

3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion

Bei der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jens Gühring
aus Oberndorf a. N.

Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart

2002

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi

Tag der Einreichung: 21. 11. 2001

Tag der mündlichen Prüfung: 28. 05. 2002

Zusammenfassung

Die dreidimensionale Digitalisierung von Objekten mit Hilfe von optischen Verfahren hat in den vergangenen Jahren große Bedeutung gewonnen. Infolge der intensiven Forschung ist weltweit eine ganze Reihe von Systemen entwickelt worden, welche in so unterschiedlichen Bereichen wie industrieller Qualitätskontrolle, Reverse Engineering, virtueller Realität und Medizin eingesetzt werden. Fortschritte in der Sensortechnik und der Verarbeitung der Messdaten haben die Erfassung nahezu beliebig komplexer Objekte möglich gemacht.

Nahezu allen Systemen gemein ist jedoch die fehlende oder unzureichende Berücksichtigung von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Methoden zur Erfassung und Rekonstruktion der Oberfläche von Objekten mittels aktiver optischer Triangulation. Im Vergleich zu anderen Systemen findet eine konsequente Berücksichtigung der Datenqualität in allen Verarbeitungsschritten statt. Dazu wurden neue Methoden entwickelt und bestehende Verfahren erweitert. Die Verarbeitungsschritte sind im Einzelnen:

- Die Datenerfassung mittels strukturierter Beleuchtung. Die Kalibrierung und Modellierung der Kameras und der Projektionseinheit erfolgt durch die Übertragung etablierter Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie auf Streifenprojektionssysteme. Durch die Verwendung neuartiger Streifenmuster in Verbindung mit neuen Verfahren zur Auswertung der Bilddaten wird eine größere Flexibilität bei der Datenerfassung erreicht. Systematische Fehler traditioneller Verfahren werden weitgehend vermieden. Das Ergebnis der Auswertung sind neben der geometrischen Position der Messpunkte auch deren Kovarianzmatrix sowie Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Reflektivität.
- Die Transformation von Einzelmessungen in ein gemeinsames Koordinatensystem. Dieser als Registrierung bezeichnete Verarbeitungsschritt ist notwendig, da nahezu jede Messaufgabe infolge von Sichtbarkeitsbeschränkungen mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Richtungen erfordert. Sowohl die paarweise Registrierung von zwei Datensätzen als auch die simultane Registrierung mehrerer Datensätze und die Hinzunahme der erfassten Oberflächenreflektivität wurden untersucht. Alle entwickelten Verfahren sind Varianten des bekannten Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus und verwenden die bei der Datenerfassung gewonnenen Kovarianzmatrizen zur Gewichtung der Transformationsschätzung. Durch das zugrundeliegende stochastische Modell, welches die laterale Unsicherheit bei der Bildung von Punktkorrespondenzen berücksichtigt, wird eine im Vergleich zum klassischen ICP-Algorithmus wesentlich schnellere Konvergenz erreicht.
- Die Integration der Datensätze, d.h. die Zusammenführung der registrierten Datensätze, wodurch eine einzige, nahtlose Oberflächenbeschreibung erhalten wird.
- Für Aufgaben in der Qualitäts- und Fertigungskontrolle ist der Vergleich des erfassten Objekts mit seiner CAD-Beschreibung notwendig (Soll-Ist-Vergleich). Hierbei wird die Unsicherheit der rekonstruierten Objektoberfläche herangezogen, um über die Signifikanz einer festgestellten Abweichung zu entscheiden, bzw. um eine Aussage über die Kontrollierbarkeit des Prüflings zu erhalten.

Das realisierte Gesamtsystem ermöglicht die präzise Erfassung komplexer Objekte mit mehreren Millionen Messpunkten. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit der Daten ist eine transparente Bewertung der Qualität der Verarbeitungsschritte und Ergebnisse möglich. Neben den Anwendungen in der industriellen Messtechnik können die Verfahren auch für die hochwertige Erfassung statischer Objekte in vielen anderen Bereichen eingesetzt werden.

Abstract

The digitization of physical objects using optical shape acquisition methods is gaining increasing importance. Nowadays, there are a lot of applications in many different fields like industrial inspection, reverse engineering, virtual reality and medicine. Due to the improvements in sensor architecture and data processing, the acquisition of objects of almost any complexity became possible.

Active research during the last decades led to a variety of working shape acquisition systems worldwide. They differ in the measurement principle, efficiency and the degree of automatization. What almost all systems have in common is the missing or inadequate consideration of accuracy and reliability aspects.

This thesis addresses the problem of surface acquisition and reconstruction using active optical triangulation. Compared to other systems, data quality is treated rigorously in all processing steps. In order to achieve this goal new methods or important extensions of existing methods have been developed. The necessary steps are:

- Data acquisition using structured light. Calibration and modeling of cameras and projectors is achieved by adapting well-established methods of digital close range photogrammetry to fringe projection systems. New pattern designs in combination with advanced processing methods allow for higher flexibility without introducing systematic measurement errors, as they are inherent in traditional methods. Results of the process are the geometric positions of the measured points, as well as their covariance matrix and additional attributes like color or surface reflectivity.
- Transformation of datasets into a common coordinate frame. This so-called registration step is necessary since almost any measurement task requires multiple measurements from different viewpoints due to unavoidable occlusions. Algorithms for pairwise registration as well as algorithms for the simultaneous registration of multiple datasets and registration using surface reflectivity information have been investigated. All methods are modified versions of the well-known iterative closest point (ICP) algorithm and make use of covariance information provided by the data acquisition step. This information is used during the pose estimation process. A new stochastic model, which takes into consideration how point correspondences are computed, tremendously improves convergence compared to the classical ICP algorithm.
- The integration of registered datasets. This step modifies the topology of the measured points to yield a seamlessly integrated surface description.
- For measurement tasks in industrial inspection, the deviation between a manufactured part and its CAD description is necessary (actual/nominal comparison). The uncertainty of the reconstructed surface is used to decide whether a measured deviation is significant and if the measurements are precise enough to detect small defects.

The realized system allows for the digitization of complex objects using millions of points. By the integration of accuracy and reliability aspects in all steps of the processing chain the robustness of the system has been considerably improved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit	10
1.3	Anwendungen	11
1.4	Einordnung in den Sonderforschungsbereich 514	12
1.5	Gliederung der Arbeit	13
2	Datenerfassung	14
2.1	Methoden zur 3D-Datenerfassung	14
2.1.1	Taktile Koordinatenmessmaschinen	15
2.1.2	Computertomographie	15
2.1.3	Aktive Triangulation.....	16
2.2	Anforderungen an die Datenerfassung.....	18
2.3	Realisierte Meßsysteme	18
2.3.1	Kameras.....	19
2.3.2	Projektoren	19
2.3.3	Positioniereinheit.....	22
2.3.4	Aufbau der Meßsysteme	23
2.4	Mathematisches Modell.....	24
2.4.1	Direkter vs. modellbasierter Ansatz	24
2.4.2	Der Stereonormalfall	25
2.4.3	Verallgemeinerung auf beliebige Sensoren nach dem Triangulationsprinzip	26
2.4.4	Innere Orientierung.....	27
2.4.5	Äußere Orientierung	29
2.4.6	Punktbestimmung	30
2.4.7	Aktormodell.....	33
2.4.8	Zusammenhang der Koordinatensysteme	34
2.5	Datenrepräsentation	35
2.6	Kalibrierung.....	37
2.6.1	Aufbau des Testfeldes	38
2.6.2	Aufnahmekonfiguration.....	40
2.6.3	Bestimmung der Bildkoordinaten der Messmarken	41
2.6.4	Berechnung der Parameter.....	47
2.6.5	Kalibrierung der Aktorik	48

2.7 Das Korrespondenzproblem	49
2.7.1 Der Kodierte Lichtansatz.....	50
2.7.2 Projektion von Graycodes	50
2.7.3 Phase-Shift-Verfahren	53
2.7.4 Genauigkeitsaspekte beim Phase-Shift-Verfahren	55
2.7.5 Line-Shift-Verfahren	56
2.7.6 Genauigkeitsaspekte beim Line-Shift-Verfahren	61
2.7.7 Space-Time-Verfahren	61
2.7.8 Genauigkeitsaspekte beim Space-Time-Verfahren.....	63
2.7.9 Bestimmung des Linienzentrums	63
2.7.9.1 Die Operatoren von Blais und Rioux	65
2.7.9.2 Genauigkeitsaspekte bei den Operatoren von Blais und Rioux	65
2.7.9.3 Die Gauss-Operatoren.....	68
2.7.9.4 Der Gauss-Operator mit Filterbreite 3 (G_3).....	70
2.7.9.5 Der Gauss-Operator mit Filterbreite 5 (G_5).....	71
2.7.9.6 Der gewichtete Gauss-Operator mit Filterbreite 5 (G_{5w}).....	72
2.7.9.7 Genauigkeitsaspekte bei den Gauss-Operatoren	73
2.7.10 Diskussion der Verfahren zur Zentrumsdetektion	75
2.8 Berechnung der Objektkoordinaten	75
2.9 Berechnung von Oberflächenfarbe und Oberflächenreflektivität	78
2.9.1 Fremdlicht	78
2.9.2 Radiometrische Eigenschaften – Kameras	78
2.9.3 Radiometrische Eigenschaften – Projektor.....	79
2.9.4 Beleuchtungsmodell	80
2.9.5 Berechnung der Oberflächenreflektivität.....	81
2.9.6 Farbe.....	82
2.10 Genauigkeitsprüfung mittels Referenzkörper	83
2.10.1 Ebener Prüfkörper	83
2.10.2 Kugelförmiger Prüfkörper	85
2.11 Beschreibung der Software.....	86
2.12 Experimentelle Ergebnisse	88
2.12.1 Bücher – Kindermann CPD Omega XV.....	88
2.12.2 Testkörper Aluminium – Kindermann CPD Omega XV.....	89
2.12.3 Testkörper Aluminium – Davis DLX 10	89
2.12.4 Testkörper Aluminium – ABW 640	90
2.12.5 Orchideen – ABW 640	91

2.12.6 Hand – ABW 640	92
2.13 Diskussion	92
3 Registrierung	94
3.1 Einleitung.....	94
3.2 Problemformulierung.....	94
3.3 Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus.....	95
3.4 Bisherige Arbeiten	96
3.4.1.1 Verfahren zur paarweisen Registrierung.....	97
3.4.1.2 Verfahren zur Registrierung mehrerer Datensätze	100
3.5 Datenrepräsentation	101
3.5.1 Geometrische Information	101
3.5.2 Transformationen	102
3.5.3 Radiometrische Information	105
3.5.4 Genauigkeitsinformation	106
3.5.5 Zusätzliche Attribute	106
3.6 Generierung von Dreiecksnetzen.....	107
3.7 Bestimmung der Transformationsparameter.....	108
3.7.1 Geschlossene Lösung der Starrkörpertransformation.....	109
3.7.2 Iterative Lösung der Starrkörpertransformation	110
3.7.3 Berücksichtigung der Kovarianzmatrizen der homologen Punkte.....	114
3.8 Bestimmung von Näherungswerten	115
3.9 Bestimmung der Quellpunkte	116
3.10 Bestimmung korrespondierender Punkte	116
3.11 Verfahren zur paarweisen Registrierung.....	119
3.12 Verbesserung des Konvergenzverhaltens	120
3.12.1 Dynamisierung des Distanzschwellwerts	120
3.12.2 Modifikation der Gewichtsmatrix.....	121
3.13 Konzeptvalidierung.....	122
3.14 Verfahren zur paarweisen Registrierung unter Verwendung von Intensitätsinformation.....	127
3.15 Verfahren zur simultanen Registrierung mehrerer Datensätze	129
3.16 Diskussion	130
4 Integration	132
4.1 Einführung	132
4.2 Überblick über das Verfahren zur Integration von Datensätzen	133

4.3	Topologierekonstruktion.....	133
4.3.1	Generierung des Ausgangsnetzes	134
4.3.2	Netzoptimierung	135
4.4	Rückprojektion und Netzverdichtung	137
4.5	Formulierung des Integrationsalgorithmus	138
4.6	Diskussion	139
5	Bezug zur industriellen Qualitätskontrolle	141
5.1	Einleitung.....	141
5.2	Berücksichtigung der Messunsicherheit	142
5.3	Anwendungsbeispiel: Formprüfung.....	144
5.4	Diskussion	145
6	Ergebnisse der Oberflächenrekonstruktion	146
6.1	Beschreibung der Software	146
6.2	Überblick über die Datensätze	147
6.3	Datensatz „Ramses“	148
6.4	Datensatz „Sandkern“	150
6.5	Datensatz „Modellauto“	152
6.6	Datensatz „Künstler“	154
7	Zusammenfassung und Ausblick	156
7.1	Datenerfassung und Systemkalibrierung	156
7.2	Registrierung	157
7.3	Integration.....	158
7.4	Prüfung	159
7.5	Gesamtsystem	159
8	Literatur	160
9	Lebenslauf	164
10	Dank	165

1 Einführung

1.1 Motivation

Methoden zur Digitalisierung dreidimensionaler Objekte ermöglichen es, Form und Eigenschaften realer Objekte in eine für die Speicherung und Verarbeitung mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen geeignete Repräsentation zu überführen.

Das klassische Anwendungsfeld für die 3D-Formerkennung ist die Qualitäts- und Fertigungskontrolle. Taktile Koordinatenmessmaschinen sind der de facto Standard für die industrielle Mess- und Prüftechnik [Boulanger, Moron und Redarce 1996]. Nach festgelegten Prüfplänen werden eine Reihe von geometrischen Merkmalen erfasst und zur Entscheidung über die Qualität des Prüflings herangezogen. Dazu werden mit einem präzise gefertigten Tastkopf einzelne Punkte angefahren, wobei moderne Geräte den Operateur durch automatische Funktionen (z.B. Scannen von Oberflächen) unterstützen [Neumann 2000]. Koordinatenmessmaschinen haben sich im praktischen Einsatz hervorragend bewährt. Die hohen Anschaffungskosten und die geringe Messgeschwindigkeit stellen jedoch Schwachpunkte dieser Technik dar.

Optische 3D-Sensoren erlauben hingegen eine schnelle, berührungslose Erfassung der Oberfläche von Objekten. Als Ergebnis der intensiven Forschung der vergangenen Jahre sind viele leistungsfähige Systeme entstanden, welche Messraten von mehreren 10 000 Punkten pro Sekunde aufweisen. Unter der Voraussetzung hinreichend kooperativer Oberflächen, d.h. diffus reflektierend – nicht spiegelnd oder volumenstreuend –, lassen sich damit nahezu beliebig komplexe Objekte erfassen.

Die Bedeutung der optischen Technologien als Innovationstreiber ist allgemein anerkannt und beispielsweise in der deutschen Agenda „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ in Zusammenarbeit von Vertretern aus Industrie und Wissenschaft dargelegt [VDI Technologiezentrum 2001]. Darin wird die Stellung optischer Technologien als sogenannte kritische Technologien oder Schlüsseltechnologien für andere technologische Entwicklungen und deren Anwendung in der Zukunft betont. Die optischen Sensoren verfügen demnach „dank Berührungslosigkeit, Schnelligkeit und Abnutzungsfreiheit“ über eine Sonderstellung und können „Aufgaben in der industriellen Fertigung übernehmen, bei denen andere Sensortechniken versagen“.

Trotz ihrer unbestrittenen Leistungsfähigkeit mangelt es den optischen Sensoren jedoch noch an breiter Akzeptanz. Ein Grund dafür ist das Fehlen von Normen für die Abnahme und Überwachung solcher Systeme. Im Fall der Koordinatenmessmaschinen existieren hierfür Vorschriften auf nationaler und internationaler Ebene [ISO 10 360-2 1997; VDI/VDE 2617 1986-1998]. Um diesen Missstand zu beheben, arbeitet derzeit der GMA/DGPF-Fachausschuss 3.32 „Optische 3D-Messtechnik“ an der Ausarbeitung der VDI/VDE Richtlinie 2634, um die Abnahme optischer Messsysteme zu vereinheitlichen [VDI/VDE 2634-1 2000; VDI/VDE 2634-2 2000].

Ein weiterer Grund für die Zurückhaltung der Industrie ist die mangelnde Vergleichbarkeit der Ergebnisse optischer Messverfahren. In der Literatur wird zwar über eine Vielzahl von optischen 3D-Messsystemen berichtet – die leistungsfähigsten unter ihnen ermöglichen die Erfassung von Datensätzen mit mehreren 100 000 000 Punkten [Levoy et al. 2000] – jedoch ist allen bisher vorgeschlagenen Systemen die fehlende oder unzureichende Berücksichtigung von Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekten gemein.

Ein wesentliches Problem dabei ist, dass die erzielbare Messgenauigkeit über das Messvolumen hinweg nicht konstant ist, sondern von einer Reihe von Faktoren wie der verwendeten Sensorhardware, der Aufnahmegeometrie sowie von der Form und den Oberflächeneigenschaften des zu erfassenden Objekts abhängt. Endgültige Ergebnisse einer Prüfaufgabe ergeben sich zudem erst nach einer Anzahl von weiteren Verarbeitungsschritten. Daher ist die letztlich erzielte Messgenauigkeit selbst von einem erfahrenen Operateur nur schwer zu beurteilen.

1.2 Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit

Die vorliegende Arbeit stellt eine komplette Verarbeitungskette für die industrielle Inspektion vor, welche neben den geometrischen Abweichungen zwischen dem erfassten Objekt und seiner CAD-Beschreibung auch die Unsicherheit der Ergebnisse bereitstellt. Dadurch wird der Operateur in die Lage versetzt, Messergebnisse unabhängig von der erfolgten Prozessierung einheitlich bewerten zu können.

Um dies zu ermöglichen, findet eine konsequente Berücksichtigung der Datenqualität in allen Verarbeitungsschritten statt. Dazu mussten neue Methoden entwickelt und wesentliche Erweiterungen bestehender Verfahren erarbeitet, in Computerprogramme umgesetzt und anhand synthetischer und realer Daten verifiziert werden. Die Verarbeitungsschritte sind im Einzelnen:

- Die Datenerfassung mittels strukturierter Beleuchtung. Neben einem kommerziellen Streifenprojektor wurde auch der Einsatz handelsüblicher Datenprojektoren untersucht. Die Kalibrierung und Modellierung der Kameras und der Projektionseinheit erfolgt durch die Übertragung etablierter Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie auf Streifenprojektionssysteme. Durch die Verwendung neuartiger Streifenmuster in Verbindung mit neuen Verfahren zur Auswertung der Bilddaten wird eine größere Flexibilität bei der Datenerfassung erreicht. Systematische Fehler traditioneller Verfahren werden weitgehend vermieden. Das Ergebnis der Auswertung sind neben der geometrischen Position der Messpunkte auch deren Kovarianzmatrix sowie Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Reflektivität.
- Die Transformation von Einzelmessungen in ein gemeinsames Koordinatensystem. Dieser als Registrierung bezeichnete Verarbeitungsschritt ist notwendig, da nahezu jede Messaufgabe infolge von Sichtbarkeitsbeschränkungen mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Richtungen erfordert. Sowohl die paarweise Registrierung als auch die simultane Registrierung mehrerer Datensätze und die Verwendung der erfassten Oberflächenreflektivität wurden untersucht. Alle entwickelten Verfahren sind Varianten des Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus [Besl und MacKay 1992] und verwenden die bei der Datenerfassung gewonnenen Kovarianzmatrizen zur Gewichtung der Transformationsschätzung. Durch das zugrundeliegende stochastische Modell, welches die Methode zur Bildung von Punktkorrespondenzen berücksichtigt, wird eine im Vergleich zum klassischen ICP-Algorithmus wesentlich schnellere Konvergenz erreicht.
- Die Integration der Datensätze, d.h. die Zusammenführung der registrierten Datensätze, wodurch eine einzige, nahtlose Oberflächenbeschreibung erhalten wird.
- Der Vergleich des erfassten Objekts mit seiner CAD-Beschreibung (Soll-Ist-Vergleich). Hierbei wird die Unsicherheit der rekonstruierten Objektoberfläche herangezogen, um über die Signifikanz einer festgestellten Abweichung zu entscheiden, bzw. um eine Aussage über die Kontrollierbarkeit des Prüflings zu erhalten.

Das realisierte Gesamtsystem ermöglicht die präzise Erfassung komplexer Objekte mit mehreren Millionen Messpunkten. Durch die Berücksichtigung der Unsicherheit der Daten ist eine transparente Bewertung der Qualität der Verarbeitungsschritte und Ergebnisse möglich. Neben den Anwendungen in der industriellen Messtechnik können die Verfahren auch für die hochwertige Erfassung statischer Objekte in vielen anderen Bereichen eingesetzt werden.

