligkeits- und Intensitätsfunktion der Objektoberfläche

Gleichung (4.64) aufgelöst ergibt:

$$\mathbf{n}_1 = \mathbf{N}_{11}\mathbf{x}_1 + \mathbf{N}_{12}\mathbf{x}_2 \tag{4.65}$$

$$\mathbf{n}_2 = \mathbf{N}_{21}\mathbf{x}_1 + \mathbf{N}_{22}\mathbf{x}_2 \tag{4.66}$$

Weiter werden Gleichung (4.65) und (4.66) nach $\mathbf{x}_2$, den unbekannten Funktionswerten der Stützstellen der Helligkeits- und Intensitätswerte der Objektoberfläche, aufgelöst, gleichgesetzt und nach $\mathbf{x}_1$ umgestellt:

$$\mathbf{x}_1 = (\mathbf{N}_{11} - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{N}_{21})^{-1}(\mathbf{n}_1 - \mathbf{N}_{12}\mathbf{N}_{22}^{-1}\mathbf{n}_2) \tag{4.67}$$

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{m} \tag{4.68}$$

Die Inversion von $\mathbf{N}_{22}$ vereinfacht sich dadurch, dass nur die Hauptdiagonalelemente besetzt sind. $\mathbf{N}_{21}$ entspricht der Transponierten von $\mathbf{N}_{12}$. $\mathbf{M}$ hat die gleiche Größe wie $\mathbf{N}_{11}$ und ist hinsichtlich der anderen Submatrizen vergleichsweise klein, da es nur die Elemente der Orientierungsparameter und der Stützstellen der Objektoberfläche enthält.

4.2.3 Ablauf der Methode

Für den in Abbildung 4.9 skizzierten Ablauf der Methode ist neben den multisensoralen Bildern und den Näherungswerten der *Äußeren Orientierung* der Aufnahmestandpunkte die Angabe von Oberflächenausschnitten notwendig. Sie werden in der Regel durch ein begrenzendes Polygon auf der Objektoberfläche definiert, wo mindestens ein Bildsignal Informationen zur Orientierungsbestimmung enthält. Mit Hilfe der Polygone und der Entfernungsdaten eines Standpunktes werden die Objektraummodelle für jeden Oberflächenausschnitt erzeugt, die als Eingangsdaten der iterativen Ausgleichung dienen.

In jeder Iteration der Ausgleichung werden für jeden Oberflächenausschnitt die Parameter der linearisierten BRDF bestimmt. Dazu wird von jedem einbezogenen Bild ein Orthophoto erzeugt, sodass 2 bis n Orthophotos im Objektraum vorliegen, dessen Histogramme für jeden Oberflächenausschnitt linear angepasst werden. Die angepassten Funktionswerte entsprechen im Weiteren den verwendeten Beobachtungen. Nun wird das Normalgleichungssystem aufgestellt und nach der Methode der Kleinsten-Quadrate gelöst. Die geschätzten Unbekanntenzuschläge werden zu den Funktionswerten des geometrischen Oberflächenrasters und zu den Parametern der *Äußeren Orientierung* addiert. Die Lösung der vermittelnden Ausgleichung hat konvergiert, wenn der maximale Unbekanntenzuschlag geringer als ein zu definierender Schwellwert ist. Als Ergebnis liegen die geschätzten Orientierungsparameter und die Objektraummodelle vor.

4.2.4 Diskussion

Die Methode zur flächenbasierten Orientierung multisensoraler Bilddaten unter Berücksichtigung des Objektraumes stellt einen allgemeinen Rahmen zur simultanen Verwendung beliebiger oberflächenbezogener Daten dar, die über den Objektraum in Bezug zueinander stehen. Die Bilddaten werden konzeptionell gleichbehandelt und hinsichtlich ihrer Güte gewichtet in die Ausgleichung eingeführt.

Im Folgenden werden die Wesentlichen Punkte der Methode bewertet und hinsichtlich ihrer Allgemeingültigkeit diskutiert.

Abbildungsfunktionen der berücksichtigten Messsysteme: Mit dem eingeführten funktionalen Modell sind zentralperspektive Kameras, polarabbildende Laserscanner und *kombinierte Messsysteme* berücksicht worden, die im Allgemeinen zur terrestrischen Oberflächenerfassung verwendet werden. Es soll aber betont werden, dass der Ansatz auf weitere Abbildungsfunktionen adaptiert werden kann. Somit können z.B. auch Panoramakameras mit einer zylindrischen Abbildungsfunktion, s. z.B. Schneider und Maas (2003), Parian und Grün (2004), oder unterschiedliche Sensorobjektive, s. z.B. Sturm (2002), Tardif und Sturm (2005), verwendet werden.

Darstellung der Objektoberfläche: Durch die eingeführte Modellierung des Objektraumes durch Rasterelemente ist die Beschreibung der Objektoberfläche auf $2\frac{1}{2}$D-Beschreibungen beschränkt, was bei der Auswahl der Oberflächenausschnitte hinsichtlich der Topographie berücksichtigt werden muss. Dieser Einschränkung wird durch die Einführung von mehrfachen Oberflächenausschnitten entgegengewirkt, die in Bereichen mit adäquater Information hinsichtlich der Orientierungsbestimmung berücksichtigt

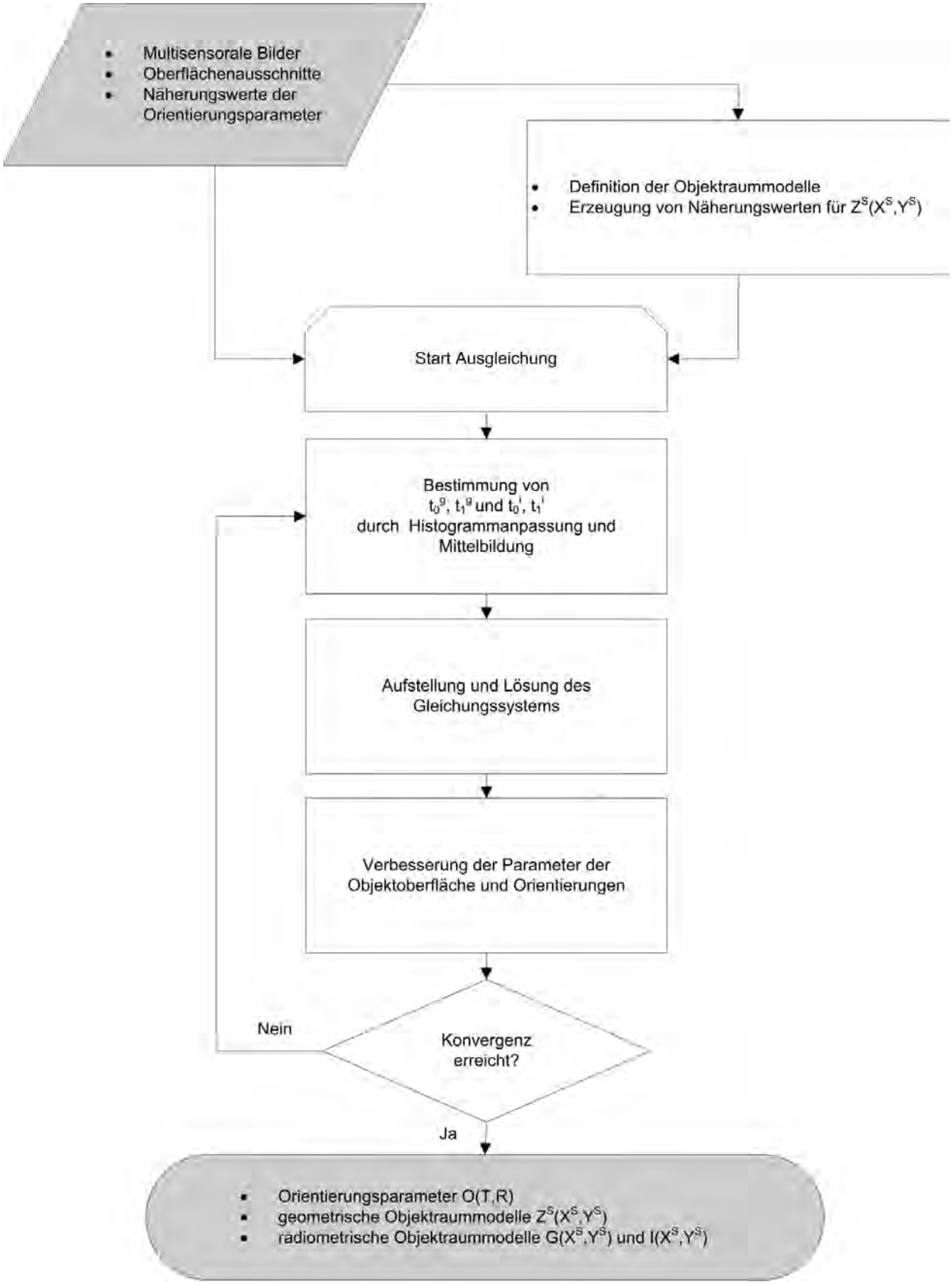


Abbildung 4.9: Prozessierungsschritte der flächenbasierten Methode zur simultanen Orientierung multisensoraler Bilddaten

werden. Wird aber gefordert dreidimensionale Oberflächentopographien darzustellen bzw. zu rekonstruieren, ist das durch ein Polyeder möglich, mit dem eine beliebig gekrümmte Objektoberfläche ebenfalls diskret durch die *Finite-Elemente-Methode* modelliert werden kann. Polyeder weisen im Vergleich zur Rasterdarstellung, durch die unregelmäßige Anordnung der Knotenpunkte, geringere Optimierungsmöglichkeiten bei der Lösung der Normalgleichungssysteme und auch allgemein bei der Datenprozessierung auf. Aufgrund der primären Zielsetzung, die Orientierungsparameter der Aufnahmestandpunkte zu bestimmen, wird der Oberflächenmodellierung durch ein Raster der Vorzug gegeben.

Simultane Oberflächenrekonstruktion: Indem die Objektoberfläche simultan rekonstruiert wird, liegt eine optimierte, ausgeglichene geometrische Beschreibung des Objektraumes vor, durch die eine erhöhte Genauigkeit in der Orientierungsbestimmung erwartet wird. Systematische Abweichungen in den Beobachtungen werden durch die ausgleichende Beschreibung eliminiert, die sonst zu einer Orientierungsungenauigkeit führen würden.

Konvergenzradius der Ausgleichung: Die maximal zulässige Ungenauigkeit der Näherungswerte, welche die Ausgleichung weiterhin zum globalen Minimum konvergieren lässt, bezeichnet den Konvergenzradius der Ausgleichung. Für eine erfolgreiche Ausgleichung sind Näherungswerte für die Orientierungsparameter innerhalb des Konvergenzradius notwendig. Neben den Näherungswerten wirkt sich zusätzlich die Genauigkeit der Bildinformationen (Auflösung, Signal-Rausch Anteile) sowie die Anzahl und Verteilung der Beobachtungen und der Oberflächenausschnitte auf das Konvergenzverhalten aus. Zur Erhöhung des Konvergenzradius wird bei der alleinigen Berücksichtigung von Helligkeitsbildern typischerweise eine Bildpyramide verwendet. In dieser Methode kann im Allgemeinen auf die Bildpyramide verzichtet werden, da die vorliegenden Entfernungsbilder Näherungswerte für die Oberflächenfunktion liefern. Durch die direkt beobachtete Objektoberfläche entsteht hinsichtlich des Konvergenzradius der Ausgleichung mehr Freiraum für die Näherungswerte der Orientierungsparameter.

Ergänzende Bildinformation

Anhand eines numerischen Beispiels wird im Folgenden demonstriert, dass sich der unterschiedliche Informationsgehalt der einzelnen Bilder zur Orientierungsbestimmung ergänzt. Mit dem Beispiel wird gezeigt, dass bei individueller Verwendung der Helligkeits- oder Entfernungsbilder die Orientierungsbestimmung versagt, diese aber bei simultaner Verwendung mit bekannten Orientierungsparametern zwischen den Bildern eines *kombinierten Messsystems* erfolgreich verläuft. Die Objektoberfläche wird in diesem Beispiel als bekannt vorausgesetzt. Dazu werden folgende synthetische Daten verwendet:

Der Datensatz in Abbildung 4.10 enthält zwei angrenzende Oberflächenausschnitte und zwei Aufnahmestandpunkte, in denen jeweils ein Helligkeitsbild und ein Entfernungsbild vorliegt. Die Anordnung der Aufnahmestandpunkte entspricht dem Stereonormalfall. Der rechte Oberflächenausschnitt enthält einen geometrischen Streifen mit einer Erhöhung von 1 m und der linke Oberflächenausschnitt einen um 90° gedrehten radiometrischen Streifen mit einer Erhöhung von 255 Grauwerten. Jeder Oberflächenausschnitt wird durch 21 x 21 geometrische Rasterelemente und 300 x 300 Rasterelemente zur Modellierung des Bildsignals des Helligkeitsbildes beschrieben und deckt eine Fläche von 20 m x 20 m ab. Der Aufnahmeabstand beträgt 50 m und die Basislinie zwischen den Aufnahmestandpunkten 20 m. Die X-Achse verläuft in Richtung der Oberflächenausschnitte und die Y- und Z-Achse parallel zum Rasterkoordinatensystem der Oberflächenausschnitte. Das Datum wird durch die Festlegung der sechs Orientierungsunbekannten im linken Aufnahmestandpunkt definiert.

Ausgehend von dieser Aufnahmesitutation wird untersucht inwieweit die Orientierungsparameter des rechten Aufnahmestandpunktes durch sich ergänzende Bildinformationen bestimmt werden können. Als Indikator der Lösbarkeit der Orientierungsbestimmung werden die Normalgleichungsmatrizen bzw. dessen Hauptdiagonalelemente gegenüber gestellt. Zur Analyse werden folgende Fälle betrachtet:

1. Helligkeitsbilder
2. Entfernungsbilder
3. simultane Verwendung von Helligkeits- und Entfernungsbildern

Im Fall (1) wird die Normalgleichungsmatrix nur aus den Bildinformationen aus den Helligkeitsbildern, im Fall (2) nur aus den Entfernungsbildern und im Fall (3) simultan aus den Helligkeits- und Entfernungsbildern aufgestellt.

Die Hauptdiagonalelemente der Normalgleichungsmatrix der ersten Iteration zur Lösung des Ausgleichungsproblems durch die Methode der Kleinsten-Quadrate sind in Tabelle 4.2 dargestellt. In ihrer Größe spiegelt sich neben der Aufnahmekonfiguration der Informationsgehalt der Bilddaten wieder. Die Größen sind jeweils relativ innerhalb der Gruppe von Translations- sowie Rotationsparametern zu beurteilen. Im

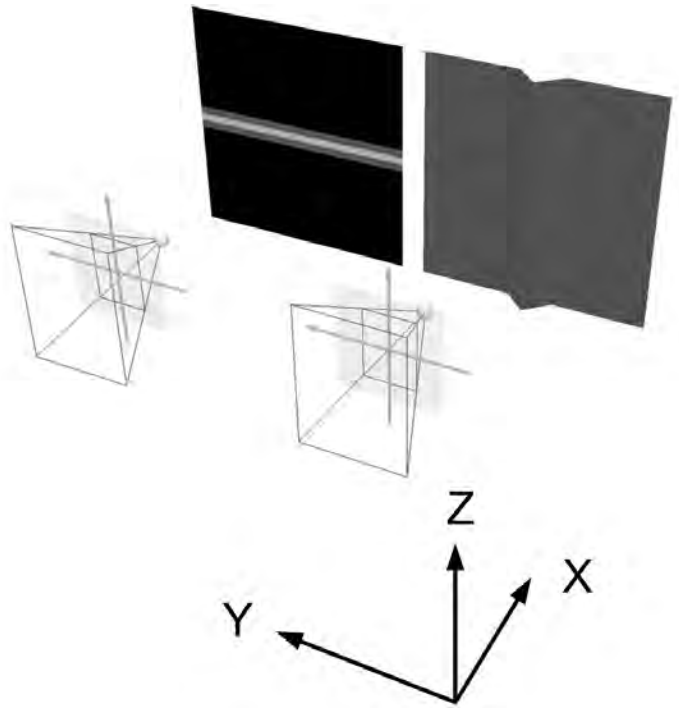


Abbildung 4.10: Darstellung der Aufnahmesituation (Aufnahmerichtung in Richtung der X-Achse)

Hauptdiagonalenelemente	Parameter	Fall (1)	Fall (2)	Fall (3)
N_{00}	t_X	737,61	12114,20	12851,81
N_{11}	t_Y	0,00	3165,60	3165,60
N_{22}	t_Z	569936,00	0,02	569936,02
N_{33}	ω	2,34e+007	90317,90	2,35e+007
N_{44}	ϕ	22,85e+007	360621,00	22,89e+007
N_{55}	κ	30323,90	1,09e+007	1,09e+007

Tabelle 4.2: Hauptdiagonalenelemente der Normalgleichungsmatrix

Fall (1) ist das Hauptdiagonalen-Element N_{11} zur Bestimmung des Translationsparameters t_Y in Richtung der Y-Achse gleich Null. Ebenfalls lässt sich der Rotationsparameter κ mit der Drehung um die Z-Achse nur unzuverlässig bestimmen, da der Wert N_{55} im Vergleich zu N_{33}, N_{44} den Drehungen um ω, ϕ gering ist. Im Fall (2) ist die unzuverlässige Bestimmbarkeit auf den Translationsparameter t_Z in Richtung der Z-Achse zu übertragen. Aufgrund der polaren Abbildungsfunktion der Entfernungsdaten wird im Gegensatz zur zentralperspektiven Abbildungsfunktion eine Gerade bzw. der Streifen im Bild gekrümmt dargestellt. Dadurch ergeben sich im Entfernungsbild für den abgebildeten Streifen Gradienten in beiden Koordinatenachsen von ungleich Null, was den Wert von $N_{22} \neq 0$ erklärt. Weiter ist festzustellen, dass aufgrund der Aufnahmesituation, sowohl der Rotationsparameter ω als auch ϕ im Vergleich zu κ nur einen geringen Wert aufweist. Obwohl alle Werte ungleich Null sind, versagt im Fall (2) nach wenigen Iterationen die Orientierungsbestimmung. Im Fall (3) ergänzen sich die Beobachtungen der einzelnen Bilder, was durch die Werte der Hauptdiagonalenelemente in Tabelle 4.2 bewiesen ist. Erst im Fall (3) lassen sich die Orientierungsparameter aufgrund der ergänzenden Bildinformationen zuverlässig berechnen.

5 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel wird die Funktionalität der entwickelten merkmalsbasierten und flächenbasierten Methode zur Orientierung von Aufnahmestandpunkten mit multisensoralen Bilddaten untersucht und bewertet. Für die experimentellen Untersuchungen stehen zwei terrestrische Datensätze mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften zur Verfügung, die mit einem *kombinierten Messsystem* aufgenommen wurden.

Erste Untersuchungen zu dem merkmalsbasierten Orientierungsverfahren wurden bereits in Wendt (2004, 2007) und zu dem flächenbasierten Orientierungsverfahren in Wendt und Heipke (2005, 2006, 2007) veröffentlicht.

5.1 Zielsetzung der Experimente

Die experimentellen Untersuchungen erstrecken sich über zwei reale Datensätze, um zum einen die entwickelte Methode anhand der unterschiedlichen Objektoberflächen zu analysieren und zum anderen die Funktionalität der Methode unabhängig voneinander zu bestätigen. Für die Untersuchungen werden Datensätze mit stark perspektiv verzerrten Bilddaten gewählt, die im Allgemeinen eine besondere Herausforderung für die Orientierungsbestimmung darstellen, und somit den möglichen Mehrwert sowie die Grenzen des neuen Verfahrens herausstellen.

Das Ziel ist es, durch die merkmalsbasierte Methode (Stufe 1) nachzuweisen, dass mit dem vorgeschlagenen Konzept robust Orientierungsparameter ermittelt werden können, und dass durch das flächenhafte Verfahren (Stufe 2) die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung durch die simultane Verwendung von multisensoralen Bilddaten erhöht werden kann. Durch die experimentellen Untersuchungen ist somit die Genauigkeit der zu bestimmenden *Äußeren Orientierungen* der Aufnahmestandpunkte nachzuweisen und zu analysieren welche Genauigkeitsunterschiede zwischen dem entwickelten merkmalsbasierten und flächenbasierten Orientierungsverfahren vorliegen. Zur Genauigkeitsbeurteilung der Orientierungsbestimmung werden die Standardabweichungen der einzelnen Parameter und zusätzlich die Differenzen zu den vorliegenden Referenzwerten der Orientierungsparameter betrachtet. Die erreichten absoluten Genauigkeiten werden durch die Differenzen von Referenzpunkten im 3D-Objektraum abgeschätzt.

Neben diesen zu untersuchenden Aspekten, die für beide Stufen zutreffen, werden individuell für das merkmalsbasierte und flächenbasierte Orientierungsverfahren folgende weitere Eigenschaften evaluiert.

Stufe 1

Für das merkmalsbasierte Orientierungsverfahren soll nachgewiesen werden, dass

- durch die Merkmalsdetektion unter simultaner Berücksichtigung von Helligkeits- und Entfernungsdaten grob falsche Merkmalspunkte von vornherein ausgeschlossen werden,
- die im Objektraum entzerrten Bildausschnitte eine maßstabs- und rotationsinvariante Merkmalsbeschreibung darstellen,
- der Kreuzkorrelationskoeffizient einem adäquaten Ähnlichkeitskriterium für den Vergleich der entzerrten Bildausschnitte entspricht und
- die vorgeschlagene Strategie zur Korrespondenzsuche nach der `GOODSAC`-Methode erfolgreich ist.

Der erste Punkt wird anhand eines repräsentativen Ausschnittes eines Datensatzes im Detail nachgewiesen und demonstriert. Dafür wird zuerst das Helligkeitsbild mit allen extrahierten *initialen Merkmalspunkten* und anschließend das Ergebnis der entwickelten Merkmalsdetektion, die *akzeptierten Merkmalspunkte*, aufgezeigt. Der Nachweis des zweiten Punktes, der invarianten Merkmalsbeschreibungen, wird visuell erbracht, indem exemplarisch die Bildausschnitte von korrespondierenden Merkmalspunkten grafisch gegenüber gestellt werden. Insbesondere die Invarianz des Maßstabs kann geprüft werden, wenn die zu verknüpfenden Standpunkte unterschiedliche Aufnahmeentfernungen aufweisen. Die Überprüfung des dritten und vierten Punktes geschieht jeweils durch die vollständige Prozessierung der paarweisen Orientierungsbestimmung von den Standpunkten der beiden realen Datensätze. In dem abschließenden Kapitel der merkmalsbasierten Untersuchungen werden die Ergebnisse hinsichtlich der Zielsetzungen diskutiert und es wird unter anderem aufgezeigt inwieweit sich der Kreuzkorrelationskoeffizient zur Beurteilung eines „good samples“ für die entwickelte Korrespondenzsuche eignet.

Stufe 2

In der zweiten Stufe werden die Orientierungsparameter durch das flächenbasierte Orientierungsverfahren bestimmt. Die in der ersten Stufe bestimmten Parameter dienen dabei als Näherungswerte. Die Untersuchungen werden durchgeführt um nachzuweisen, dass

- die Genauigkeit der Orientierungsparameter aus der Stufe 1 ausreicht, damit die Ausgleichung der flächenbasierten Orientierung zum globalen Minimum konvergiert,
- die flächenhafte und simultane Berücksichtigung der unterschiedlichen Eingangsbilder die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung steigert,
- die simultane Oberflächenrekonstruktion die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung im Vergleich zur einer konstant eingeführten Oberfläche steigert,
- und dass Helligkeitsbilder von Aufnahmestandpunkten, die keinen direkten Bezug zu dem Aufnahmestandpunkt eines 3D-Laserscanners haben, relativ zu Entfernungs- und Intensitätsbildern orientiert werden können, bei der ausschließlich die geometrische Objektoberfläche als Verknüpfungsinformation dient.

Die Untersuchungen werden anhand der in Kapitel 5.4.4 definierten Ausgleichungsfälle durchgeführt. Anhand der Quadratsumme der Verbesserungen der verwendeten Beobachtungsgruppen im Objektraum wird in jedem Ausgleichungsfall bewertet, inwieweit das globale Minimum erreicht wird (erster Punkt). Durch die Standardabweichungen der geschätzten Orientierungsparameter wird die Genauigkeit des flächenbasierten Verfahrens unter simultaner Berücksichtigung der verschiedenen Bilddaten für den Nachweis der Zielsetzung des zweiten und dritten Punktes beurteilt. Die Standardabweichung der Orientierungsparameter entspricht der erreichten inneren Genauigkeit. Die äußere Genauigkeit wird wie bereits erwähnt durch die Differenzen der Referenzpunkte im 3D-Objektraum abgeschätzt. Für den Nachweis und der Bewertung der Orientierung einzelner Helligkeitsbilder (vierter Punkt) wird ebenfalls ein Ausgleichungsfall aufgestellt und analysiert.

Neben den bisher definierten Zielsetzungen wird weiter untersucht inwieweit die Anzahl und Verteilung der Oberflächenausschnitte, die Anzahl der verwendeten Aufnahmestandpunkte sowie der Einfluss der einzelnen Bilddatentypen am Beispiel der Helligkeitsbilder die Orientierungsbestimmung bzw. das Konvergenzverhalten beeinflussen. Zur Beurteilung wird, neben der Angabe der inneren und äußeren Genauigkeit, zusätzlich das Konvergenzverhalten anhand der Unbekanntenzuschläge betrachtet.

5.2 Verwendete Datensätze

Für die experimentellen Untersuchungen stehen zwei terrestrische Datensätze zur Verfügung, die mit einem *kombinierten Messsystem* aufgenommen wurden. Das Messsystem steht in jedem Aufnahmestandpunkt lotrecht, wodurch ein Rotationswinkel in jedem Aufnahmestandpunkt bekannt ist bzw. ein Rotationsparameter unberücksichtigt bleiben kann. Die Helligkeits-, Entfernungs und Intensitätsbilder stellen in jedem Aufnahmestandpunkt aufgrund eines geringen Abstands-Basis-Verhältnises den betrachteten Objektbereich konvergent und perspektiv dar. Die Datensätze unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der Beschaffenheit der geometrischen Objektoberfläche. Der erste Datensatz (*Dresdner Frauenkirche*) beschreibt die glatte Objektoberfläche einer Kirchenfassade und der zweite Datensatz (*Verona Theater*) die raue Objektoberfläche einer historischen Gebäudefassade. Die beiden Objektoberflächen repräsentieren eine Auswahl möglicher unterschiedlicher Oberflächentopographien von Gebäudefassaden.

5.2.1 Parameter des verwendeten *kombinierten Messsystems*

Als *kombiniertes Messsystem* wurde das System „Riegl LSM-Z420i“ verwendet. Es besteht aus einem terrestrischen 3D-Laserscanner mit adaptierter Nikon D100 Kamera, s. RIEGL (2007). Der 3D-Laserscanner sowie die *Innere* und *Äußere Orientierung* der Kamera liegen kalibriert vor. Die *Äußere Orientierung* der Kamera bezieht sich auf das Sensorkoordinatensystem des 3D-Laserscanners (s. Kapitel 2.4) und wird im Folgenden als Exzentrizität bezeichnet. Die kalibrierten Exzentrizitätsparameter sind Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Die Kamera hat eine Auflösung von 3008 Pixel x 2000 Pixel. Die Größe eines Pixels beträgt 7,8 μm x 7,8 μm. Aufgrund signifikant unterschiedlicher Aufnahmeabstände in den beiden terrestrischen Datensätzen sind unterschiedliche Kameraobjektive verwendet worden. Die Kamerakonstante des verwendeten Objektives im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* beträgt 14 mm und im Datensatz *Verona Theater* 20 mm. Die jeweils durch Kalibrierung ermittelten Verzeichnungsparameter werden als Korrekturterme in den Abbildungsfunktionen der Helligkeitsbilder berücksichtigt.

Der 3D-Laserscanner tastet den Objektraum mit einem Sichtfeld von 360 Grad x 80 Grad ab. Die Genauigkeit einer einzelnen Entfernungsmessung beträgt 0,01 m. Der Messbereich der Entfernungsmessung ist

Parameter	*Dresdner Frauenkirche*	*Verona Theater*
$t_X[m]$	$-0,244$	$-0,221$
$t_Y[m]$	$0,013$	$-0,004$
$t_Z[m]$	$-0,054$	$-0,056$
$\omega[rad]$	$1,193$	$2,517$
$\phi[rad]$	$1,553$	$1,552$
$\kappa[rad]$	$1,947$	$0,627$

Tabelle 5.1: Exzentrizitätsparameter der kalibrierten Kamera im Sensorkoordinatensystem des kombinierten Messsystems

mit 2 m bis ca. 350 m angegeben und ist aufgrund des verwendeten Impulslaufzeitverfahrens nur durch die Intensität der reflektierten Signalstärke begrenzt. Die Strahldivergenz beträgt 0,25 mrad ($\approx$ 0,014 Grad). Die Entfernungs- und Intensitätsbilder beider Datensätze sind hochauflösend mit Winkelinkrementen von jeweils 0,05 Grad in Richtung von ϕ und θ aufgenommen worden.

5.2.2 Datensatz *Dresdner Frauenkirche*

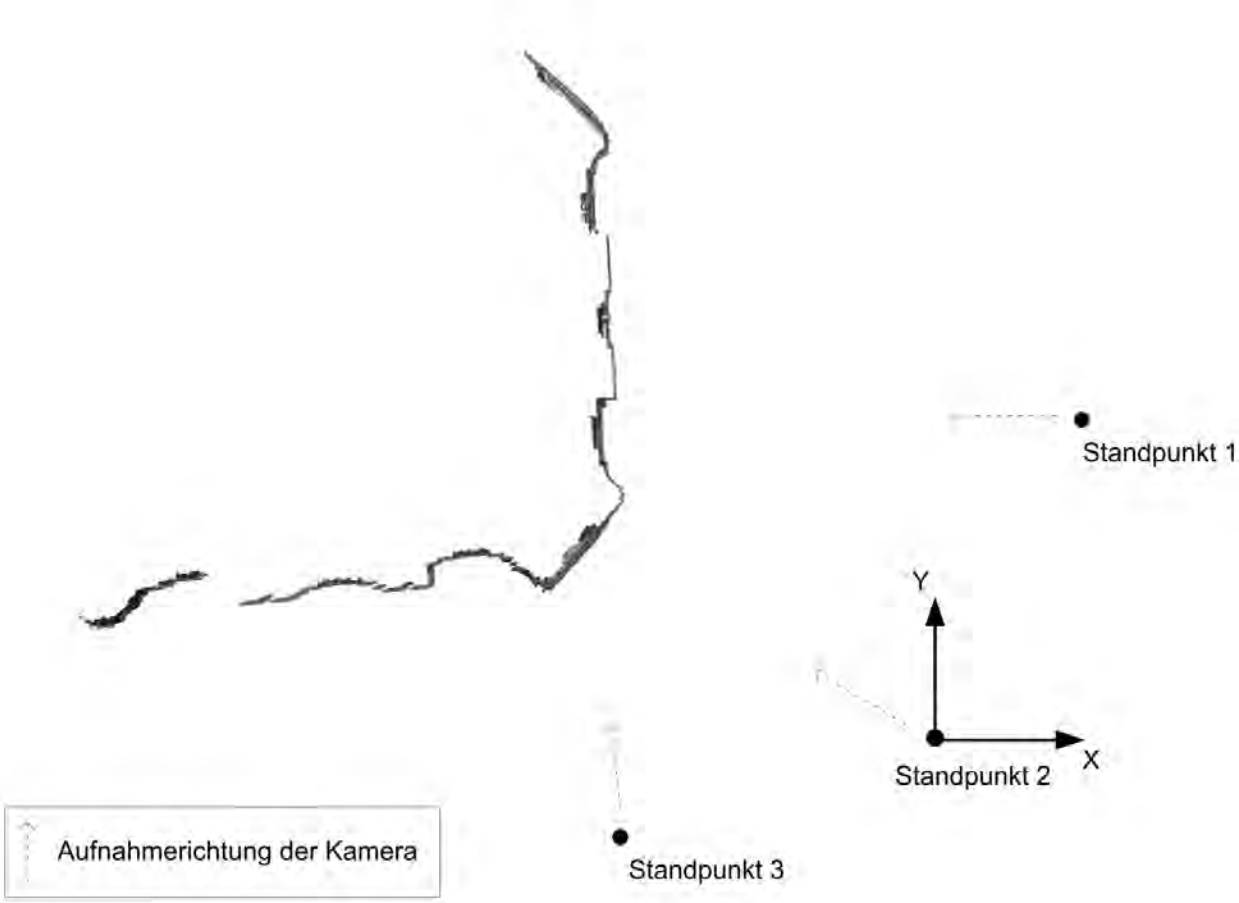
Der Datensatz besteht aus drei Aufnahmestandpunkten von einer Fassade der *Dresdner Frauenkirche*. Mit einer durchschnittlichen Entfernung von ca. 45 m zwischen Sensor und Objekt bildet sich ein Pixel des Entfernungs- und Intensitätsbildes auf einer Fläche von 0,04 m x 0,04 m und ein Pixel des Helligkeitsbildes auf einer Fläche von 0,02 m x 0,02 m ab. In Abbildung 5.1 (a) ist die Aufnahmekonfiguration skizziert. Das geodätische Datum ist im Aufnahmestandpunkt 2 definiert. Weiter werden durch die Helligkeitsbilder der einzelnen Aufnahmestandpunkte die Beschaffenheit der 3D-Oberfläche im Objektraum, die perspektive Verzerrung und in Teilen Verdeckungen bzw. Informationslücken verdeutlicht, wie sie ebenfalls in den Entfernungs- und Intensitätsbildern auftreten. Es liegen hinsichtlich der Objektoberfläche variierende Abstands-Basis-Verhältnisse vor, wie den Helligkeitsbildern (s. Abbildung 5.1 (b-d)) ebenfalls zu entnehmen ist. Die Objektoberfläche enthält im Überlappungsbereich für die Orientierungsbestimmung hinreichend planare Oberflächengeometrie mit adäquater Textur.

Die Orientierungsparameter der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Referenzwerte (s. Tabelle 5.2) sind mit Hilfe von Zielmarken bestimmt worden, die im Objektraum angebrachten wurden, und in einem übergeordnetem Koordinatensystem bestimmt sind. Die Parameter sind nicht als Referenzwerte mit einer höheren Genauigkeit zu interpretieren, da die Messungen mit demselben Messsystem durchgeführt wurden, stellen aber aufgrund der verwendeten Zielmarken die „besten“ verfügbaren Informationen dar. Die Referenzwerte der Orientierungsparameter wurden aus den manuell zugeordneten Referenzpunkten, deren 3D-Koordinaten durch den 3D-Laserscanner gemessen wurden, durch einen ausgleichenden Rückwärtsschnitt bestimmt. Neben den Referenzwerten (s. Tabelle 5.2) sind die Anzahl der Referenzpunkte, die als Verknüpfungspunkte zwischen den Aufnahmestandpunkten dienen, und die Standardabweichungen s_S, die die äußere Genauigkeit der Orientierungsbestimmung für den Aufnahmestandpunkt 1 bzw. 3 zum Aufnahmestandpunkt 2 angeben und aus den Abweichungen der jeweiligen Verknüpfungspunkte im Objektraum ermittelt wurden, genannt. Auch ist für jeden Aufnahmestandpunkt der Entfernungsbereich der betrachteten Objektszene angegeben, auf den bei der Diskussion der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen Bezug genommen wird.

Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$t_X[m]$	$12,195$	$0,000$	$-26,881$
$t_Y[m]$	$27,506$	$0,000$	$-7,902$
$t_Z[m]$	$-0,151$	$0,000$	$-0,181$
$\omega[rad]$	$0,044$	$0,000$	$0,016$
$\phi[rad]$	$-0,020$	$0,000$	$-0,042$
$\kappa[rad]$	$-0,623$	$0,000$	$0,668$
Anzahl Verknüpfungspunkte	10	-	6
$s_S[m]$	$0,016$	-	$0,019$
Entfernungsbereich $[m]$	40 bis 50	35 bis 60	25 bis 35

Tabelle 5.2: Referenzwerte der Orientierungsparameter des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

Abschließend ist anzumerken, dass die Zielmarken der Referenzpunkte in einer in Relation zur Objektgröße geringen Höhe (bis zu 3 m) im 360° Sichtfeld des 3D-Laserscanners angebracht wurden. Die Zielmarken



(a) Aufnahmekonfiguration (Draufsicht)

(b) Standpunkt 1

(c) Standpunkt 2

(d) Standpunkt 3

Abbildung 5.1: Aufnahmestandpunkte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

liegen daher auch außerhalb der betrachteten Oberfläche der Gebäudefassade. Außerhalb des durch die Referenzpunkte berücksichtigten Bereiches, nimmt die Aussagekraft der Referenzwerte aufgrund der Extrapolation ab.

5.2.3 Datensatz *Verona Theater*

Dieser Datensatz besteht aus drei Aufnahmestandpunkten von einer Fassade des Theaters in Verona. Mit einer durchschnittlichen Entfernung von ca. 25 m zwischen Sensor und der betrachteten Objektoberfläche bildet sich ein Pixel des Helligkeitsbildes mit 0,01 m x 0,01 m und ein Pixel des Entfernungs- und Intensitätsbildes mit 0,02 m x 0,02 m ab. In Abbildung 5.2 (a) ist die Aufnahmekonfiguration skizziert. Das geodätische Datum ist wieder im Aufnahmestandpunkt 2 definiert. Der Aufnahmestandpunkt 2 enthält aufgrund seines geringsten Aufnahmeabstandes und zentralen Betrachtungsrichtung die Bilder mit der höchsten Auflösung. Bei Betrachtung der Helligkeitsbilder (s. Abbildung 5.2 (b-d)) wird deutlich, dass die Objektoberfläche im Vergleich zum Datensatz *Dresdner Frauenkirche* keine glatten, ebenen Bereiche, sondern eine raue Oberflächentopographie aufweist.

Aufgrund der Aufnahmekonfiguration stellen die Bilder der Standpunkte die Objektoberfläche perspektiv verzerrt dar und enthalten Verdeckungen bzw. Informationslücken. Im Gegensatz zum Datensatz *Dresdner Frauenkirche* sind die Verdeckungen nicht nur durch die perspektive Abbildung von Gebäudekanten mit unterschiedlicher Tiefe, sondern durch die raue Oberflächentopographie zusätzlich auf der Oberfläche, zu erwarten. Wieder liegen Referenzwerte für die Orientierungsparameter vor, s. Tabelle 5.3, die ebenfalls mit Hilfe von Zielmarken erzeugt wurden und in einer hinsichtlich der erfassten Objektoberfläche geringen Höhe (bis zu 3 m) angebracht wurden.

Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$t_X[m]$	$-13,990$	$0,000$	$13,420$
$t_Y[m]$	$11,018$	$0,000$	$-18,503$
$t_Z[m]$	$0,001$	$0,000$	$-0,053$
$\omega[rad]$	$0,056$	$0,000$	$0,003$
$\phi[rad]$	$-0,035$	$0,000$	$0,261$
$\kappa[rad]$	$-0,256$	$0,000$	$0,252$
Anzahl Verknüpfungspunkte	14	-	11
$s_S[m]$	$0,011$	-	$0,009$
Entfernungsbereich $[m]$	15 bis 25	15 bis 20	25 bis 36

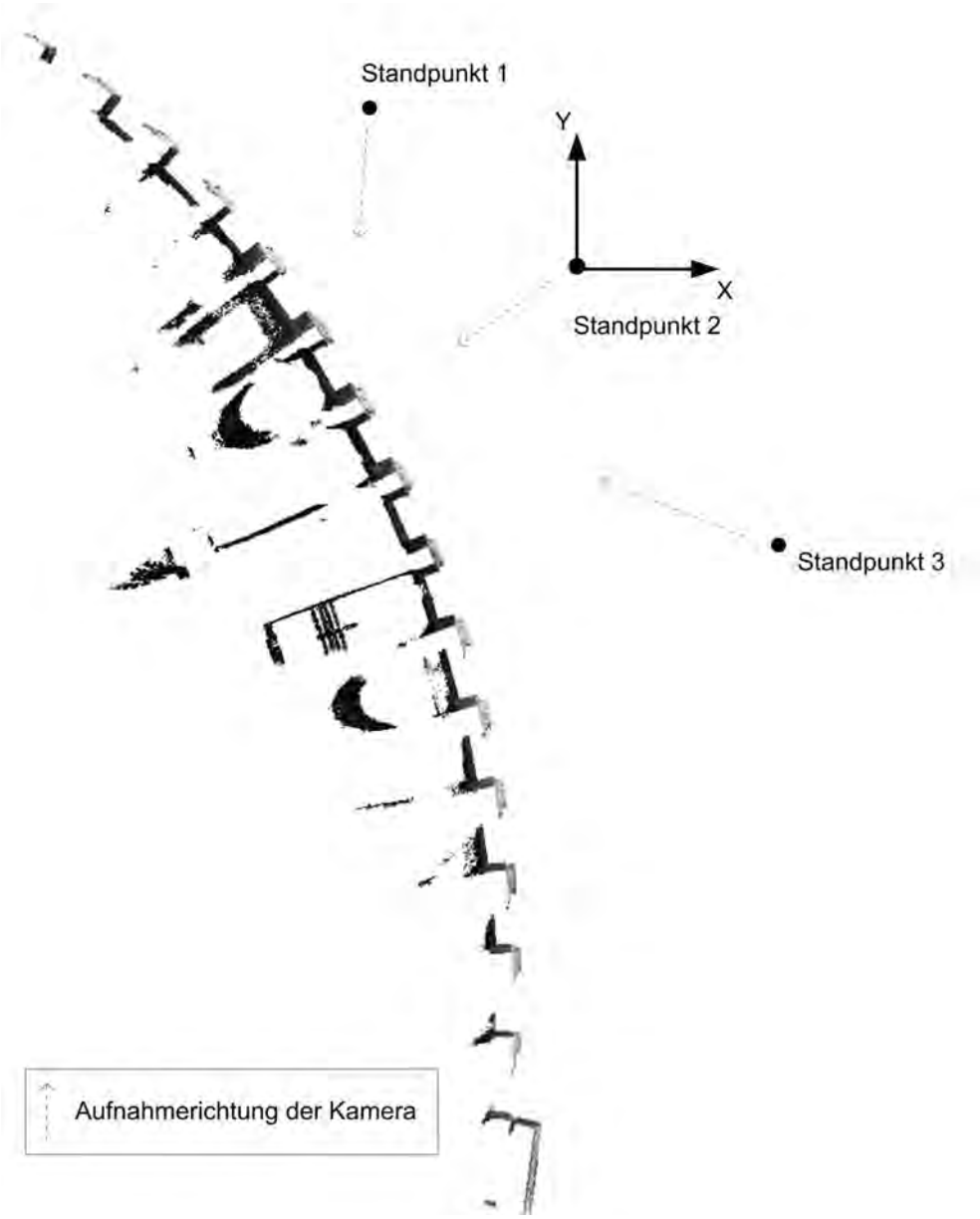
Tabelle 5.3: Referenzwerte der Orientierungsparameter des Datensatzes Verona Theater

5.3 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung

Zur paarweisen Orientierung von Aufnahmestandpunkten mit der Methode der merkmalsbasierten Orientierungsbestimmung werden zur Prozessierung die Parameter in Tabelle 5.4 verwendet.

5.3.1 Extraktion der Merkmalspunkte

Zur Detektion *initialer Merkmalspunkte* wird der pixelgenaue `SUSAN`-Operator (s. Kapitel 3.2.1) mit den in Tabelle 5.4 genannten Schwellwerten verwendet. Der `SUSAN`-Operator wurde gewählt, da er bereits als Software verfügbar war und mit diesem Operator bereits Erfahrungen gesammelt wurden. Er ist, wie bereits im Kapitel 4.1 erläutert, durch andere Interest-Operatoren austauschbar. Durch den gewählten Schwellwert s von 50% der Pixel der Maskenfläche werden Merkmalseckpunkte detektiert. Mit der Maskengröße und dem Helligkeitsdifferenzschwellwert wird die Empfindlichkeit des Operators bestimmt und damit Einfluss auf die Anzahl der detektierten Merkmalspunkte genommen. Im Rahmen dieser Auswertung ist eine ausreichende Anzahl *initialer Merkmalspunkte* im Überlappungsbereich der Aufnahmestandpunkte von Bedeutung, die durch die empirisch ermittelten Werte von t erreicht wurde. Aufgrund der kontrastreichen Helligkeitsbilder im Datensatz *Verona Theater* wird für t grundsätzlich ein höherer Wert im Vergleich zum Datensatz *Dresdner Frauenkirche* definiert, um die Empfindlichkeit des `SUSAN`-Operators zu reduzieren. Im Helligkeitsbild des Aufnahmestandpunktes 2 (s. Abbildung 5.2 (c)) wird die Empfindlichkeit abermals reduziert, um die Anzahl der *initialen Merkmalspunkte* aufgrund des Detailreichtums des Bildes zu reduzieren und damit auf ein ähnliches Niveau im Überlappungsbereich im Vergleich zu den anderen Aufnahmestandpunkten zu bringen. Zur Bestimmung der *akzeptierten Merkmalspunkte* werden die Planarität und der Betrachtungswinkel



(a) Aufnahmekonfiguration (Draufsicht)

(b) Standpunkt 1

(c) Standpunkt 2

(d) Standpunkt 3

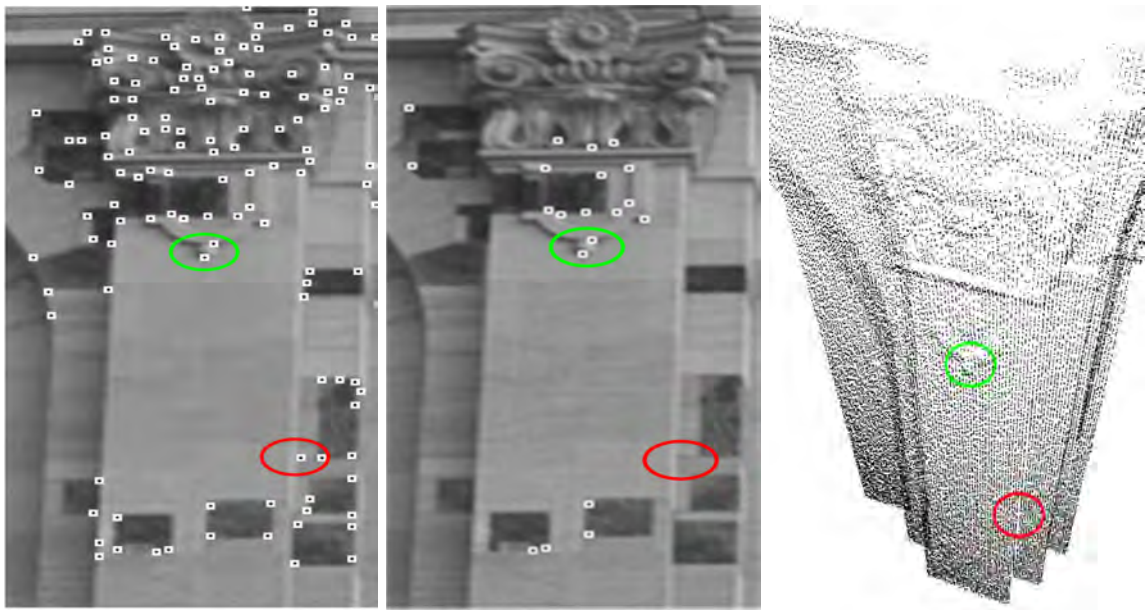
Abbildung 5.2: Aufnahmestandpunkte des Datensatzes Verona Theater

Parameter	*Dresdner Frauenkirche*	*Verona Theater*
Merkmalsdetektion		
`SUSAN` t	20 Grauwerte (S. 1 - 3)	40 Grauwerte (S. 1 u. 3) 50 Grauwerte (S. 2)
`SUSAN` s	50 %	50 %
`SUSAN` Maskengröße	10 Pixel^2	10 Pixel^2
Betrachtungswinkel, max. α	60 Grad	60 Grad
Planarität, max. β	0,1 m	0,1 m
Maskengröße zur Punktsuche	50 x 50 Pixel^2	30 x 30 Pixel^2
Merkmalsbeschreibung		
Größe entzerrte Bildausschnitte	30 x 30 Surfel^2	20 x 20 Surfel^2
Surfelgröße	0,01 x 0,01 m^2	0,005 x 0,005 m^2
Korrespondenzsuche		
Ähnlichkeitsmaß	0,6	0,6
Fehlertoleranzen	0,2 m	0,1 m
maximale Anzahl Iterationen	300	300

Tabelle 5.4: Parameter der Prozessierungsschritte für die merkmalsbasiert Orientierungsbestimmung

berechnet und mit den definierten Schwellwerten für α und β verglichen. Unterschreiten die Kriterien zur Beurteilung der Planarität und des Betrachtungswinkels die maximal zulässigen Werte in Tabelle 5.4, so ist der Merkmalspunkt akzeptiert. Die gewählten Größen der Parameter zur Merkmalsbeschreibung und Korrespondenzsuche werden erst in den zugehörigen noch folgenden Abschnitten diskutiert.

Zur Verdeutlichung des gesamten Prozesses zur Merkmalspunktextraktion wird in Abbildung 5.3 anhand eines Ausschnittes der Gebäudefassade im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* das Prinzip zur Bestimmung der *initialen* und *akzeptierten Merkmalspunkte* demonstriert. Neben dem Ausschnitt des Helligkeitsbildes in



(a) (b) (c)

Abbildung 5.3: Demonstration der Merkmalspunktextraktion. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte. (c) Geometrie der Objektoberfläche.

Abbildung 5.3 (a,b) ist in Abbildung 5.3 (c) der gleiche Ausschnitt des Entfernungsbildes als 3D-Punktwolke dargestellt. Die Punktwolke ist perspektiv verdreht, um die hervorstehende Geometrie mit ihren Diskontinuitäten zu verdeutlichen. Mit Hilfe des verwendeten Interest-Operators werden im Helligkeitsbild sowohl im planaren Bereich, als auch im Bereich der geometrischen Diskontinuitäten *initiale Merkmalspunkte* extrahiert, s. Abbildung 5.3 (a). Abbildung 5.3 (b) enthält dagegen nur noch die *akzeptierten Merkmalspunkte*, die nach der Prüfung auf Planarität und des Betrachtungswinkels bestehen bleiben. In dem in Grün markierten Fall liegt der *initiale Merkmalspunkt* zwar in einem Bereich mit ausgeprägter Geometrie entlang der Gebäu-

defassade (Textur im Entfernungsbild) vor, die aber als hinreichend planar beurteilt und damit akzeptiert wird. In dem in Rot markierten Fall werden die Merkmalspunkte verworfen. Die Planarität ist innerhalb des Einzugsbereiches der definierten Maske nicht gegeben, da 3D-Punkte bzw. Entfernungswerte von zwei Ebenen der Gebäudefassade mit unterschiedlicher Tiefe (s. Abbildung 5.3 (c)) zur Beurteilung herangezogen werden. Die Größe der Markierungen in Grün und Rot entspricht in etwa dem Einzugsbereich der Maske die zur Beurteilung verwendet wird.

Zur Bestimmung der *akzeptierten Merkmalspunkte* werden zuerst die 3D-Punkte des Entfernungsbildes in das Helligkeitsbild projiziert und innerhalb einer definierten Maske die 3D-Punkte zur Beurteilung ausgewählt. Die Maskengröße ist in Abhängigkeit der gewünschten Größe des entzerrten Bildausschnittes zu wählen.

Für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* werden innerhalb einer Maske von 50 Pixel x 50 Pixel die 3D-Punkte zur Beurteilung ausgewählt, was einem Bereich von ca. 1 m x 1 m an der Gebäudefassade entspricht, der mit ca. 15 x 15 Punkten des 3D-Laserscanners erfasst wurde. Durch die große Anzahl von Punkten haben einzelne Ausreißer und Messrauschen in den Entfernungsdaten nur eine geringe Auswirkung auf die Bestimmung der Tangentialebene. Bei der Größe des entzerrten Bildausschnittes zur Merkmalsbeschreibung ist darauf zu achten, dass der Bereich des Bildausschnittes nicht über den auf Planarität geprüften Oberflächenbereich hinausgeht. Zudem ist anzumerken, dass, je größer der Bildausschnitt ist, desto eindeutiger auch der Merkmalspunkt beschrieben ist. Aufgrund des damit verbundenen großen auf Planarität zu prüfenden Bereiches werden aber auch umso mehr *initiale Merkmalspunkte* verworfen. Für diesen Datensatz hat sich eine Bildrastergröße von 30 x 30 Elementen als geeignet herausgestellt in dessen Zentrum die markante Textur eines Merkmalspunktes liegt. Damit das Bildsignal im Objektraum eindeutig dargestellt wird, wurde in Anlehnung an das Abtasttheorem eine doppelte Abtastrate gewählt und damit eine Surfelgröße von 0,01 m x 0,01 m definiert. Die verworfenen *initialen Merkmalspunkte* (vgl. Abbildung 5.3 (b)) sind auf das Kriterium der Planarität zurückzuführen. Das Kriterium des Betrachtungswinkels schließt dagegen im Wesentlichen ganze Bereiche mit starken perspektiven Verzerrungen aus. Nur in Ausnahmefällen sorgt das Kriterium des Betrachtungswinkels innerhalb gut sichtbarer Bereiche für den Ausschluss des Merkmalspunktes. Zum Beispiel wäre es denkbar, dass bei Verwendung einer sehr geringen Maskengröße im Bereich einer geometrischen Diskontinuität das Kriterium der Planarität gewährleistet ist, weil sich die ausgleichende Ebene den ausgewählten 3D-Punkten anschmiegt. Dann würde aber durch die Verdrehung der Tangentialebene hinsichtlich der Betrachtungsrichtung dieser Merkmalspunkt dennoch verworfen werden. Der Ausschluss von Merkmalspunkten aufgrund des nicht eingehaltenen Betrachtungswinkels wird erst in den späteren Ergebnissen erläutert.

Für den Datensatz *Verona Theater* wurden in Abhängigkeit der vorliegenden Bildmaßstäbe modifizierte Maskengrößen verwendet. Die Maskengröße von 30 Pixel x 30 Pixel zur Bestimmung der *akzeptierten Merkmalspunkte* entspricht aufgrund des kürzeren Abstandes zum Objekt einer Fläche von 0,3 m x 0,3 m. Die Punktanzahl zur Berechnung der Tangentialebene bleibt mit ca. 15 x 15 Punkten des 3D-Laserscanners im Vergleich zum Datensatz *Dresdner Frauenkirche* identisch. Die Bildrastergröße eines entzerrten Bildausschnittes wird mit 30 x 30 Elementen gewählt und ist mit einer Surfelgröße von 0,005 m x 0,005 m definiert.

Die Anzahl der *initialen Merkmalspunkte* bzw. der nach der Prüfung auf Planarität und des Betrachtungswinkels *akzeptierten Merkmalspunkte* von beiden Datensätzen sind Tabelle 5.5 zu entnehmen. Es wird deutlich, dass in jedem Aufnahmestandpunkt eine große Anzahl von Merkmalskandidaten verworfen wird und damit die Merkmalspunktlisten um mögliche inkonsistente Punkte für die Korrespondenzsuche bereinigt worden sind. Die Anzahl und Verteilung der *initialen* und *akzeptierten Merkmalspunkte* ist in den Abbildun-

	Initiale Merkmalspunkte	*Akzeptierte Merkmalspunkte*
Dresdner Frauenkirche		
Standpunkt 1	5702	378
Standpunkt 2	8167	338
Standpunkt 3	4080	134
Verona Theater		
Standpunkt 1	7208	2046
Standpunkt 2	3386	1445
Standpunkt 3	2018	342

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Merkmalspunktextraktion

gen (A.1, A.2, A.3) sowie (A.4, A.5, A.6) im Anhang der einzelnen Aufnahmestandpunkte dargestellt. Es wird deutlich, dass die Anzahl und Verteilung der *initialen Merkmalspunkte* von der Oberflächentextur und bei den *akzeptierten Merkmalspunkten* zusätzlich von der Oberflächentopographie und der Aufnahmeperspektive abhängig ist.

Insbesondere im Datensatz *Verona Theater* fällt die geringe Anzahl der *initialen* und *akzeptierten Merkmalspunkte* des Aufnahmestandpunktes 3 im Vergleich zu den ersten beiden Aufnahmestandpunkten auf, was dadurch begründet ist, dass das Helligkeitsbild den potentiellen Überlappungsbereich auf einer Fläche von weniger als 1/4 der Sensorfläche der Kamera abbildet und aufgrund des vergleichsweise geringen Bildmaßstabs im Überlappungsbereich nur wenig markante Textur aufweist.

5.3.2 Korrespondenzsuche

Mit den ermittelten *akzeptierten Merkmalspunkten* wird die paarweise Korrespondenzsuche durchgeführt. Anhand der Merkmalsbeschreibung werden die Merkmalspaare mit der höchsten Ähnlichkeit ermittelt. Aus der Menge der Merkmalspaare mit einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 0,6, die den *kandidierenden Merkmalskorrespondenzen* entsprechen, wird die zufällige Auswahl der minimalen Anzahl von Beobachtungen durchgeführt (s. Tabelle 5.4). Der Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten von 0,6 wurde empirisch ermittelt. Aus den Beobachtungen werden die Orientierungsparameter der aktuellen Iteration der `RANSAC`-Methode bestimmt, um dann mit Hilfe des geometrischen Schwellwertes innerhalb der geometrischen Konsistenzprüfung die Anzahl der *konsistenten Korrespondenzen* zu ermitteln. Als Schwellwert für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* wird die *Euklidische Distanz* von 0,2 m gewählt, mit der ein Merkmalspaar als konsistent definiert wird. In den Bildraum des Helligkeitsbildes übertragen entspricht das, bei einer Auflösung eines Pixels von 0,02 m, einer maximalen lateralen Abweichung von 10 Pixeln. Liegen mehrere Punkte innerhalb des Schwellwertes vor, wird der am nächsten gelegene Punkt als Merkmalskorrespondenz bestimmt. Analog dazu wird der Schwellwert für den Datensatz *Verona Theater* aufgrund der höheren Bildauflösung mit 0,1 m gewählt, was ebenfalls einer maximalen lateralen Abweichung von 10 Pixeln entspricht.

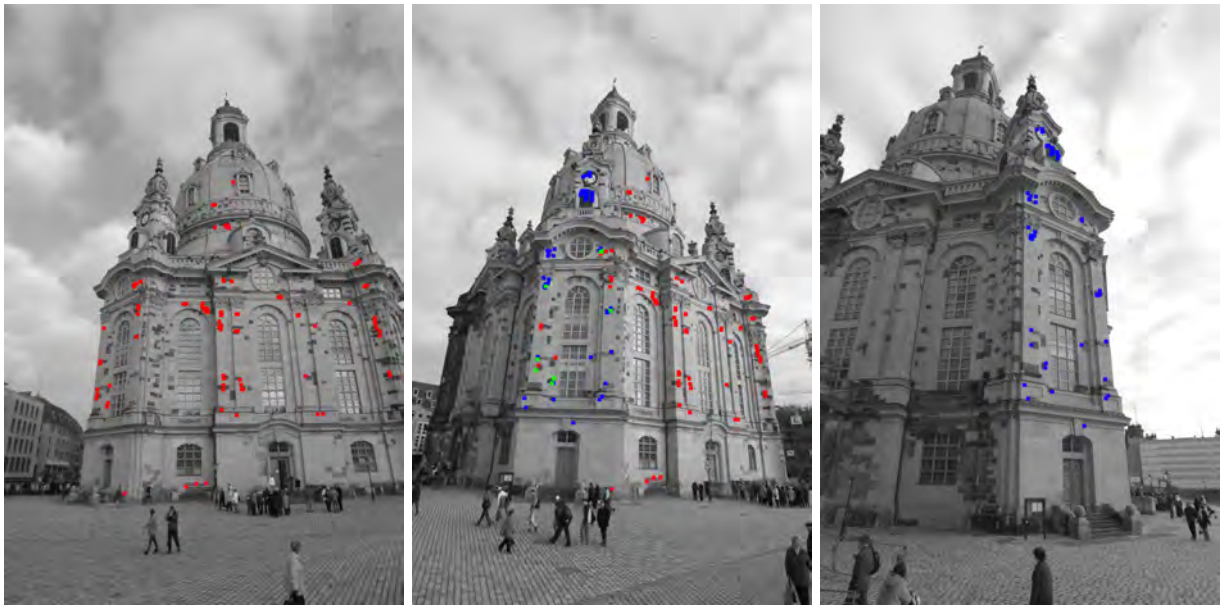
Bei der Definition der Größe des Schwellwertes der *Euklidischen Distanz* für die geometrische Konsistenzprüfung ist zu beachten, dass aufgrund der minimalen Anzahl von Beobachtungen zur Orientierungsbestimmung innerhalb der `RANSAC`-Methode ungünstige Konstellationen und Extrapolationen auftreten können. Abweichungen in den Merkmalspunkten, die aufgrund der pixelgenauen Detektion bis zu 0,02 m (bzw. 0,01 m) betragen können, wirken sich dabei direkt auf die Orientierungsparameter aus und lassen konsistente Punktpaare bei fortlaufender Entfernung zu den verwendeten Beobachtungen (Merkmalskorrespondenzen) auseinanderklaffen. Der um den Faktor 10 größer definierte Schwellwert lässt damit zu, dass die geringfügig auseinanderklaffenden Punktpaare weiterhin als konsistent deklariert werden können. Je größer der Schwellwert gewählt wird, desto größer ist auch die Robustheit der Korrespondenzsuche anzusehen, da die Wahrscheinlichkeit eine *konsistente Korrespondenz* zu finden steigt. Nachteilig wirkt sich dabei aber aus, dass zum einen möglicherweise ungenaue Korrespondenzen als konsistent definiert werden und zum anderen auch einzelne Merkmalspunkte eines Standpunktes mehrfach als Korrespondenz von Punkten des anderen Standpunktes verwendet werden. Beide Fälle führen zu einer Verminderung der Genauigkeit der Orientierungsbestimmung. Tabelle 5.6 fasst die Ergebnisse der einzelnen Prozessierungschritte zusammen. Die Anzahl

	Standpunkt 1 und 2	Standpunkt 2 und 3
Dresdner Frauenkirche		
Konsistente Korrespondenzen	91	75
Verona Theater		
Konsistente Korrespondenzen	928	210

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Korrespondenzsuche

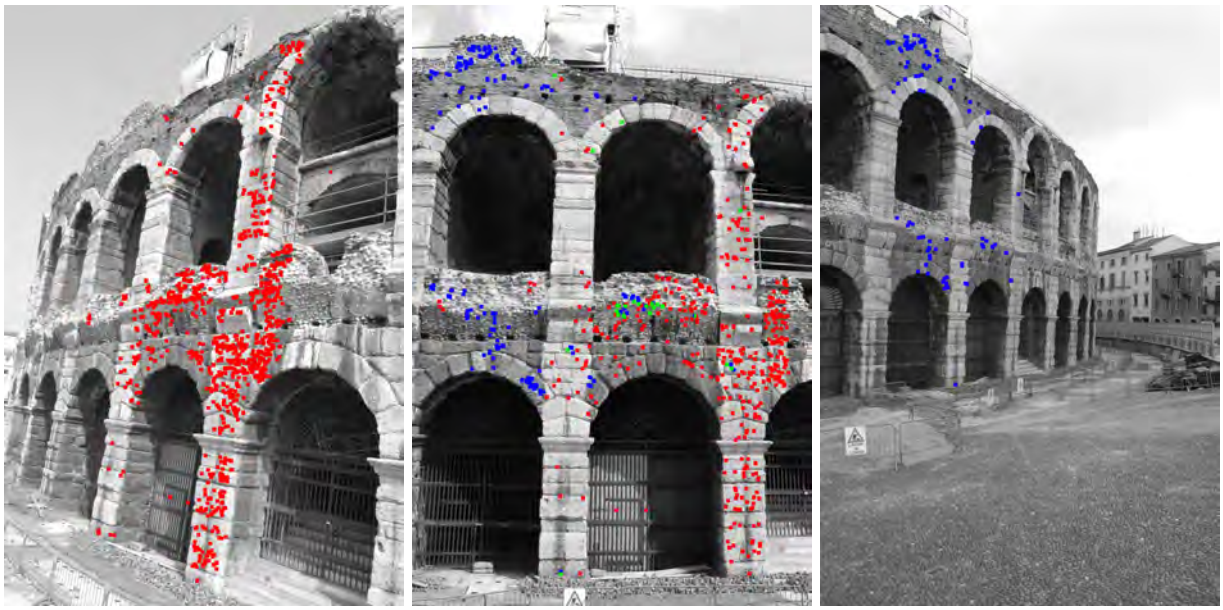
und Verteilung der *konsistenten Korrespondenzen* über den Überlappungsbereich der Aufnahmestandpunkte ist in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 dargestellt. Die *konsistenten Korrespondenzen* zwischen den Aufnahmestandpunkten 1 und 2 sind in Rot dargestellt und die *konsistenten Korrespondenzen* zwischen den Aufnahmestandpunkten 2 und 3 in Blau. Die Merkmalspunkte des zweiten Aufnahmestandpunktes (s. Abbildung 5.4 (b)), die sowohl zur Verknüpfung des ersten und dritten Aufnahmestandpunktes genutzt werden, sind in Grün dargestellt. Betrachtet man den Überlappungsbereich zwischen dem zweiten und dritten Aufnahmestandpunkt, wird nochmal das Ausschlusskriterium des Betrachtungswinkels deutlich, da nur *konsistente Korrespondenzen* an der Hauptfassade in dieser Perspektive bestimmt werden und der gesamte linke Bereich, der daran angrenzenden und schräg betrachteten Fassade, ausgeschlossen wird.

Wie schon beschrieben werden Punkte, die innerhalb des gewählten Fehlertoleranzmaßes fallen, als *konsistente Korrespondenzen* akzeptiert. Treten aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmeperspektive in den Abbildungen gleicher Objektbereiche unterschiedlich viele Merkmalspunkte auf, kann somit auch ein Merkmalspunkt mehrmals als konsistente Korrespondenz dienen. In Abbildung 5.6 ist ein Beispiel für eine solche Situation aufgezeigt. Zwischen den Abbildung 5.6 (a) und (b) wurden innerhalb des in Grün markierten Be-



(a) Standpunkt 1 (b) Standpunkt 2 (c) Standpunkt 3

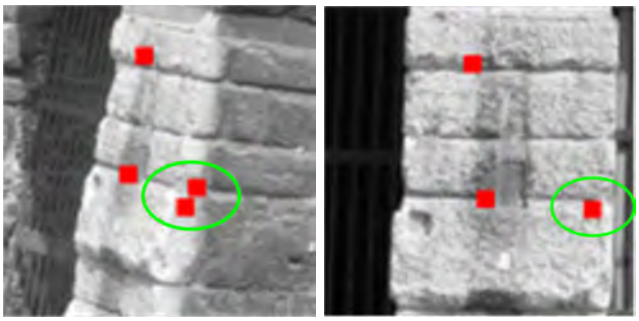
Abbildung 5.4: Konsistente Merkmalskorrespondenzen der Aufnahmestandpunkte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche. Rote Merkmalspunkte: konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2. Blaue Merkmalspunkte: konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 2 und 3. Grüne Merkmalspunkte: gemeinsame konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2 sowie Standpunkt 2 und 3.



(a) Standpunkt 1 (b) Standpunkt 2 (c) Standpunkt 3

Abbildung 5.5: Konsistente Merkmalskorrespondenzen der Aufnahmestandpunkte des Datensatzes Verona Theater. Rote Merkmalspunkte: konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2. Blaue Merkmalspunkte: konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 2 und 3. Grüne Merkmalspunkte: gemeinsame konsistente Merkmalskorrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2 sowie Standpunkt 2 und 3.

reiches 2 Merkmalspunkte des ersten Aufnahmestandpunktes einem einzelnen Merkmalspunkt des zweiten Aufnahmestandpunktes zugeordnet.



(a) Standpunkt 1 (b) Standpunkt 2

Abbildung 5.6: Beispiel von mehrfachen konsistenten Korrespondenzen im Datensatz Verona Theater. Der in Grün hervorgehobene Objektbereich zeigt zwei benachbarte Merkmalspunkte des Aufnahmestandpunktes 1 in (a), die einem einzelnen Merkmalspunkt des Aufnahmestandpunktes 2 in (b) zugeordnet sind.

Abschließend werden aus den *konsistenten Korrespondenzen* durch eine Kleinste-Quadrate Ausgleichung die Orientierungsparameter zwischen den beiden jeweiligen Aufnahmestandpunkten bestimmt. Tabelle 5.7 zeigt die ermittelten Orientierungsparameter der einzelnen Aufnahmestandpunkte. Die Parameter werden relativ zum zweiten Aufnahmestandpunkt, in dem das geodätische Datum definiert wurde, angegeben. Die Standardabweichungen und die Differenzen zu den Referenzwerten sind ebenfalls der Tabelle 5.7 zu entnehmen. Die Genauigkeitsunterschiede in den einzelnen Parametern sind auf die Anzahl und Verteilung der *konsistenten Korrespondenzen* zurückzuführen. Bei der Betrachtung der Differenzen zu den Referenzwerten wird deutlich, dass die Parameter des Aufnahmestandpunktes 3 in beiden Datensätzen die größten Werte aufweisen, die durch die vergleichsweise geringe Anzahl an *konsistenten Merkmalskorrespondenzen* zur Orientierungsbestimmung begründet ist. Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* sind die Differenzen zu den Referenzwerten der Parameter des dritten Aufnahmestandpunktes um den Faktor 2 bis 4 größer als die des ersten Standpunktes. Es ist kein Trend in einer bestimmten Koordinatenrichtung erkennbar. Die Standardabweichungen s_S liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Differenzen der Translationsparameter zu den Referenzwerten vor. Im Datensatz *Verona Theater* ist bei der Betrachtung der Differenzen der Aufnahmestandpunkte 1 und 3 ebenfalls kein Trend in eine bestimmte Richtung der Koordinatenachse des Objektraumkoordinatensystems erkennbar. Im Aufnahmestandpunkt 3 sind die Differenzen insbesondere in der Y- und Z-Achse ($0,116$ bzw. $-0,188$) zwar deutlich größer als in der X-Achse ($0,024$), was aber aufgrund der Standardabweichung von $s_S = 0,097$ zu keiner Aussage führt. Die Abweichungen lassen sich bei analoger Betrachtung der Differenzen in den Rotationsparametern plausibel erklären: In der Rotation um die X-Achse liegt die größte Abweichung und in der Rotation um die Z-Achse die geringste Abweichung vor. Die Abweichungen in den Rotationen bewirken die bereits genannten Abweichungen in den Translationen. Insgesamt sind die Abweichungen zwischen dem zweiten und dritten Aufnahmestandpunkt auf die stark unterschiedlichen Aufnahmeperspektiven, bei nahezu doppelten Aufnahmeabstand von ca. 15 m (Standpunkt 2) zu ca. 30 m (Standpunkt 3), zurückzuführen.

Neben den beschriebenen Ungenauigkeiten sind ebenfalls Mehrdeutigkeiten in den Merkmalsbeschreibungen zu erwarten, da zum einen in Bereichen von markanter Textur Merkmalspunkte gehäuft auftreten und zum anderen eine begrenzte Bildrastergöße für die Merkmalspunktbeschreibung verwendetet wurde. Ein Beispiel für gehäuft auftretende Merkmalspunkte, die dann mehrdeutige Merkmalsbeschreibungen aufweisen, sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Mehrdeutige Merkmalspunkte, die dicht beisammen liegen, führen nicht

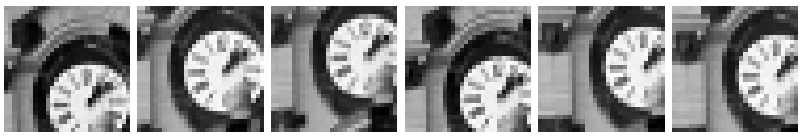


Abbildung 5.7: Beispiel möglicher Mehrdeutigkeiten im Aufnahmestandpunkt 2, Datensatz Dresdner Frauenkirche

zum Versagen des Verfahrens, sondern zu Genauigkeitseinbußen bei der Bestimmung der Orientierungsparameter in der Größenordnung des verwendeten Schwellwertes für die Fehlertoleranzen in der Korrespondenzsuche (s. Tabelle 5.4).

Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
Dresdner Frauenkirche			
$t_X[m]$	$12,210$	$0,000$	$-26,848$
$\Delta_{t_X}[m]$	$0,015$	-	$0,032$
$s_{t_X}[m]$	0,61e-002	-	1,33e-002
$t_Y[m]$	$27,517$	$0,000$	$-7,855$
$\Delta_{t_Y}[m]$	$0,010$	-	$0,046$
$s_{t_Y}[m]$	2,07e-002	-	8,17e-002
$t_Z[m]$	$-0,161$	$0,000$	$-0,268$
$\Delta_{t_Z}[m]$	$-0,010$	-	$-0,086$
$s_{t_Z}[m]$	2,13e-002	-	2,57e-002
$\omega[rad]$	$0,044$	$0,000$	$0,015$
$\Delta_{\omega}[rad]$	$0,000$	-	$-0,000$
$s_{\omega}[rad]$	2,30e-004	-	9,16e-004
$\phi[rad]$	$-0,021$	$0,000$	$-0,042$
$\Delta_{\phi}[rad]$	$-0,000$	-	$0,000$
$s_{\phi}[rad]$	2,37e-004	-	3,59e-004
$\kappa[rad]$	$-0,624$	$0,000$	$0,668$
$\Delta_{\kappa}[rad]$	$-0,001$	-	$-0,001$
$s_{\kappa}[rad]$	2,16e-004	-	14,15e-004
$s_S[m]$	0,013	-	0,027
Verona Theater			
$t_X[m]$	$-13,968$	$0,000$	$13,445$
$\Delta_{t_X}[m]$	$0,021$	-	$0,024$
$s_{t_X}[m]$	5,28e-003	-	4,41e-002
$t_Y[m]$	$10,999$	$0,000$	$-18,386$
$\Delta_{t_Y}[m]$	$-0,018$	-	$0,116$
$s_{t_Y}[m]$	1,66e-002	-	5,64e-002
$t_Z[m]$	$0,002$	$0,000$	$-0,241$
$\Delta_{t_Z}[m]$	$0,001$	-	$-0,188$
$s_{t_Z}[m]$	1,08e-002	-	2,99e-002
$\omega[rad]$	$0,052$	$0,000$	$0,011$
$\Delta_{\omega}[rad]$	$-0,003$	-	$0,008$
$s_{\omega}[rad]$	2,79e-004	-	4,68e-004
$\phi[rad]$	$-0,0360$	$0,000$	$0,266$
$\Delta_{\phi}[rad]$	$0,000$	-	$0,005$
$s_{\phi}[rad]$	3,03e-004	-	5,99e-004
$\kappa[rad]$	$-0,258$	$0,000$	$0,248$
$\Delta_{\kappa}[rad]$	$-0,001$	-	$-0,003$
$s_{\kappa}[rad]$	4,86e-004	-	11,88e-004
$s_S[m]$	$0,028$	-	$0,097$

Tabelle 5.7: Ermittelte Parameter und Standardabweichungen der merkmalsbasierten Orientierungsbestimmung sowie Differenzen zu den Referenzwerten

5.3.3 Diskussion

Insgesamt können die Zielsetzungen der Methode erreicht werden, was anhand der experimentellen Untersuchungen demonstriert wurde und im Weiteren für die wesentlichen Prozessierungsschritte diskutiert wird.

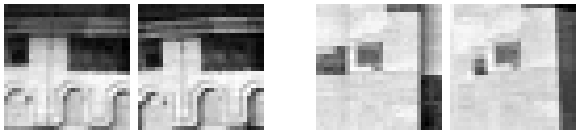
5.3.3.1 Merkmalsdetektion

Mit Hilfe der beiden realen Datensätze konnte nachgewiesen werden, dass mit Hilfe der entwickelten Methode *initiale Merkmalspunkte*, die gegebenenfalls grob inkonsistente Merkmalspunkte darstellen, erfolgreich herausgefiltert werden können und die verbleibenden *akzeptierten Merkmalspunkte*, mit ihrer Anzahl und Verteilung, eine ausreichende Punktmenge zur paarweisen Orientierungsbestimmung darstellen (s. Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5).

5.3.3.2 Merkmalsbeschreibung

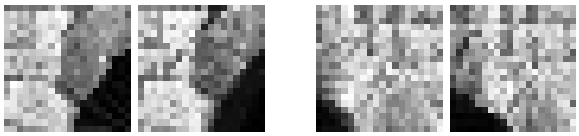
Die erfolgreiche Zuordnung innerhalb der Korrespondenzsuche ist ein Nachweis dafür, dass die entzerrten Bildausschnitte maßstabs- und rotationsinvariante Merkmalsbeschreibungen darstellen, und dass somit auch der Kreuzkorrelationskoeffizient einem geeigneten Ähnlichkeitskriterium entspricht.

Zur grafischen Beurteilung der Ähnlichkeit von Merkmalsbeschreibungen der *konsistenten Korrespondenzen* werden exemplarisch jeweils die Bildausschnitte der Merkmalsbeschreibungen zwischen dem ersten und zweiten Aufnahmestandpunkt mit dem höchsten Korrelationskoeffizient (a,b) und dem niedrigsten Korrelationskoeffizient (c,d) für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* in Abbildung 5.8 und für den Datensatz *Verona Theater* in Abbildung 5.9 dargestellt. Die entzerrten Bildausschnitte (s. Abbildung 5.8) mit dem



(a) S. 1 (b) S. 2 (c) S. 1 (d) S. 2

Abbildung 5.8: Entzerrte Bildausschnitte der konsistenten Korrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2. (a),(b) Höchster Korrelationskoeffizient ($\rho_{fc} = 0,92$). (c),(d) Niedrigster Korrelationskoeffizient ($\rho_{fc} = 0,60$).



(a) S. 1 (b) S. 2 (c) S. 1 (d) S. 2

Abbildung 5.9: Entzerrte Bildausschnitte der konsistenten Korrespondenzen zwischen Standpunkt 1 und 2. (a),(b) Höchster Korrelationskoeffizient ($\rho_{fc} = 0,90$). (c),(d) Niedrigster Korrelationskoeffizient ($\rho_{fc} = 0,60$).

niedrigsten Koeffizienten differieren von dem Idealwert 1 aufgrund von Verdeckungen entlang der Gebäudekante im linken Bildbereich. Durch die Merkmalspunktbeschreibungen in Abbildung 5.9 wird der dunkle Hintergrundbereich außerhalb der Außenmauer des Theaters ebenfalls in die Merkmalspunktbeschreibung mit einbezogen. In diesem Bereich wurden keine Entfernungsdaten erfasst und somit auch keine Diskontinuität in der Objektoberfläche detektiert. Wird der Hintergrund von beiden Aufnahmestandpunkten nicht gleichartig interpretiert ist die Merkmalsbeschreibung grob falsch. Weitere Beschreibungen von Merkmalspunkten sind exemplarisch jeweils für den Aufnahmestandpunkt 2 in Abbildung A.1 und A.2 im Anhang dargestellt.

5.3.3.3 Korrespondenzanalyse

Die ermittelte Lösung innerhalb der Korrespondenzanalyse beruht auf dem Prinzip der Statistik. Anstatt alle Möglichkeiten sukzessiv auszuprobieren, werden per Zufall *initiale Merkmalskorrespondenzen* bestimmt und damit die *konsistenten Korrespondenzen* ermittelt. Aufgrund der limitierten Anzahl an Versuchen kann nach der Wahrscheinlichkeitstheorie nicht jedesmal die Lösung mit der höchsten Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* gefunden werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Lösung aber gefunden wird steigt mit der Anzahl der durchgeführten Iterationen, oder der Reduktion der möglichen Kombinationen. Durch das vorgestellte

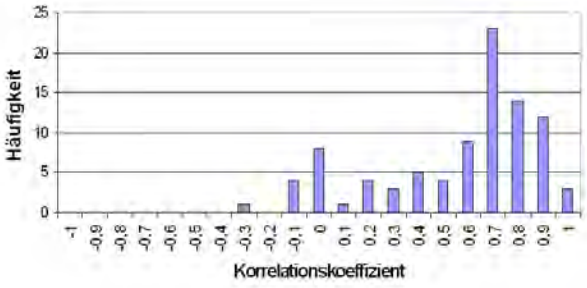
initiale Zuordnungsverfahren für die Korrespondenzsuche, mit dem Ähnlichkeitsmaß der Merkmalsbeschreibungen, ist die Zuordnungsmethode dahingehend optimiert, dass nicht mehr beliebige Kombinationen per Zufall gewählt werden, sondern nur die Kombinationen für die initiale Orientierungsbestimmung verwendet werden, die eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Durch diese Optimierung wird die Zuordnungsmethode beschleunigt, so dass auch bei einer großen Anzahl von Merkmalspunkten, die eine große Anzahl von Zuordnungskombinationen repräsentieren, innerhalb einer begrenzten Anzahl an Iterationen die Lösung mit der höchsten Anzahl *konsistenter Korrespondenzen* gefunden wird.

Aufgrund der Initialisierung der Merkmalskorrespondenzen durch das Ähnlichkeitsmaß nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass innerhalb weniger Iterationen die Lösung der Zuordnung gefunden werden kann. Das entwickelte Verfahren nach der `GOODSAC`-Methode stellt damit eine beschleunigte Zuordnungsmethode im Vergleich zu der `RANSAC`-Methode dar.

Kandidierende Korrespondenzen

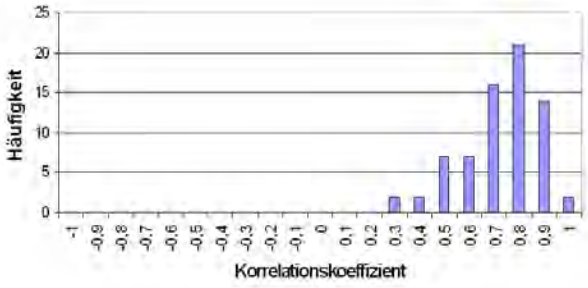
Zur weiteren Analyse der *kandidierenden Korrespondenzen* als Eingangsdaten zur paarweisen Korrespondenzsuche wird mit Hilfe der Referenzdaten bewertet, wie gut die Annahme zutrifft, dass eine Merkmalskorrespondenz mit einer hohen Ähnlichkeit ebenfalls einer *konsistenten Korrespondenz* entspricht. Dazu wird die Häufigkeit der Ähnlichkeit der *konsistenten Korrespondenzen* zwischen den Aufnahmestandpunkten in beiden realen Datensätzen betrachtet, s. Tabelle 5.8 und 5.9. Neben der Häufigkeitsverteilung ist die Anzahl der *konsistenten Korrespondenzen* n_k, die Anzahl der *konsistenten Korrespondenzen* $n_{k,\rho\geq 0,6}$, die ein Ähnlichkeitsmaß von mehr als 0,6 aufweisen, und die Anzahl der *initialen Merkmalskorrespondenzen* $n_{i,\rho\geq 0,6}$, die ein Ähnlichkeitsmaß von mehr als 0,6 aufweisen, aufgeführt. Die Anzahl n_k ist unabhängig von der Anzahl $n_{i,\rho\geq 0,6}$ zu betrachten, da $n_{i,\rho\geq 0,6}$ anhand des Korrelationsmaßes zwischen den Merkmalsbeschreibungen und n_k anhand der *Euklidischen Distanz* zwischen allen Merkmalspunktkombinationen ermittelt wird. Wie in den Tabellen 5.8 und 5.9 deutlich wird, stimmt eine größere Anzahl von Merkmalskorrespondenzen aufgrund des Korrelationsmaßes, anstatt aufgrund der Konsistenzprüfung durch die *Euklidische Distanz* überein ($n_{i,\rho\geq 0,6} \gg n_k$). Eine Ausnahme dazu stellt die Orientierungsbestimmung zwischen Standpunkt 1 und 2 des Datensatzes *Verona Theater* dar (Tabelle 5.9). In diesem Fall ($n_k \gg n_{i,\rho\geq 0,6}$), weist ein Großteil der bestimmten *konsistenten Korrespondenzen* ein Ähnlichkeitsmaß von $< 0,6$ auf. Betrachtet man dazu die Helligkeitsbilder in der Abbildung 5.5 (a,b) bzw. die exemplarischen Merkmalsbeschreibungen in der Abbildung 5.9 wird die dafür verantwortliche, unausgeprägte Textur deutlich, die zu dem durchschnittlich geringen Ähnlichkeitsmaß führt. Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* entsprechen die 61

Standpunkt 1 zu 2



$n_k = 91$
$n_{k,\rho\geq 0,6} = 61$
$n_{i,\rho\geq 0,6} = 142$
$n_{k,\rho\geq 0,6}/n_{i,\rho\geq 0,6} \approx 43\%$

Standpunkt 2 zu 3

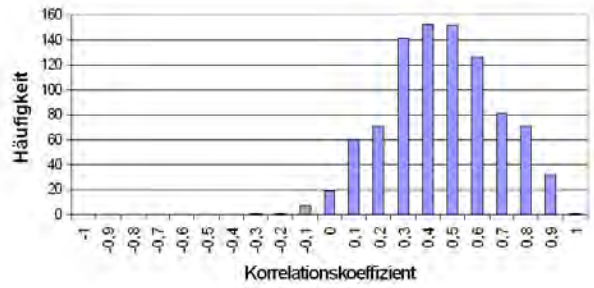


$n_k = 75$
$n_{k,\rho\geq 0,6} = 60$
$n_{i,\rho\geq 0,6} = 110$
$n_{k,\rho\geq 0,6}/n_{i,\rho\geq 0,6} \approx 54\%$

Tabelle 5.8: Analyse der konsistenten Korrespondenzen im Datensatz Dresdner Frauenkirche

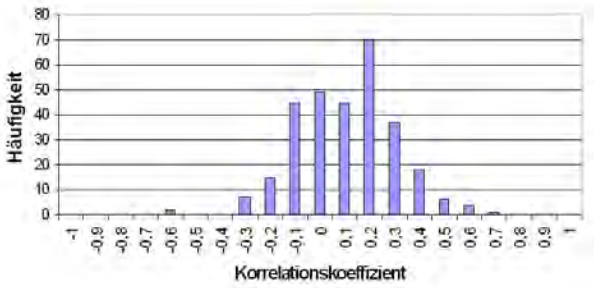
konsistenten Merkmalskorrespondenzen ca. 43% (61 von 142) der *initialen Korrespondenzen* zwischen dem 1. und 2. Aufnahmestandpunkt und die 60 *konsistenten Merkmalskorrespondenzen* ca. 54% (60 von 110) zwischen dem 2. und 3. Aufnahmestandpunkt. Im Datensatz *Verona Theater* entsprechen die 312 *konsistenten Merkmalskorrespondenzen* ca. 56% (312 von 554) der *initialen Korrespondenzen* zwischen dem 1. und 2. Aufnahmestandpunkt und die 5 *konsistenten Merkmalskorrespondenzen* ca. 2% (5 von 327) zwischen dem 2. und 3. Aufnahmestandpunkt. Diese Verhältniszahlen geben Auskunft über die Zuverlässigkeit der Zuordnungsmethode, da sich mit diesen die Wahrscheinlichkeit der Lösungsfindung abschätzen lässt. Für die paarweise Zuordnung zwischen den Aufnahmestandpunkten des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* sowie zwischen dem 1. und 2. Aufnahmestandpunkt des Datensatzes *Verona Theater* steht mit den Prozentzahlen

Standpunkt 1 zu 2



$n_k = 928$
$n_{k,\rho\geq 0,6} = 312$
$n_{i,\rho\geq 0,6} = 554$
$n_{k,\rho\geq 0,6}/n_{i,\rho\geq 0,6} \approx 56\%$

Standpunkt 2 zu 3



$n_k = 210$
$n_{k,\rho\geq 0,6} = 5$
$n_{i,\rho\geq 0,6} = 327$
$n_{k,\rho\geq 0,6}/n_{i,\rho\geq 0,6} \approx 2\%$

Tabelle 5.9: Analyse der konsistenten Korrespondenzen im Datensatz Verona Theater

von über 40% ein ausreichendes Verhältnis für eine robuste Lösung zur Verfügung. Für die Zuordnung der Merkmalspunkte zwischen dem 2. und 3. Aufnahmestandpunkt des Datensatzes *Verona Theater* liegt ein unzureichendes Verhältnis von 2% vor. Es wurde zwar auch hier die Lösung gefunden, was aber mit den angegebenen Schwellwerten für die Prozessierung (s. Tabelle 5.4) mit einer verminderten Wahrscheinlichkeit zutrifft. Die Wahrscheinlichkeit bzw. Robustheit lässt sich durch einen geringeren Schwellwert für das Ähnlichkeitsmaß in Verbindung mit einer größeren Anzahl an Iteration erhöhen. Insgesamt kann aber die Annahme der vorgeschlagenen Korrespondenzsuche bestätigt werden, dass die *kandidierenden Korrespondenzen* mit einem hohen Ähnlichkeitsmaß mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auch *konsistenten Korrespondenzen* entsprechen.

5.4 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung

Als Näherungswerte für die flächenbasierte Orientierungsbestimmung werden die durch die merkmalsbasierte Orientierungsmethode bestimmten Parameter der *Äußeren Orientierung* verwendet.

5.4.1 Wahl der Oberflächenausschnitte

Für die Prozessierung sind in dem jeweiligen Datensatz geeignete Oberflächenauschnitte zu definieren. Für die Orientierungbestimmung der Aufnahmestandpunkte vom Datensatz *Dresdner Frauenkirche* werden 12 Oberflächenausschnitte gewählt, die im Überlappungsgebiet der Fassade verteilt sind, s. Abbildung 5.10 und Tabelle A.3 im Anhang. Die Ausschnitte 1 bis 6 sind von allen 3 Aufnahmestandpunkten beobachtet, die Ausschnitte 7 bis 9 und 10 bis 12 von jeweils 2 Aufnahmestandpunkten. Alle Oberflächenausschnitte sind in den Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern abgebildet und weisen eine näherungsweise planare Oberflächengeometrie mit adäquater Textur auf (s. Tabelle A.3). Die Größe der Oberflächenausschnitte wird in Abhängigkeit der ebenen Bereiche und Textur definiert und variiert zwischen 0,60 m x 0,72 m und 1,20 m x 1,20 m. Die Ausschnitte werden mit einer geometrischen Rasterweite von 0,12 m × 0,12 m modelliert. Die Auflösung der Objektraummodelle G und I der Bildsignale entspricht mit 0,02 m × 0,02 m und 0,04 m × 0,04 m der Bildauflösung im Objektraum. Das Abtastraster für die Entfernungswerte entspricht dem der Intensitätswerte.

In dem Datensatz *Verona Theater* werden für die Orientierungsbestimmung 10 Oberflächenausschnitte verwendet, die im Überlappungsgebiet der Fassade verteilt sind, s. Abbildung 5.11 und Tabelle A.4 im Anhang. Die Ausschnitte werden von jeweils 3 Aufnahmestandpunkten im Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbild abgebildet. Die gewählten Oberflächenausschnitte weisen eine raue Oberflächengeometrie und Textur auf. Die Größe der Oberflächenausschnitte wird wieder in Abhängigkeit der Oberflächengeometrie und Textur definiert. Die Ausschnitte variieren daher zwischen 0,4 m x 0,9 m und 1,9 m x 0,9 m und werden mit einer geometrischen Auflösung von 0,1 m x 0,1 m modelliert. Die Auflösung eines Oberflächenelementes des Objektraummodells der Helligkeitswerte G entspricht 0,01 m x 0,01 m und für die Intensitätswerte I 0,02 m x 0,02 m im Objektraum. Das Abtastraster der Entfernungswerte entspricht wieder dem der Intensitätswerte.

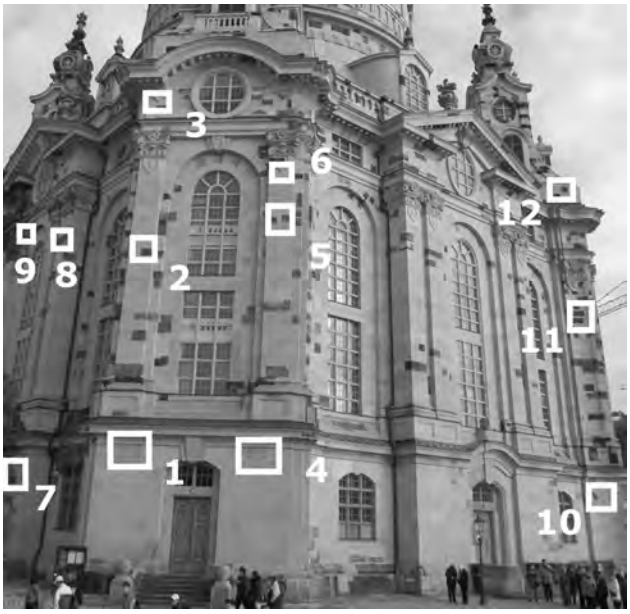


Abbildung 5.10: Verteilung der Oberflächenausschnitte im Objektraum des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

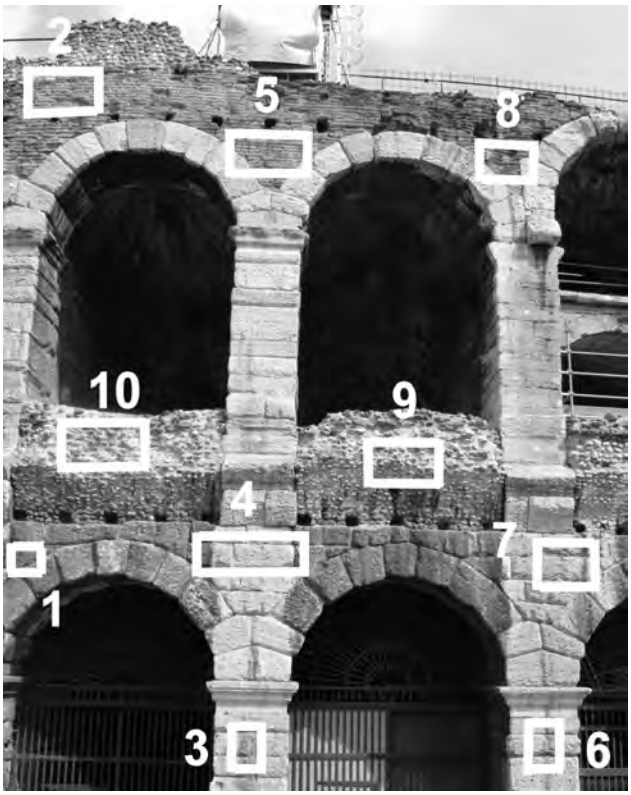


Abbildung 5.11: Verteilung der Oberflächenausschnitte im Objektraum des Datensatzes Verona Theater

Aufgrund der variierenden Aufnahmeabstände in beiden Datensätzen stellen die definierten Rasterauflösungen der Objektraummodelle einen Kompromiss zwischen Unter- und Überabtastungen hinsichtlich der Bildmaßstäbe der einzelnen Aufnahmestandpunkte dar.

5.4.2 Gewichtsfestlegung

Für die Homogenisierung der Beobachtungsgruppen ist die Genauigkeit der Messungen pro Beobachtungsgruppe abzuschätzen. Die Genauigkeit einer Einzelmessung resultiert aus der Summe von unterschiedlichen Einflüssen, wie z.B. die Genauigkeit der Bildkoordinaten, die Genauigkeit der Kalibrierung des Messgerätes und weiteren Parametern.

Neben der Genauigkeit der Messung führt ein unzureichendes funktionales Modell zu Abweichungen zwischen den gemessenen Beobachtungen und den modellierten Abbildungsfunktionen zwischen dem Bild- und Objektraum. Die größten zu erwartenden Modellfehler in dem im Kapitel 4.2 hergeleiteten funktionalen Modell sind zum einen eine unzureichende ggf. zu grobe Modellierung der Oberflächenmodelle im Objektraum und zum anderen das Auftreten von Mischpixeln. Im ersten Fall bleiben beobachtete Feinstrukturen im definierten Oberflächenmodell unmodelliert und stellen dadurch Abweichungen zum definierten Objektraummodell dar. Im zweiten Fall repräsentieren die Mischpixel Beobachtungen, die Informationen des Objektraums zusammengefasst darstellen. Der Grad der zusammengefassten Information der Mischpixel hängt von der Aufnahmeentfernung und der Aufnahmeperspektive ab. Dadurch, dass in beiden realen Datensätzen Aufnahmestandpunkte mit unterschiedlicher Entfernung und unterschiedlicher Perspektive vorliegen, sind daher diesbezüglich Abweichungen im Objektraum zu erwarten.

Um die Genauigkeiten über die Summe der einzelnen Einflüsse adäquat abzuschätzen, werden für die Homogenisierung der Beobachtungsgruppen die Differenzen der Beobachtungsgruppen im Objektraum betrachtet, wie sie in der Konstellation mit den Parametern der *Äußeren Orientierungen* für die Aufnahmestandpunkte durch die Referenzwerte auftreten. Die Objektraummodelle in den definierten Oberflächenausschnitten werden dabei gemittelt durch die Bilddaten des jeweiligen Datentyps repräsentiert. Die Differenzen der Beobachtungsgruppen im Objektraum sind damit neben den bereits genannten Einflüssen auch von der Güte der verwendeten Referenzwerte abhängig, die damit in die Genauigkeitsabschätzung einfließt. Auch führen Differenzen, die lokal und systematisch auftreten, zu Einbußen in der Genauigkeitsbeurteilung der gesamten Beobachtungsgruppe, was aber als unkritisch betrachtet wird, da diese Differenzen jeweils in allen Beobachtungsgruppen zu erwarten sind und sich damit relativieren.

Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* sind aufgrund der planaren Oberflächengeometrie nur geringe Abweichungen in den Entfernungsdaten zu erwarten, da die Modellierung durch ein Raster als adäquat einzustufen ist, die Rasterweite eine untergeordnete Rolle spielt und Mischpixel in texturlosen Bereichen der Entfernungsbilder keine Auswirkung haben. Für die Helligkeits- und Intensitätsdaten werden hingegen aufgrund der Mischpixel in den texturierten Bereichen Abweichungen im Objektraum erwartet. Der zentrale Aufnahmestandpunkt 2 stellt die Bildinformationen bereit die aufgrund der Richtung der Bildstrahlen, im Vergleich zum Aufnahmestandpunkt 1 und 3, den größten Einfluss auf die zu bestimmenden Objektraummodelle haben. Zur Beurteilung sind in Tabelle 5.10 exemplarisch für den Oberflächenausschnitt 5, der im zentralen Bereich des auszuwertenden Bereichs liegt, die Verbesserungen der einzelnen Beobachtungsgruppen mit Hilfe der Referenzdaten aufgeführt. Der Ausschnitt 5 stellt einen geometrisch ebenen Fassadenbereich dar, der zwei dunkle Steine, die von hellen Steinen umgeben sind, enthält. Neben den Verbesserungsbildern und den Häufigkeitsverteilungen als Histogrammdarstellungen sind zur Beurteilung der Verbesserungen das arithmetische Mittel und die empirische Standardabweichung aufgeführt. Durch die Verbesserungsbilder der jeweiligen Beobachtungsgruppe ist ersichtlich in welchen Bereichen die Abweichungen auftreten. Bei der Darstellung ist jedes Verbesserungsbild individuell in den 8 Bit Grauwertraum $[0, 255]$ skaliert worden. Verbesserungen < 127 entsprechen negativen und > 127 positiven Werten. Insbesondere in den Verbesserungsbildern der Helligkeitswerte sind klare systematische Strukturen zu erkennen, wie sie in zufällig verteilten Verbesserungen nicht auftreten dürfen, und durch den flächenbasierten Ansatz zu minimieren sind. Die Mittelwerte der Verbesserungen der radiometrischen Bilddaten (Helligkeiten, Intensitäten) sind Null, da diese im Rahmen des funktionalen Modells durch die Histogrammverschiebung vom Mittelwert befreit werden. Nur die Verbesserungen der Entfernungsdaten weisen Mittelwerte ungleich Null auf. Die Standardabweichungen sind in den Verbesserungsbildern vom Aufnahmestandpunkt 2 am geringsten.

Im Datensatz *Verona Theater* sind anders als beim Datensatz *Dresdner Frauenkirche* aufgrund der Oberflächentopographie Verdeckungen in den Beobachtungen zu erwarten. Die Verdeckungen stellen neben den Mischpixeln einen weiteren Modellfehler dar. Die Oberflächentopographie in Kombination mit den perspektiven Abbildungen führt damit zu größeren Abweichungen im Objektraum. In Tabelle 5.11 sind wieder exemplarisch die Verbesserungen des im zentralen Bereich liegenden Oberflächenausschnitts 4 aufgeführt. Der Ausschnitt enthält einen Bereich der Gebäudefassade mit rauer Oberflächentopographie. Die Fugen zwischen den Steinen sind sowohl als radiometrische Kanten in den Helligkeits- und Intensitätsbildern als auch als geometrische Kanten in den Entfernungsbildern sichtbar. Die Verbesserungsbilder sind wieder individuell

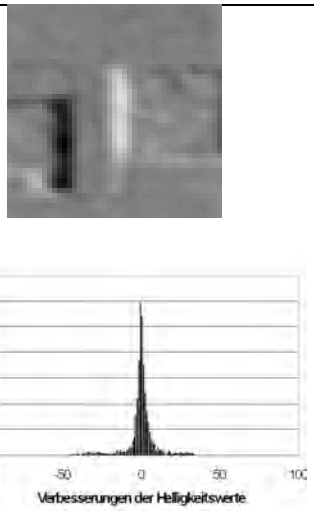
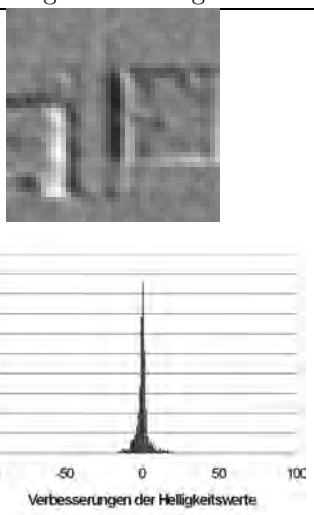
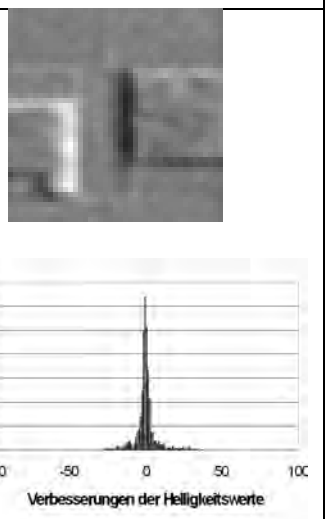
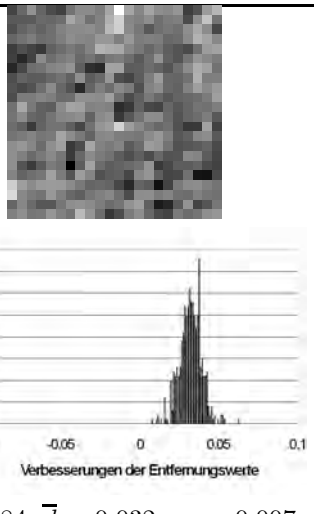
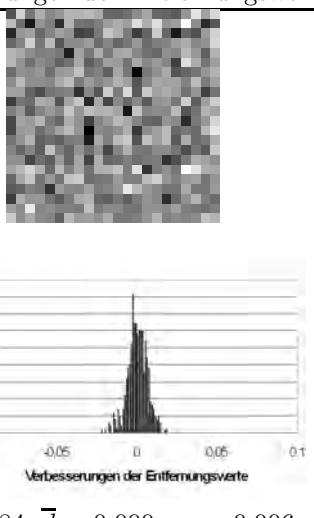
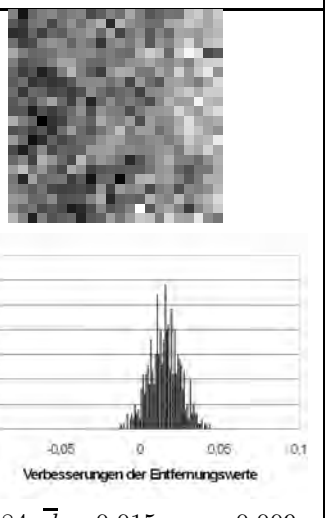
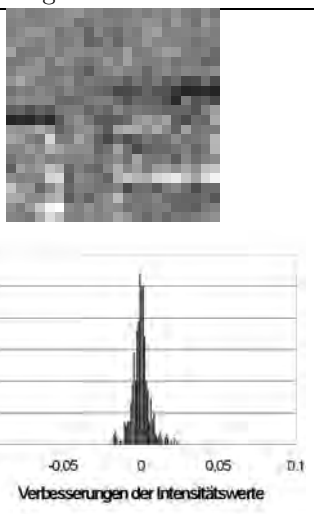
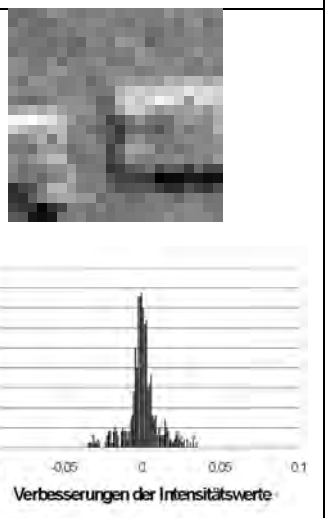
Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
Verbesserungen der Helligkeitswerte		
		
$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 8{,}652$	$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 3{,}840$	$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 7{,}604$
Verbesserungen der Entfernungswerte		
		
$n = 484$; $\overline{d} = 0{,}032$; $s_{\overline{d}} = 0{,}007$	$n = 484$; $\overline{d} = 0{,}000$; $s_{\overline{d}} = 0{,}006$	$n = 484$; $\overline{d} = 0{,}015$; $s_{\overline{d}} = 0{,}009$
Verbesserungen der Intensitätswerte		
		
$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}008$	$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}005$	$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}010$

Tabelle 5.10: Verbesserungen im Objektraum im Datensatz Dresdner Frauenkirche am Beispiel des Oberflächenausschnittes 5

in den 8 Bit Grauwertraum skaliert und die Mittelwerte der Verbesserungen der radiometrischen Bilddaten (Helligkeiten, Intensitäten) sind aufgrund der Mittelwertbefreiung wieder Null. Im Aufnahmestandpunkt 1 liegt ein vergleichsweise großer Mittelwert $\overline{d}$ von -0,469 m in den Entfernungswerten vor, der einer systematischen Abweichung entspricht. Bei Betrachtung der Aufnahmestandpunkte in Abbildung 5.2 lässt sich die Abweichung dadurch erklären, dass eine von stark unterschiedlichen Blickrichtungen durch Laserstrahlen abgetastete raue Oberfläche in den einzelnen Entfernungsbildern jeweils andere Oberflächenbereiche repräsentiert bzw. andere Verdeckungen enthält. Die Unterschiede zeigen sich insbesondere zwischen dem ersten und zweiten Standpunkt, die Daten des dritten Aufnahmestandpunktes wirken hingegen durch den nahezu doppelten Aufnahmeabstand glättend bzw. tiefpassgefiltert. Die Entfernungswerte des zweiten und dritten Aufnahmestandpunktes haben demnach eine größere Übereinstimmung. Die systematischen Strukturen in den Verbesserungsbildern der Intensitätswerte sind durch die starre Verknüpfung zu den Entfernungswerten ebenfalls auf die bereits erläuterte Begründung zurückzuführen. Auch wird bei Betrachtung der Tabelle 5.11 nochmals deutlich, dass der Aufnahmestandpunkt 2 mit dem kürzesten Aufnahmeabstand und dem direktesten Betrachtungswinkel die detailreichsten Abbildungen liefert. Wie im vorher betrachteten Oberflächenausschnitt 5 des Datensatz *Dresdner Frauenkirche* sind hier die Standardabweichungen am geringsten.