1.3 Anwendungen

Durch die Möglichkeit zur schnellen, berührungslosen Erfassung der Oberflächengeometrie und weiterer Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Textur ergibt sich für die optische 3D-Messtechnik neben den traditionellen Aufgaben in der industriellen Qualitätskontrolle ein breites Anwendungsfeld:

Industrielle Inspektion: Die industrielle Qualitäts- und Fertigungskontrolle ist das klassische Anwendungsgebiet für die dreidimensionale Formerfassung. Die rasche und dichte Erfassung des Prüflings macht eine ganzheitliche Oberflächenkontrolle möglich. Anhand der Abweichungen von der Spezifikation können fehlerhafte Teile ausgeschieden und Fertigungsprozesse überwacht und korrigiert werden.

Reverse Engineering: Die Entwicklung vieler Konsumgüter erfolgt heutzutage unter Verwendung von Computer Aided Design (CAD) Software, d.h. die Festlegung der Form geschieht durch eine parametrische oder funktionale Beschreibung der Oberfläche (z.B. mittels Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS).

In vielen Fällen, insbesondere wenn die Form ästhetischen Gesichtspunkten genügen muss, ist die manuelle Gestaltung, beispielsweise mit Hilfe von Modelliermasse, intuitiver als die Manipulation der Stützpunkte einer NURBS-Oberfläche. Der Designer kann so auf natürliche Weise mit seinem Objekt interagieren. Anschließend kann die Form digitalisiert und in eine für die Weiterverarbeitung mittels CAD geeignete Darstellung überführt werden.

Es ist ebenso denkbar, Bauteile älterer Geräte, welche noch ohne den Einsatz von CAD-Software hergestellt wurden, zu digitalisieren und für die Entwicklung neuer Geräte oder die Herstellung von Ersatzteilen zu verwenden.

Virtuelle Realität: Der Bereich der virtuellen Realität erfreut sich immer größerer Beliebtheit. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, längst vergangene, zukünftige oder der Phantasie entsprungene Welten im Computer nachzubilden und zu simulieren. Hier stellt sich die Aufgabe, 3D Modelle, welche aus der Vergangenheit erhalten geblieben sind oder von Künstlern geschaffen wurden, in den Computer zu übertragen.

Die Unterhaltungsindustrie profitiert durch immer realistischer wirkende Filmproduktionen. Computerspiele erreichen, unterstützt durch die leistungsfähigen Visualisierungsmöglichkeiten moderner Grafikhardware, ein noch nie dagewesenes Realitätsniveau.

Kunst- und Denkmalschutz: Kunstgegenstände stellen typischerweise Einzelstücke dar. Um Plastiken und Skulpturen räumlich betrachten und studieren zu können, sind Reisen zu den Ausstellungsorten unvermeidlich, sofern die Objekte überhaupt öffentlich zugänglich sind.

Durch die Methoden der dreidimensionalen Digitalisierung und Visualisierung ist es nun möglich, Kunstgegenstände zu erfassen und interaktiv darzustellen.

Eine weitere Anwendung ergibt sich in der Dokumentation des aktuellen Zustands von Objekten, um zu einem späteren Zeitpunkt deren Restauration unterstützen und planen zu können.

Medizin: Auch in der Medizin gibt es weitreichende Anwendungsmöglichkeiten für die optische 3D-Formerfassung. So lassen sich Prothesen speziell auf den Patienten anpassen. In der plastischen Chirurgie ermöglicht die genaue Kenntnis der Anatomie des Patienten, Eingriffe besser zu planen und die Ergebnisse einer Operation bereits im Voraus simulieren zu können. Darüber hinaus lassen sich bestimmte Fehlstellungen des Skeletts anhand der äußeren Form objektiv, kostengünstig und ohne Strahlenbelastung diagnostizieren. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist im Bereich der aufkommenden Telemedizin zu erwarten.

1.4 Einordnung in den Sonderforschungsbereich 514

Viele der beschriebenen Verfahren sind innerhalb des Sonderforschungsbereiches 514 „Aktive Exploration mittels Sensor/Aktor-Kopplung für adaptive Meß- und Prüftechnik“ entstanden, welcher 1998 an der Universität Stuttgart eingerichtet wurde. Das Projekt befasst sich mit der Entwicklung und Realisierung eines multisensoriellen Messsystems für den Einsatz in der Qualitätssicherung und Fertigungskontrolle. Durch die auf autonomen Agenten basierende Softwarearchitektur soll das System in seinem Endzustand in der Lage sein, Prüfaufgaben flexibel und selbständig auszuführen.

Ausgangspunkt für die Durchführung einer Mess- und Prüfaufgabe bildet ein STEP-basiertes Referenzmodell, welches die geometrischen Eigenschaften sowie die Spezifikation der Prüfmerkmale (Prüfplan) enthält.

Mit Hilfe des Konzepts der aktiven Exploration wird das System in die Lage versetzt, sich abhängig vom Prüfplan und der vorhandenen Konfiguration von Sensoren und Aktoren eigenständig und selbstoptimierend auf die gestellte Prüfaufgabe anzupassen. Es schließt die Reaktion des Systems auf unerwartete Ereignisse oder mit einem bestimmten Sensor nur schlecht oder gar nicht detektierbare Merkmale, durch neue, an die Situation angepasste Mess- und Prüfstrategien ein.

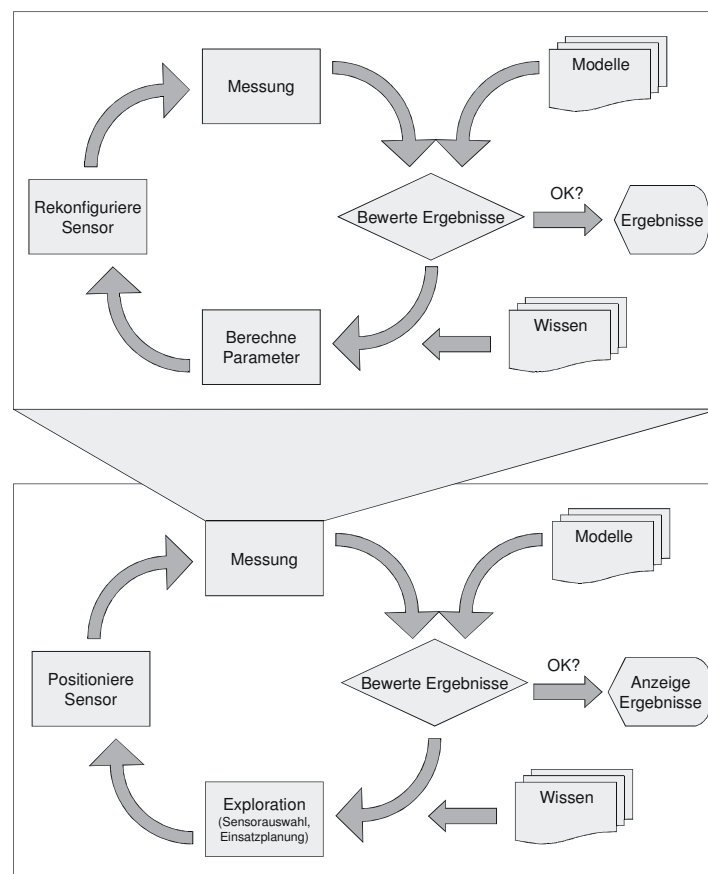


Abbildung 1: Konzept der hierarchischen Regelschleifen. Jede Ebene verfügt über Möglichkeiten zur Optimierung und Bewertung der Ergebnisse.

Systemintern werden Sensoren und Aktoren über Regelschleifen zusammengefasst, welche eigene, lokale Weltmodelle und Planungsverfahren besitzen. Die miteinander verknüpften Sensoren und Aktoren beschränken sich nicht auf physische Objekte, sondern treten in höheren Ebenen auch in Form von virtuellen Sensoren und Aktoren auf. Daraus folgt, dass auch verarbeitete Daten als Sensordaten virtueller Sensoren betrachtet werden können. Durch die Zusammenfassung dieser Regelschleifen zu übergeordneten Einheiten ergibt sich eine hierarchische Struktur von verschachtelten Regelschleifen, welche auf das Multiagentensystem abgebildet werden kann.

Ziel ist es, dem System einen Prüfling in freier Lage präsentieren zu können, woraufhin der Messvorgang gestartet wird. Anschließend soll der Prüfling selbständig erkannt und die spezifizierte Messaufgabe vollständig automatisiert durchgeführt werden. Das Prüfprotokoll sowie eine geeignete Visualisierung der Abweichungen bilden das Ergebnis des Prüfablaufs.

Um dieses Ziel zu erreichen, mussten die nachfolgenden Anforderungen an die Datenerfassung und -prozessierung erfüllt werden:

- Möglichkeit zur vollständigen Automatisierung der Datenerfassung. Neben der Bereitstellung von Näherungswerten für die Sensorpositionen anhand des kinematischen Modells der Aktorik sind hierunter z.B. die Robustheit der Verfahren sowie deren Fähigkeit zur Selbstdiagnose zu verstehen.
- Freie Konfigurierbarkeit der Position und Orientierung von Kameras und Beleuchtungsquellen.
- Unterstützung der Kooperation zwischen verschiedenen Sensorsystemen. Beispielhaft sei hier die dichte Oberflächenerfassung mit Hilfe einer Stereokamera und einer unabhängig agierenden Streifenprojektionseinheit genannt.
- Repräsentation der Datenqualität.
- Repräsentation von zusätzlichen Attributen wie Farbe oder Textur.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Verfahren zur Kalibrierung, Datenerfassung und Fusion von Datensätzen fügen sich in die Aufgaben des Teilprojekts A1 „Kalibrierung und Fusion von Sensordaten“ ein. Verfahren zur Segmentierung und Objekterkennung wurden im Rahmen der Teilprojekte B1 „Räumliche Segmentierung und Objekterkennung“ sowie B2 „Erfassung von Modellen mit lernenden Verfahren“ entwickelt.

Davon unabhängig stellt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Gesamtsystem bereits eine komplette, semiautomatische Lösung zur Erfassung, Rekonstruktion und Prüfung komplexer dreidimensionaler Objekte dar.

1.5 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden Verfahren zur dreidimensionalen Datenerfassung und -verarbeitung, bis hin zur Objektpunktbeziehung, vorgestellt. Unter Berücksichtigung des physikalischen Aufbaus der Messsysteme wird ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Sensorsystems und ein Verfahren zur Bestimmung dessen Parameter im Rahmen einer Kalibrierung vorgestellt. Die verwendete Modellierung erlaubt die Verwendung von etablierten Verfahren zur Berechnung der dreidimensionalen Objektpunkten anhand der bestimmten Zuordnungen im zweidimensionalen Bildraum. Verschiedene Konsistenzbedingungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Daten in einem automatisierten Verfahren werden geschildert. Schließlich werden noch experimentelle Ergebnisse und eine Diskussion der Verfahren gegeben.

Kapitel 3 behandelt das Problem der Registrierung von Datensätzen. Nach einer Beschreibung des Iterative-Closest-Point-Algorithmus werden verschiedene in der Literatur beschriebene Verfahren zur Registrierung dreidimensionaler Oberflächendaten diskutiert. Um die bei der Datenerfassung gewonnene Information über die Genauigkeit der Messdaten vollständig verwerten zu können, wird ein Verfahren zur Schätzung der Transformationsparameter entwickelt. Unter Verwendung dieses Verfahrens werden neue Lösungen, für die paarweise Registrierung, für die paarweise Registrierung unter Verwendung von Intensitätsinformation und für die simultane Registrierung mehrerer Datensätze vorgestellt und diskutiert.

Kapitel 4 beschreibt ein Verfahren zur Integration der Datensätze in eine gemeinsame Oberflächenbeschreibung.

Kapitel 5 befasst sich mit dem Soll-Ist-Vergleich zwischen gemessener Oberfläche und CAD-Modell. Es wird gezeigt, wie sich die Kenntnis der Messunsicherheit nutzen lässt, um die Entscheidung über die Qualität eines Prüflings mit größerer Zuverlässigkeit treffen zu können.

In Kapitel 6 werden experimentelle Ergebnisse der Oberflächenrekonstruktion und Prüfung präsentiert.

Kapitel 7 fasst schließlich die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Datenerfassung

2.1 Methoden zur 3D-Datenerfassung

Für die dreidimensionale Digitalisierung komplexer Objekte steht eine Vielfalt von Verfahren zur Verfügung. Während in der Vergangenheit vor allem mechanische Messverfahren verwendet wurden, werden in zunehmendem Maße optische Sensoren eingesetzt. Sie ermöglichen eine schnelle und berührungslose Datenerfassung.

Bei den optischen Verfahren sind grundsätzlich aktive und passive Verfahren zu unterscheiden. Passive Verfahren greifen nicht in die zu vermessende Szene ein. Sie sind von der in der Szene vorhandenen Strahlung abhängig. Die Ableitung digitaler Geländemodelle mittels intensitätsbasierter Bildzuordnung aus Luftbildern ist eine sehr erfolgreiche Anwendung passiver 3D-Erfassung. Voraussetzung ist jedoch eine hinreichend glatte, texturierte Oberfläche. Viele Objekte weisen jedoch eine homogen reflektierende und stark tiefengegliederte Oberfläche auf. Aktive Verfahren bringen hingegen gezielt Energie in die zu vermessende Szene ein und detektieren die reflektierte oder transmittierte Energie. Sie arbeiten in der Regel effizienter und robuster als passive Verfahren. Eine hervorragende Übersicht über Methoden zur aktiven Oberflächenerfassung liefert der Artikel von Besl [Besl 1988]. Eine weitere umfassende Ausarbeitung vor dem Hintergrund der Kollisionsvermeidung für mobile Roboter wurde von Everett veröffentlicht [Everett 1989].

Von besonderer Relevanz für die vorliegende Arbeit sind Verfahren nach dem Prinzip der aktiven Triangulation. Bei diesen Verfahren werden von einer Projektionseinheit Muster auf die zu erfassende Oberfläche projiziert. Das vom Objekt reflektierte Signal wird von mindestens einer Kamera aufgezeichnet und erlaubt die Ableitung der dreidimensionalen Gestalt der Oberfläche. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl weiterer optischer Verfahren (z. B. Shape-from-X, Moiré- oder interferometrische Verfahren). Auf sie wird in dieser Darstellung ebenso wenig eingegangen wie auf nicht-optische Verfahren wie Radar oder Ultraschall. Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für die industrielle Qualitäts- und Fertigungskontrolle werden jedoch die taktile Koordinatenmesstechnik und die volumenmessende Computertomographie kurz dargestellt. Abbildung 2 gibt eine Übersicht über gängige Methoden zur 3D-Datenerfassung. Diese Übersicht ist keineswegs vollständig. Sie soll vielmehr eine Einordnung der Verfahren zur aktiven 3D-Datenerfassung ermöglichen.

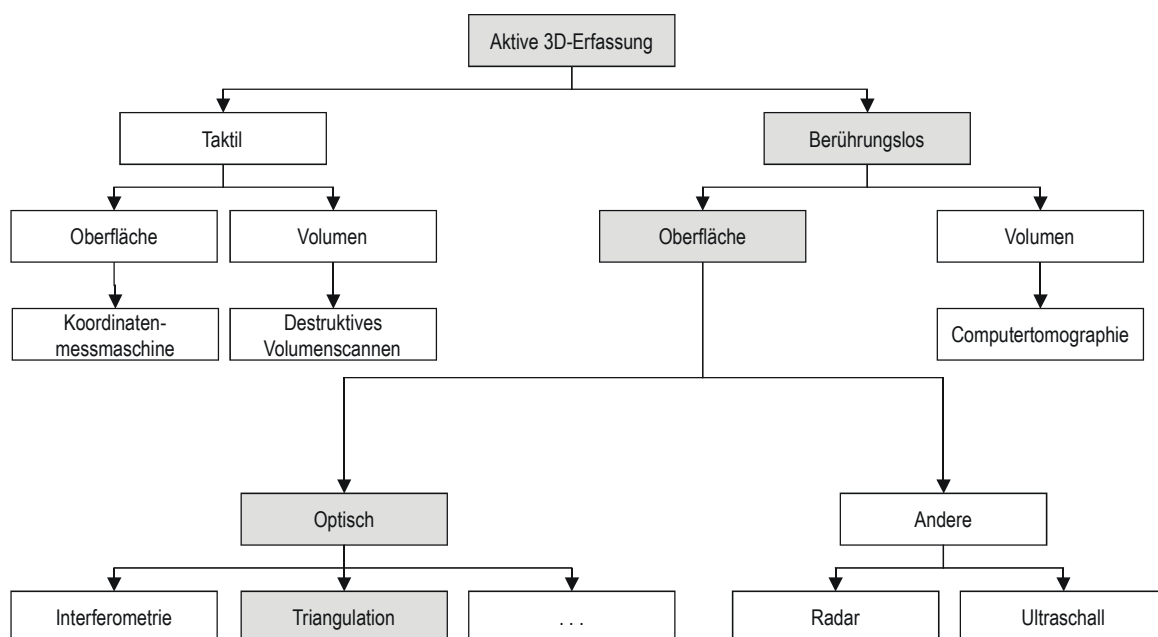


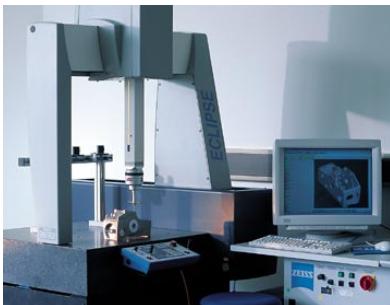
Abbildung 2: Aktive Methoden zur 3D-Datenerfassung.

2.1.1 Taktile Koordinatenmessmaschinen

Taktile Koordinatenmessmaschinen sind die Standardmethode für die industrielle Qualitäts- und Fertigungskontrolle. Mit einem an einem System von starren Achsen oder an einem Gelenkarm geführten, präzise gefertigten Tastkopf werden einzelne Punkte des Objekts angefahren. Das Aufsetzen des Tastkopfs löst die Messung aus, woraufhin die Stellung aller Achsen registriert wird. Moderne Koordinatenmessmaschinen unterstützen den Operator durch automatische Funktionen wie das Scannen von Oberflächen oder das selbständige Abarbeiten eines Prüfplans.

Koordinatenmessmaschinen zeichnen sich durch hohe Präzision und Robustheit aus. Der routinemäßige Einsatz der Technologie ist durch Vorschriften zur Abnahme und Prüfung geregelt [ISO 10 360-2 1997; VDI/VDE 2617 1986-1998]. Die Messunsicherheit wird darin leicht verständlich als Obergrenze für das gesamte Messvolumen spezifiziert (wenngleich die tatsächlich erzielbare Genauigkeit infolge der Antastunsicherheit am Objekt geringer ausfallen kann).

Die Notwendigkeit, während der Messung physischen Kontakt zur Objektoberfläche aufnehmen zu müssen, wirkt sich nachteilig auf die Messgeschwindigkeit aus und kann für deformierbare Objekte unerwünscht sein. Weitere Nachteile stellen der hohe Preis und die eintönige und langwierige manuelle Erfassung komplexer Objekte dar.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3: Klassische Koordinatenmesstechnik. (a) Zeiss ECLIPSE® Koordinatenmessmaschine in Portalausführung. (b) Detailaufnahme der Tastkopfspitze. (c) Mit Hilfe spezieller Antastköpfe lassen sich auch schwer zugängliche Bereiche anmessen.

© Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Oberkochen

2.1.2 Computertomographie

Die Besonderheit der Computertomographie ist ihre Fähigkeit, auch das Innere von Objekten zerstörungsfrei erfassen zu können. Eine Strahlenquelle sendet dazu energiereiche Röntgenstrahlung aus. Das zu untersuchende Objekt wird von mehreren Richtungen aus durchleuchtet. Aus der vom Detektorelement gemessenen Strahlung wird dann die Dichteverteilung innerhalb des Messbereiches berechnet.

Mit Hilfe der Computertomographie ist es möglich, Lage, Form, Größe und Dichte innerer Details darzustellen und zu vermessen. Anhand der erfassten Dichteverteilung ist zudem eine Rekonstruktion der Objektoberfläche möglich.

Ein grundsätzlicher Vorteil gegenüber Verfahren, welche Lichtmuster irgendwelcher Art auf die Oberfläche projizieren, ist die weitreichende Unabhängigkeit von den Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche.

Nachteile des Verfahrens sind die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten, lange Messzeiten sowie die verringerte Messgenauigkeit im Bereich starker Dichteänderungen.