Anhand der Analyse der Verbesserungen wird deutlich, dass neben den Anteilen von zufällig streuenden Verbesserungen auch Anteile von systematischen Abweichungen in den Beobachtungen in Kombination mit den Parametern der Referenzdaten enthalten sind. Mit den in Stufe 1 bestimmten Orientierungsparametern, die eine geringere Genauigkeit als die Referenzdaten aufweisen, müssen durchaus größere systematische Abweichungen berücksichtigt werden. Es ist zu erwarten, dass sich einige Anteile, z.B. die Mittelwerte in den Entfernungsdaten, mit Hilfe der Parameterschätzung für die Orienierungsunbekannte und der Oberflächenrekonstruktion minimieren lassen und andere Anteile, z.B. aufgrund der Mischpixel bzw. der unterschiedlichen Bildmaßstäbe, dagegen als Modellfehler bestehen bleiben.

Im Rahmen der Homogenisierung der Beobachtungsgruppen sind die verbleibenden Modellfehler (z.B. Mischpixel) innerhalb der Gewichtsfestlegung zu berücksichtigen. Zur Gewichtsfestlegung werden anstelle der Daten der bisher exemplarisch diskutieren Oberflächenausschnitte (Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11) die globalen Verbesserungen über alle Oberflächenausschnitte betrachtet. Die globalen Verbesserungen, bzw. Standardabweichungen sind in Tabelle 5.12 aufgeführt. Die mittlere Abweichung und die Standardabweichung, die aus den mittelwertbefreiten Verbesserungen berechnet wurden, sind in den jeweiligen Einheiten der Beobachtungsgruppen $[g], [d], [i]$ angegeben. Die stabilisierenden Bedingungsgleichungen (Gleichungen (3.19), (3.20), (3.21)) werden mit einer Genauigkeit von 0,05 m im Objektraum eingeführt, die der maximal zu erwarteten Abweichung zwischen benachbarten Höhenstützstellen entspricht. Die Gewichte (s. Tabelle 5.12) werden entsprechend nach den Gleichungen (4.59) mit der definierten homogenen Standardabweichung der Gewichtseinheit von 1 abgeleitet.

5.4.3 Konvergenzkriterium

Als Konvergenzkriterium der Ausgleichung wird ein Schwellwert von 1/100 Pixel gewählt, der sich auf den Bilddatentyp mit der geringsten Auflösung bezieht und damit im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* und im Datensatz *Verona Theater* den Entfernungs- und Intensitätsbildern entspricht. Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnung für die Translations- und Rotationsparameter sowie den Höhenzuschlägen der Objektoberfläche werden für den definierten Schwellwert maximale Unbekanntenzuschläge für die einzelnen Parametergruppen abgeleitet (s. Tabelle 5.13). Die Schwellwerte für die Translationen und die Höhenzuschläge entsprechen 1/100 der Surfelgröße im Objektraum. Der Schwellwert für die Rotationen wird entsprechend nach der Bogenformel abgeleitet. Die Konvergenz der Ausgleichung ist erreicht wenn alle Unbekanntenzuschläge der einzelnen Parametergruppen die definierten Schwellwerte unterschreiten.

5.4.4 Berechnungen

Für den Nachweis der entwickelten flächenbasierten Methode und der Evaluierung der aufgestellten Zielsetzungen werden verschiedene Fälle zur Prozessierung definiert:

1. Mit Bilddaten des *kombinierten Messsystems* bei simultaner Oberflächenrekonstruktion.
2. Mit Bilddaten des *kombinierten Messsystems* bei konstant eingeführter Objektoberfläche.
3. Mit Helligkeitsbildern und Laserscannerdatensätzen (Entfernungs- und Intensitätsbildern) von individuellen Messsystemen bei simultaner Oberflächenrekonstruktion.

Weiter wird hinsichtlich des Ausgleichungsverhaltens mit den Bilddaten des *kombinierten Messsystems* bei simultaner Oberflächenrekonstruktion (Fall (1)) die verwendete Anzahl

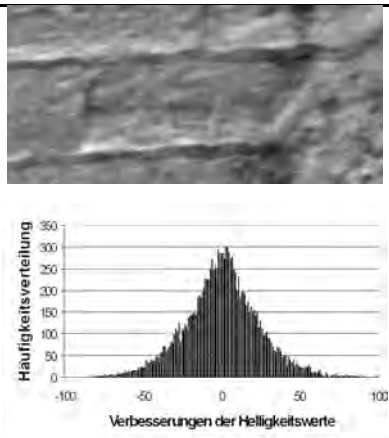
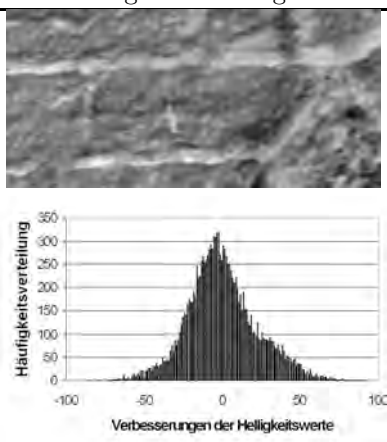
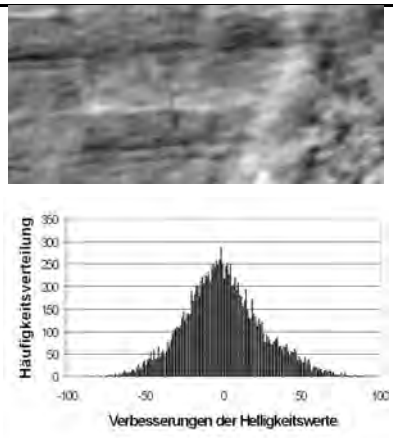
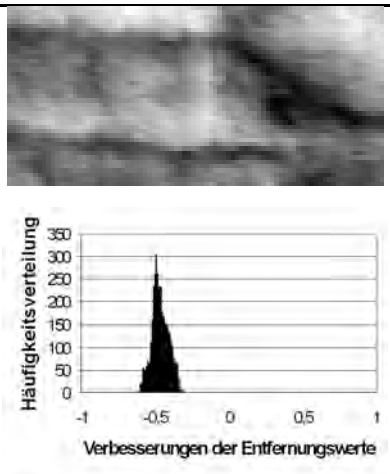
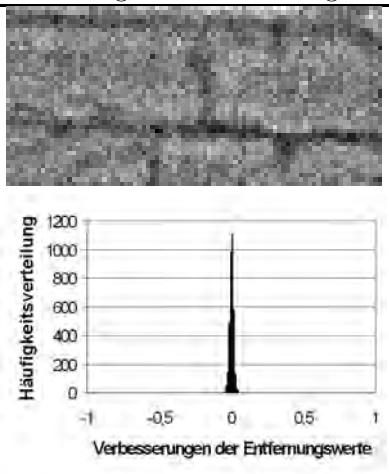
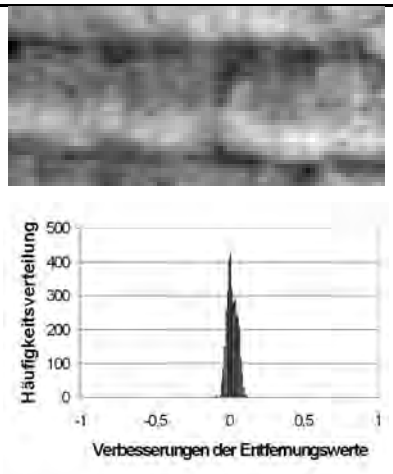
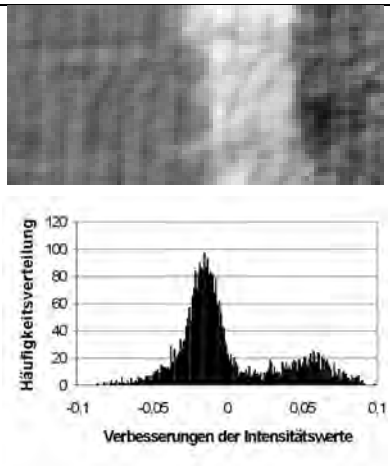
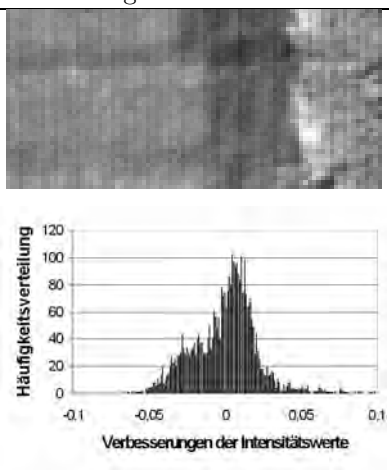
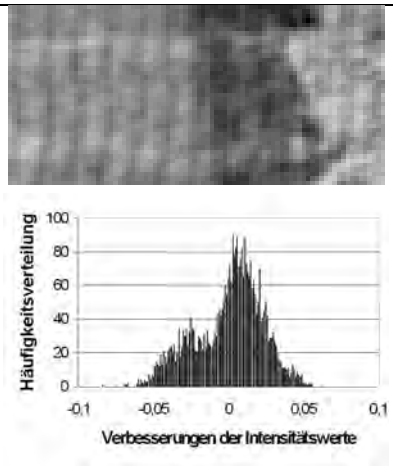
Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
Verbesserungen der Helligkeitswerte		
		
$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 23{,}522$	$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 22{,}584$	$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 25{,}148$
Verbesserungen der Entfernungswerte		
		
$n = 3526$; $\overline{d}$ = -0,469; $s_{\overline{d}} = 0{,}056$	$n = 3526$; $\overline{d} = 0{,}000$; $s_{\overline{d}} = 0{,}012$	$n = 3526$; $\overline{d} = 0{,}015$; $s_{\overline{d}} = 0{,}035$
Verbesserungen der Intensitätswerte		
		
$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}034$	$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}021$	$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}022$

Tabelle 5.11: Verbesserungen im Objektraum im Datensatz Verona Theater am Beispiel des Oberflächenausschnittes 4

Beobachtungsgruppe	mittlere Abweichung	s_0	Gewicht
Dresdner Frauenkirche			
Helligkeiten g	0,000 [g]	5,639 [g]	0,0314
Entfernungen d	0,010 [d]	0,022 [d]	2029
Intensitäten i	0,000 [i]	0,006 [i]	22956
Bedingungsgleichung C_X, C_Y, C_{XY}	-	0,050 [m]	400
Verona Theater			
Helligkeiten g	0,000 [g]	21,507 [g]	0,00216
Entfernungen d	-0,089 [d]	0,251 [d]	16
Intensitäten i	0,000 [i]	0,020 [i]	2379
Bedingungsgleichung C_X, C_Y, C_{XY}	-	0,050 [m]	400

Tabelle 5.12: Homogenisierung der Beobachtungsgruppen

Parametergruppen	*Dresdner Frauenkirche*	*Verona Theater*
Translationen [m]	4,0e-004	2,0e-004
Rotationen [rad]	8,8e-006	8,0e-006
Höhenzuschläge [m]	4,0e-004	2,0e-004

Tabelle 5.13: Konvergenzkriterien der flächenbasierten Orientierungsbestimmung

4. der unterschiedlich berücksichtigten Bilddatentypen,
5. der Oberflächenausschnitte und
6. der Aufnahmestandpunkte

analysiert. Im Fall (1) werden mit den Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern der Aufnahmestandpunkte des *kombinierten Messsystems* die Orientierungsparameter bei simultaner Oberflächenrekonstruktion geschätzt. Im Fall (2) werden im Gegensatz zum ersten Fall mit den Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbildern der Aufnahmestandpunkte des *kombinierten Messsystems* nur die Orientierungsparameter geschätzt. Die Objektoberfläche wird konstant eingeführt und durch die Entfernungsdaten des jeweils zweiten Aufnahmestandpunktes definiert. Durch die konstante Objektoberfläche sind Korrelationen, die möglicherweise zwischen den Höhenstützstellen und den in Aufnahmerichtung wirkenden Orientierungsunbekannten vorliegen, ausgeschlossen. Mit dem Fall (3) wird die Orientierungsbestimmung einzelner Helligkeitsbilder zu einem Laserscannerdatensatz (Entfernungs- und Intensitätsbilder) untersucht. Durch die im Vergleich zum 3D-Laserscanner flexibleren Einsatzmöglichkeiten einer photogrammetrischen Kamera ist dieser Fall von Bedeutung und wird durch die beiden realen Datensätze simuliert, indem die kalibrierten Exzentrizitätsparameter der Kamera zum 3D-Laserscanner des *kombinierten Messsystems* im Rahmen der Ausgleichung unberücksichtigt bleiben. Die *Äußeren Orientierungen* der Helligkeitsbilder werden ohne direkten Bezug zu dem Aufnahmestandpunkt des 3D-Laserscanners bestimmt. Ausschließlich die geometrische Objektoberfläche dient als Verknüpfungsinformation. Die Parameter der *Äußeren Orientierungen* der Kamerastandpunkte beziehen sich unter Berücksichtigung der kalibrierten Exzentrizitätsparamter (s. Tabelle 5.1) auf den identischen Aufnahmestandpunkt der Entfernungs- und Intensitätsbilder (3D-Laserscannerstandpunkt). Im Fall (4) wird untersucht inwieweit die einzelnen Bilddatentypen auf die Orientierungsbestimmung Einfluss nehmen und ob dessen Berücksichtigungen für die Orientierungsbestimmung eine Verbesserung darstellt. Da ein 3D-Laserscanner die Entfernungs- und Intensitätsbilder simultan liefert, werden diese als zusammengehörende Gruppe betrachtet. Innerhalb der Ausgleichung bleiben die Helligkeitsbilder unberücksichtigt, um zu analysieren wie sich die Genauigkeit der Parameterschätzung verändert. Neben der Bestimmung der Orientierungsparameter wird die Objektoberfläche simultan rekonstruiert. Durch die Variation der Anzahl der verwendeten Oberflächenausschnitte wird im Fall (5) Einfluss auf die Anzahl und die Verteilung der Beobachtungen genommen. Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* werden nur die Ausschnitte 1 bis 6 verwendet, die zentral im betrachten Objektbereich liegen (s. Abbildung 5.10), und von allen drei Aufnahmestandpunkten erfasst worden sind. Die außen liegenden Ausschnitte 7 bis 12 bleiben unberücksichtigt. Im Datensatz *Verona Theater* werden nur die Ausschnitte 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10 verwendet, die im unteren Bereich der betrachteten Objektoberfläche liegen (s. Abbildung 5.11). Die oberhalb liegenden Ausschnitte 2,5,8 bleiben in der Ausgleichung unberücksichtigt. Zuletzt soll im Fall (6) die Ausgleichung in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Aufnahmestandpunkte untersucht werden. In beiden Datensätzen liegen 3 Aufnahmestandpunkte vor und es wird untersucht, inwieweit sich das Ergebnis verändert, wenn nur 2 Aufnahmestandpunkte

verwendet werden. In beiden Datensätzen bleibt daher der jeweils dritte Aufnahmestandpunkt unberücksichtigt.

Die Berechnungen werden neben den bereits eingeführten Gewichten zur Homogenisierung der Beobachtungsgruppen und den eingeführten Konvergenzkriterien mit den Parametern in Tabelle 5.14 durchgeführt. Die Beobachtungsgruppen werden gleichgewichtet unter Berücksichtigung der Homogenisierungsfaktoren (s. Tabelle 5.12) verwendet. Unterschreiten die maximalen Unbekanntenzuschläge nicht die Schwellwerte (s. Tabelle 5.13) des Konvergenzkriteriums, so wird die Ausgleichung durch die maximale Anzahl an Iterationen gestoppt. Aufgrund der vergleichsweise großen Abweichungen im Objektraum des Datensatzes *Verona*

Parameter	*Dresdner Frauenkirche*	*Verona Theater*
max. Iteration	300	300
Filterstufen	0	2,1,0
Filtergröße	5x5	5x5

Tabelle 5.14: Parameter zur Prozessierung der realen Datensätze

Theater werden für den Orientierungsprozess neben den Bildern in der Originalauflösung zwei zusätzliche Filterstufen eingeführt. Die Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder werden mit einem Binominalfilter mit der Maskengröße 5x5 gefiltert. Die Bilder der Filterstufe 2 sind die abermals gefilterten Bilder der Stufe 1. Die Stufe 0 entspricht den ungefilterten Bildern. Durch die Verwendung dieser tiefpassgefilterten Bilder wird der Konvergenzradius der Ausgleichung erhöht. Für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* ist die Erhöhung des Konvergenzradius aufgrund der planaren Oberflächengeometrie nicht notwendig. Die Gradienten (Sobel-Operator) werden mit einer Maskengröße von 5x5 durchgeführt.

Aufgrund der gewählten Oberflächenausschnitte und der unterschiedlichen Bilddatentypen ergeben sich in den einzelnen zu berechnenden Fällen bis zu ca. 130.000 Unbekannte (s. Tabelle 5.15). Die 12 Orientierungsunbekannten ergeben sich aus dem Standpunkt 1 und 3. Der Standpunkt 2 wird für die Datumsdefinition festgehalten.

Parameter	*Dresdner Frauenkirche*	*Verona Theater*
Orientierungsparameter	12	12
Höhenstützstellen Z	787	1216
Helligkeitswerte G	18424	102339
Intensitätswerte I	4797	26100
Summe	24020	129667

Tabelle 5.15: Anzahl der unbekannten Parameter

Für die Darstellung der Berechnungsergebnisse werden im Folgenden die benötigte Anzahl an Iterationen, die Standardabweichungen im Objektraum s_0^g, s_0^d, s_0^i und die minimalen/maximalen Höhendifferenzen ΔZ der definierten 6 Ausgleichungsfälle angegeben. Die minimalen und maximalen Höhendifferenzen stellen jeweils Werte zwischen der ausgleichend rekonstruierten und der als konstant eingeführten Objektoberfläche (Fall (2)) dar. Die Anzahl der benötigten Iterationen im Datensatz *Verona Theater* bezieht sich auf die (letzte) Stufe 0 bei der Verwendung der ungefilterten Bilddaten. Daneben sind die äußeren Genauigkeiten s_S^1, s_S^3 des Aufnahmestandpunktes 1 und 3 mit Hilfe der Referenzpunkte angegeben, wie sie sich aus den Koordinatendifferenzen im Objektraum mit den bestimmten Orientierungsparametern ergeben.

Ergebnisse

Die Ergebnisse des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* sind in Tabelle 5.16 und die des Datensatzes *Verona Theater* in Tabelle 5.17 angegeben. Die geschätzten Parameter der Orientierungsunbekannten, ihre Standardabweichungen und Differenzen zu den Referenzwerten sind den Tabellen A.5 bis A.17 im Anhang zu entnehmen. Auch sind im Anhang Grafiken zum Konvergenzverhalten der Ausgleichung (maximale Unbekanntenzuschläge und Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen) angegeben. Im weiteren Abschnitt werden einige Aspekte der einzelnen Ausgleichungsfälle hervorgehoben, die für die abschließende Diskussion und Beurteilung von Bedeutung sind.

Für den Fall (1), der hinsichtlich der Datensätze des *kombinierten Messsystems* dem Standardfall entspricht, werden zur Analyse wieder die Oberflächenausschnitte 5 (*Dresdner Frauenkirche*) und 4 (*Verona Theater*) detailliert betrachtet und mit den Referenzwerten (s. Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11) verglichen.

Fall	Iteration	s_0^g [0...255]	s_0^d [m]	s_0^i [0...1]	min/max ΔZ [m]	$s_S^1[m]$	$s_S^3[m]$
(1)	40	4,85	0,027	0,005	$-0,052/0,066$	0,021	0,030
(2)	20	9,10	0,035	0,008	-	0,022	0,047
(3)	5	8,15	0,015	0,004	$-0,012/0,013$	0,030/0,010	0,038/0,018
(4)	8	-	0,014	0,004	$-0,035/0,023$	0,028	0,033
(5)	95	3,92	0,024	0,006	$-0,072/0,032$	0,039	0,059
(6)	15	3,50	0,015	0,004	$-0,014/0,014$	0,017	-

Tabelle 5.16: Ergebnisse des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

Fall	Iteration	s_0^g [0...255]	s_0^d [m]	s_0^i [0...1]	min/max ΔZ [m]	$s_S^1[m]$	$s_S^3[m]$
(1)	5	23,24	0,271	0,021	$-0,714/0,179$	0,283	0,264
(2)	37	34,66	0,189	0,034	-	0,218	0,258
(3)	141	24,17	0,112	0,017	$-0,860/0,233$	0,091/0,125	0,422/0,207
(4)	(300)	-	0,070	0,013	$-0,159/0,200$	0,038	0,191
(5)	42	20,60	0,177	0,023	$-0,132/0,143$	0,335	0,597
(6)	187	20,50	0,218	0,019	$-0,593/0,213$	0,250	-

Tabelle 5.17: Ergebnisse des Datensatzes Verona Theater

Wie bei den analysierten Verbesserungen der Referenzdaten für die Homogenisierung der Beobachtungsgruppen sind die Verbesserungsbilder, Histogrammdarstellung und die abgeleiteten Kenngrößen, wie der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung aufgeführt. Zusätzlich sind zur Beurteilung die Orientierungsparameter, die Differenzen der Orientierungsparameter zu den Referenzwerten und die Standardabweichungen in Tabelle 5.18 aufgeführt.

	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
$t_X[m]$	12,204	$-26,865$	$-13,832$	13,484
$\Delta t_X[m]$	$-0,008$	$-0,016$	$-0,158$	$-0,063$
$s_{t_X}[m]$	0,62e-004	0,65e-004	0,54e-004	1,60e-004
$t_Y[m]$	27,535	$-7,873$	11,306	$-18,891$
$\Delta t_Y[m]$	$-0,028$	$-0,029$	$-0,288$	0,388
$s_{t_Y}[m]$	1,83e-004	1,63e-004	0,45e-004	1,62e-004
$t_Z[m]$	$-0,182$	$-0,250$	0,521	0,537
$\Delta t_Z[m]$	0,030	0,068	$-0,519$	$-0,591$
$s_{t_Z}[m]$	2,23e-004	1,71e-004	0,52e-004	1,77e-004
$\omega[rad]$	0,045	0,014	0,043	0,008
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,001	0,013	$-0,004$
$s_\omega[rad]$	0,61e-006	1,29e-006	0,93e-006	2,07e-006
$\phi[rad]$	$-0,021$	$-0,043$	$-0,004$	0,290
$\Delta\phi[rad]$	0,000	0,000	$-0,031$	$-0,029$
$s_\phi[rad]$	2,50e-006	2,87e-006	1,30e-006	2,92e-006
$\kappa[rad]$	$-0,623$	0,667	$-0,254$	0,259
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,001	$-0,002$	$-0,007$
$s_\kappa[rad]$	1,84e-006	2,57e-006	1,45e-006	3,34e-006

Tabelle 5.18: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (1)

Im Oberflächenausschnitt 5 des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* (Tabelle 5.19) sind für die Helligkeitswerte des Aufnahmestandpunktes 1 und 3 die Standardabweichungen im Vergleich zu den Referenzwerten verringert worden. Im Aufnahmestandpunkt 2 hat sie sich dagegen leicht erhöht. Insgesamt haben sich durch die Ausgleichung die Verbesserungen über die Standpunkte gleichmäßiger (von $s_{\overline{g}} = 8{,}652; 3{,}840; 7{,}604$ nach $s_{\overline{g}} = 2{,}325; 5{,}799; 6{,}190$) verteilt. In den Verbesserungsbildern wird aber deutlich, dass auch durch die flächenbasierte Ausgleichung nach wie vor die systematischen Abweichungen entlang der radiometrischen Kanten vorliegen. In den Entfernungsdaten konnte insbesondere der Mittelwert $\overline{d}$ (systematische Abweichung) im

ersten Aufnahmestandpunkt von 0,032 m auf 0,010 m reduziert werden. Die Standardabweichungen aber erhöhen sich. Die Erhöhung ist dadurch begründet, dass die Objektoberfläche im Ausgleichungsfall (1) mit gleichen Gewichtsanteilen durch die einzelnen Beobachtungsgruppen ermittelt wurde und nicht mehr alleine durch die Entfernungsdaten berechnet wird. In den Intensitätswerten verringern sich die Standardabweichungen gleichmäßig (von $s_{\overline{i}} = 0{,}008$; 0,005; 0,010 nach $s_{\overline{i}} = 0{,}006$; 0,004; 0,006).

Im Oberflächenaussschnitt 4 des Datensatz *Verona Theater* (Tabelle 5.20) sind für die Helligkeitswerte wieder im Vergleich zu den Referenzwerten geringere Standardabweichungen zu beobachten (von $s_{\overline{g}} = 23{,}522$; 22,584; 25,148 nach $s_{\overline{g}} = 17{,}117$; 16,328; 18,698). Insbesondere in den Fugenbereichen der Gebäudefassade konnten die Anteile in den Verbesserungen reduziert werden. Bei den Entfernungswerten erhöhen sich die Standardabweichungen von allen drei Standpunkten geringfügig, was wieder dadurch begründet ist, dass die Objektoberfläche im Ausgleichungsfall (1) mit gleichen Anteilen durch die Beobachtungsgruppen rekonstruiert wurde. Der arithmetische Mittelwert $\overline{d}$ vom Standpunkt 1 konnte zwar um ein Drittel von -0,496 m auf -0,309 m reduziert werden, die Entfernungsdaten weisen aber nach wie vor in diesem betrachtetem Ausschnitt große systematische Abweichungen auf. Die Standardabweichungen der Entfernungsdaten haben sich in allen drei Standpunkten vergrößert (von $s_{\overline{d}} = 0{,}056$; 0,012; 0,035 nach $s_{\overline{d}} = 0{,}076$; 0,030; 0,049). Die systematische Abweichung im Aufnahmestandpunkt 1 pflanzt sich ebenfalls in den Intensitätswerten fort, was anhand der überlagerten Häufigkeitsverteilungen mit den Nebenpeaks erkennbar ist. Bei alleiniger Betrachtung der Verbesserungen dieses Ausschnittes lässt sich schlussfolgern, dass die Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen der Helligkeitswerte auf Kosten der Entfernungs- und Intensitätswerte erfolgt. Daher soll an dieser Stellen nochmals betont werden, dass neben diesem jeweils im Detail betrachteten Oberflächenausschnitt des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* und *Verona Theater* weitere neun bzw. elf Oberflächenausschnitte für die Ausgleichung verwendet wurden, die die Verteilung der Verbesserungen in den betrachteten Ausschnitten beeinflussen.

5.4.5 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnungen hinsichtlich der Zielsetzungen der Methode beurteilt.

5.4.5.1 Genauigkeit der Orientierungsparameter im Vergleich zur Stufe 1

Zur Beurteilung inwieweit die Genauigkeit der geschätzten Orientierungsparameter im Vergleich zu den bestimmten Orientierungsparametern der Stufe 1 gesteigert werden konnte, werden die Ergebnisse der Tabellen 5.7 mit 5.18 bzw. 5.16, 5.17 gegenüber gestellt. Für den Vergleich wird der Fall (1) herangezogen, da er den allgemeinen Fall für die Auswertung von Datensätzen *kombinierter Messsysteme* repräsentiert. Anhand dieses Ausgleichungsfalls wird ebenfalls beurteilt, ob die Genauigkeit der Orientierungsparameter der Stufe 1 als Näherungswerte für die Stufe 2 ausreicht, und damit die Ausgleichung zum globalen Minimum führt.

Innere Genauigkeit

In Tabelle 5.21 sind zur Beurteilung zusammenfassend die über die Translations- und Rotationsparameter gemittelten absoluten Differenzen zu den Referenzwerten sowie die Standardabweichungen dargestellt. Die Standardabweichungen konnten in beiden Datensätzen circa um den Faktor 100 gesteigert werden, was vor allem an der größeren Redundanz liegt.

	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
Ausgleichungsfall (1)				
$\Delta(t_X, t_Y, t_Z)[m]$	0,022	0,037	0,321	0,347
$s(t_X, t_Y, t_Z)[m]$	1,56e-004	1,33e-004	0,50e-004	1,66e-004
$\Delta(\omega, \phi, \kappa)[rad]$	0,000	0,001	0,015	0,013
$s_(\omega, \phi, \kappa)[rad]$	1,65e-006	2,24e-006	1,22e-006	2,77e-006
Stufe 1				
$\Delta(t_X, t_Y, t_Z)[m]$	0,011	0,054	0,013	0,109
$s(t_X, t_Y, t_Z)[m]$	1,60e-002	4,02e-002	2,67e-002	4,34e-002
$\Delta(\omega, \phi, \kappa)[rad]$	0,000	0,000	0,001	0,005
$s(\omega, \phi, \kappa)[rad]$	2,27e-004	8,96e-004	3,56e-004	7,51e-004

Tabelle 5.21: Gemittelte absolute Differenzen zu den Referenzwerten Δ und gemittelte Standardabweichungen s der Orientierungsparameter des Ausgleichungsfalls (1) im Vergleich zur Stufe 1

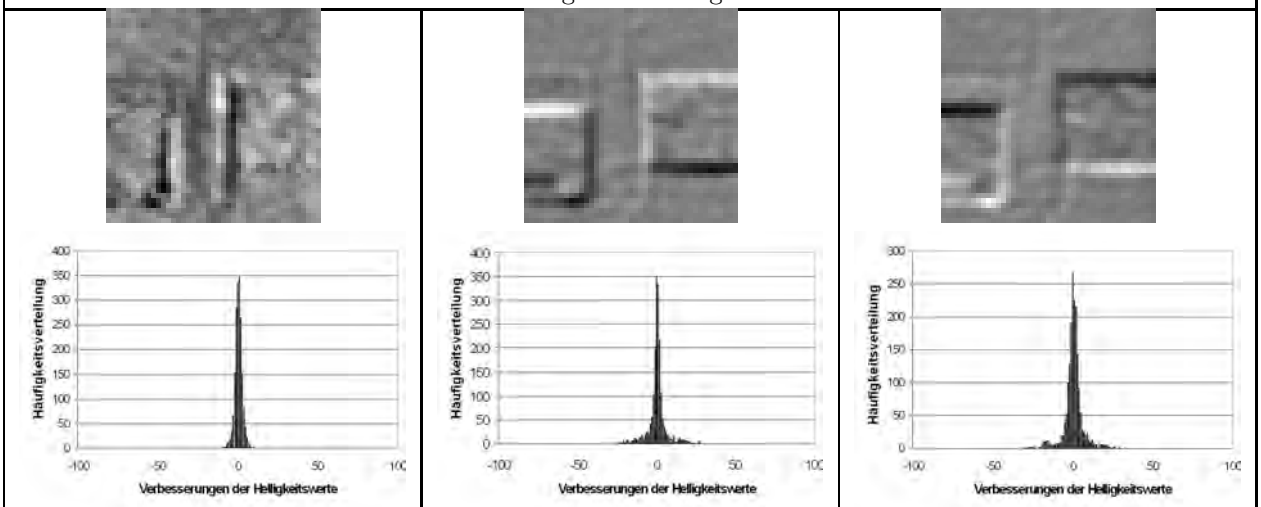
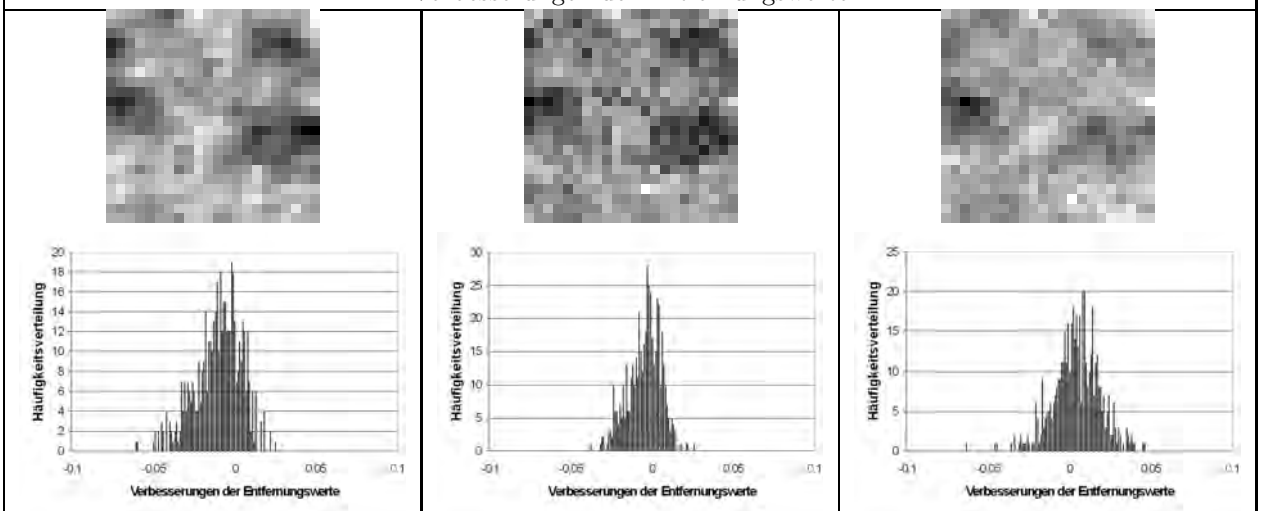
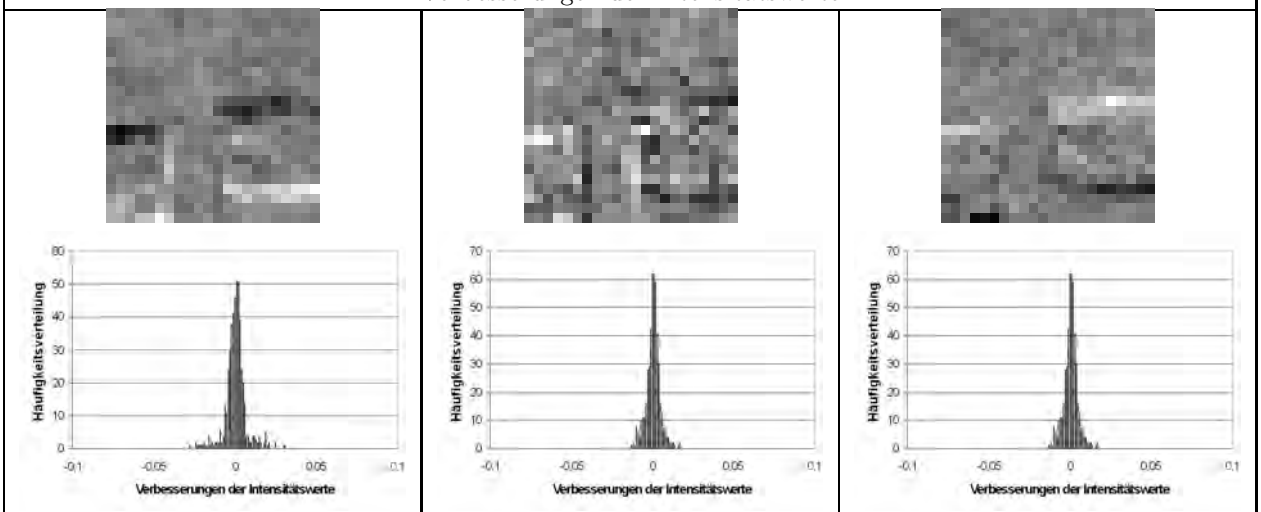
Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
Verbesserungen der Helligkeitswerte		
		
$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 2{,}325$	$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 5{,}799$	$n = 1849$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 6{,}190$
Verbesserungen der Entfernungswerte		
		
$n = 484$; $\overline{d}$ = -0,010; $s_{\overline{d}} = 0{,}014$	$n = 484$; $\overline{d}$ = -0,005; $s_{\overline{d}} = 0{,}010$	$n = 484$; $\overline{d} = 0{,}003$; $s_{\overline{d}} = 0{,}014$
Verbesserungen der Intensitätswerte		
		
$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}006$	$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}004$	$n = 484$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}006$

Tabelle 5.19: Verbesserungen im Objektraum im Datensatz Dresdner Frauenkirche am Beispiel des Oberflächenausschnittes 5

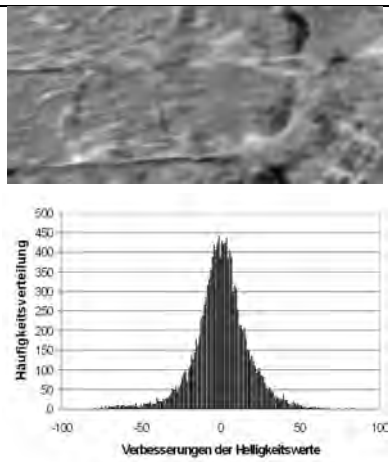
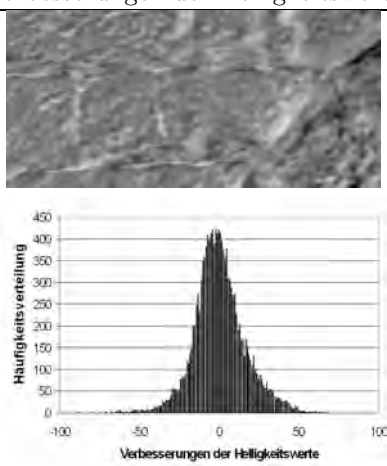
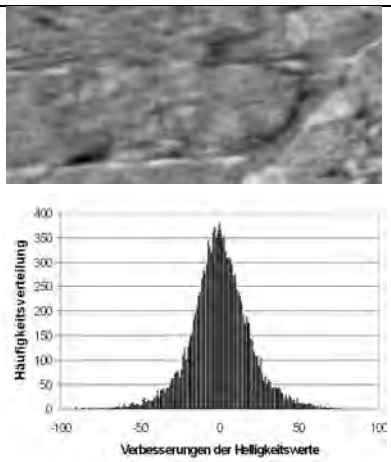
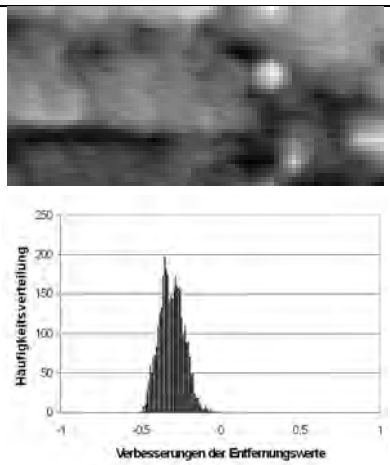
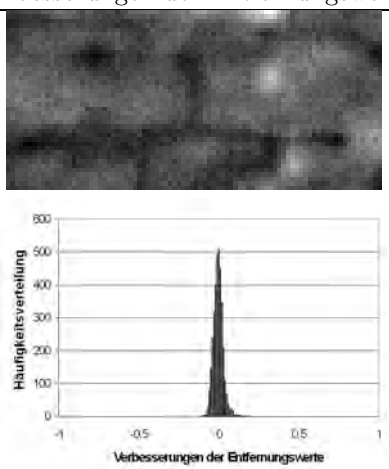
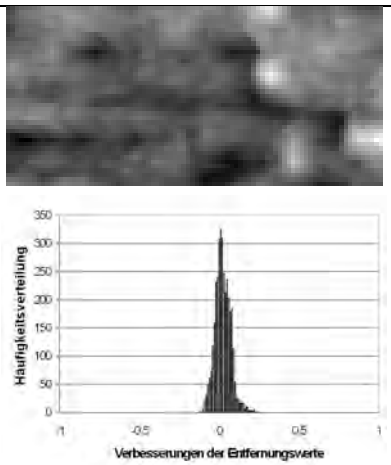
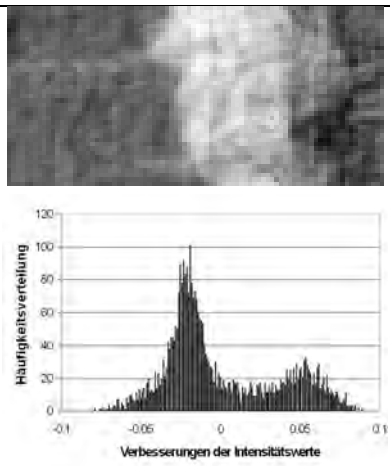
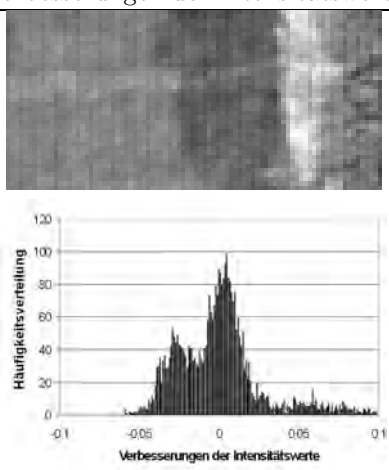
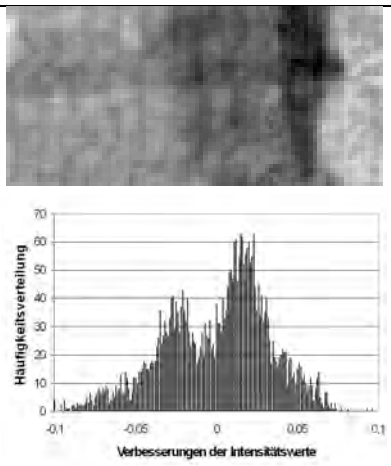
Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
Verbesserungen der Helligkeitswerte		
		
$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 17{,}117$	$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 16{,}328$	$n = 13851$; $\overline{g} = 0$; $s_{\overline{g}} = 18{,}698$
Verbesserungen der Entfernungswerte		
		
$n = 3526$; $\overline{d} = -0{,}309$; $s_{\overline{d}} = 0{,}076$	$n = 3526$; $\overline{d} = -0{,}008$; $s_{\overline{d}} = 0{,}030$	$n = 3526$; $\overline{d} = 0{,}018$; $s_{\overline{d}} = 0{,}049$
Verbesserungen der Intensitätswerte		
		
$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}035$	$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}027$	$n = 3526$; $\overline{i} = 0$; $s_{\overline{i}} = 0{,}032$

Tabelle 5.20: Verbesserungen im Objektraum im Datensatz Verona Theater am Beispiel des Oberflächenausschnittes 4

Äußere Genauigkeit

Betrachtet man weiter die Differenzen zu den Referenzwerten, stellt sich für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* heraus, dass diese im Bereich weniger Millimeter variieren (für die Translationen von 0,011; 0,054 nach 0,022; 0,037), aber beim Datensatz *Verona Theater* im Ausgleichungsfall (1) der Stufe 2 deutlich größer geworden sind (für die Translationen von 0,013; 0,109 nach 0,321; 0,347).

Die vorliegenden Differenzen, als erste Beurteilung der äußeren Genauigkeit, werden durch die Standardabweichungen s_S in Tabelle 5.22 bestätigt. Während sich das s_S im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* in einem vergleichbaren Genauigkeitsbereich bewegt, fällt es im Datensatz *Verona Theater* im Ausgleichungsfall (1) der Stufe 2 stark ab.

	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
s_S	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
Referenzdaten $[m]$	0,016	0,019	0,011	0,009
Stufe 1 $[m]$	0,013	0,027	0,028	0,097
Fall (1) $[m]$	0,021	0,030	0,283	0,264

Tabelle 5.22: Äußere Genauigkeit der Orientierungsbestimmung ermittelt aus den Abweichungen der Referenzpunkte im Objektraum

Zusammenfassend kann also die Aussage getroffen werden, dass durch die flächenbasierte Orientierungsmethode die innere Genauigkeit der Orientierungsparameter aufgrund der höheren Redundanz gesteigert werden kann. Die äußere Genauigkeit und auch die Zuverlässigkeit hängt von der Güte der Beobachtungen ab.

Anhand der höheren äußeren Genauigkeiten der Orientierungsparameter der Stufe 1 im Vergleich zur Stufe 2 kann bestätigt werden, dass die Güte der Näherungswerte ausreicht, damit die Ausgleichung zum globalen Minimum konvergiert. Dabei ist zu beachten, dass das globale Minimum in den sechs Ausgleichungsfällen variiert, zum einen aufgrund der jeweils unterschiedlichen Ausgleichungskonfiguration (unterschiedliche Anzahl und Art der Unbekannten) und zum anderen aufgrund der insbesondere im Datensatz *Verona Theater* vorliegenden Abweichungen zwischen den Beobachtungen und dem gewählten Funktionalen Modell.

5.4.5.2 Simultane Oberflächenrekonstruktion

Durch die simultane Oberflächenrekonstruktion wird in beiden realen Datensätzen die innere Genauigkeit gesteigert, was durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse (s. Tabelle 5.16 und 5.17) des Ausgleichungsfalls (1) zum Fall (2) nachgewiesen wird.

Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* nimmt bei der konstant eingeführten Oberfläche durch die verringerte Anzahl an Unbekannten wie erwartet die Anzahl der Iterationen (von 40 auf 20) und die Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen im Objektraum ab (von $s_0^g = 4,85$; $s_0^d = 0,027$; $s_0^i = 0,005$ nach $s_0^g = 9,10$; $s_0^d = 0,035$; $s_0^i = 0,008$). Auch nehmen die äußeren Genauigkeiten für beide Standpunkte ab. Zur weiteren Beurteilung der inneren Genauigkeit werden die Standardabweichungen der Orientierungsunbekannten betrachtet, die im Fall (2) circa um den Faktor 2 abnehmen (s. Tabelle A.5 und A.12 im Anhang). Durch die konstant eingeführte Objektoberfläche liegen größere Modellabweichungen in den Beobachtungen der perspektiven Aufnahmestandpunkte 1 und 3 vor, was durch die insgesamt größeren Differenzen zu den Referenzwerten bestätigt wird.

Im Datensatz *Verona Theater* nimmt dagegen die Anzahl der Iterationen zu (von 5 auf 37), was wahrscheinlich auf die systematischen Abweichungen zurückzuführen ist, die durch die konstant eingeführte Objektoberfläche weniger stark minimiert werden können. Die Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen im Objektraum nehmen im Fall (2) für die Helligkeits- und Intensitätswerte ebenfalls ab (von $s_0^g = 23,24$; $s_0^i = 0,021$ nach $s_0^g = 34,66$; $s_0^i = 0,034$). Die Entfernungsdaten weisen dagegen bei der konstant eingeführten Objektoberfläche eine geringere Standardabweichungen auf (von $s_0^d = 0,271$ nach $s_0^d = 0,189$). Auch sind die Werte der äußeren Genauigkeiten im Fall (2), insbesondere für den ersten Standpunkt, geringer (=höhere Genauigkeit) als im Fall (1). Die innere Genauigkeit der Orientierungsparameter (s. Tabelle A.5 und A.12 im Anhang) nimmt dagegen ab. Insgesamt deuten die Ergebnisse dieses Datensatzes aber wieder auf Abweichungen in den Beobachtungen hin. Dadurch, dass die minimalen und maximalen Höhendifferenzen von -0,714 m bis 0,179 m zwischen der rekonstruierten Objektoberfläche (Fall (1)) und der als konstant eingeführten Oberfläche (Fall (2)) entsprechen, ist das Ergebnis aus Stufe (2) für diesen Datensatz insgesamt als zuverlässiger einzustufen.

5.4.5.3 Orientierung einzelner Helligkeitsbilder

Durch die Betrachtung der Helligkeitsbilder als einzelne Aufnahmestandpunkte im Ausgleichungsfall (3) wird die starre Verbindung zwischen den Bilddaten des *kombinierten Messsystems* aufgehoben. Die kalibrierten Exzentrizitätsparameter fließen somit nicht mehr in das funktionale Modell ein, sondern dienen zur Näherungswertbestimmung für die Orientierungsparameter der Kamerastandpunkte. Zur Beurteilung werden die Ergebnisse mit dem Fall (1) verglichen.

Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* (s. Tabelle 5.16) wird nach nur 5 Iterationen die Konvergenz erreicht. Die Standardabweichung der Helligkeitswerte nimmt im Fall (3) im Vergleich zum Fall (1) zu (von s_0^g=4,85 nach 8,15). Die Standardabweichungen der Entfernungs- und Intensitätswerte nehmen hingegen ab (von s_0^d=0,027; s_0^i=0,005 nach s_0^d=0,015; s_0^i=0,004). Weiter nimmt die äußere Genauigkeit für die Laserscannerstandpunkte (s_S^1=0,030; s_S^3=0,038) ebenfalls ab, aber für die Kamerastandpunkte deutlich zu (s_S^1=0,010; s_S^3=0,018). Durch diese systematisch verschiedenen äußeren Genauigkeiten ist anzunehmen, dass für die Orientierung der Helligkeitsbilder ein anderes Minimum gefunden wird, als wie für die Entfernungs- und Intensitätsbilder. Zur weiteren Analyse des Falls (3) im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* werden die Differenzen zwischen den bestimmten Kamera- und Laserscannerstandpunkten und den Exzentrizitätsparametern des *kombinierten Messsystems* betrachtet. In der Tabelle 5.23 sind die Differenzen zu den kalibrierten Exzentrizitätsparametern aufgeführt.

	Kamerastandpunkte		
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$\Delta t_X[m]$	-0,009	0,000	-0,010
$\Delta t_Y[m]$	-0,012	0,015	0,002
$\Delta t_Z[m]$	-0,002	0,000	-0,033
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,000	0,002
$\Delta\phi[rad]$	0,000	0,000	0,000
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,000	0,000

Tabelle 5.23: Differenzen zwischen den Orientierungsparametern der Aufnahmestandpunkte und den Kalibrierungsdaten des kombinierten Messsystems im Datensatz Dresdner Frauenkirche

Es liegen nur geringe Abweichungen in der Größenordnung der Messgenauigkeit des Laserscanners vor. Die größten Abweichungen treten dabei im Kamerastandpunkt 3 in t_Z bzw ω auf, was einer Verschiebung des Kamerastandpunktes entlang der vertikalen Gebäudefassade entspricht (s. Abbildung 5.1). Der Standpunkt 3 weist die kürzeste Aufnahmeentfernung auf, wodurch die Helligkeitsbilder mehr Informationen enthalten, als die vom Standpunkt 1 und 2. Diese Informationen werden innerhalb der Ausgleichung als Verbesserungen interpretiert, die es zu minimieren gilt.

Dass die Standardabweichungen der Entfernungs- und Intensitätsdaten im Vergleich zum Fall (1) weiter minimiert werden konnten, ist auch auf ungenaue Exzentrizitätsparameter des *kombinierten Messsystems* zurückzuführen. Ungenauigkeiten in den kalibrierten Exzentrizitäten sind leicht nachzuweisen, indem die radiometrischen Bilder des Aufnahmestandpunktes auf die Entfernungsdaten im Objektraum entzerrt werden. Liegen keine Ungenauigkeiten vor, bilden die radiometrischen Objektraummodelle denselben Objektbereich ab. In Abbildung 5.24 sind aber für den Datensatz *Dresdner Frauenkirche* systematische Verschiebungen anhand der Auswahl an Oberflächenausschnitten von bis zu 5 Pixel nachgewiesen. Die Verschiebung ist anhand der radiometrischen Kanten sichtbar, die sich im Helligkeits- und Intensitätsbild nicht exakt überlagern. Die systematische Abweichung wirkt sich in Richtung der Z-Achse des Objektraumkoordinatensystems aus. Doch durch die geringe Oberflächentopographie, die als Verknüpfungsinformation zwischen den Bildern der Laserscannerstandpunkte und Kamerastandpunkte dient, wird die zuverlässige Orientierung der Helligkeitsbilder zu den Laserscannerdaten erschwert. Durch die fehlende bzw. geringe Verknüpfungsinformation liegt somit eine Mehrdeutigkeit bzw. ein Datumsdefekt vor, der z.B. durch die Einführung eines einzelnen kombinierten Aufnahmestandpunktes, durch den festen Bezug der drei Bilddatentypen, behoben werden kann.

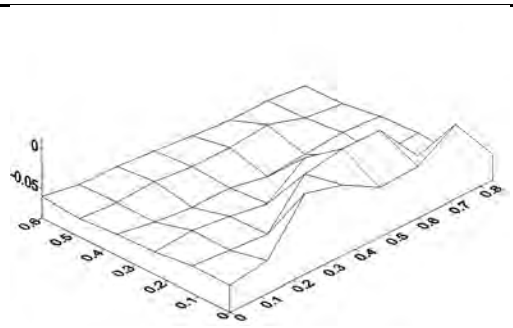
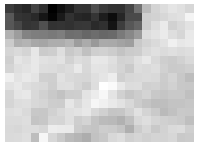
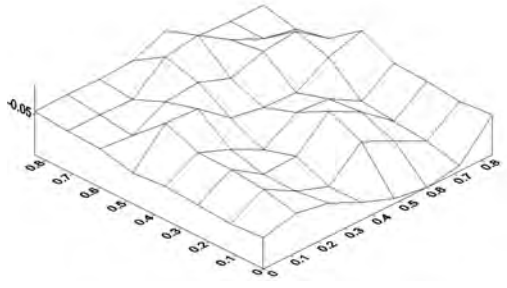
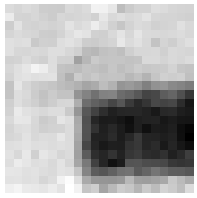
Nr.	3D-Objektoberfläche	Helligkeiten	Intensitäten
3			
6			

Tabelle 5.24: Nachweis von systematischen Effekten in den Kalibrierungsdaten des kombinierten Messsystems am Datensatz Dresdner Frauenkirche

Im Datensatz *Verona Theater* werden dagegen 141 Iterationen bis zum Erreichen der Konvergenz benötigt. Hinsichtlich der Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen im Objektraum liegt der gleiche Trend wie beim Datensatz *Dresdner Frauenkirche* vor. Die Genauigkeit kann gegenüber dem Fall (1) für die Entfernungs- und Intensitätswerte gesteigert werden, bei den Helligkeitswerten fällt die Genauigkeit leicht ab. Bei der Betrachtung der äußeren Genauigkeiten fällt auf, dass für den Standpunkt 1 der Laserscannerstandpunkt genauer orientiert wurde als der Kamerastandpunkt. Für den Standpunkt 3 verhält es sich genau entgegengesetzt. Zur weiteren Analyse dieses Falls (3) werden daher wieder die Differenzen zwischen den bestimmten Kamera- und Laserscannerstandpunkten und den Exzentrizitätsparametern des *kombinierten Messsystems* betrachtet (s. Tabelle 5.25).

	Kamerastandpunkte		
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$\Delta t_X[m]$	-0,384	-0,001	0,168
$\Delta t_Y[m]$	0,179	0,139	-0,322
$\Delta t_Z[m]$	0,402	-0,191	0,167
$\Delta\omega[rad]$	-0,008	0,000	0,031
$\Delta\phi[rad]$	0,009	0,011	-0,002
$\Delta\kappa[rad]$	-0,008	-0,009	0,003

Tabelle 5.25: Differenzen zwischen den Orientierungsparametern der Aufnahmestandpunkte und den Kalibrierungsdaten des kombinierten Messsystems im Datensatz Verona Theater

Dieses mal liegen die Abweichungen in einer Größenordnung von mehreren Dezimetern vor und übertreffen damit die möglicherweise vorliegenden Ungenauigkeiten in den Exzentrizitätsparametern, wie sie grafisch nicht oder kaum in Tabelle 5.26 anhand des Helligkeits- und Intensitätsbildes nachzuweisen sind.

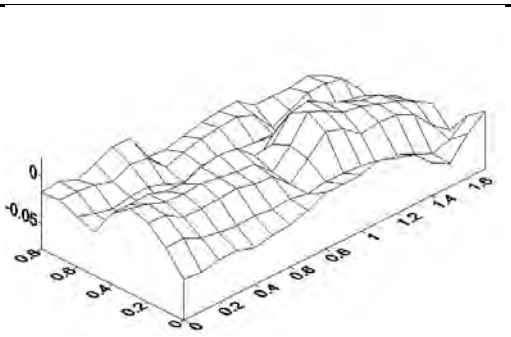
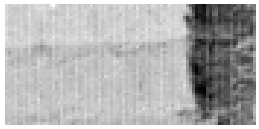
Nr.	3D-Objektoberfläche	Helligkeiten	Intensitäten
4			

Tabelle 5.26: Nachweis von systematischen Effekten in den Kalibrierungsdaten des kombinierten Messsystems am Datensatz Verona Theater

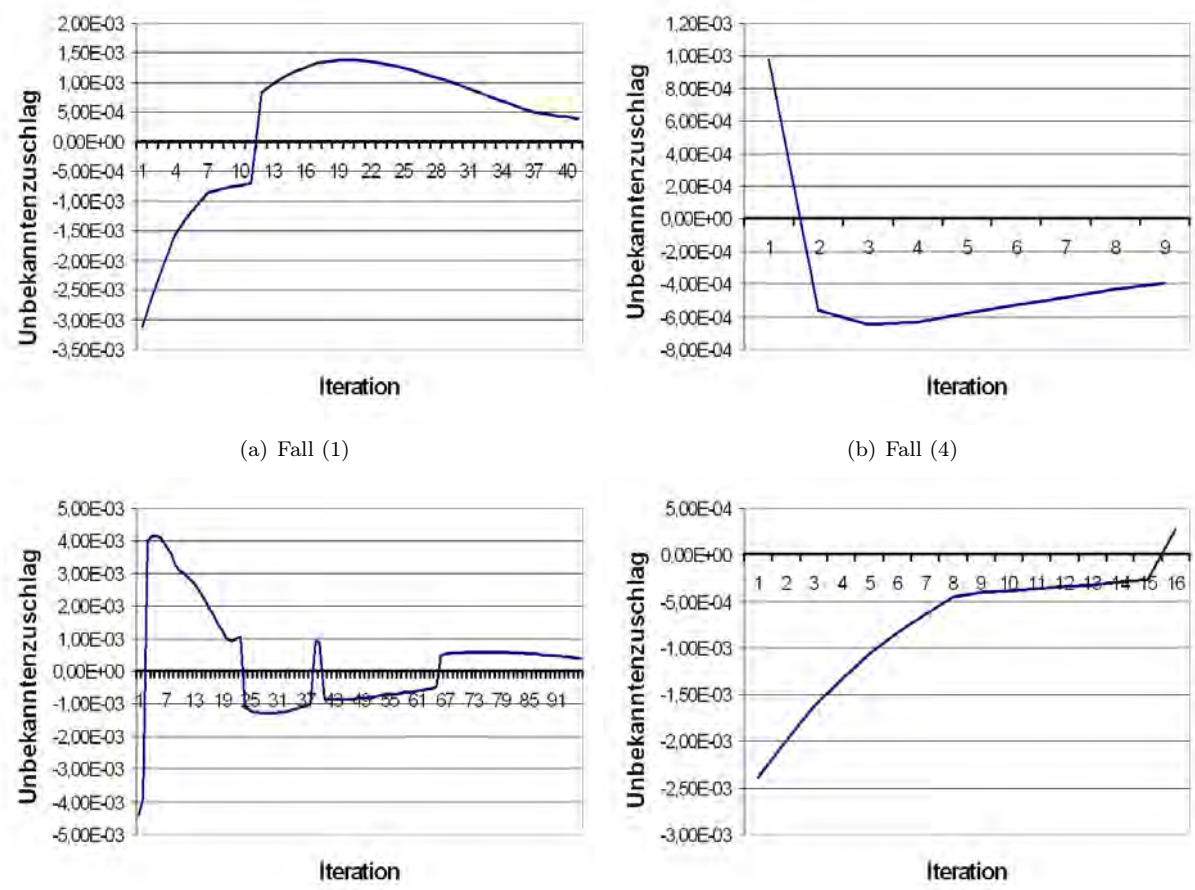
Anhand der Differenzen in Tabelle 5.25 wird damit die bereits getroffene Aussage gestärkt, dass systematische Abweichungen in den Beobachtungen zum einen zu einer Verschiebung in den Orientierungsparametern und zum anderen auch zu großen Höhendifferenzen zwischen der rekonstruierten und der als konstant eingeführten Objektoberfläche führen (von -0,860 m bis 0,233 m).

5.4.5.4 Analyse des Konvergenz- und Genauigkeitsverhaltens

Die Ausgleichungsfälle (4), (5) und (6) mit denen im Wesentlichen das Konvergenz- und Genauigkeitsverhalten hinsichtlich der verwendeten Bilddatentypen, der Anzahl und Verteilung der Oberflächenausschnitte und der Anzahl der verwendeten Aufnahmestandpunkte analysiert wird, werden in diesem Abschnitt gemeinsam betrachtet. Die Ergebnisse sind den Tabellen 5.16 und 5.17 zu entnehmen und werden wieder dem Fall (1) gegenüber gestellt.

Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* nehmen im Fall (4) (s. Tabelle 5.16), beim Verzicht auf die Verwendung der Helligkeitsbilder, die Abweichungen der Entfernungs- und Intensitätswerte ab (von s_0^d=0,027; s_0^i=0,005 nach s_0^d=0,015; s_0^i=0,004), was damit einer höheren inneren Genauigkeit entspricht. Die äußere Genauigkeit nimmt dagegen ab. Im Fall (5) fällt insbesondere die hohe Anzahl der benötigten Iterationen von 95 auf, die auf die reduzierte Anzahl und Verteilung im Überlappungsbereich zurückzuführen ist. Die innere Genauigkeit liegt auf einem ähnlichen Niveau wie im Fall (1), die äußere Genauigkeit nimmt dagegen deutlich ab (im Standpunkt 3 von 0,030 m nach 0,059 m). Insgesamt ist die äußere Genauigkeit des Aufnahmestandpunktes 3 für alle betrachteten Ausgleichungsfälle (1-5) geringer als für den Aufnahmestandpunkt 1, was aufgrund der Konfiguration (kürzerer bzw. „anderer“ Aufnahmeabstand, als Standpunkt 1 und 2 und damit „anderer“ Informationsgehalt in den Bilddaten) zurückzuführen ist. Im Fall (6) wird daher untersucht, ob durch das Weglassen dieses Standpunktes 3 die Genauigkeit gesteigert werden kann. Durch das Weglassen des dritten Standpunktes fallen auch die Oberflächenausschnitte 7,8,9 (s. Abbildung 5.10) aus der Berechnung heraus. Sowohl die innere als auch die äußere Genauigkeit kann im Fall (6) für den Standpunkt 1 gesteigert werden.

Weiter werden zur Beschreibung des Konvergenzverhaltens exemplarisch die maximalen Unbekanntenzuschläge der Translationen über die Anzahl der berechneten Iterationen dargestellt (s. Abbildung 5.12). Neben den Ausgleichungsfällen (4), (5) und (6) ist jeweils der Fall (1) als Standardfall dargestellt. Die Darstellungen der Unbekanntenzuschläge der weiteren Parametergruppen sowie die Standardabweichungen der einzelnen Bilddatentypen über die Anzahl der berechneten Iterationen sind dem Anhang zu entnehmen.



(a) Fall (1)

(b) Fall (4)

(c) Fall (5)

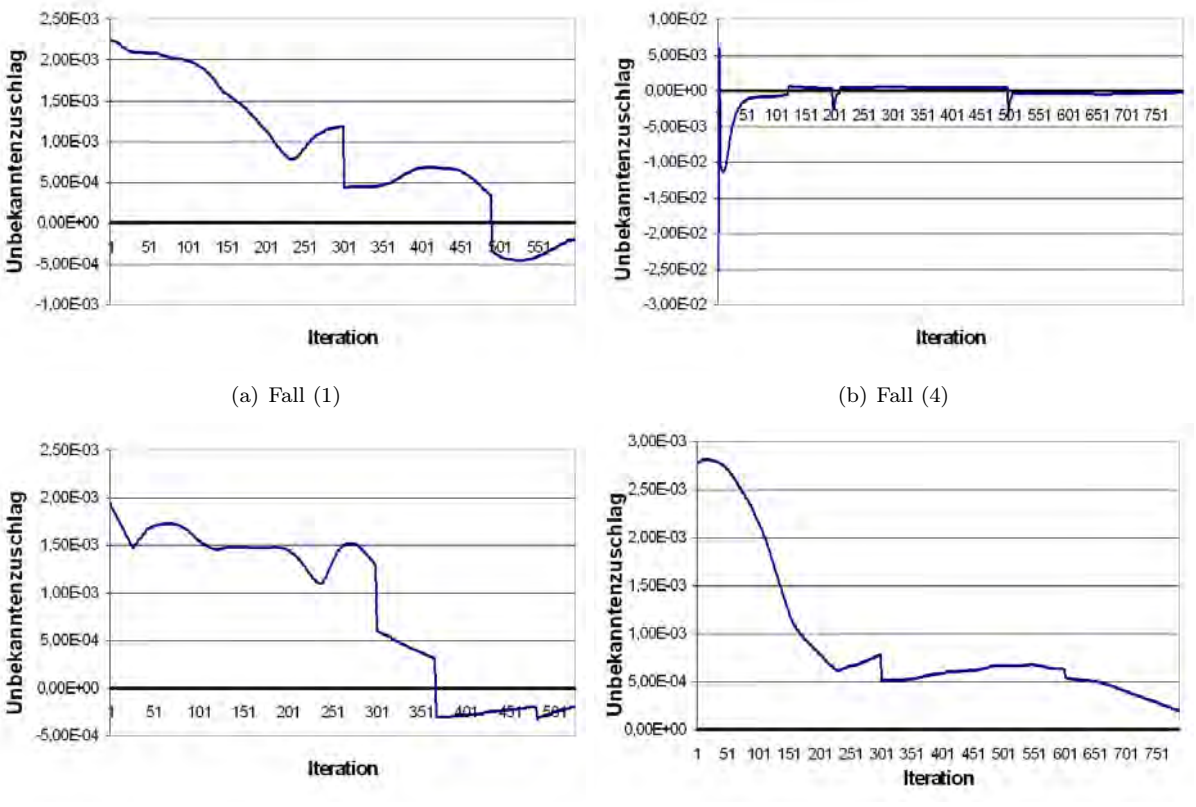
(d) Fall (6)

Abbildung 5.12: Maximale Unbekanntenzuschläge [m] der Translationen im Datensatz Dresdner Frauenkirche

Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* wird im Fall (4) (s. Abbildung 5.12 (b)) deutlich, dass zu Beginn der Ausgleichung die maximalen Unbekanntenzuschläge positiv und zum Ende das Vorzeichen der maximalen Unbekanntenzuschläge negativ ist. Durch die unberücksichtigten Helligkeitsbilder nähert sich die Ausgleichung im Vergleich zum Fall (1) von der anderen Seite dem Minimum. Im Fall (5) führt die verringerte Anzahl und Verteilung an Oberflächenausschnitten zu einer erheblich langsameren Konvergenzgeschwindigkeit. Der unstetige Kurvenverlauf lässt zudem auf eine schwache Ausgleichungskonfiguration schließen. Im Fall (6) ist ein ähnlicher direkter Verlauf wie im Fall (1) festzustellen.

Im Datensatz *Verona Theater* (s. Tabelle 5.17) wurde im Fall (4) keine Konvergenz erreicht und die Ausgleichung wurde nach der maximalen Anzahl der Iterationen abgebrochen. Die Ausgleichung weist, durch das Weglassen der Helligkeitsinformationen, eine sehr langsame Konvergenzgeschwindigkeit auf, wie es auch an dem in Abbildung 5.13 (b) aufgezeigten Verlauf der Unbekanntenzuschläge deutlich wird. Die innere und äußere Genauigkeit ist an dieser Iteration 300 im Fall (4) im Vergleich zu den anderen Ausgleichungsfällen am höchsten. Im Fall (5) kann durch das Weglassen der oberen Oberflächenausschnitte (s. Abbildung 5.11) eine höhere innere Genauigkeit für die Helligkeits- und Entfernungswerte auf Kosten einer geringeren äußeren Genauigkeit erreicht werden. Insbesondere der Aufnahmestandpunkt 3 weist mit s_S^3=0,597 m die höchste Ungenauigkeit auf. Betrachtet man dazu die Aufnahmekonfiguration in Abbildung 5.2 wird deutlich, dass für den dritten Standpunkt durch den nahezu doppelten Aufnahmeabstand nur wenig Informationen mit einer schlechten räumlichen Verteilung zur Orientierungsbestimmung vorliegen. Im Fall (6) werden daher durch den Ausschluss des dritten Standpunktes nur die Standpunkte mit gleichwertigen Bildinformationen orientiert. Im Vergleich zum Fall (1) kann damit sowohl die innere als auch die äußere Genauigkeit gesteigert werden.

Wieder werden zur Beschreibung des Konvergenzverhaltens exemplarisch die maximalen Unbekanntenzuschläge der Translationen über die Anzahl der berechneten Iterationen dargestellt (s. Abbildung 5.13).



(a) Fall (1)

(b) Fall (4)

(c) Fall (5)

(d) Fall (6)

Abbildung 5.13: Maximale Unbekanntenzuschläge [m] der Translationen im Datensatz Verona Theater

Im Datensatz *Verona Theater* ist das Ausgleichungsverhalten über insgesamt 2 Filterstufen und der sich daran anschließenden Originalauflösung dargestellt. Insgesamt sind hinsichtlich Ausgleichungsverhaltens die gleichen Rückschlüsse zu ziehen, wie bei dem bereits beschriebenen ersten Datensatz. Erwähnenswert ist noch der Fall (4), bei dem, wie bereits in der Diskussion der Ergebnisse beschrieben, keine Konvergenz erreicht wird. Durch die alleinige Verwendung der Entfernungs- und Intensitätsbilder können die Konvergenzkriterien nicht erreicht werden. Dieser Effekt tritt gleichermaßen für die Rotationsparameter und den Höhenzuschlägen auf (s. Abbildung A.21 im Anhang).