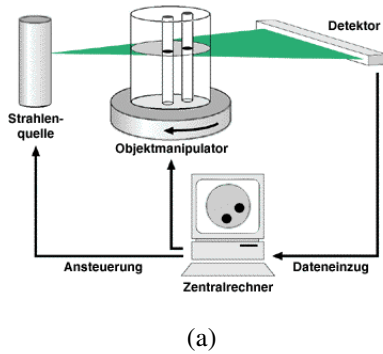


Abbildung 4: (a) Prinzipskizze zur Computertomographie (CT). Das Objekt wird aus mehreren Richtungen durchleuchtet. Aus der vom Detektor gemessenen Strahlungsintensität wird dann das Tomogramm berechnet. (b) Schnitt durch eine im Feingussverfahren hergestellte Turbinenschaufel aus Aluminium. Die CT-Aufnahme zeigt die komplexe innere Struktur der Kühlkanäle.

© HAPEG GmbH, Hattingen

2.1.3 Aktive Triangulation

Die aktive Triangulation mit strukturierter Beleuchtung ist die am häufigsten verwendete Methode zur 3D-Oberflächenerfassung [Jiang und Bunke 1997]. Eine Beleuchtungseinheit projiziert dabei wohldefinierte Lichtmuster auf das Objekt, welche von mindestens einer Kamera erfasst werden.

Das Messprinzip beruht auf dem Schnitt räumlicher Strahlen, welche kameraseitig den Objektpunkt, das Projektionszentrum der Kamera sowie den auf der Verbindungsgerade von Objektpunkt und Projektionszentrum liegenden Punkt auf dem Sensorelement enthalten. Auf der Seite der Projektionseinheit wird der Strahl durch die Beleuchtungsquelle und das Projektionszentrum festgelegt und enthält wiederum den Objektpunkt.

Jeweils ein Kamerastrahl und ein Beleuchtungsstrahl bilden zusammen mit der Verbindungsline der beiden Projektionszentren, der sogenannten Basis, ein Dreieck (Triangulationsdreieck). Bei bekannter Position und Orientierung von Kamera und Projektionseinheit lassen sich daraus die Objektpunktkoordinaten im übergeordneten Koordinatensystem berechnen.

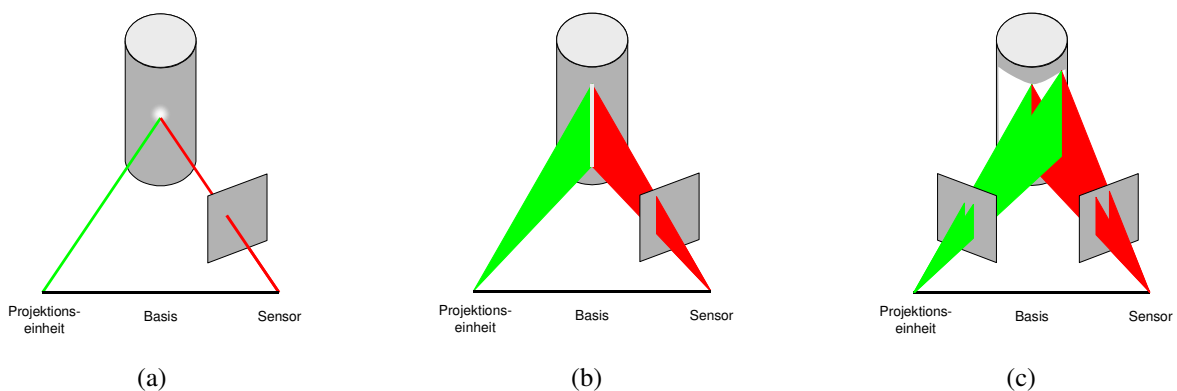


Abbildung 5: Prinzipien der aktiven Triangulation mit strukturierter Beleuchtung. In Abhängigkeit von der Dimension der verwendeten Beleuchtungsquelle unterscheidet man (a) Einzelpunktmessung (0D), (b) Profilmessung (1D), (c) flächenhafte Vermessung (2D). Der weiß markierte Bereich zeigt den jeweils in einer einzelnen Aufnahme erfassten Objektbereich.

In Abhängigkeit von der Dimension der verwendeten Beleuchtungsquelle unterscheidet man:

Punktmessung (0D): Ein Lichtpunkt wird auf das Objekt projiziert und mit einer Zeilenkamera oder einer Kamera mit flächenhaftem Sensor erfasst (Abbildung 5 (a)). Die Position des Lichtpunkts im Kamerabild wird mit Subpixelgenauigkeit bestimmt und dient der Berechnung eines einzelnen Objektpunkts. Aufgrund der guten Fokussierbarkeit werden vorrangig Laserlichtquellen eingesetzt. Um die gesamte von einem Sensorstandpunkt aus sichtbare Oberfläche zu erfassen, muss sowohl die horizontale als auch die vertikale Position des Lichtpunkts verändert werden.

Linien- oder Profilmessung (1D): Bei dieser, auch als Lichtschnittverfahren bekannten, Methode wird eine dünne Linie, in der Regel erzeugt durch einen Laserstrahl, welcher über eine Zylinderlinse aufgeweitet wird, auf das Objekt projiziert (Abbildung 5 (b)). Der resultierende Linienverlauf wird von einer Kamera erfasst und daraus ein dichtes Profil berechnet. Durch Scannen, das heißt durch das Verdrehen oder Verschieben von Objekt oder Sensor zwischen aufeinanderfolgenden Messungen wird eine dichte Oberflächenerfassung möglich.

Diese Art von Sensor ist sehr populär und wird in Wissenschaft und Praxis häufig eingesetzt. Die Verwendung von Laserlicht führt zu einer großen Schärfentiefe und ermöglicht die Benutzung spektraler Filter, womit sich der Einfluss von Umgebungslicht effektiv unterdrücken und die Robustheit des Verfahrens steigern lässt.

Durch die fehlende Redundanz bei der Berechnung der Objektkoordinaten ist jedoch keine Aussage über die tatsächliche Genauigkeit der Punktbestimmung möglich, welche durch die Genauigkeit der mechanischen Positionierung mitbestimmt wird.

Flächenhafte Messung (2D): Ein statisches Dia oder ein computergesteuerter Mustergenerator (z.B. ein LCD) im Strahlengang einer Projektionseinheit wird zur Erzeugung von flächenhaften Mustern verwendet. Dadurch kann ein ganzer Objektbereich von einer Sensorposition aus erfasst werden. Die mechanische Positionierung von Objekt oder Sensor entfällt (Abbildung 5 (c)).

Derartige Systeme sind gewöhnlich schneller als Lichtschnittsensoren, weisen allerdings eine geringere Schärfentiefe und eine geringere Robustheit gegenüber Umgebungslicht auf.

Die im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung entwickelten Systeme zur Datenerfassung verwenden alle Projektionseinheiten, welche flächenhafte Muster erzeugen. Es wird daher durchgängig das letztgenannte Messprinzip eingesetzt.

2.2 Anforderungen an die Datenerfassung

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die Berücksichtigung der Qualität der originären Messgrößen sowie der daraus abgeleiteten Ergebnisse. Die Datenerfassungskomponente muss daher neben der Position der Messpunkte auch Information über deren Unsicherheit bereitstellen. Gleichzeitig muss die Einrichtung des Meßsystems, dessen Kalibrierung und nicht zuletzt die Datenerfassung selbst effizient genug sein, um den Anforderungen der Praxis gerecht werden zu können. Für die Datenerfassung ergeben sich daher folgende Anforderungen:

Automatisierung der Systemkalibrierung: Die Systemkalibrierung stellt einen wesentlichen Faktor für die mit einem Messsystem erzielbare Genauigkeit dar. Durch die Automatisierung der Systemkalibrierung wird deren wirtschaftliche Durchführung sowie eine objektive und gleichbleibende Qualität des Messsystems sichergestellt.

Automatisierung der Datenerfassung: Das System soll ohne Benutzereingriff verschiedene Objekte erfassen und die zur Auswertung notwendigen Berechnungen durchführen können.

Effektivität: Das System soll eine dichte Oberflächenerfassung ermöglichen, d.h. es muss mehrere 100.000 Messpunkte in wenigen Sekunden bereitstellen können. Dabei darf von statischen Objekten ausgegangen werden.

Flexibilität: Das System soll einen weiten Bereich von möglichen Sensorkonfigurationen erlauben. Darunter ist neben einer Variation der Aufnahmegeometrie vor allem auch eine flexible Zusammenstellung der Hardwarekomponenten, insbesondere die Kombination mehrerer Kameras zu verstehen.

Genauigkeit: Die Systemkomponenten und die Datenverarbeitung sollen eine hohe Genauigkeit sicherstellen.

Konsistenz und Zuverlässigkeit: Das System soll bei der Prüfung der Messdaten inkonsistente und unzuverlässige Messungen zurückweisen. Dies schließt explizit formulierten Konsistenzbedingungen, z.B. basierend auf der Kompatibilität der Messungen mehrerer Kameras ebenso ein, wie das Zurückweisen von Punkten aufgrund einer zu großen Standardabweichung. Das Interpolieren fehlender Messpunkte ist zu vermeiden. Es darf hingegen von einer Schließung von Messlücken in Folgeaufnahmen ausgegangen werden.

Robustheit gegenüber Variationen der Reflexionseigenschaften: Variationen im Reflexionsverhalten der Objektoberfläche verursachen bei Systemen, welche mit strukturierter Beleuchtung arbeiten, häufig systematisch verfälschte Messpunkte. Diese Messfehler sollen minimiert werden.

Bereitstellung von Genauigkeitsinformation: Neben den Koordinaten der Messpunkten soll als Maß für die Qualität der Messpunkte auch deren Kovarianzmatrix bestimmt werden.

2.3 Realisierte Meßsysteme

Zur Verifikation der entwickelten Konzepte und Verfahren und zur Untersuchung deren praktischer Leistungsfähigkeit wurden mehrere prototypische Meßsysteme realisiert. Alle diese Systeme arbeiten nach dem Prinzip der aktiven Triangulation mittels strukturierter Beleuchtung unter Verwendung von kommerziell erhältlichen Komponenten. Vom mechanischen Aufbau abgesehen wurden keine speziellen Anpassungen vorgenommen. Es fand lediglich eine Integration der Komponenten zur Mustergenerierung, Bildaufnahme, Positionierung und Datenverarbeitung statt. Aufgrund der Flexibilität des Mess- und Kalibrierkonzepts lassen sich alle Systeme mit derselben Software betreiben. An herstellereinspezifischer Software werden lediglich die zur Ansteuerung notwendigen Gerätetreiber verwendet.

2.3.1 Kameras

Für den Aufbau der Meßsysteme standen insgesamt drei monochrome Digitalkameras vom Typ Basler A113 mit drei Framegrabber-Karten vom Typ Matrox Meteor II Digital zur Verfügung. Sie sind mit hochwertigen Schneider-Kreuznach Cinegon Objektiven ausgerüstet. Durch die Digitalisierung innerhalb der Kamera und die anschließende digitale Übertragung der Daten ist sichergestellt, dass keine Artefakte durch Störungen auf dem Übertragungsweg oder durch eine fehlerhafte Digitalisierung von Analogsignalen entstehen. Der Bildeinzug selbst erfolgt programmgesteuert über eine Programmierschnittstelle. Die technischen Daten sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Kameras

<i>Hersteller Kameras</i>	<i>Basler Vision Technologies, Ahrensburg, Deutschland</i>
Modell	A 113
Sensortyp	2/3" Interline Transfer Progressive Scan CCD (monochrom)
Auflösung	1300 × 1030 Pixel
Pixelgröße	6,7 µm × 6,7 µm
Framerate	11,75 Bilder / s
Objektivtyp	C-Mount
Signalübertragung	8 Bit, RS 644 (LVDS)
<i>Hersteller Objektive</i>	<i>Schneider, Kreuznach, Deutschland</i>
Modell	Cinegon CNG 1,4 / 12
Brennweite	12,7 mm
<i>Hersteller Framegrabber</i>	<i>Matrox, Dorval (Quebec), Canada</i>
Framegrabber API	Matrox MIL Lite V. 6.1 unter Windows 2000

2.3.2 Projektoren

Die Aufgabe der Projektionseinheit liegt darin, eine Sequenz wohldefinierter Muster auf das Objekt zu projizieren. Um die Auswertung in der hier vorgeschlagenen Form durchführen zu können, ist die Projektion sowohl horizontaler, als auch vertikaler Streifenmuster notwendig. Es wurden drei unterschiedliche Projektoren verwendet (Tabelle 2) welche alle eine freie Programmierung der Mustersequenz erlauben. Für die Erfassung einer breiten Auswahl unterschiedlicher Objekte ist zudem eine Anpassung der Intensität auf die Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Objektoberflächen möglich.

Nur der LCD-Projektor der Firma ABW wurde für den Einsatz in der industriellen Messtechnik konzipiert. Er weist daher eine besonders hochwertige und stabile Optik auf. Bei den beiden anderen Projektoren handelt es sich um handelsübliche Datenprojektoren für Präsentationszwecke. Sie sind daher prinzipiell für einen anderen Entfernungsbereich und ein größeres Sichtfeld ausgelegt und werden deshalb im Bereich ihrer minimalen Objektentfernung betrieben. Die große Lichtstärke und der verhältnismäßig günstige Preis lassen deren Einsatz in der dreidimensionalen Oberflächenmesstechnik jedoch trotzdem attraktiv erscheinen. Die Mustererzeugung erfolgt mittels der zwei derzeit am häufigsten verwendeten Technologien: LCD- und DMD-Technologie.

Bei der LCD-Technik handelt es sich um ein transmissives Verfahren unter Verwendung von polarisiertem Licht. Das von einer Halogenlampe erzeugte Licht wird im Polarisator zunächst linear polarisiert. Anschließend passiert es eine Flüssigkristallschicht. Die Struktur der Kristalle kann für jeden Bildpunkt individuell geregelt werden. Sie legt fest, wie sehr die Schwingungsebene des polarisierten Lichts von den Flüssigkristallen verändert wird. Die letzte Schicht stellt

der sogenannte Analysator dar, welcher nur Licht mit einer bestimmten Polarisationsrichtung passieren lässt. Die Intensität eines einzelnen Bildpunktes kann damit individuell festgelegt werden.

Das Gerät von ABW besitzt ein spezielles LCD, welches aus durchgezogenen horizontalen und vertikalen Gitterlinien statt aus einzeln ansteuerbaren Pixeln besteht. Es weist einen besonders großen Füllfaktor auf, da die Linien am Zellenrand kontaktiert werden können und daher auf Schaltungen innerhalb des LCDs verzichtet werden kann.

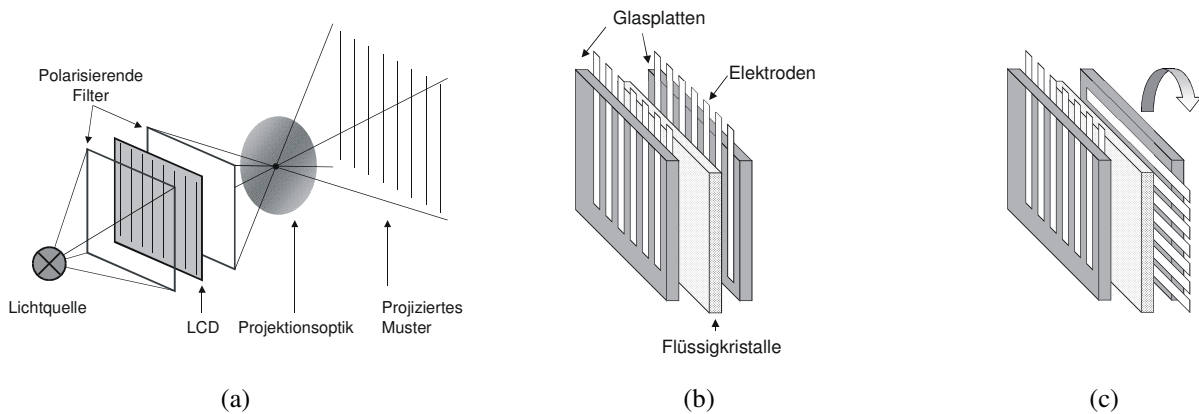


Abbildung 6: LCD-Technologie: (a) Schematischer Aufbau eines LCD-Projektors. (b) Aufbau eines LCDs für die Erzeugung von Linien in vertikaler Richtung. (c) Durch das Drehen der Elektroden auf einer Seite der Flüssigkristallschicht lassen sich sowohl horizontale als auch vertikale Linien erzeugen.

Der Datenprojektor von Kindermann verwendet dagegen eine aktive LCD-Matrix, bei der jedes Pixel über eine elektronische Schaltung verfügt. Um photoelektrische Effekte zu vermeiden, müssen diese Schaltungen in abgedunkelten Bereichen der LCD-Zelle liegen. Aus diesem Grund weisen die Pixel von LCD-Projektoren lediglich einen Füllfaktor von ca. 50% auf, weshalb sich die Pixelstruktur deutlich als dunkle Linien auf dem Objekt abzeichnet.

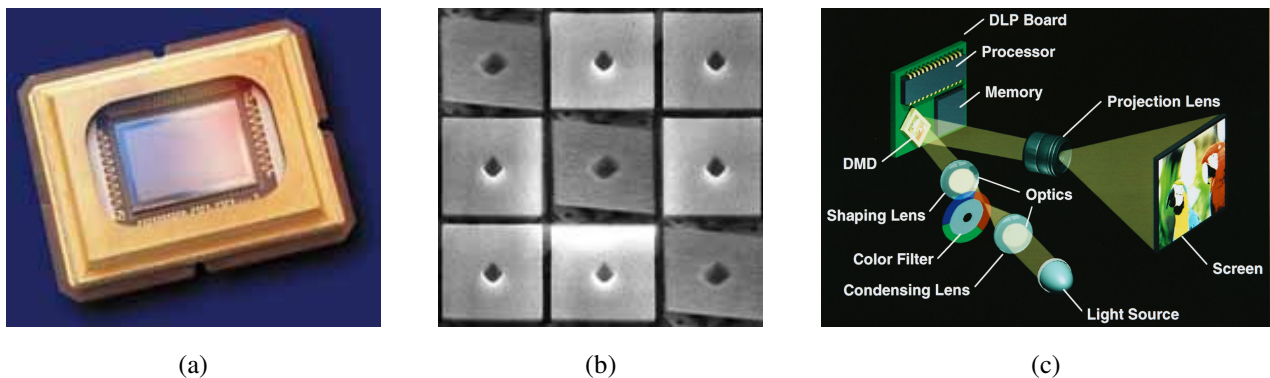


Abbildung 7: DMD-Technologie: (a) DMD-Chip mit 848×600 Mikrospiegel. (b) Großaufnahme der Mikrospiegel in unterschiedlicher Ausrichtung. (c) Schematischer Aufbau eines DMD-Projektors. © Texas Instruments

Bei der von Texas Instruments entwickelten DMD-Technologie (Digital Micromirror Device) des Projektors von Davis handelt es sich um ein reflektives Verfahren. Die Erzeugung der Muster erfolgt mit Hilfe eines Chips, welcher auf seiner Oberfläche ein dicht gepacktes Feld von Mikrospiegeln aufweist. Die Spiegel können von ihrer Ruhelage aus über ein statisches CMOS-RAM mit Zusatzflächenelektroden in zwei mögliche Positionen ($\pm 10^\circ$) geklappt werden. Bei der einen Position reflektieren die Spiegel das einfallende Licht in die Richtung der Projektionsoptik. Bei der anderen Position gelangt kein Licht in das Objektiv. Um die Intensität variieren zu können, wird der Chip in einem gepulsten Modus betrieben. Unterschiedliche Helligkeitsstufen ergeben sich durch schnelles Umschalten der Spiegelpositionen, wodurch nur bei einem Teil der Pulse Licht in die Projektionsoptik abgelenkt wird (Pulskodemodulation). Die Pixel von

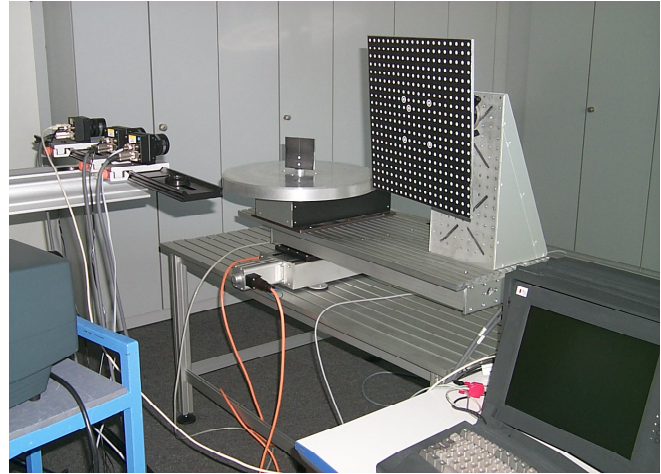
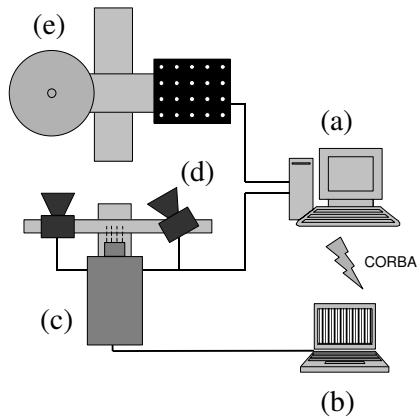
DMD-Projektoren weisen einen großen Füllfaktor (ca. 90%) und einen hohen Kontrast auf. Allerdings führt das ständige Kippen der Spiegel zu deutlich wahrnehmbarem Flimmern, wodurch die Messgenauigkeit negativ beeinflusst wird.