Bei der Analyse der Ausgleichungsergebnisse bestätigt sich insgesamt die Annahme, dass aufgrund einer geringeren Anzahl an Beobachtungen auch ein Genauigkeitsabfall in den geschätzten Parametern entsteht. Eine Ausnahme stellt in beiden Datensätzen der Fall (6) dar. Beim Verzicht eines Aufnahmestandpunktes, der ungleichwertige Bildinformationen liefert (z.B. erheblich höherer oder erheblich niedrigerer Bildmaßstab), wird die Genauigkeit der Parameterschätzung erhöht. Die verbleibenden 2 Aufnahmestandpunkte lassen sich in beiden realen Datensätzen besser anpassen als die verwendeten 3 Standpunkte.

5.5 Bewertung

Im Folgenden werden die beiden Stufen der Methode hinsichtlich der Zielsetzungen zusammenfassend beurteilt. Die erwarteten Vorteile durch die simultane Verarbeitung multisensoraler Bilddaten *kombinierter Messsysteme* konnten insgesamt bestätigt werden. Auch konnte gezeigt werden, dass die Orientierungsbestimmung von Aufnahmestandpunkten mit großem Abstands-Basis-Verhältnis möglich ist. Beide Stufen der neuen Methode sind erfolgreich.

5.5.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung

Die merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung ist für beide Datensätze als robust zu beurteilen. Die beiden, hinsichtlich der Objektoberflächengeometrie und Textur, unterschiedlichen Datensätze wurden im Wesentlichen mit gleichen Schwellwerten in den einzelnen Prozessierungsschritten verarbeitet. Dadurch wird die Unempfindlichkeit des Verfahrens hinsichtlich der definierten Schwellwerte hervorgehoben und ebenfalls die Robustheit des Verfahrens betont. Nur die Empfindlichkeit des `SUSAN`-Operators zur Steuerung der Anzahl

der *initialen Merkmalspunkte* wird in Abhängigkeit der vorliegenden Textur hinsichtlich des Überlappungsbereichs angepasst. Durch die verwendeten geometrischen Kriterien der Planarität und des maximal zulässigen Betrachtungswinkels wird die Anzahl der *initialen Merkmalspunkte* erheblich um mögliche Ausreißer reduziert. Bei der Verarbeitung der realen Datensätze wurden mit dem maximal zulässigen Betrachtungswinkel *initiale Merkmalspunkte* innerhalb gesamter Oberflächenbereiche verworfen. Im Gegensatz zu diesem globalen Kriterium wirkt sich das Kriterium der Planarität lokal in Bezug zu der umgebenden Oberflächengeometrie aus.

In der jeweiligen Analyse der Merkmalskorrespondenzen zwischen den Aufnahmestandpunkten 1 und 2 bzw. 2 und 3 in dem jeweiligen Datensatz wird nachgewiesen, dass sich die entzerrten Bildausschnitte als Merkmalsbeschreibungen eignen, der Kreuzkorrelationskoeffizient ein geeignetes Ähnlichkeitskriterium darstellt und die vorgeschlagene Strategie zur Korrespondenzanalyse erfolgreich ist. Die Bestimmung der *kandidierenden Korrespondenzen* durch den Vergleich der Merkmalsbeschreibungen der *akzeptierten Merkmalspunkte* führt zu einer Optimierung der `RANSAC`-Methode, da für die zufällige Auswahl einer minimalen Anzahl von Merkmalskorrespondenzen die *kandidierenden Korrespondenzen* herangezogen werden.

Die Standardabweichung der geschätzten Orientierungsparameter von wenigen Zentimetern, fällt aufgrund der pixelgenauen Detektion der *initialen Merkmalspunkte* sowie der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit einer Einzelpunktmessung von 1 cm in den erwarteten Genauigkeitsbereich. Durch die raue Oberflächenstruktur im Datensatz *Verona Theater* und der Verdeckungen aufgrund der großen Basislinien ist eine höhere Ungenauigkeit in den 3D-Koordinaten der Merkmalspunkte zu erwarten, die sich in der vergleichsweise schlechteren Genauigkeit der Standardabweichungen der Gewichtseinheit bei der Orientierungsbestimmung widerspiegelt.

Insgesamt sind die ermittelten Orientierungsparameter aber als zuverlässig bestimmt einzustufen, was sich durch die geringen Differenzen zu den Referenzwerten gezeigt hat.

5.5.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung

Die flächenbasierte Orientierungsbestimmung ist für beide Datensätze als genau einzustufen. Die innere Genauigkeit der Orientierungsparameter kann im Vergleich zur merkmalsbasierten Orientierungsbestimmung erfolgreich gesteigert werden. Die äußere Genauigkeit und auch die Zuverlässigkeit hängt von der Güte der Beobachtungen ab. Es kann nachgewiesen werden, dass durch die simultane Oberflächenrekonstruktion im Ausgleichungsfall (1) die Genauigkeit der Orientierungsbestimmung im Vergleich zum Ausgleichungsfall (2), mit der konstant eingeführten Objektoberfläche, gesteigert wird. Im Datensatz *Dresdner Frauenkirche* entstehen aufgrund der planaren Objektoberfläche im Fall (3) Mehrdeutigkeiten, da die Oberflächentopographie der Verknüpfungsinformation, zur simultanen Orientierung der individuellen Helligkeitsbilder zu den Entfernungs- und Intensitätsbildern, entspricht. Die Mehrdeutigkeiten können auch als Datumsdefekt interpretiert werden, da die Aufnahmestandpunkte der Helligkeitsbilder nur durch die unzureichende geometrische Oberflächenstruktur mit den Entfernungs- und Intensitätsbildern verknüpft sind. Abhilfe würde die Berücksichtigung eines einzelnen kombinierten Aufnahmestandpunktes schaffen, der Helligkeits-, Entfernungs- und Intensitätsbilder enthält, so dass ein eindeutiger Bezug zwischen den Helligkeitsbildern und Laserscannerdaten hergestellt ist.

Im Datensatz *Verona Theater* wirken sich die systematischen Abweichungen in den Beobachtungen bzw. aufgrund des unzureichend definierten funktionalen Modells als eine Verschiebung in den Aufnahmestandpunkten aus. Es wird deutlich, dass aufgrund der perspektiven Verzerrungen in den Bildern der Aufnahmestandpunkte, den unterschiedlichen Bildmaßstäben aufgrund der variierenden Abstands-Basis-Verhältnissen, den Mischpixeln, Verdeckungen und weiteren Einflüssen, Abweichungen in den Beobachtungen vorliegen, die nicht hinreichend mit dem funktionalen Modell berücksichtigt werden können. Den vorliegenden Abweichungen im Objektraum, wurde im Wesentlichen durch die Wahl der Gewichte bei der Homogenisierung der Beobachtungsgruppen und der Verwendung von gefilterten Bilddaten bei der Datenprozessierung entgegen gewirkt. Insgesamt wird aber für diese Methode vorausgesetzt, dass die Beobachtungen nur zufällige Abweichungen enthalten die normalverteilt vorliegen.

Als noch unzureichend beantwortet muss die Untersuchung bzw. der Nachweis betrachtet werden, ob sich Helligkeitsbilder einzelner Kamerastandpunkte relativ zu Entfernungs- und Intensitätsbildern orientieren lassen. Insbesondere stellt sich die Frage, wieviel Oberflächenstruktur in Relation zum Abstands-Basis-Verhältnis benötigt wird. Auch kann hinsichtlich der benötigten Genauigkeit der Näherungswerte bzw. der Größe des Konvergenzradius der zweiten Stufe bislang nur ausgesagt werden, dass die durch die erste Stufe erzeugte Genauigkeit ausreicht. Da aber die zweite Stufe ebenfalls als unabhängige Methode zu betrachten ist und die Näherungswerte ebenfalls mit Hilfe anderer Verfahren zur Verfügung gestellt werden können, ist dieser Punkt ebenfalls noch zu untersuchen.

Insgesamt sind aber die wesentlichen Eigenschaften der Methode zur flächenhaften Orientierung multisensoraler Bilddaten erfolgreich dargelegt worden.

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Das vorgestellte zweistufige Verfahren zur objektraumbasierten simultanen Orientierung multisensoraler Bilddaten stellt eine allgemeine Methode zur Verarbeitung multisensoraler Daten von bildgebenden Messsystemen dar. Die Methode baut auf den Erfahrungen bisheriger Bildzuordnungsverfahren auf und nutzt zur Orientierungsbestimmung das Potential der unterschiedlichen Bilddatentypen. Näherungswerte für die Objektoberfläche im Objektraum werden sowohl in der ersten als auch in der zweiten Stufe vorausgesetzt und durch die Entfernungsbilder zur Verfügung gestellt.

Die entwickelte erste Stufe zur merkmalsbasierten Orientierungsbestimmung ist nur unter der Voraussetzung verwendbar, dass multisensorale Bilddaten in jedem Aufnahmestandpunkt vorliegen. Das Verfahren der ersten Stufe wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierungsparameter, als Eingangsdaten der zweiten Stufe, verwendet und daher auch nur innerhalb dieser Zielsetzung entwickelt und analysiert. Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen wurde die Funktionalität demonstriert und bewertet. Durch die Referenzwerte für die Orientierungsparameter der Aufnahmestandpunkte ist eine durchgreifende Kontrolle für die erste Stufe ermöglicht worden.

Mögliche Erweiterungen des bisher vorgestellten Verfahrens insbesondere hinsichtlich weiterer Anwendungen wären z.B.:

- Eine erweiterte Merkmalsbeschreibung, die über den auf die Tangentialebene der Objektoberfläche entzerrten Bildausschnitt hinausgeht. Z.B. ließe sich die Textur des Bildausschnittes durch die Angabe eines Maßes (Haralick-Parameter, Strukturtensor, ...) zusammenfassend beschreiben, sodass für den Vergleich kandidierender Merkmalspaare nur entsprechend eine bzw. eine geringe Anzahl an Größen verglichen werden müssen. Auch wäre es denkbar ein beschreibendes Maß zu definieren, welches die Nachbarschaft des Merkmalspunktes quantifiziert. Durch die Beschreibung und Berücksichtigung der globalen Eigenschaften der Merkmalspunkte nimmt die Robustheit des Verfahrens zu.

- Die Berücksichtigung der Merkmalsbeschreibung innerhalb der Konsistenzprüfung der `GOODSAC`-Methode. Bislang wird die Merkmalsbeschreibung nur zur Bestimmung der *initialen Korrespondenzen* verwendet. Innerhalb der Konsistenzprüfung wird nur die *Euklidische Distanz* berücksichtigt mit der kandidierende Merkmalskorrespondenzen, die einen definierten Schwellwert unterschreiten, als konsistent deklariert werden.

- Die automatisierte Einflußnahme auf die Anzahl und Verteilung der extrahierten Merkmalspunkte. Die Schwellwerte die bislang für ein gesamtes Bild gültig sind könnten lokal für Subbereiche adaptiert werden, sodass in einem Subbereich jeweils eine gewisse Anzahl markanter Punkte mit einer zu definierenden Verteilung extrahiert werden. Aufgrund der sequentiell durchgeführten Operationen zur Extraktion der *akzeptierten Merkmalspunkte* und dem damit verbundenen Einfluss von unterschiedlichen Schwellwerten ist in diesem Zusammenhang ebenfalls eine Gewichtung zu definieren. Es ist zu entscheiden, ob z.B. ein Merkmalspunkt, der in einem geometrisch unebenen Oberflächenbereich liegt aber eine markante Textur aufweist als wertvoller für die Korrespondenzanalyse einzustufen ist, als ein Merkmalspunkt, der in einem geometrisch ebenen Oberflächenbereich liegt und eine schwache Textur aufweist.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten der merkmalsbasierten Orientierungsmethode sind immer dann gegeben, wenn von einem Aufnahmestandpunkt mindestens ein radiometrischer Bilddatentyp und die geometrische Oberflächeninformation verfügbar sind. Anwendungsfelder neben dem vorgestellten terrestrischen Fall der Vermessung von Gebäudefassaden sind z.B. im Computer Vision beim Merkmalstracking, dem merkmalsbasierten Stereomatching und weiteren denkbar.

Die entwickelte zweite Stufe zur flächenhaften Orientierungsbestimmung stellt dagegen ein allgemeines Verfahren dar, welches multisensorale Bilddaten sowohl von unterschiedlichen, als auch von gemeinsamen Aufnahmestandpunkten, verarbeiten kann. Es setzt Näherungswerte für die Orientierungsparameter voraus, die durch die erste Stufe oder beliebige andere Verfahren zur Verfügung gestellt werden können. Durch die simultane Oberflächenrekonstruktion wird eine optimierte Objektoberfläche geschätzt, die hinsichtlich der Orientierungsbestimmung eine optimierte Verknüpfungsinformation darstellt. Auch für die zweite Stufe wurde mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen die Funktionalität der Methode demonstriert und anhand von sechs Ausgleichungsfällen bewertet. Durch die Angabe der inneren Genauigkeit konnte eine Genauigkeitssteigerung der Parameterschätzung, im Vergleich zur ersten Stufe, mit dem verwendeten funktionalen Modell nachgewiesen werden. Zur Beurteilung der Ergebnisse wird zudem eine absolute Kontrolle durchgeführt bzw. eine äußere Genauigkeit mit Hilfe von Verknüpfungspunkten angegeben. Die äußere Genauigkeit der Stufe 2 konnte im Vergleich zur Stufe 1 nicht gesteigert werden. Auch wurde durch die Prozessierung der realen

Datensätze deutlich, dass im Allgemeinen nicht vermieden werden kann, dass systematische Abweichungen zur Parameterschätzung einfliesen. Mögliche Erweiterungen des Verfahrens wären z.B.:

- Die Erweiterung des bestehenden funktionalen und stochastischen Modells zur Minimierung der (systematischen) Abweichungen, die insbesondere durch die Mischpixel, den Verdeckungen und den unterschiedlichen Bildmaßstäben herrühren. Eine mögliche Erweiterung zur Berücksichtigung unterschiedlicher Bildmaßstäbe könnte z.B. dafür sorgen, dass nur die Bilddaten bzw. bei einem multiskalen Ansatz nur die Skalen miteinander kombiniert werden, die einen identischen Maßstab aufweisen.

- Die Modellierung der Objektoberfläche durch ein Polyeder. Das würde zu einer allgemeineren Oberflächenbeschreibung führen und zum flexibleren Einsatz der Methode dienen, z.B. bei der Wahl der Oberflächenausschnitte.

- Die Übertragbarkeit des Ansatzes auf weitere Messsysteme und Beobachtungsgleichungen, z.B. auf andere Laserscanner mit anderen Abbildungsfunktionen oder auch eine Panoramakamera. Der entwickelte Ansatz stellt nur einen Rahmen für die objektraumbasierte flächenhafte Orientierungsbestimmung unter simultaner Verwendung multisensoraler Bilddaten dar. Der Ansatz lässt sich beliebig auf andere Messsysteme und Abbildungsfunktionen erweitern und damit neben der Erfassung von Gebäudefassaden ebenfalls auf andere Anwendungen übertragen. Das vorgestellte Anwendungsbeispiel der terrestrischen Erfassung von Gebäudefassaden, mit der Objektoberflächencharakteristik, den verwendeten Messsystemen und Aufnahmekonfigurationen muss entsprechend angepasst und erweitert werden. Es soll betont werden, dass der konzeptionelle Ansatz ein allgemeiner Ansatz zur Verarbeitung von Bildstrahlen ist, wobei abgeleitete Werte wie Bildpunkte und Bildkanten u.a. in diesem Rahmen ebenfalls integriert werden können.

Aufgrund der Allgemeingültigkeit des konzeptionellen Ansatzes der zweiten Stufe zur flächenhaften Orientierungsbestimmung sind weitere Anwendungen möglich. Durch die experimentellen Untersuchungen wurde deutlich, dass sich abhängig von der Oberflächentopographie Helligkeitsbilder einzelner Kamerastandpunkte simultan zu einem 3D-Laserscannerdatensatz orientieren lassen. Diese Möglichkeit wird als sinnvoll eingestuft, weil z.B. durch die kurze Aufnahmezeit einer photogrammetrischen Kamera auch Aufnahmestandpunkte von Plattformen gewählt werden können, die instabil sind oder sich bewegen, wie z.B. von einem Hubwagen oder händisch (ohne Stativ). Mit den ergänzenden Helligkeitsbildern lassen sich für einen Datensatz folgende Vorteile erreichen:

- Stabilisierung der Aufnahmekonfiguration

- Verfeinerte Rekonstruktion der Oberflächengeometrie

Die Stabilisierung der Aufnahmekonfiguration von Bildern einer Panoramakamera durch zentralperspektive Helligkeitsbilder wurde z.B. von Schneider und Maas (2005) und die der Aufnahmekonfiguration von 3D-Laserscannerstandpunkten durch zentralperspektive Helligkeitsbilder von Ullrich et al. (2003) durch gemessene Bildpunkte von synthetischen Zielmarken nachgewiesen. In der neuen vorgestellten Methode wird die Verknüpfung durch die natürliche Objektoberfläche direkt erreicht.

Eine höhere Auflösung und Genauigkeit innerhalb der Oberflächenrekonstruktion wird durch Helligkeitsbilder erreicht, die durch eine Kamera mit einer höheren Auflösung bzw. eine Aufnahmekonfiguration, die eine höhere Auflösung am Objekt erzeugt, erfasst werden. Die Genauigkeit und Auflösung des 3D-Laserscanners spielt damit eine untergeordnete Rolle. Der Scanner liefert mit seiner Messgenauigkeit und Auflösung Näherungswerte für die Objektoberfläche, die dann durch die Oberflächenrekonstruktion mit den Helligkeitsbildern verfeinert wird. Betrachtet man diese Eigenschaft zudem von der wirtschaftlichen Seite, wäre es denkbar, bewusst ein sehr günstiges 3D-Messsystem und damit oftmals auch ein ungenaues System für die Erfassung der Entfernungsbilder zu nutzen, um anschließend bei Bedarf die Oberflächengeometrie entsprechend hochgenau zu rekonstruieren. Weiter wird durch die simultane Verwendung von Bilddaten unterschiedlicher Messsysteme neben der möglichen Genauigkeitssteigerung eine unabhängige Kontrolle für die Oberflächenerfassung erreicht. Die unabhängige Kontrolle wird für viele Messaufgaben gefordert und kann mit diesem Ansatz durch die Ausgleichung simultan durchgeführt werden.

Weitere Automatisierung des zweistufigen Verfahrens in der Praxis

Betrachtet man das zweistufige Verfahren im Gesamten, wird deutlich, dass in der ersten Stufe keinerlei Interaktion notwendig ist und in der zweiten Stufe Oberflächenausschnitte und Näherungswerte für die Orientierungsparameter vorzugeben sind. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt, wie die Näherungswerte für die Orientierungsparameter direkt von der ersten Stufe verwendet werden können. Die Oberflächenausschnitte wurden in diesen Auswertungen aber manuell definiert und vorgegeben. Dies lässt sich noch weiter automatisieren. Die Kriterien für die Wahl eines Oberflächenbereiches sind identisch mit

denen für die Merkmalspunkte in Stufe 1. Es wäre also denkbar, dass an jeder Oberflächenposition der *konsistenten Korrespondenzen* aus Stufe 1 ein Oberflächenausschnitt definiert wird. Der Oberflächenbereich weist in Abhängigkeit der definierten Schwellwerte der Planarität und der Oberflächentopographie wenig Verdeckungen auf und stellt aufgrund des einzuhaltenden Betrachtungswinkels sicher, dass dieser Bereich Textur in den Helligkeits- und Intensitätsbildern enthält.

Literaturverzeichnis

[Ackermann 1983] Ackermann, F.: High precision digital image correlation. In: *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie* (1983), Nr. 9, S. 231–243

[Ackermann 1984] Ackermann, F.: Digital image correlation: performance and potential application in photogrammetry. In: *The Photogrammetric Record* 11 (1984), Nr. 64, S. 429–439

[Akca 2005] Akca, D.: Registration of point clouds using range and intensity information. In: Grün, A. ; Van Gool, L. ; Pateraki, M. ; Baltsavias, M.(Hrsg.) : *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, May 22–27.* Leiden : Taylor & Francis/Balkema, 2005, S. 115–126

[Al-Manasir und Fraser 2006] Al-Manasir, K. ; Fraser, C. S.: Registration of terrestrial laser scanner data using imagery. In: *Photogrammetric Record* 21 (2006), Nr. 115, S. 1–14

[Barnard und Fischler 1982] Barnard, S. ; Fischler, M. A.: Computational Stereo. In: *ACM Computing Surveys* 14 (1982), Nr. 4, S. 553–571

[Bay 2006] Bay, T. H.: SURF: Speeded Up Robust Features. In: Leonardis, A. ; Bischof, H. ; Pinz, A.(Hrsg.) : *Proc. of the 9th European Conference on Computer Vision (ECCV)* Bd. 1. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2006, S. 404–417

[Becker et al. 2004] Becker, R. ; Benning, W. ; Effkemann, C.: 3D-Monoplotting - Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 129 (2004), Nr. 5, S. 347–355

[Besl und McKay 1992] Besl, P. J. ; McKay, N. D.: A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence* 14 (1992), Nr. 2, S. 239–256

[Böhler und Marbs 2004] Böhler, W. ; Marbs, A.: 3D Scanning and Photogrammetry for heritage recording: A comparison. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics.* Gävle, Schweden, 2004, S. 291–298

[Boochs 1984] Boochs, F.: *Ein Verfahren zur Herstellung digitaler Höhenmodelle aus photogrammetrischen Stereomodellen mit Hilfe der flächenhaften Korrelation in digitalen Bildern.* München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 299, 1984

[Brenner und Dold 2007] Brenner, C. ; Dold, C.: Automatic Relative Orientation of Terrestrial Laser Scans using planar structures and angle constraints. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007.* Espoo, Finland, 2007, S. 84–89

[Brown 1992] Brown, L. G.: A survey of image registration techniques. In: *ACM Computing Surveys* 24 (1992), Nr. 4, S. 325–376

[Brusco et al. 2005] Brusco, N. ; Andreettoo, M. ; Giorgi, A. ; Cortelazzo, G. M.: 3D registration by textured spin-images. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM05).* Ottawa, Ontario, Canada, 2005, S. 262–269

[Chen und Medioni 1992] Chen, Y. ; Medioni, G.: Object modeling by registration of multiple range images. In: *Image and Vision Computing* 10 (1992), Nr. 3, S. 145–155

[Claus 1983] Claus, M.: *Korrelationsrechnung in Stereobildpaaren zur automatischen Gewinnung von digitalen Geländemodellen.* München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 283, 1983

[Dhond und Aggarwal 1989] Dhond, U. R. ; Aggarwal, J. K.: Structure from Stereo - A Review. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 19 (1989), Nr. 6, S. 1489–1510

[Ding et al. 2006] Ding, M. ; Li, L. ; Zhou, C. ; Cai, C.: A Multi-sensor image registration method based on Harris Corner Matching. In: Zha, H. et a. : *Interactive Technologies and Sociotechnical Systems, Proc. of the 12th International Conference, VSMM 2006* Bd. 1. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2006, S. 174–183

[Dold 2005] Dold, C.: Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data. In: Vosselman, G. ; Brenner, C.(Hrsg.) : *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005, Enschede, the Netherlands, September 12-14.* 2005

[Dreschler 1981] Dreschler, L.: *Ermittlung markanter Punkte auf den Bildern bewegter Objekte und Berechnung einer 3D-Beschreibung auf dieser Grundlage.* Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1981

[Ebner et al. 1987] Ebner, H. ; Fritsch, D. ; Gillessen, W. ; Heipke, C.: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. In: *BuL* 55 (1987), Nr. 5, S. 194–203

[Ebner und Strunz 1988] Ebner, H. ; Strunz, G: Combined point determination using Digital Terrain Models as control information. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 27 (1988), Nr. B11/3, S. 578–587

[Feldmar et al. 1994] Feldmar, J. ; Ayache, N. ; Betting, F.: 3D-2D Projective Registration of Free-Form Curves and Surfaces. In: *Technical Report INRIA Epidaure 2434, December 1994* (1994), S. 47

[Fischler und Bolles 1981] Fischler, M. ; Bolles, R.: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communication ACM* 24 (1981), Nr. 6, S. 381–395

[Förstner 1979] Förstner, W.: Ein Verfahren zur Schätzung von Varianz- und Kovarianzkomponenten. In: *AVN* 11-12 (1979), S. 446–453

[Förstner 1982] Förstner, W.: On the geometric precision of digital correlation. In: *International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing* 24 (1982), Nr. 3, S. 176–189

[Förstner 1985] Förstner, W.: Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder. In: *Vorträge der 40. Photogrammetrische Woche an der Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart* (1985), S. 69–90

[Förstner 1986] Förstner, W.: A feature based correspondence algorithm for image matching. In: *International Archives of Photogrammetry, Rovaniemi* 26-B3/3 (1986), S. 13–19

[Förstner 1991] Förstner, W.: *Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung.* München : Habilitation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 370, 1991

[Gelfand et al. 2005] Gelfand, N. ; Mitra, N. J. ; Guibas, L. J. ; Pottmann, H.: Robust Global Registration. In: Desbrun, M. ; Pottmann, H.(Hrsg.) : *Eurographics Symposium on Geometry Processing.* 2005, S. 197–206

[Godin et al. 2001] Godin, G. ; Laurendau, D. ; Bergevin, R.: A method for the registration of attributed range images. In: *International Conference on 3D Imaging and Modeling.* Quebec, 2001, S. 179–186

[Gonzales und Woods 1992] Gonzales, R. C. ; Woods, R.: *Digital Image Processing.* 2. Addison-Wesley, 1992

[Grejner-Brzezinska 2001] Grejner-Brzezinska, D. A.: Direct Sensor Orientation in Airborne and Land-based Mapping Applications. In: *Report No. 461, Geodetic GeoInformation Science, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, United States* (2001), S. 52

[Grimson 1981] Grimson, W.: *From Images to Surfaces - A computational Study of Human Early Visual System.* Cambridge, London : MIT Press, 1981

[Grün 1985] Grün, A.: Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. In: *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* 14 (1985), Nr. 2, S. 175–187

[Grün und Akca 2006] Grün, A. ; Akca, D.: Least squares 3D surface and curve matching. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59 (2006), Nr. 3, S. 151–174

[Haala 2005] Haala, N.: *Multi-Sensor-Photogrammetrie - Vision oder Wirklichkeit?* München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 589, 2005

[Haala und Alshawabkeh 2006] Haala, N. ; Alshawabkeh, Y.: Combining Laser Scanning and Photogrammetry - A Hybrid Approach for Heritage Documentation. In: *Eurographics Symposium Proceedings, The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST2006*, 2006, S. 163–170

[Hahn und Pross 1992] Hahn, M. ; Pross, E.: Bildzuordnung nach dem Variationsprinzip - ein Vergleich mit Kleinste-Quadrate-Verfahren. In: *ZPF, 4/1992* (1992), S. 116–123

[Harris und Stephens 1988] Harris, C. ; Stephens, M.: A combined corner and edge detector. In: *Proc. 4th Alvey Vision Conference*, 1988, S. 147–151

[Harston 1991] Harston, C.: Pattern Identification with a computerized neural network system. In: *IEEE Proceedings of SouthEastConference* 2 (1991)

[Hartley und Zissermann 2003] Hartley, R. ; Zissermann, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2003

[Häusler und Ettl 2004] Häusler, G. ; Ettl, P.: Über die kluge Auswahl und Anwendung optischer 3D-Sensoren. In: *Photonik* (2004), Nr. 5, S. 58–61

[Heipke 1990] Heipke, C.: *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 366, 1990

[Heipke 1997] Heipke, C.: Automation of interior, relative, and absolute orientation. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 52 (1997), S. 1–19

[Heipke et al. 2005] Heipke, C. ; Albertz, J. ; Attwenger, M. ; Buchroithner, M. ; Dorninger, P. ; Dorrer, E. ; Gehrke, S. ; Gwinner, K. ; Lehmann, H. ; Mayer, H. ; Ostrovskiy, A. ; Pacher, G. ; Rentsch, M. ; Schmidt, R. ; Scholten, F. ; Spiegel, M. ; Stilla, U. ; Neukum, G: HRSC auf Mars Express - Photogrammetrische und kartographische Auswertungen. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 6 (2005), S. 379–386

[Helava 1988] Helava, U. V.: Object-Space Least-Squares Correlation. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54 (1988), Nr. 6, S. 711–714

[Hemmleb 2002] Hemmleb, M.: *Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten*. Berlin : Dissertation, Technische Universität Berlin, 2002

[Horn 1984] Horn, B. K. P.: Extended Gaussian Images. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 72, 1984, S. 1671–1686

[Horn 1987] Horn, B. K. P.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: *Journal of the Optical Society of America* 4 (1987), Nr. 4, S. 629–642

[Horn und Schunck 1981] Horn, B. K. P. ; Schunck, B. G.: Determining Optical Flow. In: *Artificial Intelligence* 16 (1981), Nr. 1–3, S. 185–203

[Johnson und Kang 1997] Johnson, A. ; Kang, S.: Registration and Integration of Textured 3-D Data. In: *International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*. 1997, S. 234–241

[Johnson und Hebert 1998] Johnson, A.E. ; Hebert, M.: Surface matching for object recognition in complex three-dimensional scenes. In: *Image and Vision Computing* 16 (1998), Nr. 9–10, S. 635–651

[Johnson und Hebert 1999] Johnson, A.E. ; Hebert, M.: Using Spin Images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. In: *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (1999), Nr. 5, S. 433–449

[Kahlmann und Ingensand 2007] Kahlmann, T. ; Ingensand, H.: Range Imaging. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 132 (2007), Nr. 2, S. 87–96

[Kempa 1995] Kempa, M.: *Hochaufgelöste Oberflächenbestimmung von Natursteinen und Orientierung von Bildern mit dem Facetten-Stereosehen*. Darmstadt : Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1995

[Kern 2003] Kern, F.: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Braunschweig : Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, 2003

[Kersten et al. 2006] Kersten, T. ; Przybilla, H.-J. ; Lindstaedt, M.: Integration, Fusion und Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und digitalen Bildern. In: *Workshop: Anforderungen an geometrischen Fusionsverfahren, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und Humboldt-Universität zu Berlin, 20. November 2006* (2006)

[Klette et al. 1996] Klette, R. ; Koschan, A. ; Schlüns, K.: *Computer Vision - Räumliche Informationen aus digitalen Bildern.* Braunschweig, Wiesbaden : Verlag Vieweg Technik, 1996

[Koch 1997] Koch, K.: *Parametschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen.* 3. Auflage. Bonn : Ferd. Dümmlers Verlag, 1997

[Kraus 1996] Kraus, K.: *Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen.* Bonn : Ferd. Dümmlers Verlag, 1996

[Litke et al. 2005] Litke, N. ; Droske, M. ; Rumpf, M. ; Schröder, P.: An Image Processing Approach to Surface Matching. In: Desbrun, M. ; Pottmann, H. : *Eurographics Symposium on Geometry Processing (2005).* 2005, S. 1–10

[Lowe 2004] Lowe, D. G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), Nr. 2, S. 91–110

[Lucas und Kanade 1981] Lucas, B.D. ; Kanade, T.: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)* (1981), S. 674–679

[Luhmann 2003] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlage, Methoden und Anwendungen.* 2. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 2003

[Luhmann und Altrogge 1986] Luhmann, T. ; Altrogge, G.: Interest-Operator for image matching. In: *Proceedings of the Symposium: From Analytical to digital, ISPRS Vol. 26 - 3/2, Rovaniemi, Finnland*, 1986, S. 459–474

[Makadia et al. 2006] Makadia, A. ; Patterson IV, A. ; Daniilidis, K.: Fully Automatic Registration of 3D Point clouds. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, 2006, S. 1297–1304

[Marr und Poggio 1979] Marr, D. ; Poggio, T.: A Computational Theory of Human Stereo Vision. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 204 (1979), Nr. 1156, S. 301–328

[McGlone 2004] McGlone, J. C. (Ed.). : *Manual of Photogrammetry.* 5. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004

[Michaelsen et al. 2006] Michaelsen, E. ; Hansen, W. von ; Kirchhof, M. ; Meidow, J. ; Stilla, U.: Estimating the Essential Matrix: GOODSAC versus RANSAC. In: *Proceedings of the ISPRS conference 'Photogrammetric Computer Vision', Vol. XXXVI-3.* Bonn, Germany, 2006

[Michaelsen und Stilla 2003] Michaelsen, E. ; Stilla, U.: Good Sample Consensus estimation of 2D-homographies for vehicle movement detection from thermal videos. In: Ebner, H. ; Heipke, C. ; Mayer, H. ; Pakzad, K.(Hrsg.) : *Proceedings of the ISPRS conference 'Photogrammetric Image Analysis', Vol. XXXIV 3/W8.* Munich, Germany, 2003, S. 125–130

[Moravec 1977] Moravec, H. P.: Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance. In: *Proc. of 5th International Joint Conference of Artificial Intelligence. MIT, Cambridge, MA, August 1977* (1977), S. 584

[Neugebauer 1997] Neugebauer, P. J.: Reconstruction of real-world objects via simultaneous registration and robust combination of multiple range images. In: *International Journal of Shape Modeling* 3 (1997), Nr. 1&2, S. 71–90

[Neugebauer 2001] Neugebauer, P. J.: *3D-Digitalisierung und Rekonstruktion realer Objekte unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie.* Aachen : Dissertation, Shaker Verlag, 2001

[Nicodemus et al. 1977] Nicodemus, F. E. ; Richmond, J. ; Hsia, J. J. ; Ginsberg, I. ; Limperis, T.: Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. In: *National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Washington, DC* (1977), S. 67

[Niemeier 2002] Niemeier, Wolfgang: *Ausgleichungsrechnung - eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens.* Berlin : Walter de Gruyter, 2002

[Norvelle 1992] Norvelle, F. R.: Stereo Correlation: Window Shaping and DEM Corrections. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (1992), Nr. 1, S. 111–115

[Ohno 2000] Ohno, Y.: CIE Fundamentals for Color Measurements. In: *IS&T NIP16 International Conference on Digital Printing Technologies, Oct. 15-20, Vancouver, Canada*, 2000, S. 540–545

[Parian und Grün 2004] Parian, J. A. ; Grün, A.: An Advanced Sensor Model for Panoramic Cameras. In: *The XXth ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, July 2004, Vol. XXXV (B5)*, 2004, S. 24–29

[Potmesil 1983] Potmesil, M.: Generating models of solid objects by matching 3D surface segments. In: *Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence* (1983), S. 1089–1093

[Press et al. 1992] Press, W. ; Teukolsky, S. ; Vetterling, W. ; Flannery, B.: *Numerical Recipes in C - The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992

[Pulli 1997] Pulli, K.: *Surface Reconstruction and Display from Range and Color Data*. Washington, University of Washington, Dissertation, 1997

[RIEGL 2007] RIEGL: *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, LMS-Z420i Produktspezifikationen, www.riegl.com*. 2007

[Rietdorf 2005] Rietdorf, A.: *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 582, 2005

[Ritter et al. 2005] Ritter, H. ; Martinetz, T. ; Schulten, K.: *Neuronale Netze - Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke*. Bonn, München, Reading : Addison-Wesley, 2005

[Rosenholm und Torlegard 1988] Rosenholm, D. ; Torlegard, K.: Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 54 (1988), Nr. 10, S. 1385–1389

[Runne et al. 2001] Runne, H. ; Niemeier, W. ; Kern, F.: Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings. In: Grün, A. ; Kahmen, H.(Hrsg.) : *Optical 3D Measurement Techniques V*, 2001, S. 41–48

[Rusinkiewicz und Levoy 2001] Rusinkiewicz, S. ; Levoy, M.: Efficient variants of the ICP algorithm. In: *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, 2001, S. 145–152