Beide Datenprojektoren projizieren generell in Farbe. Da die Aufnahmen der projizierten Muster mit Monochromkameras gemacht werden, erfolgt die Projektion der Muster ebenfalls monochrom, wobei Konvergenzfehler die Messgenauigkeit negativ beeinflussen. Aufgrund der geschilderten Nachteile eignen sich die Datenprojektoren vor allem für Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsansprüchen oder für große Messbereiche. Tabelle 2 stellt die Eigenschaften der verwendeten Projektionseinheiten zusammen.

Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Projektoren.

<i>Name</i>	<i>ABW LCD 640 Cross</i>	<i>Kindermann</i>	<i>Davis</i>
Hersteller	ABW GmbH, Frickenhausen, Deutschland	Kindermann GmbH, Ochsenfurt, Deutschland	Davis A/S, Drammen, Norwegen
Produktbezeichnung	LCD 640 Cross	CPD Omega XV	DL X 10
Technologie	LCD (Linien)	LCD (Pixel)	DMD (Pixel)
Auflösung	640 × 640	1024 × 768	1024 × 768
Pixelgröße	90 µm × 90 µm	Keine Angabe	16 µm × 16 µm
Brennweite	ca. 180 mm	315 mm (Datenblatt)	ca. 35 mm
Farbe	Monochrom	Farbe	Farbe
Ansteuerung	RS 232	XGA	XGA

Ein Problem stellt die Ansteuerung der Datenprojektoren dar. Während beim ABW Projektor die Definition der Muster und die Steuerung der Datenaufnahme einfach über die serielle Schnittstelle erfolgt, erlauben die Datenprojektoren lediglich die Darstellung eines Videosignals. Es ist daher ein Programm notwendig, welches über eine Grafikkarte die gewünschten Muster erzeugt. Um den Betrieb mehrerer Grafikkarten in einem Computer zu vermeiden, wurde das Programm zur Mustererzeugung als zwei separate Komponenten, die über eine TCP/IP Verbindung miteinander kommunizieren, realisiert. Eine Komponente agiert als Display-Server. Der Display-Client stellt eine wohldefinierte Schnittstelle bereit, welche den Betrieb unterschiedlicher Projektortypen innerhalb der Software zur Datenauswertung und Analyse erlaubt. Die Kommunikation zwischen Server und Client erfolgt über den Middleware-Standard CORBA der Object Management Group (OMG) [Object Management Group 2000]. Die verwendete Implementierung MICO ist frei verfügbar [MICO 2001]. Server und Client können prinzipiell auf demselben Computer ausgeführt werden. Wird für die Darstellung der Muster hingegen ein Notebook verwendet, ist es möglich, den Computer für die Datenauswertung in einer anderen Auflösung als für die Mustererzeugung notwendig zu betreiben. Abbildung 8 zeigt den gewählten Aufbau für Meßsysteme unter Verwendung von Datenprojektoren.



(f)

Abbildung 8: Aufbau eines Meßsystems mit Datenprojektor: (a) PC für die Datenerfassung und Auswertung. (b) Notebook zur Erzeugung der Streifenmuster. (c) Datenprojektor. (d) Kameras. (e) Positioniereinheit für die Positionierung des Messobjekts und des Kalibrierfeldes. (f) Fotografie des Meßsystems.

2.3.3 Positioniereinheit

Die Positioniereinheit besteht aus einem Kreuztisch (zwei senkrecht aufeinander stehende Lineareinheiten), auf welchem ein Rundschalttisch mit Drehteller montiert ist. Dadurch ist es möglich, das Objekt um nahezu 360° zu drehen, um es von verschiedenen Richtungen aus zu erfassen. Die translatorischen Freiheitsgrade können dazu benutzt werden, um ausgedehnte Objekte im Schärfentiefebereich des Meßsystems zu platzieren. Außerdem lässt sich damit das Kalibrierfeld bequem im Sichtfeld des Sensors positionieren. Die Position und Orientierung des Kalibrierfelds lassen sich nicht automatisch verändern. Es lässt sich jedoch über einen Kugelkopf einfach von Hand verdrehen und kippen. Das Zentrum des Kalibrierfeldes verändert sich dabei nur geringfügig, wodurch das Kalibrierfeld im Bereich der Schärfentiefe bleibt. Die Ansteuerung der Positioniereinheit erfolgt über die serielle Schnittstelle über eine Steuereinheit, welche die Stromversorgung und die Ansteuerung der Servomotoren übernimmt. Die Kenntnis der Stellgrößen erlaubt es, näherungsweise die Transformation zwischen verschiedenen Aufnahmen zu berechnen.

Tabelle 3: Technische Daten der Positioniereinheit.

Hersteller Kreuztisch	Isel automation KG, Eiterfeld, Deutschland
Modell	Kreuztisch 1
Antriebsart	Schrittmotor-Kugelgewindetrieb; Spindelsteigung 4 mm
Verfahrbereich	607 mm / Richtung
Wiederholgenauigkeit	< 0.01 mm
Hersteller Rundschalttisch	Isel automation KG, Eiterfeld, Deutschland
Modell	Rundschalttisch RF 1
Antriebsart	Schrittmotor
Verfahrbereich	ca. 350°
Positioniergenauigkeit	62,3" (Winkelsekunden)

2.3.4 Aufbau der Meßsysteme

Die verfügbaren Komponenten lassen sich prinzipiell auf vielfältige Art und Weise zu einem Meßsystem kombinieren. Die idealen Parameter für eine Messaufgabe hängen neben der geforderten Genauigkeit auch von den vorhandenen Beschränkungen ab (Einschbarkeit von Objektbereichen, Platzangebot etc). Exemplarisch seien folgende, typische Konfigurationen dargestellt:

Meßsystem 1: Das Meßsystem 1 (Abbildung 9) besteht aus dem Projektor ABW LCD 640 Cross in Kombination mit einer oder zwei Kameras. Der Abstand zwischen Projektor und Objekt beträgt ca. 1 m, bei einem Messfeld von ca. $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Der Projektor ist kalibriert und trägt zur Punktbestimmung bei. Der Winkel zwischen der optischen Achse des Projektors und der optischen Achse der Kameras beträgt jeweils ungefähr 30° bei einer Basislänge von ca. 25 cm.

Meßsystem 2: Das Meßsystem 2 besteht aus dem Projektor Kindermann CPD Omega XV in Kombination mit zwei Kameras. Der Abstand zwischen Projektor und Objekt beträgt ca. 1,7 m bei einem Messfeld von ca. $70 \times 70 \text{ cm}^2$. Der Projektor ist nicht kalibriert und trägt daher nicht zur Punktbestimmung bei. Der Winkel zwischen den beiden Kameras beträgt ungefähr 40° bei einer Basislänge von ca. 50 cm.

Meßsystem 3: Das Meßsystem 3 besteht aus dem Projektor Davis DLX 10 in Kombination mit zwei Kameras. Der Abstand zwischen Projektor und Objekt beträgt ca. 1,7 m, bei einem Messfeld von ca. $80 \times 80 \text{ cm}^2$. Der Projektor ist nicht kalibriert und trägt daher nicht zur Punktbestimmung bei. Der Winkel zwischen den beiden Kameras beträgt ungefähr 40° bei einer Basislänge von ca. 50 cm.

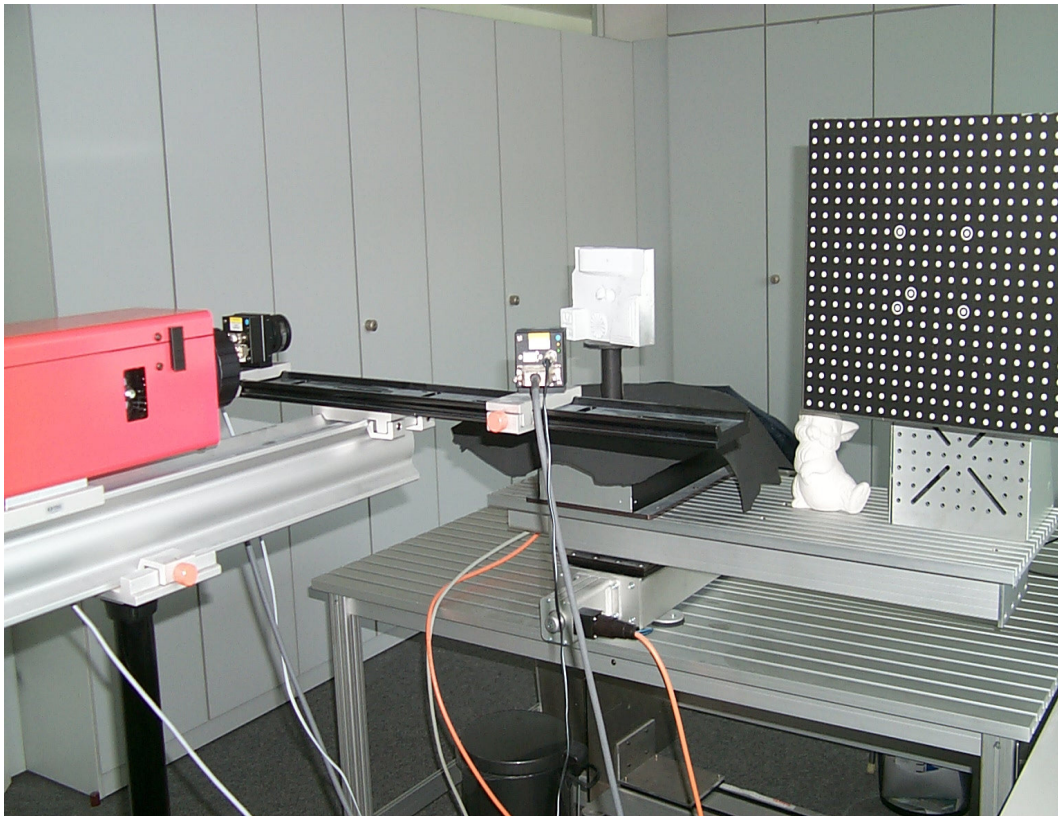


Abbildung 9: Experimenteller Aufbau zur Datenerfassung. Der Projektor (ABW) und die Kameras sind fest über Aluminiumprofile verbunden. Auf einem separaten Tisch befindet sich die 3-achsige Aktorik, welche wahlweise das Objekt oder das Kalibrierfeld ins Messfeld des Sensors bewegt.

2.4 Mathematisches Modell

In diesem Abschnitt wird ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Sensorsystems entwickelt. Dieses Modell ist die Voraussetzung, um aus den erfassten Bilddaten dreidimensionale Information über die zu vermessende Szene abzuleiten. Da die verwendeten Projektionseinheiten die Projektion sowohl horizontaler als auch vertikaler Strukturen erlauben, können sie wie inverse Kameras modelliert werden. Anstatt Licht aus der Szene zu empfangen, bringen sie gezielt Licht in die zu vermessende Szene ein. Durch eine geeignete Auswertung der projizierten Lichtmuster kann indirekt auf die Position in der „Bildebene“ der Projektionseinheit geschlossen werden. Dadurch wird eine gleichartige Behandlung von Kameras und Projektionseinheiten möglich, die beiden Begriffe werden im Sinne des mathematischen Modells austauschbar. Bei der Beschreibung des Modells wird daher nur noch der Begriff Kamera verwendet.

2.4.1 Direkter vs. modellbasierter Ansatz

Die Auswertung der Messungen eines optischen 3D-Sensors kann prinzipiell nach zwei unterschiedlichen Ansätzen erfolgen:

Direkter Ansatz: Bei diesem Ansatz wird eine beliebige Kalibrierfunktion bestimmt, welche die Abbildung zwischen beobachteten Bildkoordinaten und dreidimensionalen Objektkoordinaten leistet. In der Regel werden hierfür Polynome verwendet. Die Parameter dieser Funktion werden im Rahmen der Kalibrierung unter Verwendung einer großen Anzahl bekannter Punkte, welche das gesamte Messvolumen abdecken, bestimmt. Häufig erfolgt die Kalibrierung mit Hilfe der sogenannten Tiefenkalibrierung, das heißt durch das lineare Verschieben und Vermessen eines präzise gefertigten Testfelds in Aufnahme­richtung des Sensors. Die bestimmten Testfeldkoordinaten werden dann zur Berechnung der Koeffizienten eines Polynommodells verwendet.

Vorteil dieses Verfahrens ist, dass keines der für den Messprozess relevanten Phänomene explizit modelliert werden muss. Es findet vielmehr eine implizite Kompensation aller Fehlereinflüsse durch die ermittelten Parameter statt. Viele Streifenprojektionssysteme können zudem nur Streifen in einer Richtung (entweder horizontal oder vertikal) projizieren, was die Übertragung etablierter Kalibrierverfahren für Kameras erschwert, für direkte Kalibrierverfahren jedoch kein Problem darstellt.

Ein offensichtlicher Nachteil des Verfahrens ist die Verwendung eines präzise gefertigten Kalibrierobjekts und die Notwendigkeit, dieses präzise im Raum positionieren zu können. Dies stellt speziell für Sensoren mit einem großen Messbereich ein Problem dar.

Da die ermittelte Kalibrierfunktion als Black-Box genutzt wird, ist keine Aussage über die Genauigkeit der Punktbestimmung möglich.

Beispiele für die Anwendung des direkten Ansatzes finden sich in [Trucco et al. 1998], [Wolf 1996].

Modellbasierter Ansatz: Dem modellbasierten Ansatz liegt ein mathematisches Modell des Sensors zugrunde. Dieses beschreibt die Projektion dreidimensionaler Objektkoordinaten in den zweidimensionalen Bildraum unter Berücksichtigung der Sensorgeometrie und von Abbildungsfehlern in den optischen Komponenten.

Mit den Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie ist die Bestimmung dieser Parameter prinzipiell sogar während der Messaufgabe möglich. In der Regel wird die Kalibrierung jedoch vorab mit Hilfe einer Anzahl von Messungen eines speziellen Testfeldes durchgeführt. Da dieses lediglich während der Kalibrierung stabil sein muss, entfällt die Forderung nach einem genauen Kalibriernormal. Für die Festlegung des Maßstabs ist jedoch eine bekannte Strecke notwendig. Ist das Testfeld mit automatisch identifizierbaren Merkmalen ausgestattet, ist die vollständige oder teilweise Automatisierung des Kalibriervorgangs möglich.

Einen Nachteil des Ansatzes stellen die mit zunehmenden Genauigkeitsanforderungen komplizierter werdenden Sensormodelle dar. Effekte, welche im Modell nicht berücksichtigt werden, führen zu systematischen Fehlern in den Messwerten. Die Automatisierung des Kalibriervorgangs erfordert zwar keine präzise Aktorik, diese muss jedoch im Vergleich zur Tiefenkalibrierung eine höhere Zahl an Freiheitsgraden aufweisen.

Beispiele für die Anwendung des modellbasierten Ansatzes finden sich in [Stahs 1990; Stahs und Wahl 1990; Valkenburg und McIvor 1996; Valkenburg und McIvor 1995; Salvi 1998; Pulli 1999; Riechmann 1995; Trobina 1995].

In [Brenner, Böhm und Gühring 1999] wird der direkte Vergleich der beiden Ansätze für die Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors beschrieben, wobei beide Verfahren ungefähr die gleiche Messgenauigkeit erreichen. Da für die Untersuchungen in dieser Arbeit die Kovarianzmatrix der Messpunkte von großer Bedeutung ist, wird dem modellbasierten Ansatz der Vorzug gegeben.

2.4.2 Der Stereonormalfall

Mit dem Stereonormalfall wird zunächst ein idealisiertes Sensormodell eingeführt. Dieses idealisierte Modell hat einerseits den Vorteil, dass sich für grobe Abschätzungen einfache Rechenformeln ergeben. Andererseits erlaubt die Analyse der Unzulänglichkeiten des Modells dessen sukzessive Erweiterung, um die Beschreibung realer Sensorsysteme zu ermöglichen.

Der Stereonormalfall basiert auf dem Grundmodell der Zentralperspektive und verfügt über eine besonders einfache Aufnahmegeometrie (Abbildung 10). Zwei ideale Lochkameras mit identischer Kammerkonstante c sind parallel zueinander und senkrecht zur Stereobasis B ausgerichtet. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems fällt mit dem Projektionszentrum O' der linken Kamera zusammen. Die positive Richtung der X -Achse des Weltkoordinatensystems wird in Richtung auf O'' gewählt. Die Y -Achse zeigt in die Zeichenebene hinein.

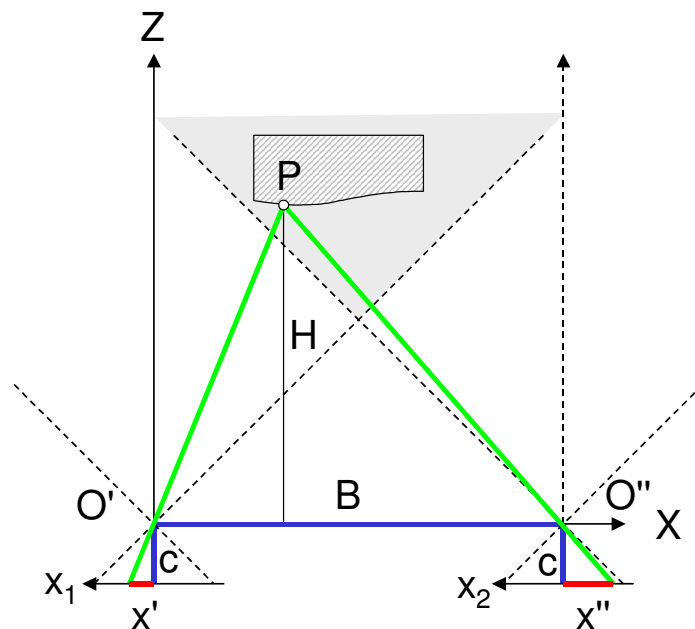


Abbildung 10: Der Stereonormalfall.

Die Koordinaten eines Punktes $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ im grau schattierten Stereobereich ergeben sich zu

$$X = \frac{H}{c} x' = m_b x' \quad (2.1)$$

$$Y = \frac{H}{c} y' = m_b y' \quad (2.2)$$

$$Z = H = \frac{Bc}{x' - x''} = \frac{Bc}{p_x} \quad (2.3)$$

wobei p_x die x-Parallaxe $x' - x''$ und $m_b = \frac{Z}{c}$ die Bildmaßstabszahl darstellt.

Die fehlertheoretische Betrachtung des Stereonormalfalls erfolgt durch die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Gleichungen (2.1)-(2.3). Dabei wird angenommen, dass nur die im Bildraum gemessenen Größen x' , y' und x'' fehlerbehaftet sind. Für gegebene $\sigma_{x'}$, $\sigma_{y'}$ und σ_{p_x} ergibt sich

$$\sigma_X = \sqrt{\left(\frac{x'}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_x}\right)^2 + (m_b \sigma_{x'})^2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{y'}{c} m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_x}\right)^2 + (m_b \sigma_{y'})^2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_Z = m_b \frac{Z}{B} \sigma_{p_x} = \frac{Z^2}{cB} \sigma_{p_x} \quad (2.6)$$

Die Standardabweichung der X- und Y-Koordinate nimmt also linear in Z zu, während die Standardabweichung der Z-Koordinate eine quadratische Zunahme in Z erwarten lässt.

2.4.3 Verallgemeinerung auf beliebige Sensoren nach dem Triangulationsprinzip

Der Stereonormalfall stellt in vielerlei Hinsicht einen idealisierten Sonderfall der optischen Triangulation dar. Um die Beschreibung realer Sensoren zu ermöglichen, müssen die gemachten Einschränkungen aufgegeben und durch eine Erweiterung der Modellbildung ersetzt werden. Diese Erweiterungen sind:

Innere Orientierung der Kameras: Um präzise Messungen durchführen zu können, ist die exakte Kenntnis der geometrischen Verhältnisse innerhalb der Kameras notwendig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass jede reale Optik Fehler aufweist, welche zu Verzerrungen führen. Das mathematische Modell muss die geometrischen Verhältnisse innerhalb der Kamera durch geeignete Parameter beschreiben. In der Photogrammetrie werden diese Parameter als die Parameter der inneren Orientierung bezeichnet.

Äußere Orientierung der Kameras: Das Modell der Zentralperspektive beschreibt die Abbildung vom dreidimensionalen Objektraum in den zweidimensionalen Bildraum. Aufgrund der Festlegung der Koordinatensysteme ergeben sich beim Stereonormalfall besonders einfache Abbildungsgleichungen. Im allgemeinen Fall sind sechs unabhängige Parameter notwendig, um die Position des Projektionszentrums und die Orientierung der Kamera im Objektkoordinatensystem zu beschreiben. Diese Parameter werden als die Parameter der äußeren Orientierung bezeichnet.

Anzahl der Kameras: Stehen in einem Sensorsystem mehr als zwei Kameras zur Verfügung, können die zusätzlichen Beobachtungen zu einer Erhöhung der Redundanz und damit zur Verbesserung der Messgenauigkeit beitragen. Es ist daher wünschenswert, alle verfügbaren Beobachtungen gemäß ihrer Genauigkeit für die Punktbestimmung zu verwenden. Redundante Beobachtungen sind auch notwendig, um grobe Fehler in den Messdaten aufzudecken.

Abbildungsschärfe: Entgegen den Annahmen des zentralperspektivischen Modells erfolgt keine punktförmige Vereinigung aller Abbildungsstrahlen im Projektionszentrum. Aufgrund der Dimension der Blendenöffnung werden die Abbildungsstrahlen eines Objektpunktes unscharf auf einen Bereich in der Bildebene abgebildet. Das Maß der Unschärfe hängt von verschiedenen Faktoren ab. Es begrenzt die erzielbare Messgenauigkeit sowie den Messbereich eines Sensorsystems.

2.4.4 Innere Orientierung

Die Parameter der inneren Orientierung beschreiben die Lage des Projektionszentrums in einem kamerafesten Koordinatensystem sowie Abweichungen vom Modell der Zentralperspektive. Die Bestimmung der Parameter erfolgt im Rahmen der Systemkalibrierung. Bei bekannter innerer Orientierung können gemessene Bildkoordinaten um die Fehlereinflüsse korrigiert werden, was die Auswertung im Modell der Zentralperspektive möglich macht.

In diesem Zusammenhang sind zwei Koordinatensysteme von Bedeutung:

1. Das *Pixelkoordinatensystem*. Ein digitales Bild besteht aus einer Matrix aus diskreten Bildelementen (Pixel) mit M Spalten und N Zeilen. Der Spaltenindex c und der Zeilenindex r eines Punktes geben dessen Lage im Pixelkoordinatensystem wieder. Der Ursprung des Pixelkoordinatensystems liegt in der Mitte des Pixels in der linken unteren Bildecke. Durch die Wahl der c -Achse nach rechts und der r -Achse nach oben entsteht ein Rechtssystem. Die Skalierung der beiden Koordinatenachsen ist jedoch nur im Falle von quadratischen Pixeln identisch.
2. Das *Bildkoordinatensystem*. Das Bildkoordinatensystem ist ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung in der Bildmitte. Dieses Koordinatensystem liegt allen geometrischen Berechnungen im Bildraum zugrunde. Koordinaten im Pixelkoordinatensystem können durch eine Affintransformation in das Bildkoordinatensystem überführt werden.

Die Parameter der inneren Orientierung sind die Kammerkonstante c , die Lage des Bildhauptpunkts x_0 , y_0 , sowie weitere (sog. zusätzliche) Parameter zur Korrektur von Abbildungsfehlern. In der Praxis sind unterschiedliche Parametersätze gebräuchlich. Nicht zuletzt wegen der freien Verfügbarkeit des Source-Kodes ist im Bereich des Computer-Visions der Ansatz von Tsai [Tsai 1986; Tsai's Camera Calibration Source Code 1986] sehr populär. In der Photogrammetrie werden häufig physikalisch motivierte Parametersätze verwendet, wobei viele der im photogrammetrischen Nahbereich verwendeten Kameramodelle auf die Veröffentlichung von Brown zurückgehen [Brown 1971].

Im Rahmen dieser Arbeit wird das in der Bündelausgleichungssoftware *Australis* des Department of Geomatics der University of Melbourne benutzte Kameramodell verwendet [Fraser 1997]. Insgesamt 10 Parameter dienen zur Beschreibung der inneren Orientierung. Die Formulierung ist so gewählt, dass sich Korrekturen für die verzeichneten Bildkoordinaten x' als Funktion der verzeichneten Bildkoordinaten berechnen lassen¹.

¹ Im Gegensatz dazu existieren Kameramodelle, welche die zusätzlichen Parameter in umgekehrter Weise anbringen, d.h. die Modelle erlauben die Berechnung der verzeichneten Bildkoordinaten x' als Funktion der idealen Bildkoordinaten x .

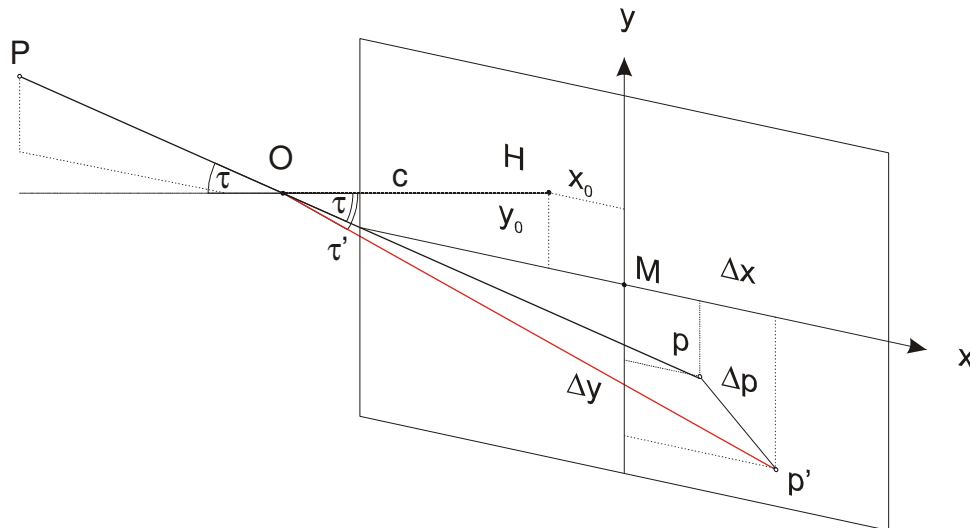
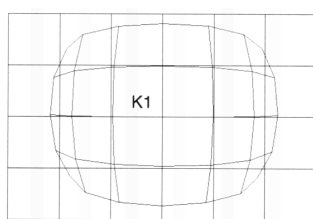


Abbildung 11: Zur Definition der inneren Orientierung eines Messbilds.

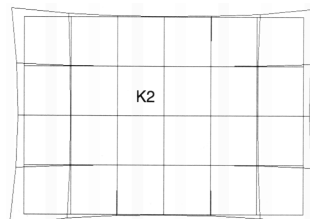
Die beiden Parameter x_0 und y_0 legen die Lage des Bildhauptpunktes fest. Dadurch ergibt sich das Projektionszentrum im Bildkoordinatensystem zu

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ -c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

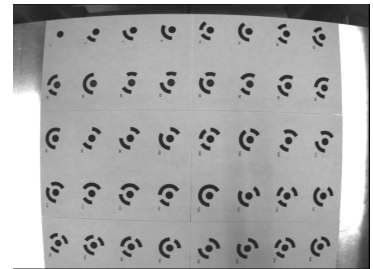
wobei die Kammerkonstante c der lotrechte Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene ist und bei Fokussierung auf unendlich ungefähr der Brennweite f des Objektivs entspricht. Die Korrektur von Verzeichnungseffekten erfolgt mit Hilfe von Polynomen, deren Einfluss in Abbildung 12 dargestellt ist.



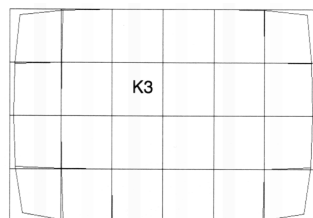
(a)



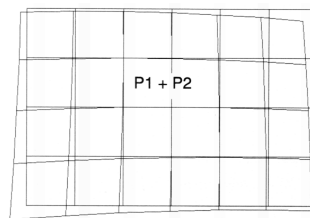
(b)



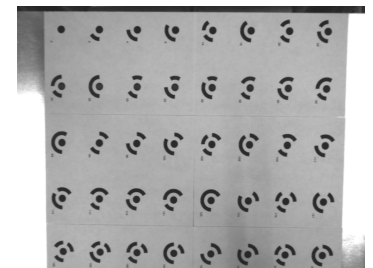
(c)



(d)



(e)



(f)

Abbildung 12: (a), (b), (d), (e) Einfluss verschiedener Verzeichnungsparameter auf synthetische Bilddaten (aus [Beyer 1992]). (c) Reales Bild einer Weitwinkelkamera mit starkem Verzeichnungseinfluss. (f) Mit Hilfe der Kalibrierparameter korrigiertes Bild.

Zur Korrektur der verzeichneten Bildkoordinaten x' , y' werden diese zunächst auf den Bildhauptpunkt bezogen

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x' - x_0 \\ \bar{y} &= y' - y_0\end{aligned}\quad (2.8)$$

Mit $r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ ergibt sich als Korrektur für die Radialverzeichnung

$$\begin{aligned}dr &= r^3 K_1 + r^5 K_2 + r^7 K_3 \\ dr_x &= \frac{\bar{x}}{r} dr \\ dr_y &= \frac{\bar{y}}{r} dr\end{aligned}\quad (2.9)$$

Die radialsymmetrische Verzeichnung stellt in der Regel den dominanten Anteil der Abbildungsfehler dar. Sie entsteht durch Variationen im Brechungsverhalten der Linsen und nimmt mit zunehmender Entfernung vom Bildhauptpunkt zu.

Die tangentielle oder asymmetrische Verzeichnung entsteht durch die sog. Dezentrierung des Linsensystems, d.h. durch Fehlstellungen der Linsen bezüglich der optischen Achse und wird daher in der englischsprachigen Literatur auch als *decentering distortion* bezeichnet. Ihr Einfluss lässt sich mit folgendem Ansatz korrigieren

$$\begin{aligned}dd_x &= (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2 \\ dd_y &= 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2\end{aligned}\quad (2.10)$$

Der letzte Korrekturanteil, als Affinität oder Scherung bezeichnet, kompensiert unterschiedliche Maßstäbe für die x - und y -Achse und wurde ursprünglich für die Kompensation von Filmverzug bei analogen Filmkameras entwickelt. Bei der digitalen Photogrammetrie lassen sich damit vor allem Effekte modellieren, welche bei der Digitalisierung von Bildern analoger Kameras mit Hilfe von Framegrabbern entstehen.

Der Ansatz lautet:

$$\begin{aligned}da_x &= B_1\bar{x} + B_2\bar{y} \\ da_y &= 0\end{aligned}\quad (2.11)$$

Damit ergibt sich für die korrigierte Punktposition

$$\begin{aligned}x &= \bar{x} + dr_x + dd_x + da_x \\ y &= \bar{y} + dr_y + dd_y + da_y\end{aligned}\quad (2.12)$$

Numerische Werte für die Parameter der inneren Orientierung werden im Rahmen der Kalibrierung bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Parameter nicht unkorreliert sind. Dadurch wird die Reproduzierbarkeit der Werte für die einzelnen Parameter eingeschränkt, weshalb ein Parametersatz immer im Ganzen gesehen werden muss.

2.4.5 Äußere Orientierung

Durch die äußere Orientierung werden die Position und Orientierung einer Kamera im übergeordneten Koordinatensystem festgelegt. Für die zentralperspektivische Abbildung eines Punktes müssen dessen Koordinaten zunächst auf das Projektionszentrum reduziert werden. Anschließend wird der Punkt einer räumlichen Rotation unterzogen, welche die Achsen des übergeordneten Koordinatensystems parallel zu den Koordinatenachsen des Bildkoordinatensystems ausrichtet. Nun kann die Projektion in den zweidimensionalen Bildraum erfolgen, wodurch ideale, d.h. von Abbildungsfehlern freie, Bildkoordinaten entstehen.

Den Zusammenhang zwischen den 3D-Objektkoordinaten und 2D-Bildkoordinaten stellen die sogenannten Kollinearitätsgleichungen her

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \frac{Z_x}{N} \\ y &= -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = -c \frac{Z_y}{N} \end{aligned} \quad (2.13)$$

wobei die r_{ij} Elemente einer räumlichen Drehmatrix $\mathbf{R}$ mit $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$; $\det \mathbf{R} = 1$ sind und $\mathbf{X}_0(X_0, Y_0, Z_0)$ die Position des Projektionszentrums im übergeordneten Koordinatensystem darstellt. Eine räumliche Rotationsmatrix lässt sich mit Hilfe von 3 unabhängigen Parametern (z.B. Cardan-Winkel, Euler-Winkel, Quaternionen) parametrisieren. Insgesamt ergeben sich 6 unabhängige Parameter der äußeren Orientierung.

2.4.6 Punktbestimmung

Bei allgemeiner Position und Orientierung der Kameras erfolgt die Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes im Objektraum mit Hilfe des räumlichen Vorwärtsschnitts. Als Beobachtungen dienen die Bildkoordinaten eines Punktes, welche in N Bildern gemessen werden. Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung der Kameras lassen sich die unbekannten Koordinaten X, Y, Z des Punktes $\mathbf{P}$ mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (2.13) im Zuge einer Ausgleichung berechnen.

Die Näherungswerte für das nichtlineare Ausgleichungsproblem erhält man durch Lösen des linearen Gleichungssystems für 2 Kameras (vgl. Abbildung 13)

$$[\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \mathbf{d}] \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b} \quad (2.14)$$

mit dem Unbekanntenvektor $\boldsymbol{\lambda}^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_d]$ zu

$$\mathbf{P}^0 = \mathbf{X}_{01} + \lambda_1 \mathbf{v}_1 + \frac{1}{2} \lambda_d \mathbf{d} \quad (2.15)$$

Der Betrag des Vektors $\lambda_d \mathbf{d}$ kann als Gütekriterium für die Punktbestimmung angesehen werden. Die benötigten Größen werden folgendermaßen berechnet

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}_2 &= \mathbf{R}_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{d} &= \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{b} &= \mathbf{X}_{02} - \mathbf{X}_{01} \end{aligned} \quad (2.16)$$

mit i : Bildindex; $i = 1 \dots N$

$\mathbf{R}_i$: Rotationsmatrix der äußeren Orientierung der Kamera i

$\mathbf{X}_{0i}$: Position des Projektionszentrums der Kamera i

c_i : Kammerkonstante der Kamera i

x_i, y_i : Bildkoordinaten des Punktes $\mathbf{P}$ in Kamera i

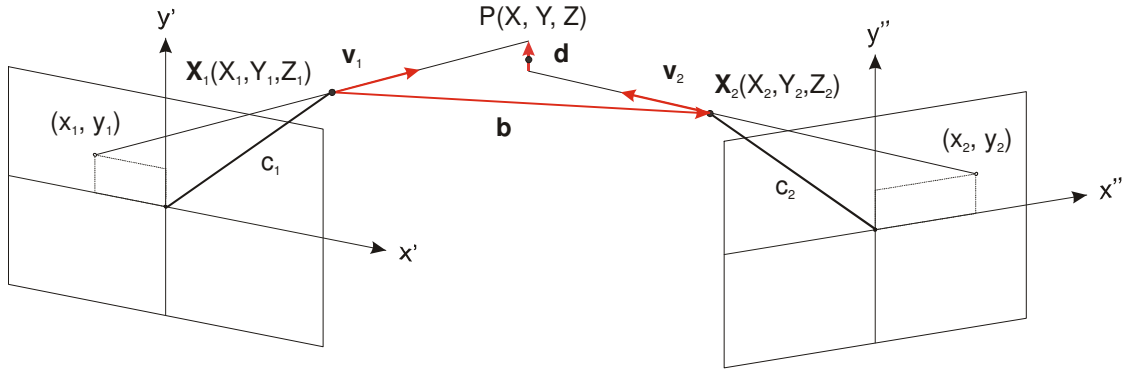


Abbildung 13: Skizze zur allgemeinen Lösung der Punktbestimmung (Vorwärtseinschnitt).

Die Ausgleichung der unbekannten Objektkoordinaten erfolgt im Gauss-Markov-Modell. Mit Hilfe der Näherungswerte für die Objektkoordinaten werden die Verbesserungsgleichungen

$$\begin{aligned} x_i + v_{x_i} &= f_x(\mathbf{R}_i, \mathbf{X}_{0i}, X, Y, Z) \\ y_i + v_{y_i} &= f_y(\mathbf{R}_i, \mathbf{X}_{0i}, X, Y, Z) \end{aligned} \quad (2.17)$$

mit X, Y, Z : Objektkoordinaten des Punktes

nach Taylor linearisiert.

Dazu sind die Ableitungen nach den unbekannten Objektpunktkoordinaten notwendig:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial X} &= c \frac{(r_{13}Z_x - r_{11}N)}{N^2} & \frac{\partial y}{\partial X} &= c \frac{(r_{13}Z_y - r_{12}N)}{N^2} \\ \frac{\partial x}{\partial Y} &= c \frac{(r_{23}Z_x - r_{21}N)}{N^2} & \frac{\partial y}{\partial Y} &= c \frac{(r_{23}Z_y - r_{22}N)}{N^2} \\ \frac{\partial x}{\partial Z} &= c \frac{(r_{33}Z_x - r_{31}N)}{N^2} & \frac{\partial y}{\partial Z} &= c \frac{(r_{33}Z_y - r_{32}N)}{N^2} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Mit der Designmatrix

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial z}{\partial X} \\ \frac{\partial x}{\partial Y} & \frac{\partial y}{\partial Y} & \frac{\partial z}{\partial Y} \\ \frac{\partial x}{\partial Z} & \frac{\partial y}{\partial Z} & \frac{\partial z}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

dem gekürzten Beobachtungsvektor

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_x(\mathbf{R}_i, \mathbf{X}_{0i}, X^0, Y^0, Z^0) \\ f_y(\mathbf{R}_i, \mathbf{X}_{0i}, X^0, Y^0, Z^0) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dem Verbesserungsvektor

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{x_i} \\ v_{y_i} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

und dem Unbekanntenvektor

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

ergibt sich das funktionale Modell:

$$\mathbf{E}(\mathbf{l}) = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2.23)$$

Das stochastische Modell lautet:

$$\mathbf{P} = \sigma_0^2 \Sigma_l^{-1} \quad (2.24)$$

Mit dem Normalgleichungssystem

$$\mathbf{N}\mathbf{x} = \mathbf{n} \quad (2.25)$$

mit $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$: Normalgleichungsmatrix

$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$: Absolutglied

ergeben sich iterativ der Lösungsvektor

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} \quad (2.26)$$

dessen Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (2.27)$$

und die ausgeglichenen Koordinaten des Punktes

$$\hat{\mathbf{P}} = \mathbf{P}^0 + \hat{\mathbf{x}} \quad (2.28)$$

Eine erwartungstreue Schätzung der Varianz der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0^2$ lässt sich aus dem Residuenvektor

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad (2.29)$$

berechnen

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{n - u} = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{2N - 3} \quad (2.30)$$

mit n : Anzahl der Beobachtungen

u : Anzahl der Unbekannten

Die Betrachtung der Redundanz $r = n - u$ zeigt, dass bereits bei der Auswertung von zwei Bildern eine Überbestimmung vorliegt. Durch jedes weitere Bild kommen zwei weitere Beobachtungen hinzu. Für die Beurteilung der Genauigkeit sind verschiedene Genauigkeitsmaße gebräuchlich. Sie beruhen auf der Analyse der Kovarianzmatrix der geschätzten Punktkoordinaten:

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_{YY} & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Ein orientierungsinvariantes Maß für die Punktgenauigkeit stellt der Helmertsche oder mittlere Punktfehler dar:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 + \sigma_{ZZ}^2} \quad (2.32)$$

Die Koeffizienten der Kovarianzmatrix beschreiben ein Ellipsoid in allgemeiner Lage. Durch Multiplikation mit dem Quantil der $\chi^2_{3,1-\alpha}$ -Verteilung erhält man ein Fehler- oder Konfidenzellipsoid, in dessen Volumen der wahre Wert mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $1-\alpha$ liegt. Die Länge und Orientierung der Halbachsen des Konfidenzellipsoids kann mit Hilfe einer Eigenwert-Eigenvektorzerlegung bestimmt werden, wobei der Betrag der Eigenwerte der Länge der jeweiligen Halbachse, der zugehörige Eigenvektor deren Richtung entspricht.

2.4.7 Aktormodell

In der Robotik wird die Entwicklung eines mathematischen Modells für das kinematische Verhalten eines Roboters als kinematische Modellierung bezeichnet. Das kinematische Modell stellt den Zusammenhang zwischen den Stellgrößen des Roboters und der Pose des Endeffektors her. Anforderungen an ein kinematisches Modell sind:

Vollständigkeit: Das Modell muss in der Lage sein, den gesamten Bewegungsumfang des Roboters zu beschreiben.

Proportionalität: Dies bedeutet, dass die Parametrisierung frei von Singularitäten ist. Anders ausgedrückt soll eine stetige Veränderung der Position und Orientierung einer beliebigen Achse durch eine stetige Veränderung der Modellparameter beschrieben werden.

Um den Modellierungsprozess zu vereinheitlichen, wurden in der Robotik Konventionen hinsichtlich der Parametrisierung und Notation getroffen (z. B. [Denavit und Hartenberg 1955; Hayati und Mirmirani 1985]). Grundsätzlich wird zwischen Gelenken (joints) und Verbindungen (links) unterschieden. Jedem Gelenk wird eine Gelenkvariable zugeordnet. Die Gelenke werden weiter in lineare Gelenke (prismatic joints) und Drehgelenke (revolute joints) unterteilt. Nach einem festen Schema wird jeder Gelenk-Verbindungs-Kombination eine lineare Transformation zugeordnet. Die Verkettung dieser Transformationen beschreibt die gesamte innere Geometrie des Roboters. Eine besonders übersichtliche Notation ergibt sich unter Verwendung von homogenen Koordinaten. Die Einbettung des Roboterkoordinatensystems in das übergeordnete Koordinatensystem sowie die Bestimmung der tatsächlichen Geometrie der Gelenke und Verbindungen ist Aufgabe der Roboterkalibrierung. Sie erfolgt in der industriellen Praxis häufig mit Hilfe von photogrammetrischen Messsystemen [Godding, Lehmann und Rawiel 1997].

Um die Modellierung und Kalibrierung des hier vorliegenden 3-achsigen Roboters zu vereinfachen, wird auf die Konformität mit einer allgemeinen Modellierkonvention verzichtet. Stattdessen wird ein auf die Problemstellung reduziertes Aktormodell verwendet.

Die Richtungen der Achsen werden durch einen Referenzpunkt, welcher der Position der Rotationsachse $\mathbf{P}_{ref}$ in der Nullstellung beider Linearachsen entspricht, und je einen normierten Richtungsvektor beschrieben (Abbildung 14). Die Position der Rotationsachse $\mathbf{P}_{rot}$ ist also durch

$$\mathbf{P}_{rot} = \mathbf{P}_{ref} + \lambda_1 \mathbf{r}_1 + \lambda_2 \mathbf{r}_2 \quad (2.33)$$

mit $\mathbf{r}_i$: normierter Richtungsvektor der i . Linearachse

λ_i : Stellung der i . Linearachse

gegeben. Zur Transformation eines Datensatzes vom Sensorkoordinatensystem ins übergeordnete Koordinatensystem muss zunächst auf die Position der Achse reduziert werden:

$$T_1 = \text{Trans}(-\mathbf{P}_{rot}) \quad (2.34)$$

Anschließend wird um den Stellwinkel α^1 der Rotationsachse gedreht:

$$T_2 = \text{Rot}(\alpha) \quad (2.35)$$

Nach erfolgter Rotation wird die ursprüngliche Position wiederhergestellt:

$$T_3 = \text{Trans}(\mathbf{P}_{rot}) \quad (2.36)$$

Zur Kompensation der Translationskomponente wird um

$$T_4 = \text{Trans}(\mathbf{P}_{ref} - \mathbf{P}_{rot}) \quad (2.37)$$

verschoben. Die Gesamttransformation ergibt sich durch Verkettung der einzelnen Transformationen:

$$T_s^W = T_4 \cdot T_3 \cdot T_2 \cdot T_1 = \text{Trans}(\mathbf{P}_{ref} - \mathbf{P}_{rot}) \text{Trans}(\mathbf{P}_{rot}) \text{Rot}(-\alpha) \text{Trans}(-\mathbf{P}_{rot}) \quad (2.38)$$

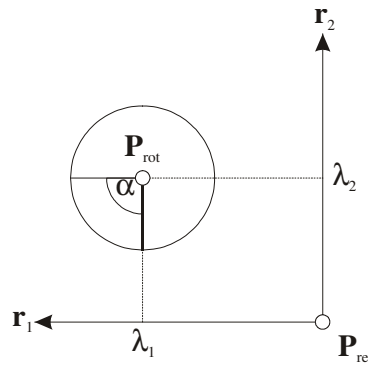


Abbildung 14: Skizze zum Aktormodell.

2.4.8 Zusammenhang der Koordinatensysteme

Der Zusammenhang der verschiedenen Koordinatensysteme innerhalb des Systems zur 3D-Datenerfassung ist in Abbildung 15 dargestellt. Die originären Messungen sind mit Abbildungsfehlern behaftet und liegen im Pixelkoordinatensystem vor. Durch eine Affintransformation können sie in verzeichnungsbehaftete Bildkoordinaten umgerechnet werden. Mit den Parametern der inneren Orientierung ist es möglich, die Bildkoordinaten von Abbildungsfehlern zu befreien. Die Messungen mehrerer Kameras werden dazu verwendet, Objektkoordinaten im Sensorkoordinatensystem zu berechnen. Das Sensorkoordinatensystem stimmt für die Nullstellung der Aktorik mit dem Weltkoordinatensystem überein. Die Manipulation der Position und Orientierung des Objekts mit Hilfe der Aktorik kommt der Erfassung des Objekts von unterschiedlichen Standpunkten und Richtungen gleich. Messungen im Sensorkoordinatensystem können mit Hilfe einer räumlichen Starrkörpertransformation ins Weltkoordinatensystem überführt werden.

¹ Die Drehung des Rotationstisches im Uhrzeigersinn führt zu einem positiven Vorzeichen des Winkels α .

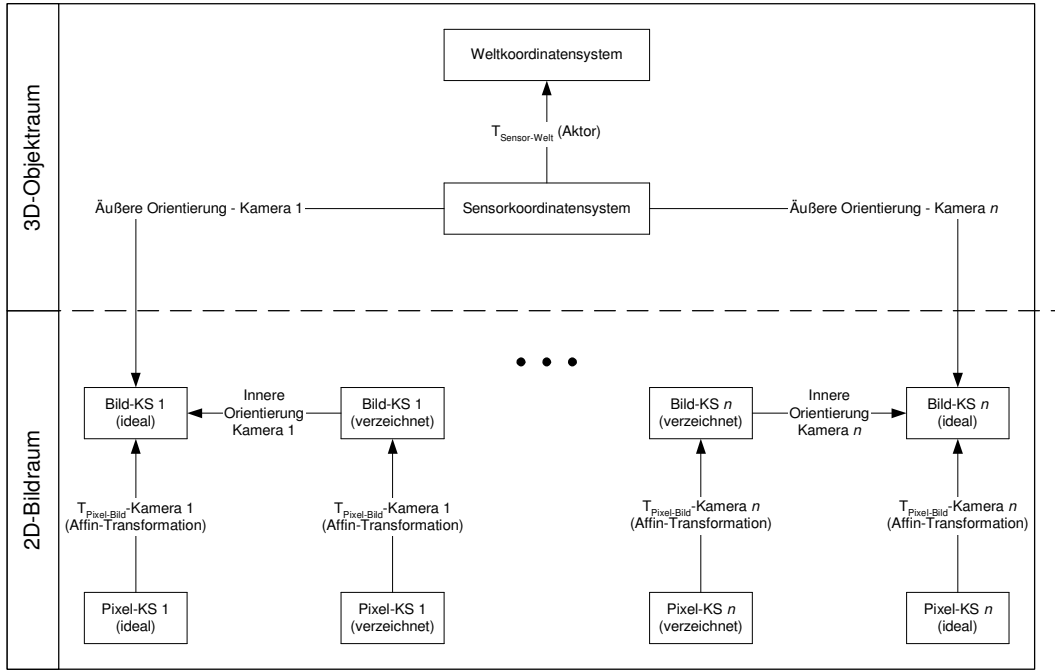


Abbildung 15: Zusammenhang der verschiedenen Koordinatensysteme bei der Datenerfassung.

2.5 Datenrepräsentation

Innerhalb eines Systems zur 3D-Datenerfassung und -verarbeitung kommt der Repräsentation der Daten eine große Bedeutung zu. Aufgrund der erheblichen Datenmengen muss einerseits eine kompakte Speicherung gewährleistet sein. Andererseits müssen die zugrundeliegenden Datenstrukturen typische Operationen durch einen effizienten Zugriff unterstützen. Im Kontext dieser Arbeit sind folgende Datenarten relevant:

Geometrische Information: Information über die Form der Objektoberfläche ist in den erfassten Bildern durch die Anordnung der Grauwerte in den Bildmatrizen implizit enthalten. Eines der wesentlichen Ziele der Prozessierung ist, die geometrische Information in eine explizite Beschreibung zu überführen und in geeigneter Form bereitzustellen.

Es hat sich gezeigt, dass in verschiedenen Stufen der Verarbeitungskette unterschiedliche Datenrepräsentationen zweckmäßig sind. Digitale Bilder bieten sich zur effizienten Speicherung skalarer oder vektorwertiger Daten an, welche in einem regelmäßigen Raster mit M Spalten und N Zeilen angeordnet sind. Da die bei der Datenerfassung anfallenden Messbilder bereits in diesem Format vorliegen, stellen sie die natürliche Repräsentation für die weitere Verarbeitung und Speicherung der Daten dar. Digitale Bilder können ganz allgemein als Abbildung

$$\mathbf{f}(x, y): \mathbb{R}^2 \supseteq (x, y) \rightarrow \mathbf{v} = \mathbf{f}(x, y) \in \mathbb{R}^n \quad (2.39)$$

beschrieben werden, wobei x und y nur diskrete Werte $x = c \cdot \Delta x \mid \Delta x \in \mathbb{R}, c \in \{0, \dots, M-1\}$ und $y = r \cdot \Delta y \mid \Delta y \in \mathbb{R}, r \in \{0, \dots, N-1\}$ annehmen. Δx und Δy werden als Raster- oder Gitterweite bezeichnet. Da $\mathbf{f}$ eine vektorwertige Funktion darstellt, ist es möglich, die Koordinaten der Messpunkte sowie weitere Information wie Normalenvektoren und Farbe in kompakter Weise zu verwalten.

Für Positionsangaben in Bildern sind unterschiedlich definierte Koordinatensysteme gebräuchlich. Im Folgenden wird von einem rechtshändigen, kartesischen *Pixelkoordinatensystem*, dessen Ursprung im Mittelpunkt des Pixels in der linken unteren Bildecke liegt, ausgegangen. Damit besitzt das Pixel in der rechten oberen Ecke die Koordinaten $(M-1, N-1)$.

Bei der Formulierung des Zusammenhangs zwischen dreidimensionalen Objektkoordinaten und zweidimensionalen Koordinaten im Bildraum ist es üblich, ein sogenanntes *Bildkoordinatensystem* einzuführen, dessen Ursprung in der Bildmitte liegt. Beim Bildkoordinatensystem handelt es sich ebenfalls um ein rechthändiges, kartesisches Koordinatensystem.

Neben der Kompaktheit der Repräsentation liegt ein weiterer Vorteil in der einfachen Verarbeitung rasterförmiger Daten. Zum einen legt die Anordnung der Daten in einem Gitter die Nachbarschaft der Datenelemente und damit implizit deren Topologie fest. Zum anderen lassen sich viele Bildverarbeitungsoperationen unter Ausnützung der rasterförmigen Struktur der Daten sehr effizient formulieren. In dieser Arbeit werden Bilder für die Speicherung folgender Daten verwendet:

Tabelle 4: Verwendete Bildarten und Datentypen.

<i>Information</i>	<i>Name</i>	<i>Bits/Pixel</i>	<i>Datentyp</i>
Maskenbilder	m	8	char
Grauwertbilder	g	8	char
Farbbilder	r, g, b	3×8	char
Bildkoordinaten	x, y	2×32	float
Objektkoordinaten	X, Y, Z	3×64	double
Texturkoordinaten	s, t	2×32	float
Varianzen/Kovarianzen	$\sigma_{XX}, \sigma_{XY}, \sigma_{XZ}, \sigma_{YY}, \sigma_{YZ}, \sigma_{ZZ}$ s	6×32	float

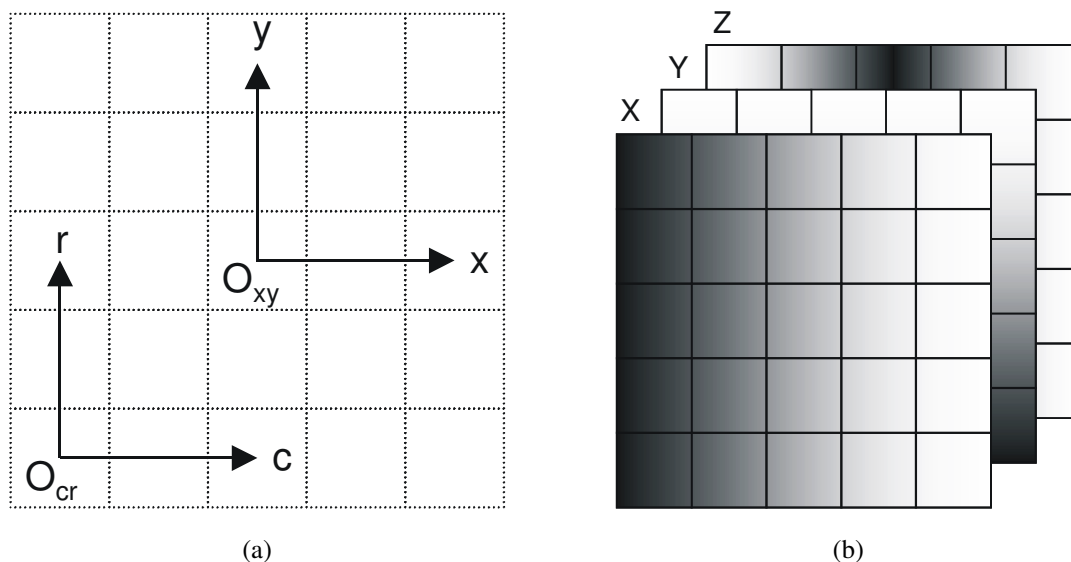


Abbildung 16: (a) Definition des Pixelkoordinatensystems c,r und des Bildkoordinatensystems x,y.
(b) Die Kombination mehrerer Bilder erlaubt die Beschreibung vektorwertiger Daten.

Radiometrische Information: Digitale Bilder des zu erfassenden Objekts stellen den Ausgangspunkt der Datenverarbeitung dar. Ihr Inhalt wird durch die zur Messung verwendete Beleuchtung, Fremdlicht, das Objekt selbst und die umgebende Szene bestimmt. Im Rahmen der Auswertung lassen sich aus den gemessenen Intensitätswerten die Farbe oder Reflexionseigenschaften der Oberfläche bestimmen.

Die Reflektivität der Oberfläche wird durch die Zuordnung von Grauwerten beschrieben. Es findet eine Quantisierung mit 8 Bit statt, sodass insgesamt 256 unterschiedliche Grauwerte zwischen 0 (schwarz) und 255 (weiß) dargestellt werden können.

Für die Speicherung von Farben existieren unterschiedliche Farbmodelle. Im benutzten RGB-Modell werden je 8 Bit für den roten, grünen und blauen Farbkanal verwendet. Insgesamt lassen sich also $2^{24} = 16.777.216$ unterschiedliche Farben darstellen.

Stochastische Information: Messergebnisse jeder Art beschreiben den wahren Sachverhalt nur mit einer beschränkten Genauigkeit. Für die Interpretation von Messungen ist die Kenntnis der Messgenauigkeit von entscheidender Bedeutung. Sie beschreibt „das Ausmaß der Annäherung des Messergebnisses an den wahren Wert der Meßgröße“ [ISO 10012-1 1992].

Zur quantitativen Beschreibung der Genauigkeit von Messungen und daraus abgeleiteten Größen werden wohldefinierte Genauigkeitsmaße verwendet.

In dieser Arbeit wird zur Beschreibung der Genauigkeit n -dimensionaler Größen deren Kovarianzmatrix Σ ,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ sym. & \cdots & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

d.h. die Matrix der zweiten zentralen Momente verwendet.

Eine geometrische Interpretation der Kovarianzmatrix ist durch die Vorstellung eines n -dimensionalen Hyperellipsoids in allgemeiner Lage gegeben.

2.6 Kalibrierung

Die Beschreibung der realen Welt im Computer erfolgt mit Hilfe von Modellen. Die Komplexität der Modelle steigt mit zunehmenden Genauigkeitsanforderungen. Das Grundmodell für die photographische Abbildung ist die Zentralperspektive. Demzufolge wird ein Punkt im dreidimensionalen Objektraum entlang eines Strahls, welcher durch das Projektionszentrum der Kamera hindurchgeht, maßstäblich verkleinert auf die zweidimensionale Bildebene abgebildet. Für praktische Anwendungen ist zu beachten, dass jede reale Optik Abbildungsfehler verursacht. Um präzise Messungen durchführen zu können, müssen diese Fehlereinflüsse bei der Auswertung berücksichtigt werden. Die mathematische Beschreibung der Abbildungsverhältnisse erfolgt daher gemäß dem in Abschnitt 2.4 entwickelten Modell.

Ziel der Kalibrierung ist die Bestimmung der Parameter dieses mathematischen Modells. In der Photogrammetrie sind Verfahren zur Kalibrierung von Kameras im Rahmen einer Bündelausgleichung seit langem bekannt. Die Grundlagen hierzu wurden bereits in den 70er Jahren erarbeitet [Brown 1971; Ebner 1976]. Seit dieser Zeit hat sich die Verwendung von nichtmetrischen Kameras in vielen Anwendungen der Industrie- und Architekturphotogrammetrie durchgesetzt. Die klassische Messanordnung, welche mit hoher Genauigkeit den Normalfall (Abschnitt 2.4.2) realisiert, spielt dabei fast keine Rolle mehr. Stattdessen werden wegen der größeren Flexibilität und um höhere Genauigkeiten erzielen zu können, vorrangig konvergente Mehrbildmessungen durchgeführt. Systematische Untersuchungen von Aufnahmeconfigu-

rationen für die Kalibrierung von Kameras mittels Bündelausgleichung wurden beispielsweise von [Wester-Ebbinghaus 1983] durchgeführt. Die Bestimmung der Parameter erfolgt in der Regel anhand mehrerer Messungen eines Testfeldes. Das Konzept der freien Netzausgleichung macht es möglich, die Modellparameter ohne die genaue Kenntnis der Testfeldgeometrie mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Die einzige Anforderung an solch ein Testfeld ist, dass es seine Geometrie während der Kalibriermessungen nicht verändert. Derartige Testfelder lassen sich technisch einfach realisieren.

Für die Kalibrierung von Streifenprojektionssensoren werden häufig auch direkte Kalibrierverfahren eingesetzt. An die Stelle der Modellparameter rückt dabei eine beliebige Kalibrierfunktion, welche den Zusammenhang zwischen beobachteten 2D-Bildkoordinaten und 3D-Objektkoordinaten herstellt. Abschnitt 2.4.1 stellt direkte und modellbasierte Verfahren einander gegenüber. Die Tatsache, dass alle in dieser Arbeit verwendeten Projektionseinheiten sowohl die Projektion horizontaler als auch vertikaler Streifenmuster erlauben, erleichtert deren Kalibrierung durch die Übertragung von etablierten Verfahren der Kamerakalibrierung. Zudem ist für die weitere Arbeit Information über die Unsicherheit der bestimmten 3D-Punkte von großer Bedeutung. Aus diesem Grund erfolgt die Kalibrierung im Rahmen einer freien Bündelausgleichung unter Verwendung von Bildkoordinatenmessungen der Kameras, der Projektionseinheit sowie der Näherungskordinaten der Punkte des Testfeldes.

2.6.1 Aufbau des Testfeldes

Die Aufgabe des Testfeldes ist es, Merkmale im Objektraum bereitzustellen, welche in aufeinanderfolgenden Aufnahmen gemessen und eindeutig identifiziert werden können. Für praktische Anwendungen gelten folgende Anforderungen:

Präzise Bestimmbarkeit. Die Genauigkeit der Kalibrierung hängt in hohem Maße davon ab, wie genau sich die Merkmale des Testfeldes im Bild bestimmen lassen. Durch ihren radialsymmetrischen Aufbau sind kreisförmige Messmarken sowohl für die manuelle interaktive Messung, als auch für die Auswertung mit Hilfe automatischer Verfahren mittels digitaler Bildverarbeitung gut geeignet. Zur automatischen Bestimmung der Markenmittelpunkte können entweder konturbasierte Verfahren zur Ellipsenschätzung oder flächenbasierte Verfahren (Schwerpunktsbestimmung) eingesetzt werden.

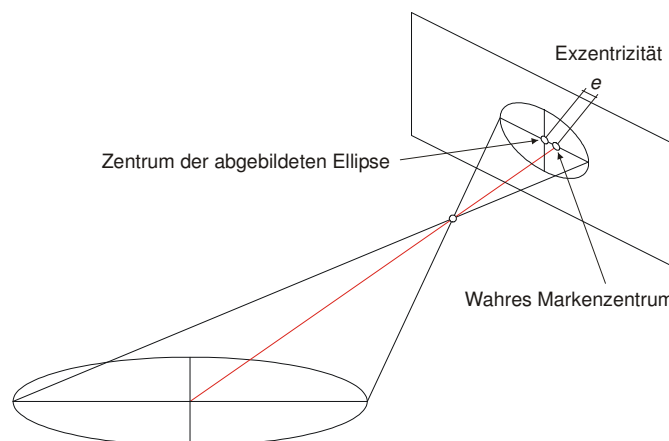


Abbildung 17: Skizze zur Entstehung der Exzentrizität bei der Abbildung einer kreisförmigen Zielmarke.

Um eine hohe Messgenauigkeit erzielen zu können, muss die Größe der Messmarken auf das jeweilige Sensorsystem abgestimmt sein. Der minimale Durchmesser im Bild beträgt ungefähr 5 Pixel. Wird der Durchmesser hingegen zu groß gewählt, führt die Exzentrizität zwischen der wahren Position des abgebildeten Markenzentrums und dem Mittelpunkt der im Bild als Ellipse abgebildeten Zielmarke zu nicht mehr tole-

rierbaren Messfehlern (Abbildung 17). Eine Abschätzung dieses Effekts wurde u.a. von [Ahn 1997] durchgeführt. Für praktische Anwendungen hat sich ein Markendurchmesser von 10-20 Pixel als geeignet erwiesen. Eine Korrektur der Markenexzentrizität findet in der Regel nur für Anwendungen höchster Genauigkeit statt.

Robuste Bestimmbarkeit. Der Aufbau des Testfeldes soll eine fehlerfreie Bestimmung der Merkmale unterstützen. Um deren Trennbarkeit in den Messbildern sicherzustellen, müssen die Merkmale einen gewissen Mindestabstand aufweisen. Wird ein tiefengegliedertes Testfeld verwendet, ist zusätzlich darauf zu achten, dass es nicht zu Messfehlern aufgrund von Selbstverdeckungen kommt.

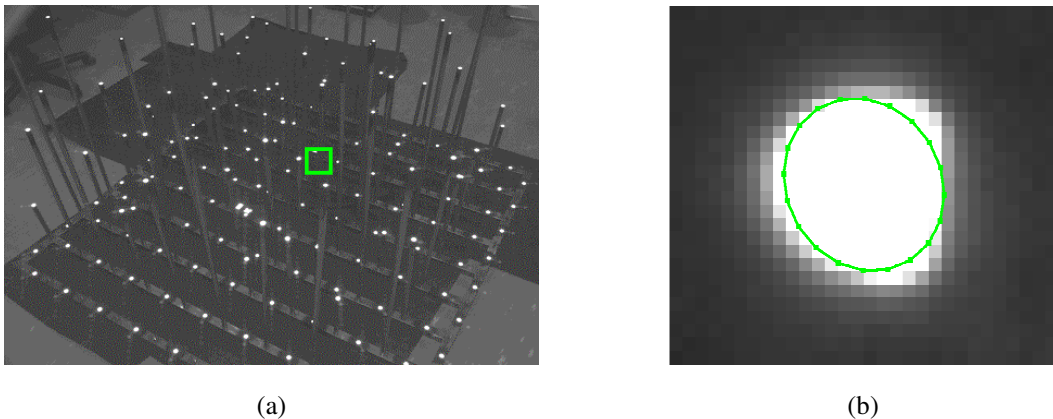


Abbildung 18: (a) Ansicht eines räumlich ausgedehnten Testfeldes. Die Zielmarken sind am Ende der unterschiedlich langen Stäbe angebracht. (b) Vergrößerung einer am rechten Rand leicht verdeckten Marke mit überlagertem Ergebnis einer Ellipsenschätzung.

Identifizierbarkeit. Um die Automatisierung des Kalibriervorgangs zu unterstützen, sollten die Merkmale mit Hilfe automatischer Verfahren eindeutig identifiziert werden können. Zu diesem Zweck kann jedes einzelne Merkmal mit einer Kodierung versehen werden. Alternativ dazu ist es auch möglich, nur einen Teil der Merkmale zu erkennen und die verbleibenden Merkmale anhand ihrer Lage auf dem Testfeld zu identifizieren.

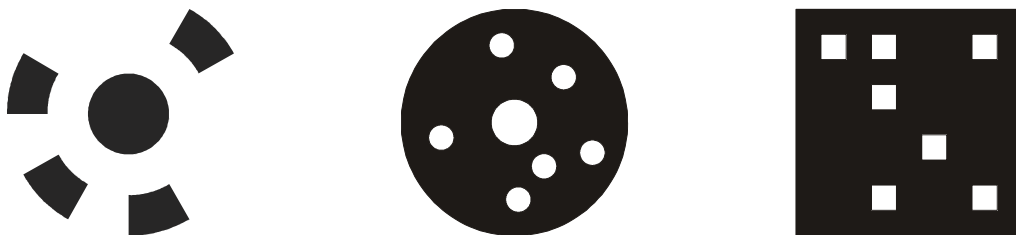
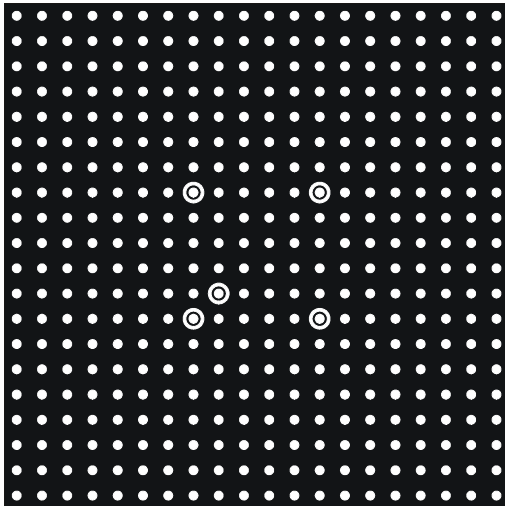


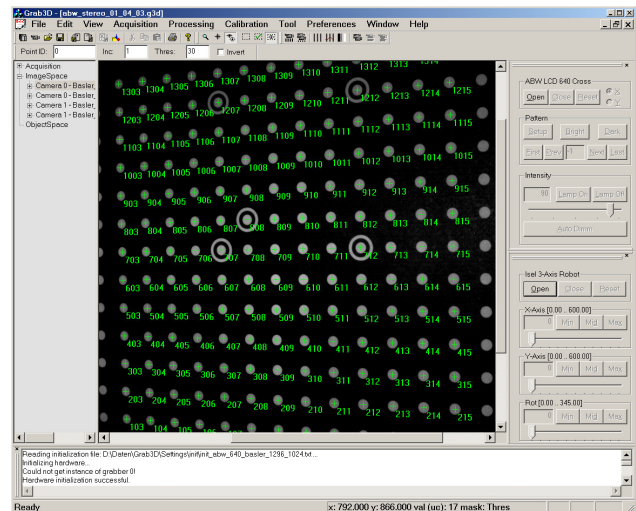
Abbildung 19: Verschiedene Ausführungen kodierter Messmarken.

Antastbarkeit. Die Merkmale müssen für eine optische Antastung geeignet sein. Für die Kalibrierung von Kameras werden häufig Messmarken aus retroreflektierender Folie verwendet. Derartige Merkmale sind für die Verwendung mit Projektionssystemen nicht geeignet, da das Material fast ausschließlich in Richtung der Beleuchtungsquelle zurückstrahlt und feine Strukturen des projizierten Musters aufgrund der Struktur der Folienoberfläche verloren gehen. Gut geeignet sind diffus reflektierende Oberflächen wie zum Beispiel matts Papier.

Das in dieser Arbeit verwendete Testfeld besteht aus einer ebenen Aluminiumplatte mit 400 weißen, kreisförmigen Messmarken, welche in einem regelmäßigen Raster von 20×20 Marken angeordnet sind (Abbildung 20). Die Marken wurden mit einem präzisen, großformatigen Tintenstrahlplotter auf mattes, selbstklebendes Papier ausgedruckt und haben im Bild einen Durchmesser von 15-20 Pixel. Im mittleren Bereich des Testfeldes befinden sich fünf asymmetrisch angeordnete Marken, welche von einem weißen Ring umgeben sind. Anhand dieser ausgezeichneten Messmarken ist im Rahmen der Auswertung die automatische Identifikation aller Messmarken möglich.



(a)



(b)

Abbildung 20: (a) Testfeld zur Kalibrierung des Messsystems. (b) Reale Aufnahme des Testfeldes mit automatisch bestimmten und identifizierten Messmarken.

2.6.2 Aufnahmekonfiguration

Unter Verwendung eines räumlich ausgedehnten Testfelds, dessen Koordinaten mit übergeordneter Genauigkeit bekannt sind, kann die Kamerakalibrierung anhand einer einzelnen Aufnahme erfolgen [Torlegard 1967]. Wird hingegen ein ebenes Testfeld verwendet, sind mehrere konvergente Aufnahmen für die präzise Bestimmung der Kalibrierparameter notwendig. Durch die Konvergenzaufnahmen ergeben sich einerseits günstige Strahlenschnitte, andererseits werden durch die Konvergenzaufnahmen Maßstabsinformation in Aufnahmerichtung bereitgestellt, was für die Bestimmung der Kammerkonstante notwendig ist.

Die mittels Bündelausgleichung erhaltenen Parameter sind häufig stark miteinander korreliert, lassen sich jedoch durch eine geeignete Aufnahmekonfiguration zumindest teilweise voneinander entkoppeln. [Kenefick, Gyer und Harp 1972] schlagen zur Verminderung der Korrelationen zwischen den Koordinaten des Bildhauptpunktes und den Parametern der äußeren Orientierung das Verdrehen der Kamera um 180° um die optische Achse vor. Eine Drehung um 90° dient insbesondere der Bestimmbarkeit der Affinitätsparameter.

Um eine hohe Redundanz für die zuverlässige Bestimmung der Parameter zu schaffen, werden acht konvergente Aufnahmen des Testfeldes von unterschiedlichen Sensorpositionen aus durchgeführt. Da von jeder Position aus Messungen von mindestens zwei Kameras vorliegen, ergibt sich ein stark überbestimmtes System, da bereits je drei Bilder für die simultane Kalibrierung mehrerer Kameras ausreichen [Dold 1994].

Die äußeren vier Aufnahmen garantieren gute Strahlenschnitte, während die vier um die optische Achse verdrehten Aufnahmen die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung ermöglichen. Tatsächlich wird anstelle des Aufnahmesystems das Testfeld zwischen den Aufnahmen mit Hilfe eines Kugelkopfes um sein Zentrum rotiert und gegenüber dem Aufnahmesystem geneigt, wodurch sich dieselben Aufnahmeverhältnisse wie bei einer Bewegung des Aufnahmesystems ergeben.

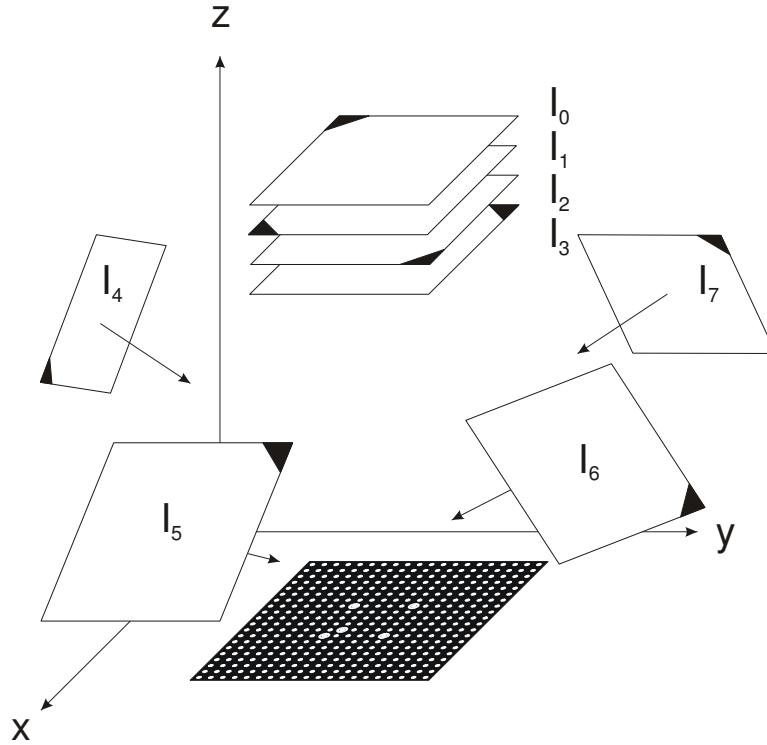


Abbildung 21: Skizze zur Aufnahmekonfiguration bei der Kalibrierung. Die Abbildung zeigt die ungefähre Position und Orientierung der Bildebene der Projektionseinheit.

2.6.3 Bestimmung der Bildkoordinaten der Messmarken

Die Auswertung zur Bestimmung der Bildkoordinaten der Messmarken erfolgt zunächst analog zur Objektvermessung, d.h. die projizierten Muster werden dekodiert und es wird eine subpixelgenaue Bestimmung der korrespondierenden Punkte vorgenommen. In Abhängigkeit von den verwendeten Projektionsmustern und der Auswertestrategie liegen folgende Zwischenergebnisse vor:

Line-Shift-Verfahren: Beim Line-Shift-Verfahren wird für jede ganzzahlige Position (x_p, y_p) auf der Bildebene des Projektors die subpixelgenaue Position (x_{ci}, y_{ci}) der homologen Punkte in der Bildebene jeder Kamera bestimmt.

Time-Space und Phase-Shift-Verfahren: Bei den anderen beiden Verfahren wird pro Kamera für jede ganzzahlige Position (x_{ci}, y_{ci}) die korrespondierende Position (x_{pi}, y_{pi}) in der Bildebene des Projektors mit Subpixelgenauigkeit bestimmt.

Differenzbild: Für jede Kamera existiert unabhängig vom verwendeten Verfahren noch das zur Ermittlung des pixelweisen Schwellwerts berechnete Differenzbild $I_D = I_{max} - I_{min}$.

Zur Bestimmung der Markenzentren wird das Bild I_D zuerst in ein Binärbild I_B umgewandelt, wobei dem Hintergrund (schwarze Fläche des Testfeldes) der Wert 0, dem Vordergrund (Marken und Ringe) der Wert 1 zugewiesen wird. In der Bildverarbeitung ist es üblich, diese Zuweisung unter Verwendung eines Schwellwerts t in Abhängigkeit vom Wert eines Pixels vorzunehmen:

$$I_B(c, r) = \begin{cases} 0 & \text{für } I_D(c, r) \leq t \\ 1 & \text{für } I_D(c, r) > t \end{cases} \quad (2.41)$$

Unter der Annahme, dass ein geeigneter Schwellwert t gefunden werden kann, erfolgt die Bestimmung von t vorzugsweise anhand des Bildinhaltes von I_D selbst. Voraussetzung dafür ist, dass das Histogramm der Grauwerte einer bimodalen Verteilung genügt. Diese Voraussetzung ist für Aufnahmen des Testfeldes gut erfüllt, da nur der vom Projektor beleuchtete Bereich des Testfeldes deutlich von Null verschiedene Grauwerte aufweist. In diesem Bereich heben sich

die Messmarken deutlich als helle Punkte auf dunklem Hintergrund ab. Die Berechnung des Schwellwerts erfolgt durch eine Histogrammanalyse, anhand der die Bildpunkte in die Klassen „hell“ und „dunkel“ eingeteilt werden.

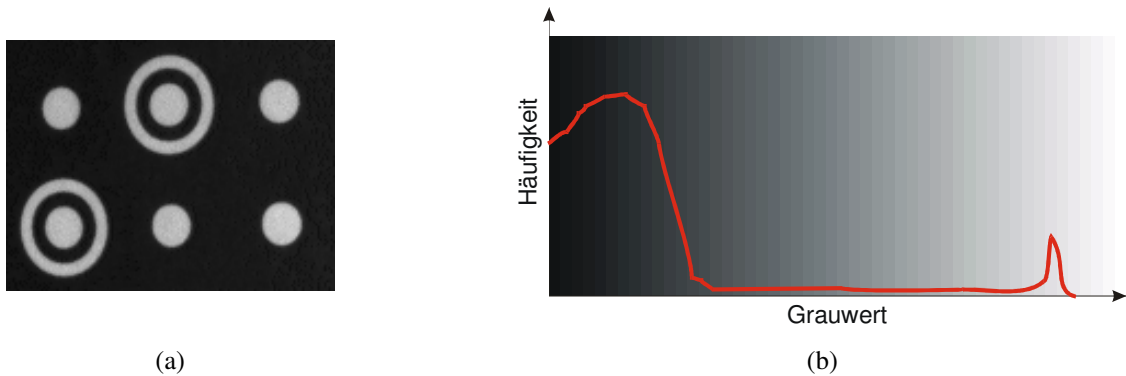


Abbildung 22: (a) Vergrößerter Ausschnitt eines zu binarisierenden Messbilds.
(b) Schematische Darstellung des bimodalen Histogramms des Messbildes.

Die Aufgabe, einen optimalen Schwellwert zu finden, besteht nun darin, denjenigen Wert t zu bestimmen, welcher die beiden Maxima der bimodalen Verteilung optimal voneinander trennt. Das Problem dabei ist, dass das Histogramm in der Regel zerklüftet ist und sehr viele lokale Maxima und Minima besitzen kann, sodass eine Entscheidung über den Wert, welcher die bimodale Verteilung trennt, anhand lokaler Kriterien schwer fällt.

Eine sehr elegante, robuste und theoretisch fundierte Möglichkeit der Bestimmung von t besteht in dem statistischen Ansatz von [Otsu 1979]. Es sei L die Anzahl der möglichen Grauwerte im Bild, d.h. es existieren die Grauwerte 0 bis $L-1$ (üblich ist $L=256$). Die Anzahl der Bildpunkte sei N und die Anzahl Bildpunkte des Bildes, welche den Grauwert i besitzen, sei n_i , also $N = n_0 + n_1 + \dots + n_{L-1}$.

Das aus dem Bild ermittelte Histogramm wird normalisiert und als Wahrscheinlichkeitsverteilung betrachtet, wobei relative Häufigkeiten die Wahrscheinlichkeit approximieren:

$$p_i := n_i / N, \quad \text{damit} \quad 0 \leq p_i \leq 1, \quad \sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1. \quad (2.42)$$

Wird nun das Histogramm an einem Grauwert k in zwei Klassen C_0 und C_1 eingeteilt, welche jeweils die Grauwertmengen $\{0, 1, \dots, k\}$ bzw. $\{k+1, \dots, L-1\}$ beinhalten, so kann man die Klassenwahrscheinlichkeiten berechnen

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \Pr(C_0) = \sum_{i=0}^k p_i \\ \omega_1 &= \Pr(C_1) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i \end{aligned} \quad (2.43)$$

welche den nullten Momenten entsprechen ($\Pr(\cdot)$ bezeichnet hier die Wahrscheinlichkeit).

Des weiteren ergeben sich die ersten Momente (Mittelwerte) zu

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \sum_{i=0}^k i \cdot \Pr(i | C_0) = \sum_{i=0}^k i \cdot p_i / \omega_0 \\ \mu_1 &= \sum_{i=k+1}^{L-1} i \cdot \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^{L-1} i \cdot p_i / \omega_1 \end{aligned} \quad (2.44)$$

sowie die zweiten Momente (Varianzen)

$$\begin{aligned}\sigma_0^2 &= \sum_{i=0}^k (i - \mu_0)^2 \cdot \Pr(i | C_0) = \sum_{i=0}^k (i - \mu_0)^2 p_i / \omega_0 \\ \sigma_1^2 &= \sum_{i=k+1}^{L-1} (i - \mu_1)^2 \cdot \Pr(i | C_1) = \sum_{i=k+1}^{L-1} (i - \mu_1)^2 p_i / \omega_1\end{aligned}\quad (2.45)$$

wobei $\Pr(A|B)$ die bedingte Wahrscheinlichkeit von A unter der Voraussetzung B bezeichnet. Aus der Diskriminantenanalyse sind Maße zur optimalen Trennung von Klassen bekannt. Es lässt sich zeigen, dass eine optimale Trennung dann erreicht wird, wenn die Varianz in den Klassen

$$\sigma_I^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (2.46)$$

minimal wird, oder äquivalent hierzu die Varianz zwischen den Klassen

$$\sigma_Z^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (2.47)$$

maximal wird. Eine Bestimmung des global besten Schwellwerts t kann also so erfolgen, dass für alle k ($0 \leq k < L$), für welche C_0 und C_1 nicht leer sind, die Werte für σ_I^2 bzw. σ_Z^2 errechnet werden und t derjenige Wert für k ist, für den σ_I^2 minimal bzw. σ_Z^2 maximal ist. Zu beachten ist, dass die Suche über alle k erfolgt, also höchstens über $L-1$ Einträge des Histogramms, für die C_0 und C_1 nicht leer sind. Histogrammeinträge, welche Null sind, müssen dabei nicht betrachtet werden. Die Grauwerte des zu binarisierenden Bildes werden nur bei der Erstellung des Histogramms benötigt.

Nach der Ermittlung des optimalen Schwellwerts t können die Mittelwerte der beiden Klassen μ_0 und μ_1 zur Beurteilung herangezogen werden, wie stark sich der Vordergrund vom Hintergrund unterscheidet. Ist eine Mindestmodulation t_{MinMod} gefordert, so kann sie mittels $\mu_1 - \mu_0 \geq t_{MinMod}$ getestet werden. Ist die Bedingung nicht erfüllt, lassen sich Vordergrund und Hintergrund des Bildes nicht eindeutig trennen.

Wurde ein geeigneter Schwellwert gefunden, kann gemäß (2.41) das Binärbild I_B erzeugt werden. Dieses Bild ist jedoch nicht unmittelbar zur Bestimmung der Markenzentren geeignet. Es fehlt noch der Übergang von der ikonischen Ebene (Bildpunkte) auf die symbolische Ebene (Zusammengehörigkeit der Bildpunkte zu Regionen, Objekte). Dieser Übergang stellt einen sehr wichtigen Schritt in der Auswertung dar, ist er doch mit einem enormen Informationsgewinn verbunden. Während ein einzelnes Pixel lediglich Information über seine Lage (xy-Position in der Bildmatrix) und seinen Wert trägt, besitzt die symbolische Beschreibung einer Region viel weitreichendere Attribute wie etwa Form, Umfang, Fläche sowie verschiedene statistische Kenngrößen.

Die Aufgabe der Bestimmung solcher Regionen besteht im Auffinden von Bildpunkten im Binärbild, welche den Wert 1 (Vordergrund, Objekt) tragen und über einen zusammenhängenden Pfad von Objektpixel verbunden sind. Alle Bildpunkte einer Region erhalten dieselbe Bezeichnung. Diese Bezeichnung ist ein eindeutiger Name oder Index, welcher einer Region zugewiesen und in einem separaten Bild mit gleicher Dimension wie das Binärbild, dem sog. Label-Bild, abgespeichert wird. Die Definition des Begriffs zusammenhängend erfordert die Definition eines Nachbarschaftsbegriffs. In der Bildverarbeitung sind zwei Arten der Definition benachbarter Pixel gebräuchlich: die 4er-Nachbarschaft (Abbildung 23 a) und die 8er-Nachbarschaft (Abbildung 23 b). Bei der 4er-Nachbarschaft werden nur die horizontal und vertikal anschließenden Pixel als Nachbarn betrachtet, während bei der 8er-Nachbarschaft auch die diagonal anschließenden Pixel Nachbarn darstellen. Diejenigen Pixel einer Region, welche Hintergrundpixel in ihrer Nachbarschaft haben, werden als Randpixel der Region bezeichnet. Bei der Definition der Zusammengehörigkeit ergibt sich ein Problem, da sich bei Zugrundelegung desselben Nachbarschaftstyps für Objekt und Hintergrund widersprüchliche Aussagen ergeben. Im Falle der 4er-Nachbarschaft sind die Pixel einer diagonal verlaufenden Linie nicht miteinander verbunden, werden aber auch nicht durch einen zusammenhängenden Hintergrund getrennt. Bei der 8er-Nachbarschaft hingegen ergeben diagonal anschließende Pixel einen zusammenhängenden Linienzug, der den Hintergrund jedoch

nicht in zwei getrennte Bereiche teilt. Aus diesem Grund legt man üblicherweise für Objektpixel die 8er-Nachbarschaft und für Hintergrundpixel die 4er-Nachbarschaft zugrunde.



Abbildung 23: Zusammenhängende Pixel bei 4er-Nachbarschaft (a) und 8er-Nachbarschaft (b).

Unter Verwendung des soeben definierten Nachbarschaftsbegriffs werden nun zusammenhängende Bereiche von Vordergrundpixel in Regionen zusammengefasst. Algorithmen zu dieser sog. *Connected Component Analysis (CCA)* werden seit langem in vielen industriellen Anwendungen verwendet, weshalb entsprechend effiziente Verfahren zur Verfügung stehen. Die Verarbeitung des Bildes geschieht zeilenweise von links nach rechts. Trifft man innerhalb einer Zeile auf das erste Pixel einer Region, wird für die Region eine neue Nummer vergeben und dem Pixel zugeordnet. Im weiteren Verlauf wird diese Nummer auf die weiter rechts und in der Folgezeile liegenden Pixel fortgepflanzt. Schwierigkeiten ergeben sich dann, wenn ein Pixel von zwei (oder mehr) Bildpunkten aus Regionen mit unterschiedlichen Nummern erreicht werden kann. Faktisch bedeutet dies, dass die Regionen in Wirklichkeit zusammengehören, d.h. die zwei (oder mehrere) Nummern sind äquivalent. Ein Beispiel für das Entstehen einer solchen Konfliktsituation zeigt Abbildung 24. Die Bearbeitung erfolgt zeilenweise von links nach rechts und von unten nach oben. Zunächst wird davon ausgegangen, dass zwei getrennte Regionen mit der Bezeichnung 1 und 2 vorliegen. Wird eine 8er-Nachbarschaft für die Objektpixel zugrunde gelegt, befindet sich das mittlere Pixel in der obersten Zeile sowohl in der Nachbarschaft von Pixeln, die der Region 1 angehören, als auch von Pixeln, die der Region 2 angehören. Die beiden Regionen 1 und 2 gehören also in Wirklichkeit zu derselben Region. Ein wesentlicher Unterschied verschiedener Verfahren zur CCA liegt darin, wie diese Konflikte aufgelöst werden.



Abbildung 24: Entstehung äquivalenter Bezeichnungen für Regionen: (a) Binärbild. (b) Labelbild. Das mit ? gekennzeichnete Pixel in der oberen Zeile befindet sich sowohl in der Nachbarschaft von Pixeln der Region 1 als auch der Region 2. Die beiden Regionen sind also äquivalent, d.h. es handelt sich in Wirklichkeit nur um eine zusammenhängende Region.

Der in dieser Arbeit verwendete Algorithmus stammt aus [Haralick und Shapiro] und benötigt nur zwei Durchgänge, um alle Regionen eindeutig zu benennen. Im ersten Durchgang wird allen Regionen eine vorläufige Nummer zugewiesen. Zuweisungskonflikte, welche aufgrund von äquivalenten Regionen entstehen, werden in einer separaten Tabelle erfasst. Nach dem Auflösen dieser Konflikte wird in einem zweiten Schritt jeder Region ihre endgültige Bezeichnung zugeordnet. Um die Größe der Äquivalenztabelle zu reduzieren, arbeitet die tatsächliche Implementierung noch etwas komplizierter als hier dargestellt. Sie kommt mit einer lokalen Äquivalenztabelle aus, welche nur Konflikte in der

aktuellen und der vorhergehenden Zeile speichert. Das Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes ist also ein Bild, welches jedes Pixel des Ausgangsbildes eindeutig einer Region zuordnet.

Alle Pixel einer Region zusammengekommen bilden einen sog. Blob. Diese Blobs werden zunächst ihrer Größe nach gefiltert, d.h. Blobs, welche deutlich kleiner oder größer als die erwartete Größe der Messmarken oder der sie umgebende Ringe sind, werden entfernt. Weiterhin wird für jeden Blob geprüft, ob für das in der Binärbildverarbeitung

gebräuchliche Rundheitsmaß $\kappa = \frac{U^2}{4\pi A} \approx 1$ gilt (A : Fläche, U : Umfang).

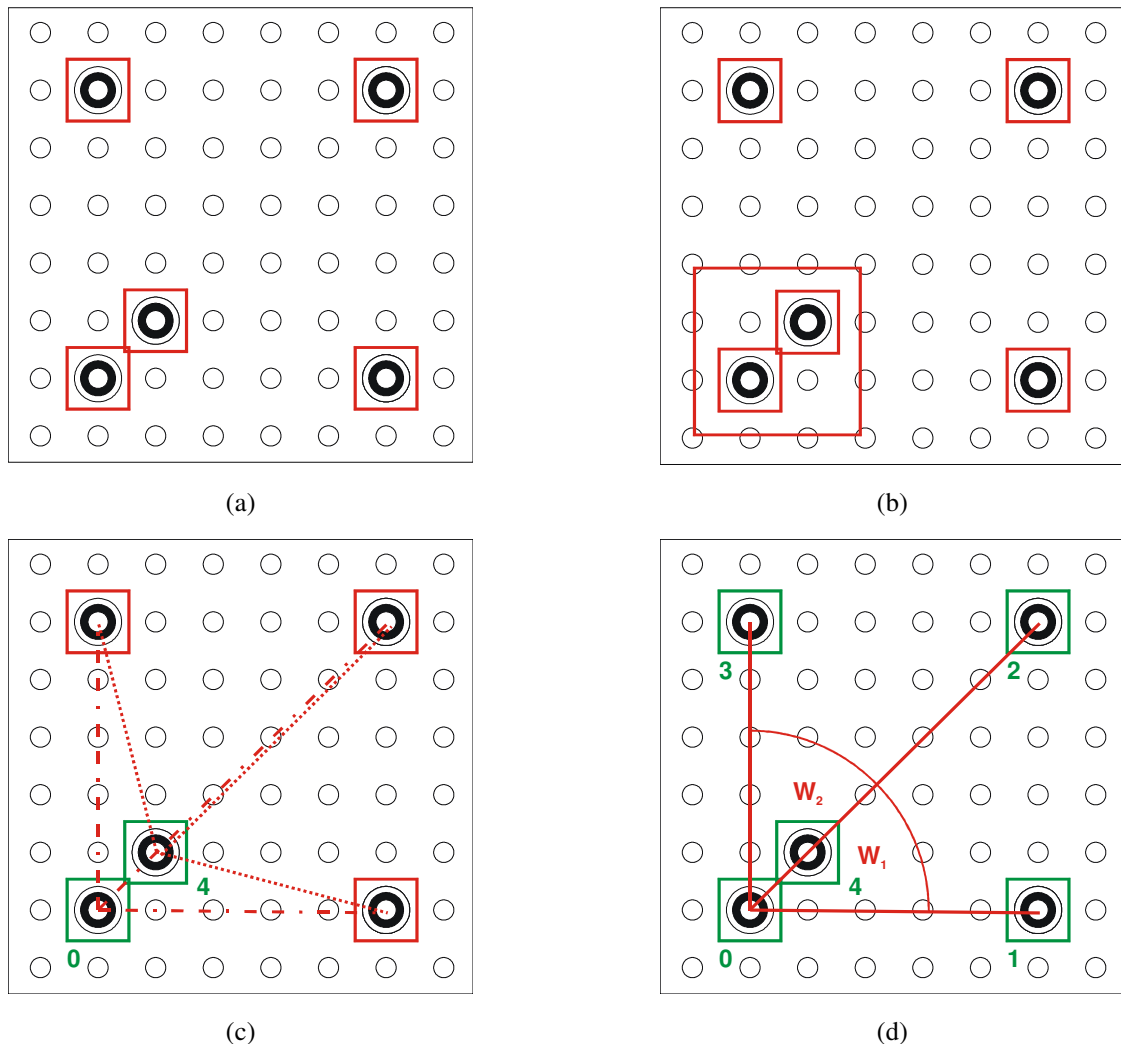


Abbildung 25: Algorithmus zur automatischen Identifizierung der Zielmarken: (a) Detektion der ID-Marken durch Aufsuchen von Regionen kompatibler Größe mit identischem Schwerpunkt. (b) Finden der zwei ID-Marken mit kürzestem Abstand zueinander. (c) Berechnung der Summe der Entfernungen zu allen anderen Marken. Diejenige Marke mit der größten Abstandssumme erhält den Bezeichner 0, die andere den Bezeichner 4. (d) Durch Betrachten der Winkel zwischen den Verbindungslinien der verbleibenden Marken und der Marke mit Kennung 0 ergeben sich die Bezeichner der restlichen Zielmarken.

Die mit einem Ring versehenen Messmarken lassen sich dadurch leicht erkennen, dass zwei Blobs passender Größe nahezu denselben Schwerpunkt gemäß (2.49) besitzen. Für die automatische Zuordnung der Punktnummern macht man sich die im Innern des aus vier Ringmarken gebildeten Rechtecks liegende fünfte Marke zunutze. Zunächst werden die zwei Ringmarken gesucht, welche zueinander den kürzesten Abstand haben. Von diesen beiden Marken weist die äußere, auf dem Rechteck liegende Marke eine größere Summe der Abstände zu den anderen Ringmarken auf. Sie erhält daher die Nummer 0. Die andere Marke erhält die Nummer 4.

Die Identifizierung der verbleibenden drei Ringmarken erfolgt dadurch, dass dasjenige Paar (1, 3) gefunden wird, für welches der Winkel (1, 0, 3) maximal wird. Die verbleibende Marke erhält schließlich die Nummer 2.

Mit Hilfe der bekannten Näherungswerte dieser Marken lassen sich die Parameter einer Projektivtransformation mit 8 Parametern bestimmen, welche die projektive Abbildung zwischen den ebenen Näherungswerten der Ringmarken und deren Position im Bild beschreibt:

$$x = \frac{a_0 X + a_1 Y + a_2}{c_0 X + c_1 Y + 1}, \quad y = \frac{b_0 X + b_1 Y + b_2}{c_0 X + c_1 Y + 1} \quad (2.48)$$

Damit ist es möglich, die Näherungspositionen der Punkte des Testfeldes in das Koordinatensystem des Messbilds umzurechnen und im Labelbild die Nummer der zugehörigen Region – falls vorhanden – zu bestimmen. Nach der Detektion der Messmarken kann das Markenzentrum subpixelgenau mit Hilfe einer grauwertgewichteten Schwerpunktbestimmung berechnet werden. Dazu wird der Bildbereich der zugehörigen Region R folgendermaßen ausgewertet:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{(x,y) \in R} x \cdot g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in R} g(x,y)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{(x,y) \in R} y \cdot g(x,y)}{\sum_{(x,y) \in R} g(x,y)}. \quad (2.49)$$

Für die verwendete Markengröße bietet diese Art der Zentrumsbestimmung eine hohe Genauigkeit bei vergleichsweise geringem Aufwand.

Die Bestimmung der zugehörigen Projektorkoordinate erfolgt abhängig von der verwendeten Auswertemethode (vgl. Abschnitt 2.7):

Line-Shift-Verfahren: Die Schwierigkeit bei dieser Art der Auswertung liegt darin, dass zu ganzzahligen Projektorkoordinaten subpixelgenaue Kamerakoordinaten bestimmt werden müssen, d.h. die homologen Punkte sind im Raster des Projektors beschrieben, während die Detektion der Markenzentren aber im Bildkoordinatensystem der Kamera erfolgt. Demzufolge müssen die dem Markenzentrum entsprechenden Projektorkoordinaten erst indirekt aus der Zuordnung zwischen Projektor und Kamera bestimmt werden.

Zu diesem Zweck wird für alle ganzzahligen Projektorpositionen an der korrespondierenden Stelle im Kamerabild die im Labelbild gespeicherte Regionnummer i ermittelt. Der bereits bekannte Mittelpunkt C_i der Region im Kamerabild wird zur Einteilung des Bildes in vier Quadranten verwendet. Für jede Region wird jetzt in jedem Quadranten diejenige Projektorposition gesucht, deren zugehörige Position im Kamerabild dem Mittelpunkt der Region am nächsten liegt. Es ergeben sich also vier Punkte, aus denen zwei Dreiecke gebildet werden können. Mit Hilfe der baryzentrischen Koordinaten α, β, γ des Regionenzentrums $\bar{x}_p$ im Dreieck $(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_k)$, welches das Zentrum der Region enthält, kann die Position des Zentrums in der Bildebene des Projektors mit Subpixelgenauigkeit bestimmt werden:

$$\bar{\mathbf{x}}_p = \alpha \mathbf{x}_i + \beta \mathbf{x}_j + \gamma \mathbf{x}_k \quad (2.50)$$

Time-Space und Phase-Shift-Verfahren: Bei diesen Auswertungsvarianten erfolgt die Auswertung derart, dass jeder ganzzahligen Kameraposition eine subpixelgenaue Projektorposition zugeordnet wird. Es kann daher äquivalent zu der Berechnung der Markenzentren gemäß (2.49) eine grauwertgewichtete Schwerpunktbestimmung erfolgen, bei der jedoch innerhalb der Region nicht über die Positionen x_c, y_c der Kamera, sondern über die zugehörigen Positionen x_p, y_p des Projektors summiert wird.

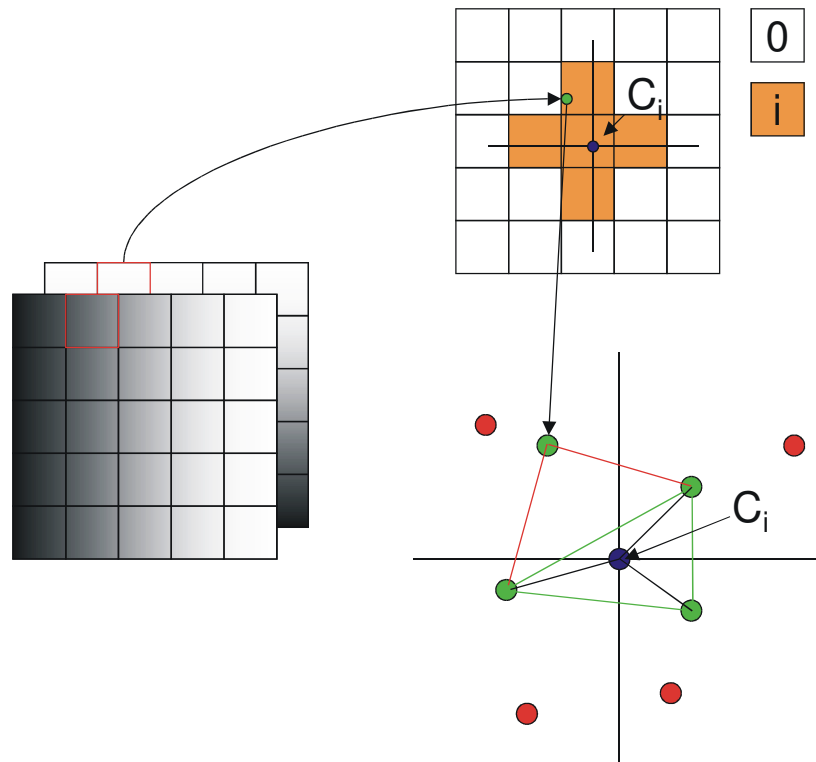


Abbildung 26: Indirekte Bestimmung der Subpixelposition im Bildkoordinatensystem des Projektors beim Line-Shift-Verfahren. Die Marken werden im Kamerabild detektiert. Anschließend werden alle gültigen Projektorpunkte in das symbolische Bild, welches die Regionennummern enthält, übertragen. Fällt der übertragene Punkt in die einer Zielmarken zugeordneten Region i , wird der übertragene Punkt in eine der Region i zugehörigen Datenstruktur im entsprechenden Quadranten eingetragen, welche den dem Zentrum am nächsten liegenden Punkt für jeden Quadranten speichert. Aus diesen vier Punkten werden zwei Dreiecke gebildet. Innerhalb des Dreiecks, welches das Zentrum C_i enthält, werden die baryzentrischen Koordinaten von C_i bestimmt. Sie dienen als Gewichte, um aus den drei Scheitelpunkten des Dreiecks die Subpixelposition des Zentrums im Koordinatensystem des Projektors zu bestimmen.

2.6.4 Berechnung der Parameter

Nach der Identifizierung und Bestimmung der Bildkoordinaten der Messmarken werden die Parameter der inneren und äußeren Orientierung im Rahmen einer Bündelausgleichung bestimmt. Für diesen Schritt wird die „Benge“-Bibliothek des Department for Geomatics der Universität Melbourne verwendet. Um Näherungswerte für das nichtlineare Ausgleichungsproblem bereitzustellen, wird zunächst die äußere Orientierung des Projektors und aller Kameras mittels räumlichen Rückwärtsschnitts unter Verwendung einer geschlossenen Lösung bestimmt. Um die Unbekannten unabhängig von der