[Schaepman-Strub et al. 2006] Schaepman-Strub, G. ; Schaepman, M. ; Painter, T. ; Dangel, S. ; Martonchik, J.: Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. In: *Remote Sensing of Environment* (2006), Nr. 103, S. 27–42

[Schenk 1999] Schenk, T.: *Digital Photogrammetry*. Bd. 1. TerraScience, 1999

[Schenk und Toth 1992] Schenk, T. ; Toth, C. K.: Conceptual Issues of Softcopy Photogrammetric Workstations. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58 (1992), Nr. 1, S. 101–110

[Schlemmer 1996] Schlemmer, H.: *Grundlagen der Sensorik*. Heidelberg : Herbert Wichmann Verlag, 1996

[Schlüter 1999] Schlüter, M.: *Von der $2\frac{1}{2}$D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 506, 1999

[Schneider 1991] Schneider, C.-T.: *Objektgestützte Mehrbildzuordnung*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 375, 1991

[Schneider und Maas 2003] Schneider, D. ; Maas, H.-G.: Geometric Modelling and calibration of a high resolution panoramic camera. In: *Grün, A.; Kahmen, H. (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI. Vol II, Zurich, Switzerland*, 2003, S. 122–129

[Schneider und Maas 2005] Schneider, D. ; Maas, H.-G.: Combinde bundle adjustment of panoramic and central perspective images. In: Reulke, R. ; Knauer, U.(Hrsg.) : *IAPRS, Vol. XXXVI, PART 5/W8, Proceedings of the ISPRS working group V/5 'Panoramic Photogrammetry Workshop', Berlin, Germany, February 24-25, 2005*, 2005

[Schumacher und Böhm 2005] Schumacher, S. ; Böhm, J.: Georeferencing of Terrestrial Laser scanner Data for Applications in Architectural Modeling. In: El-Hakim, S. ; Remondino, F. ; Gonzo, L.(Hrsg.) : *IAPRS, Vol. XXXVI, PART 5/W17, Proceedings of the ISPRS working group V/4 '3D-Arch 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures', Mestre-Venice, Italy, August 22-24, 2005, on CD*, 2005

[Schwarz et al. 1993] Schwarz, K.P. ; Chapman, M. ; Cannon, M.E. ; Gong, P.: An integrated INS/GPS Approach to the Georeferencing of Remotely Sensed Data. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 59 (1993), Nr. 11, S. 1667–1674

[Sharp et al. 1965] Sharp, J.V. ; Christensen, R.L. ; Gilman, W.L. ; Schulman, F.D.: Automatic map compilation using digital techniques. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 31 (1965), Nr. 3, S. 223–239

[Siirtola 2004] Siirtola, H.: Interactive cluster analysis. In: *International Conference on Information Visualisation, IV 2004* (2004), S. 471–476

[Silva et al. 2005] Silva, L. ; Bellon, O. ; Boyer, K. L.: *Machine Perception Artificial Intelligence*. Bd. 60: *Robust Range Image Registration Using Genetic Algorithms and the Surface Interpenetration Measure*. World Scientific, 2005

[Smith und Brady 1997] Smith, S. ; Brady, J.: `SUSAN` - a new approach to low level image processing. In: *International Journal of Computer Vision* 23 (1997), Nr. 1, S. 45–78

[Staiger 2005] Staiger, R.: Terrestrisches Laserscanning - Eine neue Universalmessmethode? Terrestrisches-Laser-Scanning (TLS) - Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. In: *Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21.-22.11.2005 in Fulda, Schriftenreihe des DVW* 48 (2005), S. 3–16

[Stenger 1984] Stenger, F.: Polynomial, sinc and rational function methods for approximating analytic functions. In: Graves-Morris, P.R. ; Saff, E.B. ; Varga, R.S.(Hrsg.) : *Rational Approximation and Interpolation* Bd. 1. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1984, S. 49–72

[Strunz 1993] Strunz, G.: *Bildorientierung und Objektrekonstruktion mit Punkten, Linien und Flächen*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 408, 1993

[Sturm 2002] Sturm, P.: Mixing Catadioptric and Perspective Cameras. In: *Workshop on Omnidirectional Vision, Copenhagen, Denmark*, 2002, S. 37–44

[Talaya et al. 2004] Talaya, J. ; Alams, R. ; Bosch, E. ; Serra, A. ; Kornus, W. ; Baron, W.: Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU Orientation Sensors. In: *IAPRS Vol. 35, on CD*, 2004

[Tardif und Sturm 2005] Tardif, J.-P. ; Sturm, P.: Calibration of Cameras with Radially Symmetric Distortion. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-Classical Cameras, Beijing, China*, 2005, S. 44–51

[Terzopoulos 1988] Terzopoulos, D.: The computation of visible-surface representations. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence* 10 (1988), Nr. 4, S. 417–438

[Toth 1998] Toth, C. K.: Direct platform orientation of multisensor data acquisition systems. In: Fritsch, D. ; Englich, M. ; Seester, M.(Hrsg.) : *GIS between Visions and Applications* Bd. 32. Stuttgart, Germany : IAPRS, 1998, S. 629–634

[Tsay 1996] Tsay, J.: *Wavelets für das Facetten-Stereosehen*. München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 454, 1996

[Ullrich et al. 2003] Ullrich, A. ; Schwarz, R. ; Kager, H.: Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system. In: Grün, A. ; Kahmen, H.(Hrsg.) : *Optical 3-D Measurement Techniques VI* Bd. 1, 2003, S. 298–305

[Vanden Wyngaerd und Van Gool 2002] Vanden Wyngaerd, J. ; Van Gool, L.: Automatic Crude Patch Registration: TowardAutomatic 3D Model Building. In: *Computer Vision and Image Understanding* 87 (2002), Nr. 1-3, S. 8–26

[Vanden Wyngaerd und Van Gool 2003] Vanden Wyngaerd, J. ; Van Gool, L.: Combining texture and shape for coarse patch registration. In: *Proceedings of The 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2003, S. 179–186

[Vosselman 1992] Vosselman, G.: *Relational Matching.* Berlin, Heidelberg : Dissertation, Springer Verlag, 1992

[Wang und Jepson 1994] Wang, Z. ; Jepson, A.: A new closed-form solution for absolute orientation. In: *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, S. 129–134

[Weik 1997] Weik, S.: Registration of 3-D partial surface models using luminance and depth information. In: *NRC '97: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling.* Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1997, S. 93–100

[Weisensee 1988] Weisensee, M.: Models of light reflection for facet stereo vision. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B3*, 1988, S. 360–367

[Weisensee 1992] Weisensee, M.: *Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen.* München : Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 374, 1992

[Wendt 2004] Wendt, A.: On the automation of the registration of point clouds using the metropolis algorithm. In: *ISPRS Congress Comm. III, IntArchPhRS. Band XXXV, Teil B3.* Istanbul, 2004, S. 106–111

[Wendt 2007] Wendt, A.: A concept for feature based data registration by simultaneous consideration of laser scanner data and photogrammetric images. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (2007), Nr. 62, S. 122–134

[Wendt und Dold 2005] Wendt, A. ; Dold, C.: Estimation of interior orientation and eccentricity parameters of a hybrid imaging and laser scanning sensor. In: Reulke, R. ; Knauer, U.(Hrsg.) : *Proceedings of the ISPRS working group V/5 'Panoramic Photogrammetry Workshop'* Bd. XXXVI, 5/W8. Berlin, Germany : IAPRS, 2005

[Wendt und Heipke 2005] Wendt, A. ; Heipke, C.: A concept for the simultaneous orientation of brightness and range images. In: Grün, A. ; Van Gool, L. ; Pateraki, M. ; Baltsavias, M.(Hrsg.) : *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, May 22–27.* Leiden : Taylor & Francis/Balkema, 2005, S. 451–457

[Wendt und Heipke 2006] Wendt, A. ; Heipke, C.: Simultaneous Orientation of brightness, range and intensity images. In: Maas, H.-G. ; Schneider, D.(Hrsg.) : *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', September 25-27, 2006, Dresden, Germany, Volume XXXVI, Part 5*, 2006, S. 315–322

[Wendt und Heipke 2007] Wendt, A. ; Heipke, C.: Area-based orientation of brightness, range and intensity images. In: *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* (2007), Nr. 3, S. 187–195

[Wendt und Weisensee 2003] Wendt, A. ; Weisensee, M.: Registrierung und Integrierung von Punktwolken. In: Luhmann, T.(Hrsg.) : *Photogrammetrie- Laserscanning - Optische 3D Messtechnik, 2. Oldenburger 3D-Tage.* Karlsruhe : Wichman Verlag, 2003, S. 133–142

[Wiesel 1985] Wiesel, J.: Herstellung digitaler Orthophotos. In: Bähr, H.(Hrsg.) : *Digitale Bildverarbeitung - Anwendungen in Photogrammetrie und Bildverarbeitung.* Karlsruhe : Wichman Verlag, 1985, S. 73–96

[Williams et al. 1999] Williams, J.A. ; Bennamoun, M. ; Latham, S.: Multiple view 3D registration: A review and a new technique. Tokyo : IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 1999, S. 497–502

[Wrobel 1987a] Wrobel, B.: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. In: *BuL* 55 (1987), Nr. 3, S. 93–101

[Wrobel 1987b] Wrobel, B.: Facets stereo vision (FAST Vision) - A new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. In: *Fast Processing of Photogrammetric Data. ISPRS Intercommision conference*, 1987, S. 231–258

[Zhang 1994] Zhang, Z.: Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. In: *International Journal of Computer Vision* 13 (1994), Nr. 2, S. 119–152

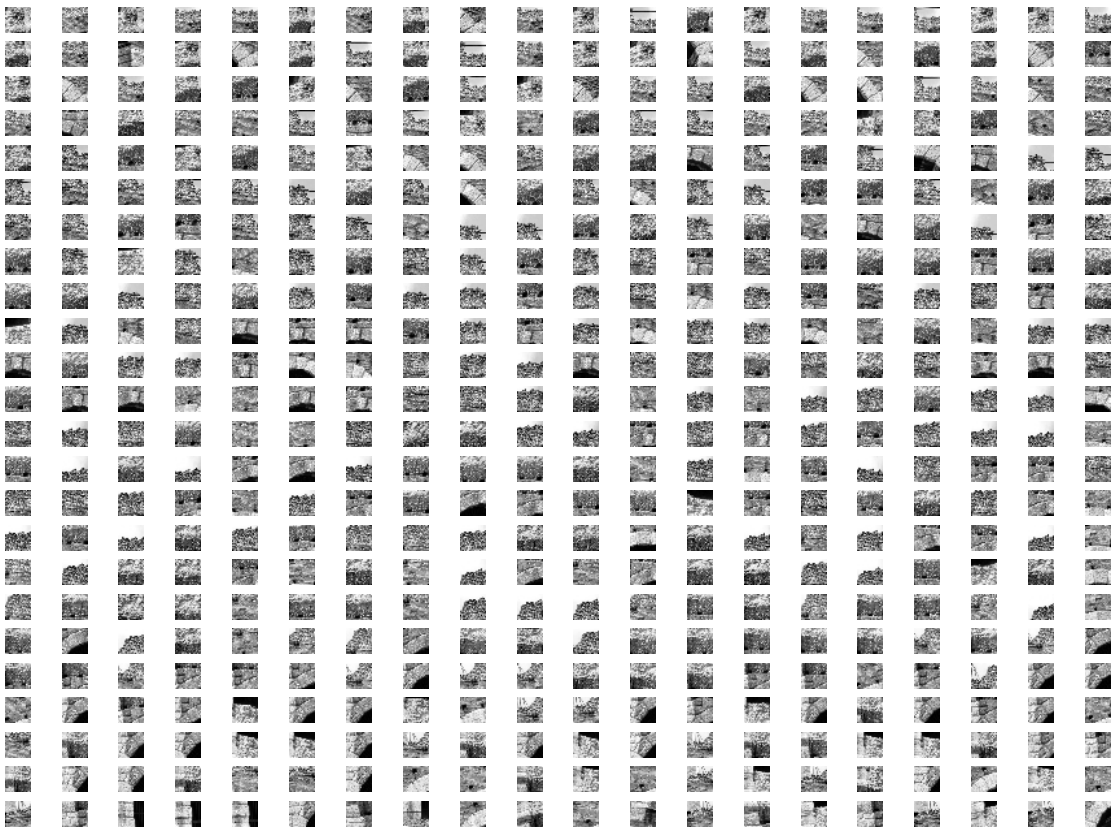
[Zitova und Flusser 2003] Zitova, B. ; Flusser, J.: Image registration methods: A survey. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003), S. 977–1000

A Ergebnisdarstellungen

A.1 Merkmalsbasierte Orientierungsbestimmung

Die Merkmalsbeschreibungen der *akzeptierten Merkmalspunkte* sind exemplarisch für den Aufnahmestandpunkt 2 des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* (s. Abbildung A.1) und für Aufnahmestandpunkt 2 des Datensatzes *Verona Theater* (s. Abbildung A.2) aufgezeigt. Die Merkmalsbeschreibungen entsprechen Bildausschnitten, die auf die Tangentialebene der Objektoberfläche entzerrt wurden.

Tabelle A.1: Merkmalsbeschreibungen des Aufnahmestandpunktes 2 des Datensatzes Dresdner Frauenkirche



Fortsetzung auf der nächsten Seite...

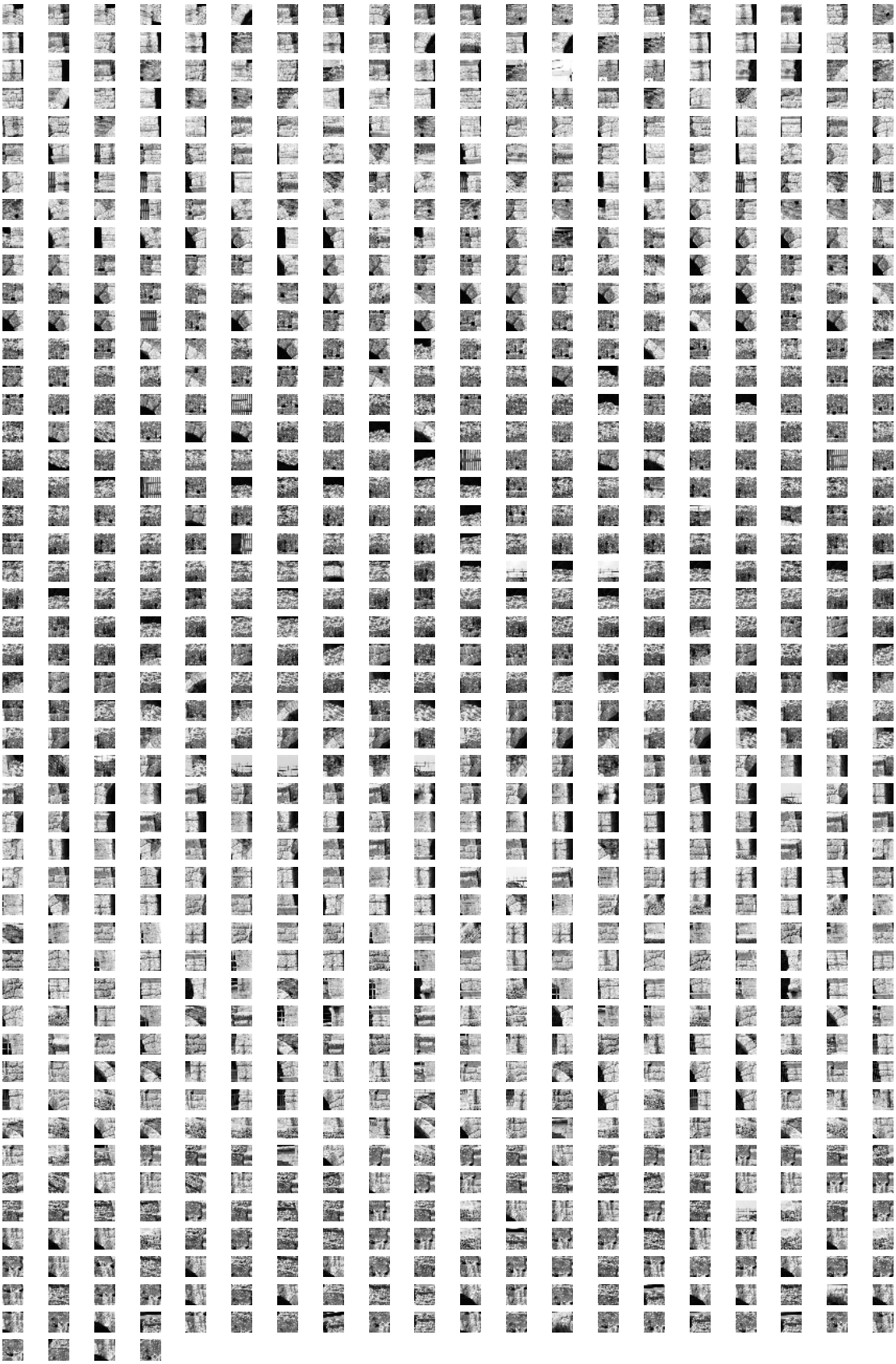


Tabelle A.2: Merkmalsbeschreibungen des Aufnahmestandpunktes 2 des Datensatzes Verona Theater

Die Anzahl und die Verteilung der *initialen* und *akzeptierten Merkmalspunkte* ist im Folgenden in den Helligkeitsbildern des Datensatz *Dresdner Frauenkirche* und *Verona Theater* durch die in Rot hervorgehobe-

nen Punkte dargestellt. Die *initialen Merkmalspunkte* sind durch den SUSAN-Operator extrahiert worden. Bei Betrachtung der *akzeptierten Merkmalspunkte* bzw. den verworfenen *initialen Merkmalspunkten* wird insbesondere das geometrische Kriterium des maximalen Betrachtungswinkels deutlich. Durch den Schwellwert für den maximalen Betrachtungswinkel von 60° werden vollständige Oberflächenbereiche ausgeschlossen, wie z.B. durch die verworfenen Merkmalspunkte auf dem Marktplatz vor der *Dresdner Frauenkirche* deutlich wird (s. Abbildung A.1). Auch werden Merkmalspunkte verworfen, die im Bereich der Fenster liegen, da die Entfernungsdaten in diesem Bereich aufgrund der transparenten Oberflächeneigenschaften unzuverlässig sind.

(a) (b)

Abbildung A.1: Aufnahmestandpunkt 1 des Datensatzes Dresdner Frauenkirche. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

(a) (b)

Abbildung A.2: Aufnahmestandpunkt 2 des Datensatzes Dresdner Frauenkirche. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

(a) (b)

Abbildung A.3: Aufnahmestandpunkt 3 des Datensatzes Dresdner Frauenkirche. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

(a) (b)

Abbildung A.4: Aufnahmestandpunkt 1 des Datensatzes Verona Theater. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

(a) (b)

Abbildung A.5: Aufnahmestandpunkt 2 des Datensatzes Verona Theater. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

(a) (b)

Abbildung A.6: Aufnahmestandpunkt 3 des Datensatzes Verona Theater. (a) Initiale Merkmalspunkte. (b) Akzeptierte Merkmalspunkte.

A.2 Flächenbasierte Orientierungsbestimmung

In diesem Abschnitt sind die einzelnen für die flächenbasierte Orientierungsbestimmung definierten Oberflächenausschnitte dargestellt. Neben der geometrischen Objektoberfläche sind die radiometrischen Objektraummodelle der Helligkeits- und Intensitätswerte aufgezeigt. Die Objektraummodelle sind zur Visualisierung ausschließlich aus den Daten des Aufnahmestandpunktes 2 erzeugt worden, um Glättungseffekte hinsichtlich der approximierten Orientierungsparameter und der Mittelung der Bilddaten zu vermeiden. In Tabelle A.3 sind die Objektraummodelle des Datensatzes *Dresdner Frauenkirche* und in Tabelle A.4 des Datensatzes *Verona Theater* aufgeführt. Die räumliche Verteilung der Oberflächenausschnitte ist in Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 skizziert. Die Z-Werte der geometrischen Objektraummodelle sind für jeden Oberflächenausschnitt individuell skaliert worden. Die untere Ecke eines betrachteten geometrischen Ausschnittes entspricht der linken unteren Ecke der radiometrischen Objektraummodelle.

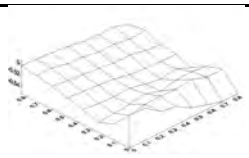
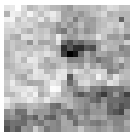
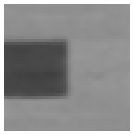
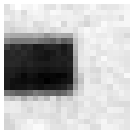
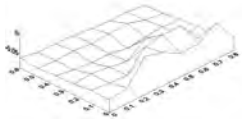
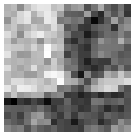
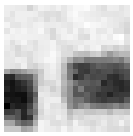
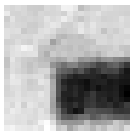
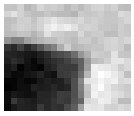
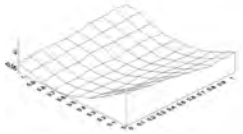
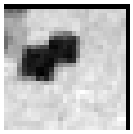
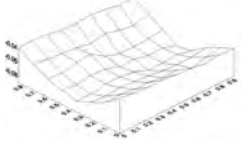
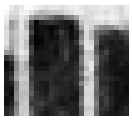
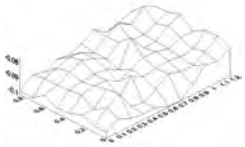
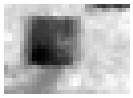
Nr.	3D-Objektoberfläche	Helligkeiten	Intensitäten
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

Tabelle A.3: Verwendete Oberflächenausschnitte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

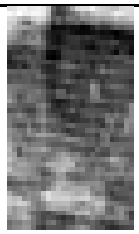
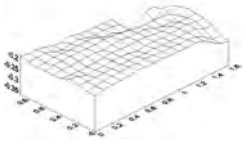
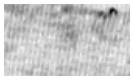
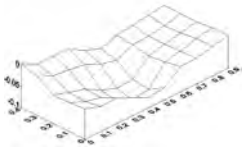
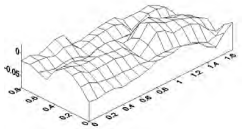
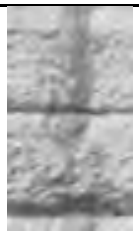
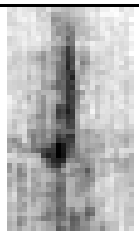
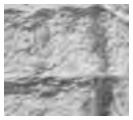
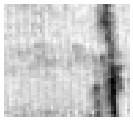
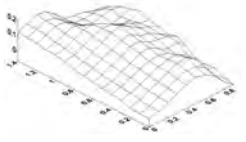
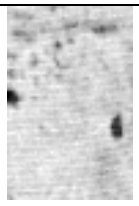
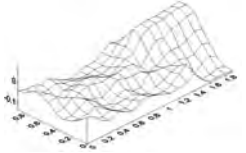
	3D-Objektoberfläche	Helligkeiten	Intensitäten
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Tabelle A.4: Verwendete Oberflächenausschnitte des Datensatzes Verona Theater

In den nächsten Abschnitten sind die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen geschätzten Orientierungsparameter mit den Differenzen zu den Referenzwerten (s. Tabelle 5.2 und 5.3) und ihren Standardabweichungen aufgeführt. Zur weiteren Beurteilung des Konvergenzverhaltens der Ausgleichung sind jeweils die Standardabweichungen der einzelnen Beobachtungsgruppen über die Anzahl der Iterationen und die maximalen Unbekanntenzuschläge über die Anzahl der Iterationen dargestellt. Die Diagramme zum Konvergenzverhalten des Datensatzes *Verona Theater* zeigen jeweils den vollständigen Verlauf der Ausgleichung über die drei Filterstufen. Beim Wechsel zur nächsten geringeren Filterstufe nehmen die Standardabweichungen sprunghaft zu, was sich durch die erhöhten Anteile der zufälligen und systematischen Abweichungen, die aufgrund des gewählten funktionalen Modells in den Bilddaten enthalten sind, begründet ist. Die ungefilterte letzte Stufe weist die vergleichsweise größten Abweichungen auf. Für den Ausgleichungsfall (1) sind zusätzlich die ausgeglichenen Objektraummodellen der einzelnen Oberflächenausschnitte mit den entsprechenden Verbesserungsbildern der einzelnen Bilddatentypen dargestellt. Die Objektraummodelle und Verbesserungsbilder werden nur für einen Fall angegeben, da sie tendenziell nur geringfügige Unterschiede zwischen den einzelnen Ausgleichungsfällen aufweisen. Die Verbesserungsbilder sind individuell in den 8 Bit Grauwertraum skaliert.

A.2.1 Ausgleichungsfall (1)

	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
$t_X[m]$	$12,204$	$-26,865$	$-13,832$	$13,484$
$\Delta t_X[m]$	$-0,008$	$-0,016$	$-0,158$	$-0,063$
$s_{t_X}[m]$	0,62e-004	0,65e-004	0,54e-004	1,60e-004
$t_Y[m]$	$27,535$	$-7,873$	$11,306$	$-18,891$
$\Delta t_Y[m]$	$-0,028$	$-0,029$	$-0,288$	$0,388$
$s_{t_Y}[m]$	1,83e-004	1,63e-004	0,45e-004	1,62e-004
$t_Z[m]$	$-0,182$	$-0,250$	$0,521$	$0,537$
$\Delta t_Z[m]$	$0,030$	$0,068$	$-0,519$	$-0,591$
$s_{t_Z}[m]$	2,23e-004	1,71e-004	0,52e-004	1,77e-004
$\omega[rad]$	$0,045$	$0,014$	$0,043$	$0,008$
$\Delta\omega[rad]$	$0,000$	$0,001$	$0,013$	$-0,004$
$s_\omega[rad]$	0,61e-006	1,29e-006	0,93e-006	2,07e-006
$\phi[rad]$	$-0,021$	$-0,043$	$-0,004$	$0,290$
$\Delta\phi[rad]$	$0,000$	$0,000$	$-0,031$	$-0,029$
$s_\phi[rad]$	2,50e-006	2,87e-006	1,30e-006	2,92e-006
$\kappa[rad]$	$-0,623$	$0,667$	$-0,254$	$0,259$
$\Delta\kappa[rad]$	$0,000$	$0,001$	$-0,002$	$-0,007$
$s_\kappa[rad]$	1,84e-006	2,57e-006	1,45e-006	3,34e-006

Tabelle A.5: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (1)

Helligkeitsbilder

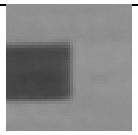
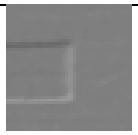
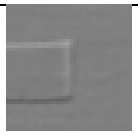
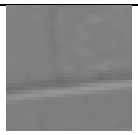
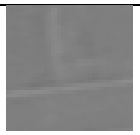
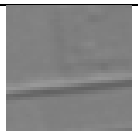
		Verbesserungsbilder		
Nr.	Objektraummodell	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Tabelle A.6: Helligkeitsbildausschnitte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

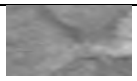
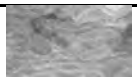
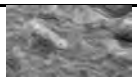
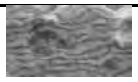
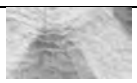
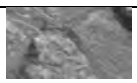
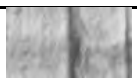
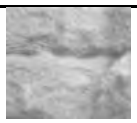
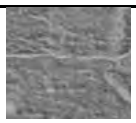
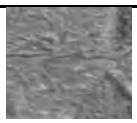
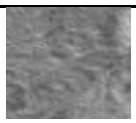
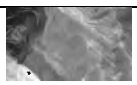
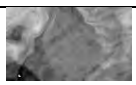
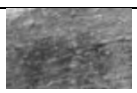
		Verbesserungsbilder		
Nr.	Objektraummodell	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabelle A.7: Helligkeitsbildausschnitte des Datensatzes Verona Theater

Entfernungsbilder

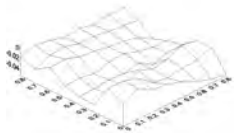
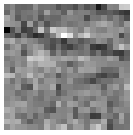
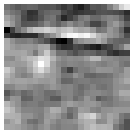
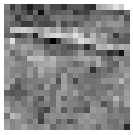
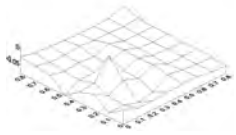
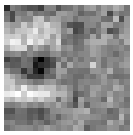
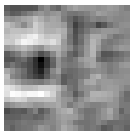
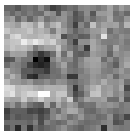
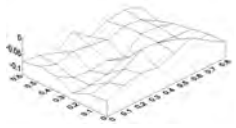
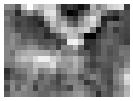
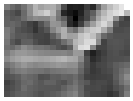
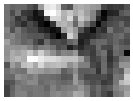
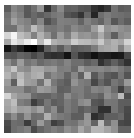
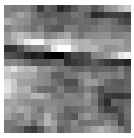
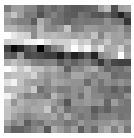
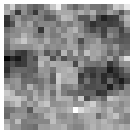
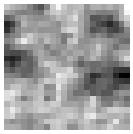
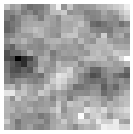
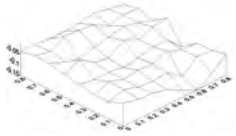
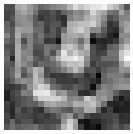
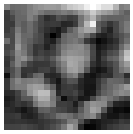
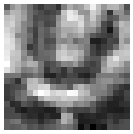
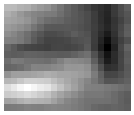
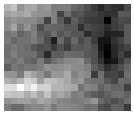
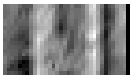
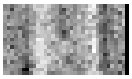
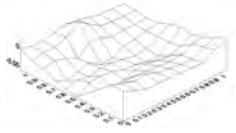
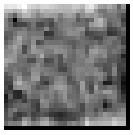
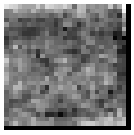
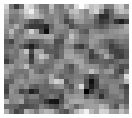
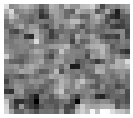
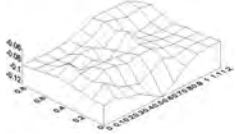
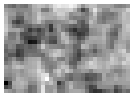
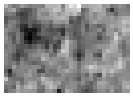
		Verbesserungsbilder		
Nr.	Objektraummodell	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Tabelle A.8: Entfernungsbildausschnitte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

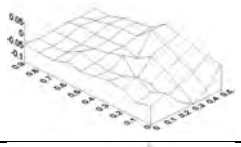
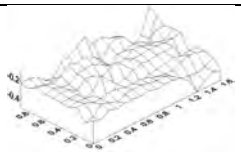
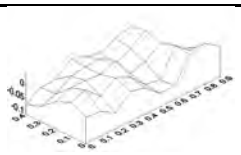
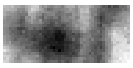
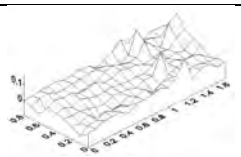
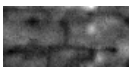
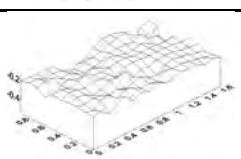
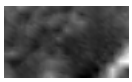
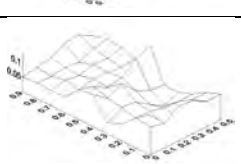
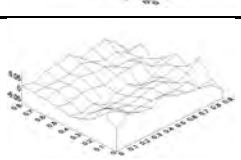
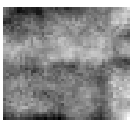
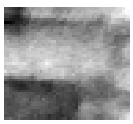
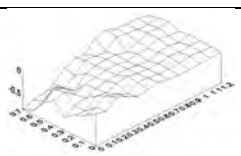
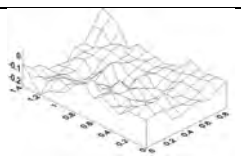
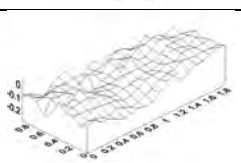
		Verbesserungsbilder		
Nr.	Objektraummodell	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabelle A.9: Entfernungsbildausschnitte des Datensatzes Verona Theater

Intensitätsbilder

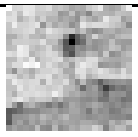
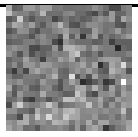
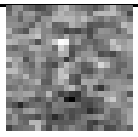
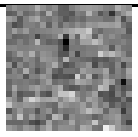
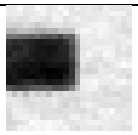
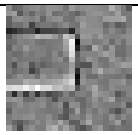
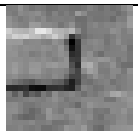
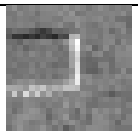
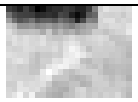
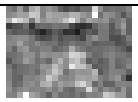
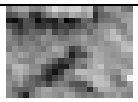
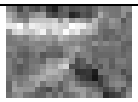
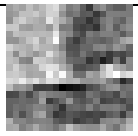
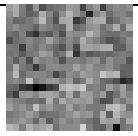
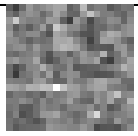
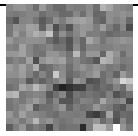
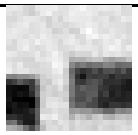
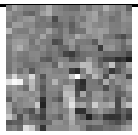
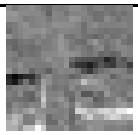
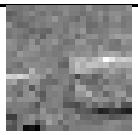
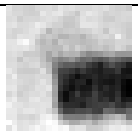
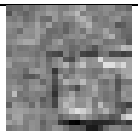
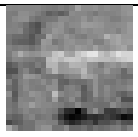
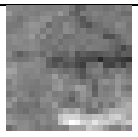
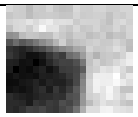
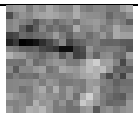
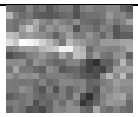
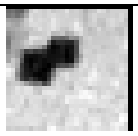
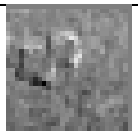
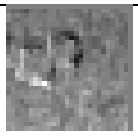
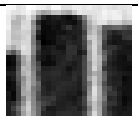
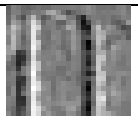
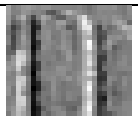
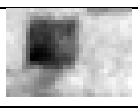
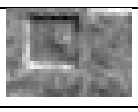
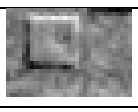
		Verbesserungsbilder		
Nr.	Objektraummodell	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				

Tabelle A.10: Intensitätsbildausschnitte des Datensatzes Dresdner Frauenkirche

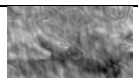
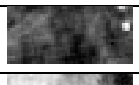
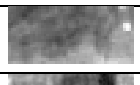
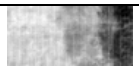
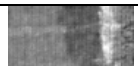
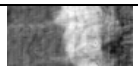
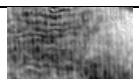
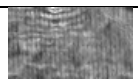
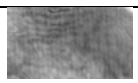
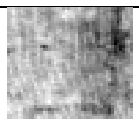
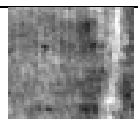
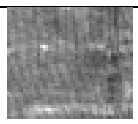
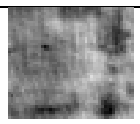
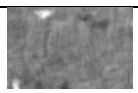
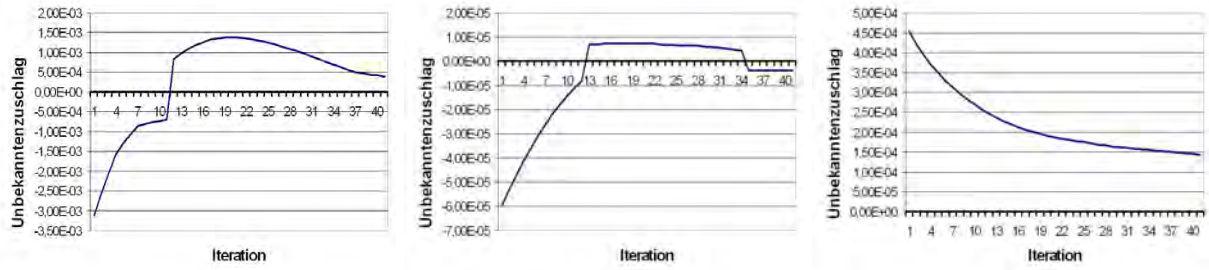
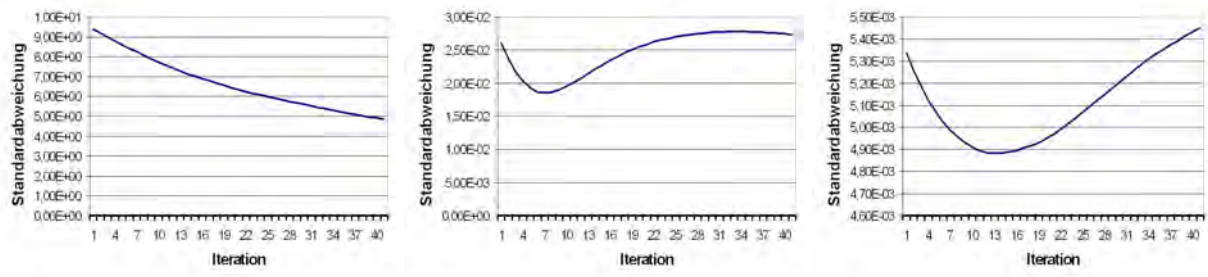
Nr.	Objektraummodell	Verbesserungsbilder		
		Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Tabelle A.11: Intensitätsbildausschnitte des Datensatzes Verona Theater



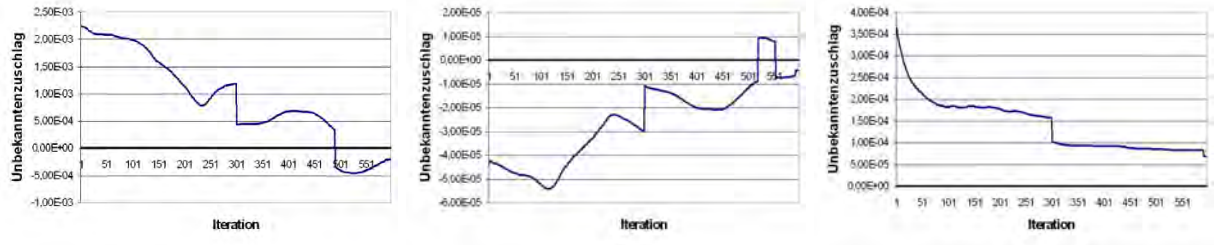
(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.7: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



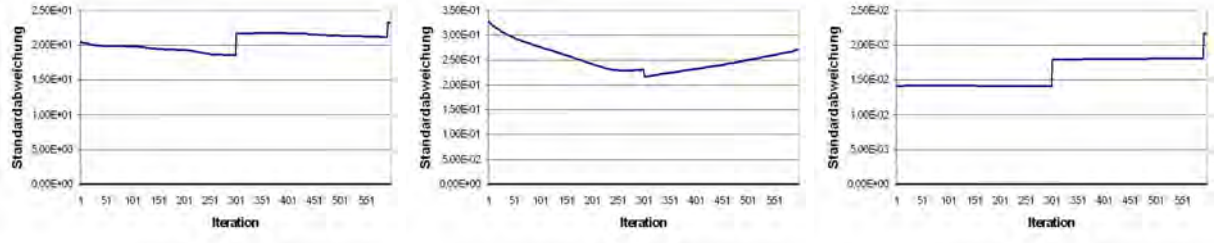
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.8: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.9: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



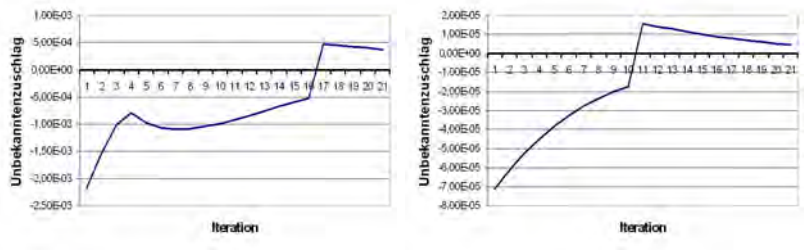
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.10: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

A.2.2 Ausgleichungsfall (2)

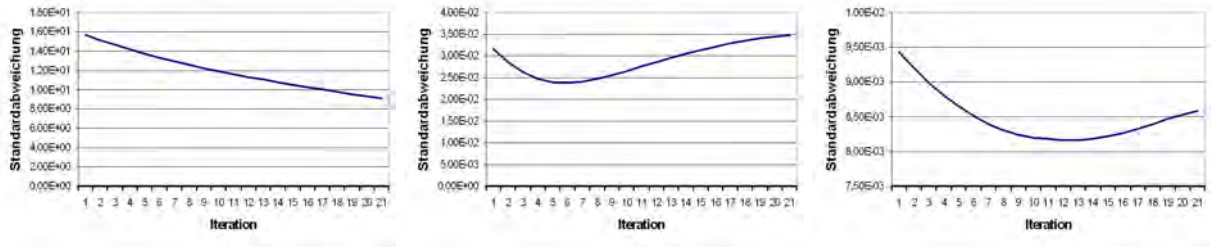
	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
$t_X[m]$	12,206	−26,881	−13,652	13,166
$\Delta t_X[m]$	−0,010	0,000	−0,337	0,254
$s_{t_X}[m]$	1,03e-004	1,10e-004	0,80e-004	2,04e-004
$t_Y[m]$	27,514	−7,874	11,603	−19,033
$\Delta t_Y[m]$	−0,008	−0,028	−0,585	0,530
$s_{t_Y}[m]$	3,07e-004	2,76e-004	0,64e-004	2,12e-004
$t_Z[m]$	−0,174	−0,287	0,378	0,328
$\Delta t_Z[m]$	0,022	0,105	−0,376	−0,381
$s_{t_Z}[m]$	3,76e-004	2,85e-004	0,76e-004	2,43e-004
$\omega[rad]$	0,045	0,015	0,048	0,014
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,000	0,007	−0,010
$s_\omega[rad]$	1,02e-006	2,19e-006	1,34e-006	2,83e-006
$\phi[rad]$	−0,021	−0,044	−0,006	0,276
$\Delta\phi[rad]$	0,000	0,001	−0,029	−0,014
$s_\phi[rad]$	4,20e-006	4,79e-006	1,83e-006	3,94e-006
$\kappa[rad]$	−0,623	0,668	−0,243	0,268
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,000	−0,012	−0,015
$s_\kappa[rad]$	3,08e-006	4,37e-006	2,10e-006	4,29e-006

Tabelle A.12: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (2)



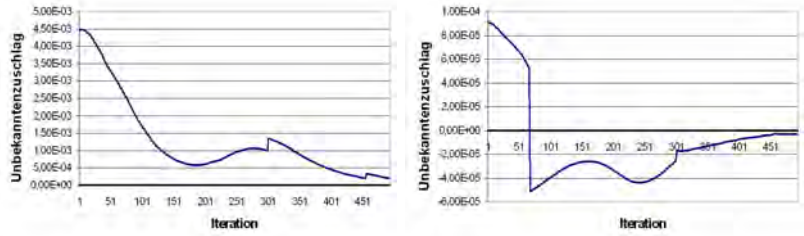
(a) Translationen (b) Rotationen

Abbildung A.11: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



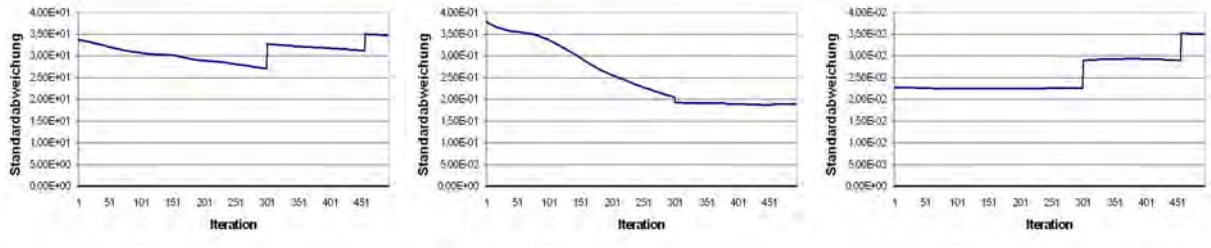
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.12: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen

Abbildung A.13: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.14: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

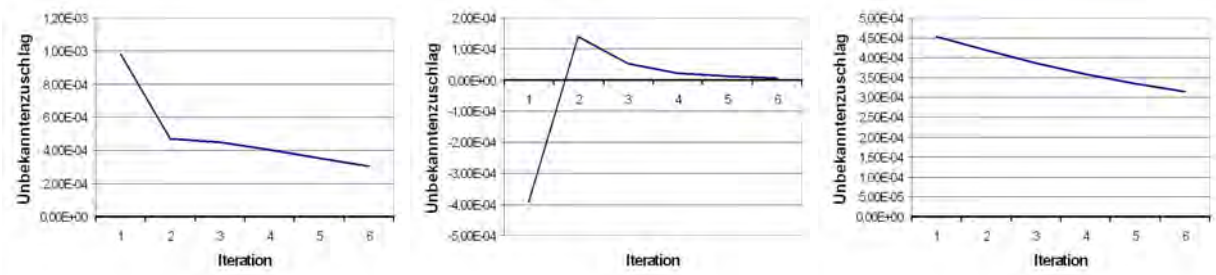
A.2.3 Ausgleichungsfall (3)

	3D-Laserscannerstandpunkte		Kamerastandpunkte		
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$t_X[m]$	12,208	−26,840	12,199	0,000	−26,850
$\Delta t_X[m]$	−0,013	−0,041	−0,003	0,000	−0,031
$s_{t_X}[m]$	1,71e-004	1,35e-004	1,05e-004	0,98e-005	1,25e-004
$t_Y[m]$	27,520	−7,867	27,508	0,015	−7,865
$\Delta t_Y[m]$	−0,013	−0,035	−0,001	−0,015	−0,037
$s_{t_Y}[m]$	3,66e-004	5,44e-004	3,32e-004	1,28e-004	2,39e-004
$t_Z[m]$	−0,162	−0,241	−0,164	0,000	−0,275
$\Delta t_Z[m]$	0,010	0,059	0,012	0,000	0,093
$s_{t_Z}[m]$	7,06e-004	6,20e-004	3,36e-004	1,32e-004	2,73e-004
$\omega[rad]$	0,045	0,013	0,044	0,000	0,015
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001
$s_\omega[rad]$	19,62e-006	36,08e-006	0,89e-006	0,94e-006	1,69e-006
$\phi[rad]$	−0,021	−0,041	−0,021	0,000	−0,042
$\Delta\phi[rad]$	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
$s_\phi[rad]$	13,71e-006	13,17e-006	3,73e-006	1,54e-006	4,57e-006
$\kappa[rad]$	−0,623	0,667	−0,623	0,000	0,668
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
$s_\kappa[rad]$	7,54e-006	11,05e-006	3,34e-006	1,37e-006	3,79e-006

Tabelle A.13: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (3) des Datensatzes Dresdner Fraunenkirche

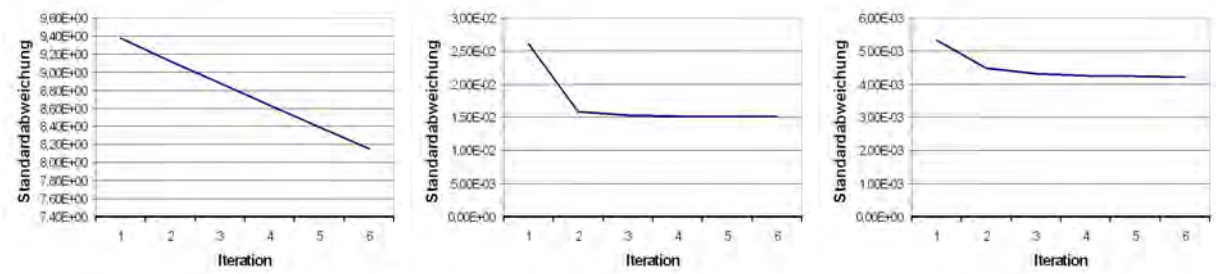
	3D-Laserscannerstandpunkte		Kamerastandpunkte		
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 2	Standpunkt 3
$t_X[m]$	−13,512	13,500	−13,897	−0,001	13,668
$\Delta t_X[m]$	−0,477	−0,079	−0,092	0,001	−0,247
$s_{t_X}[m]$	7,37e-004	11,25e-004	0,51e-004	0,31e-004	1,62e-004
$t_Y[m]$	10,976	−18,492	11,155	0,139	−18,815
$\Delta t_Y[m]$	0,042	−0,010	−0,137	−0,139	0,311
$s_{t_Y}[m]$	8,90e-004	14,22e-004	0,40e-004	0,99e-004	1,44e-004
$t_Z[m]$	−0,100	−0,401	0,302	0,191	−0,234
$\Delta t_Z[m]$	0,102	0,348	−0,300	−0,191	0,181
$s_{t_Z}[m]$	6,21e-004	8,36e-004	0,48e-004	0,59e-004	1,57e-004
$\omega[rad]$	0,054	−0,023	0,046	0,000	0,008
$\Delta\omega[rad]$	0,001	0,027	0,010	0,000	−0,004
$s_\omega[rad]$	35,13e-006	40,41e-006	0,87e-006	0,67e-006	1,78e-006
$\phi[rad]$	−0,028	0,273	−0,019	0,011	0,270
$\Delta\phi[rad]$	−0,007	−0,012	−0,016	−0,011	−0,009
$s_\phi[rad]$	29,98e-006	31,43e-006	1,19e-006	1,63e-006	2,70e-006
$\kappa[rad]$	−0,247	0,251	−0,256	−0,009	0,254
$\Delta\kappa[rad]$	−0,009	0,001	0,000	0,009	−0,001
$s_\kappa[rad]$	30,97e-006	31,45e-006	1,35e-006	2,76e-006	2,95e-006

Tabelle A.14: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (3) des Datensatzes Verona Theater



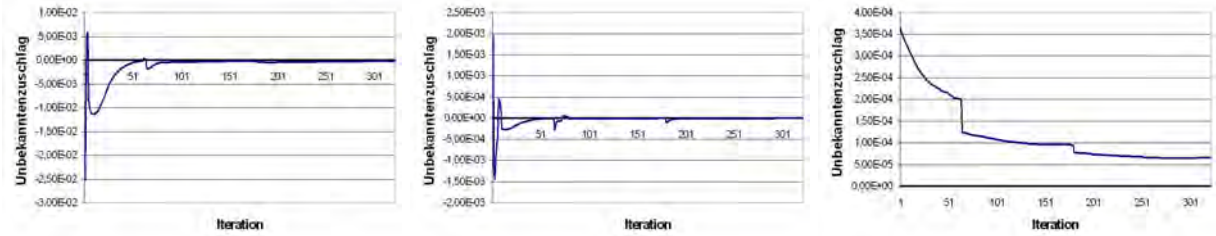
(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.15: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



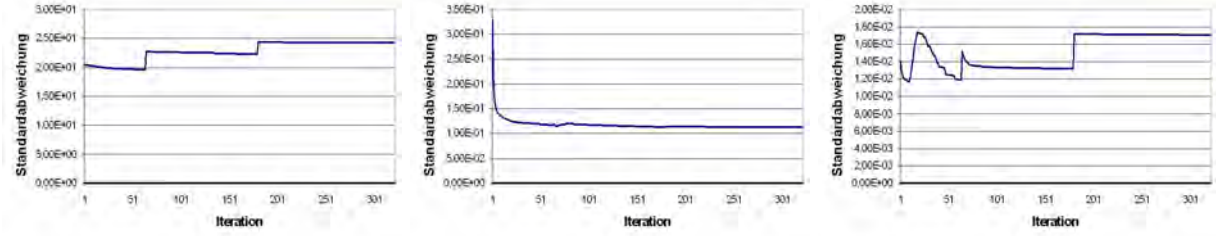
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.16: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.17: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



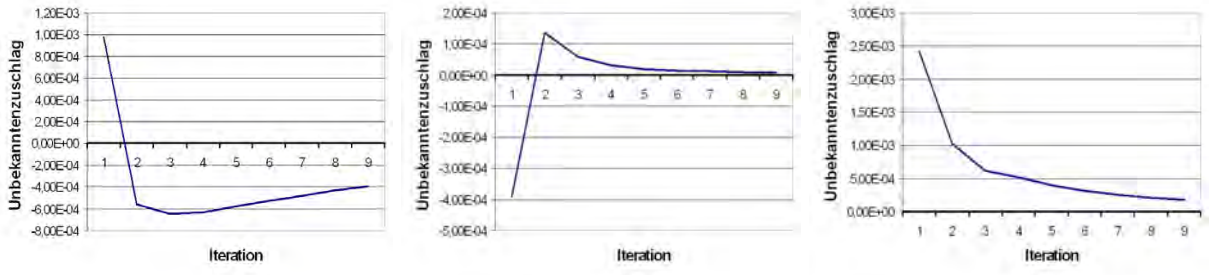
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.18: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

A.2.4 Ausgleichungsfall (4)

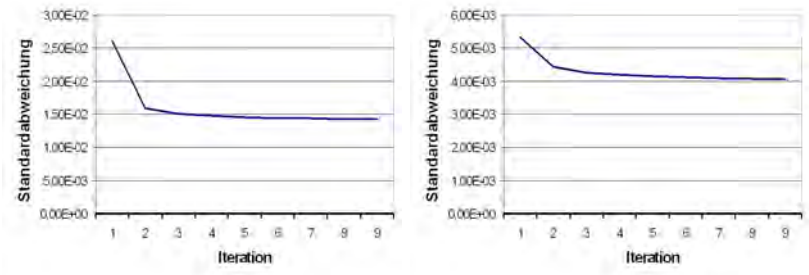
	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
$t_X[m]$	12,207	−26,842	−13,608	13,519
$\Delta t_X[m]$	−0,012	−0,039	−0,381	−0,099
$s_{t_X}[m]$	0,88e-004	0,69e-004	3,54e-004	5,64e-004
$t_Y[m]$	27,521	−7,870	11,017	−18,215
$\Delta t_Y[m]$	−0,014	−0,032	0,000	−0,287
$s_{t_Y}[m]$	1,88e-004	2,79e-004	4,23e-004	7,20e-004
$t_Z[m]$	−0,164	−0,236	−0,150	−0,002
$\Delta t_Z[m]$	0,012	0,054	0,152	−0,050
$s_{t_Z}[m]$	3,63e-004	3,19e-004	3,09e-004	4,14e-004
$\omega[rad]$	0,045	0,013	0,054	−0,004
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,002	0,001	0,008
$s_\omega[rad]$	10,09e-006	18,58e-006	16,74e-006	19,64e-006
$\phi[rad]$	−0,022	−0,041	−0,032	0,273
$\Delta\phi[rad]$	0,001	0,000	−0,003	−0,012
$s_\phi[rad]$	7,03e-006	6,77e-006	13,87e-006	15,41e-006
$\kappa[rad]$	−0,623	0,667	−0,252	0,243
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,001	−0,004	0,009
$s_\kappa[rad]$	3,87e-006	5,68e-006	14,36e-006	15,90e-006

Tabelle A.15: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (4)



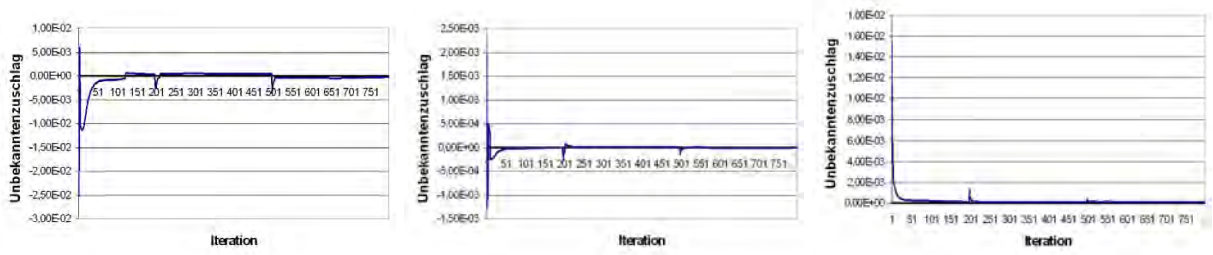
(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.19: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



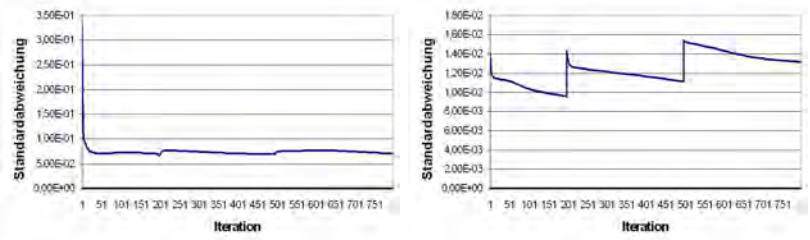
(a) Entfernungen (b) Intensitäten

Abbildung A.20: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.21: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



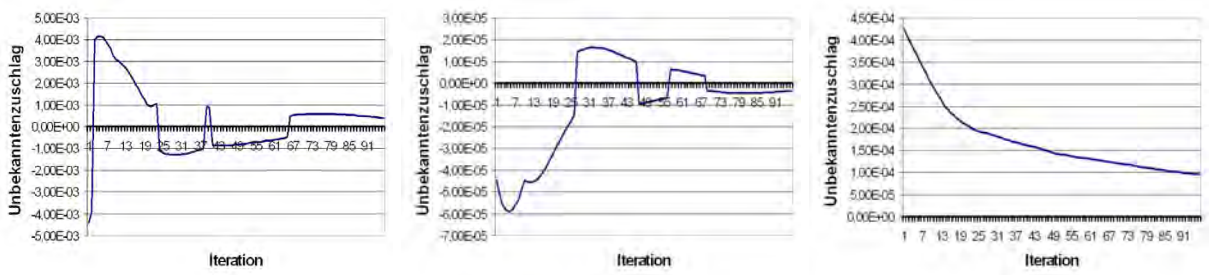
(a) Entfernungen (b) Intensitäten

Abbildung A.22: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

A.2.5 Ausgleichungsfall (5)

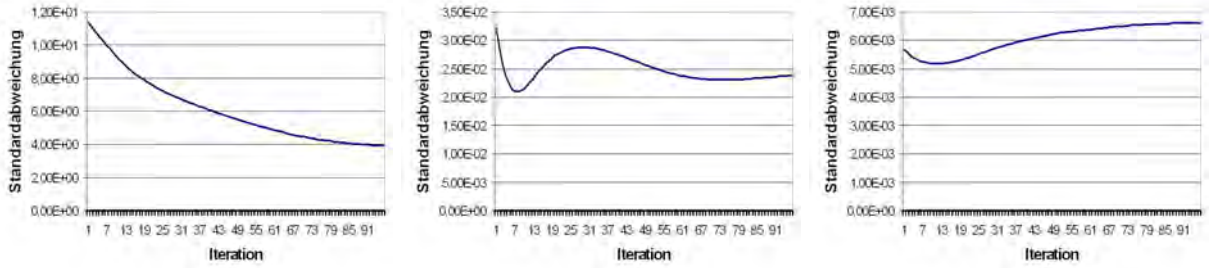
	Dresdner Frauenkirche		*Verona Theater*	
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 3	Standpunkt 1	Standpunkt 3
$t_X[m]$	12,224	−26,815	−14,011	13,033
$\Delta t_X[m]$	−0,028	−0,066	0,010	0,420
$s_{t_X}[m]$	1,54e-004	0,79e-004	0,91e-004	2,52e-004
$t_Y[m]$	27,533	−7,879	11,269	−19,204
$\Delta t_Y[m]$	−0,026	−0,023	−0,281	0,696
$s_{t_Y}[m]$	4,15e-004	1,98e-004	0,47e-004	2,16e-004
$t_Z[m]$	−0,127	−0,193	0,462	−1,023
$\Delta t_Z[m]$	−0,024	0,011	−0,398	1,046
$s_{t_Z}[m]$	3,48e-004	1,70e-004	0,82e-004	3,66e-004
$\omega[rad]$	0,046	0,012	0,050	0,010
$\Delta\omega[rad]$	−0,001	0,003	0,006	−0,007
$s_\omega[rad]$	2,95e-006	1,72e-006	1,50e-006	2,82e-006
$\phi[rad]$	−0,020	−0,041	−0,004	0,225
$\Delta\phi[rad]$	0,000	0,000	−0,031	0,036
$s_\phi[rad]$	4,02e-006	2,86e-006	3,38e-006	8,17e-006
$\kappa[rad]$	−0,623	0,665	−0,263	0,273
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	0,003	0,006	−0,020
$s_\kappa[rad]$	4,71e-006	3,22e-006	1,85e-006	4,86e-006

Tabelle A.16: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (5)



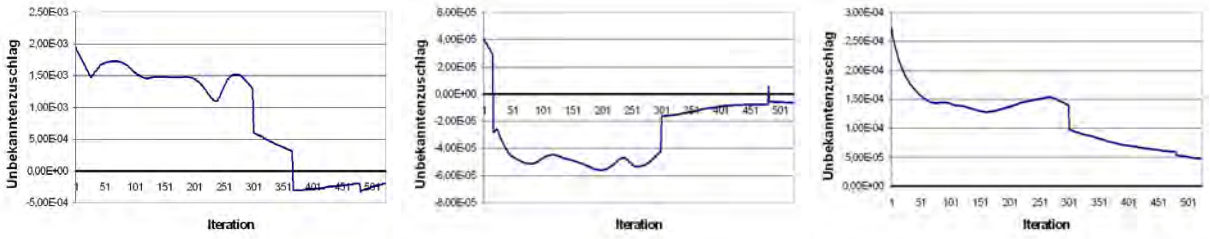
(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.23: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



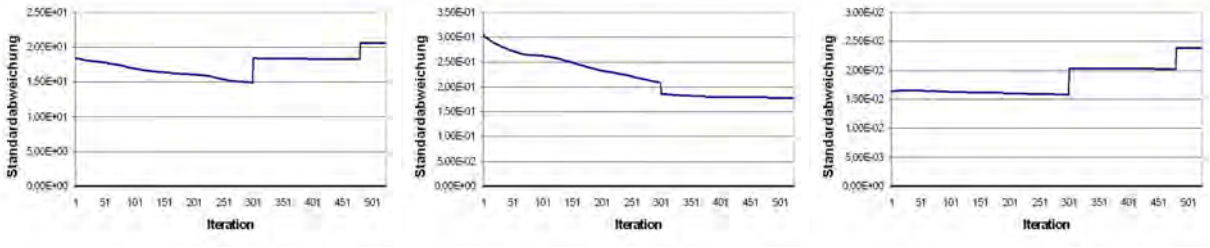
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.24: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.25: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



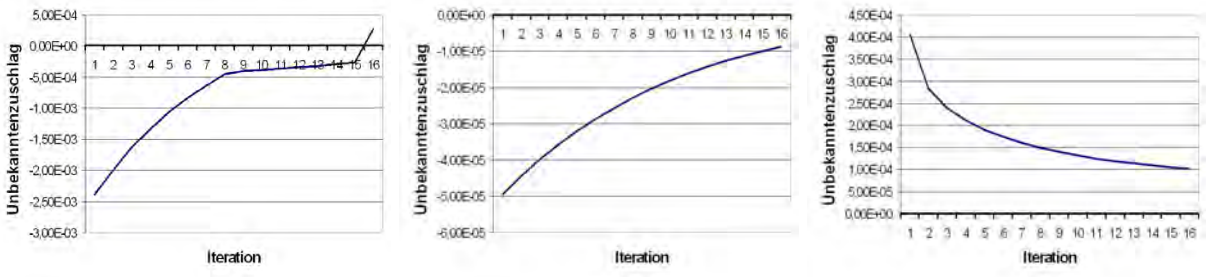
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.26: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

A.2.6 Ausgleichungsfall (6)

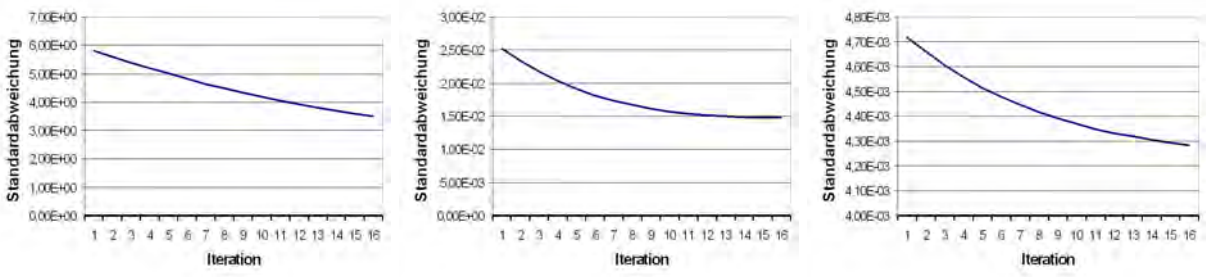
	Dresdner Frauenkirche	*Verona Theater*
Parameter	Standpunkt 1	Standpunkt 1
$t_X[m]$	12,201	−13,578
$\Delta t_X[m]$	−0,006	−0,411
$s_{t_X}[m]$	0,42e-004	0,91e-004
$t_Y[m]$	27,507	11,570
$\Delta t_Y[m]$	0,000	−0,552
$s_{t_Y}[m]$	1,23e-004	0,47e-004
$t_Z[m]$	−0,164	0,364
$\Delta t_Z[m]$	0,012	−0,362
$s_{t_Z}[m]$	1,52e-004	0,82e-004
$\omega[rad]$	0,045	0,051
$\Delta\omega[rad]$	0,000	0,004
$s_\omega[rad]$	0,41e-006	1,50e-006
$\phi[rad]$	−0,021	−0,005
$\Delta\phi[rad]$	0,000	−0,029
$s_\phi[rad]$	1,70e-006	3,38e-006
$\kappa[rad]$	−0,623	−0,239
$\Delta\kappa[rad]$	0,000	−0,016
$s_\kappa[rad]$	1,24e-006	1,85e-006

Tabelle A.17: Orientierungsparameter sowie Differenzen zu den Referenzwerten und Standardabweichungen des Ausgleichungsfalls (6)



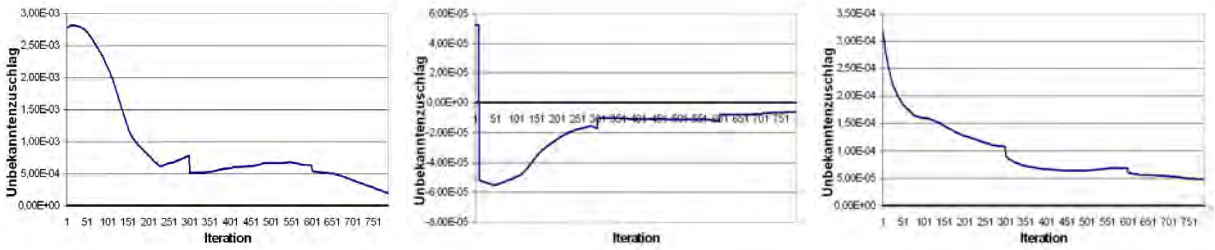
(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.27: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



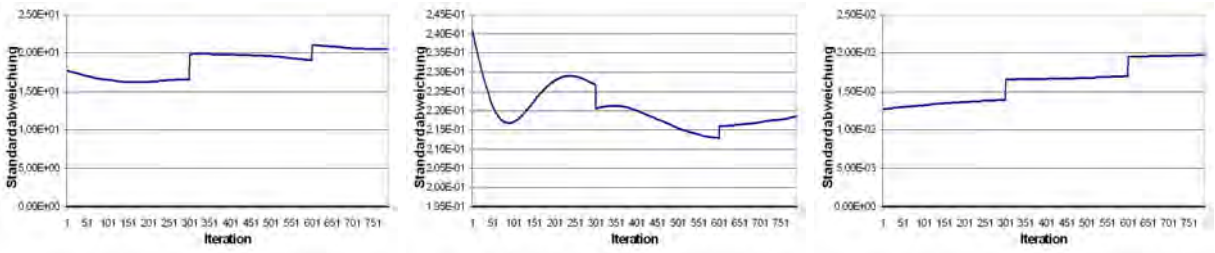
(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.28: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Dresdner Frauenkirche



(a) Translationen (b) Rotationen (c) Höhen

Abbildung A.29: Maximale Unbekanntenzuschläge der Parametergruppen im Datensatz Verona Theater



(a) Helligkeiten (b) Entfernungen (c) Intensitäten

Abbildung A.30: Standardabweichungen im Objektraum der Beobachtungsgruppen im Datensatz Verona Theater

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Leibniz Universität Hannover und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven im Rahmen des Stipendiums *„niedersächsisches Assistentenprogramm“* der *Arbeitsgruppe Innovative Projekte* (AGIP) des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur (MWK) entstanden.

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit geholfen haben. Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke. Es ist mir ein großes Anliegen ihm für die anregenden Gespräche während der gesamten Entstehungsdauer der Arbeit, sowie der Begleitung als Wissenschaftler und Mensch für die vielfältige Unterstützung zu danken. Weiter möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Grün, Herrn Dr. Claus Brenner und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann für das Lesen meiner Arbeit, ihre konstruktiven Anregungen und für die Übernahme des Korreferats bzw. des Gutachtens danken. Für die guten Rahmenbedingen am Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann und auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Weisensee danken. Mit ihren fachlichen Ratschlägen haben sie mich bei der Erarbeitung des Themas motivierend begleitet und gefördert. Sie haben es mir immer wieder ermöglicht Beträge auf verschiedenen nationalen und internationalen Kongressen zu präsentieren, die wichtige Meilensteine für die Erstellung dieser Arbeit waren. Für die fachliche, technische und moralische Unterstützung bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen vom Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, sowie vom Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik und - in alphabetischer Reihenfolge - besonders bei Herrn Matthias Butenuth, Christoph Dold, Dr. Markus Gerke, Heidi Hastedt, Claudia Haig, Christina Müller, Dr. Folke Santel, Werner Tecklenburg und Dr. Manfred Wiggenhagen. Durch die vielen Gespräche und den stetigen Erfahrungsaustausch haben sie zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Weiter möchte ich Herrn Nikolaus Studnicka von der RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Österreich für die Bereitstellung der verwendeten Datensätze danken.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern und meiner Frau Diana danken, ohne die das Entstehen dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Lebenslauf

seit April 2007	Mitarbeiter in der Forschung- und Vorausentwicklung bei der Robert Bosch GmbH
2001-2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven im Rahmen des niedersächsischen Assistentenprogramms, Doktorand am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Leibniz Universität Hannover
2006	Halbjähriger Aufenthalt als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Department of Geomatics, University of Melbourne, Australien
2001-2002	Vertiefendes Studium der Photogrammetrie an der Leibniz Universität Hannover für die Zulassung zur Promotion
2001	Dreimonatiger Forschungsaufenthalt am National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL), Purdue University, West Lafayette, USA
2000-2001	Projektleiter und Softwareentwickler im Bereich Medizintechnik bei der AXIOS 3D Services GmbH, Oldenburg
1996-2000	Studium des Vermessungswesen an der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven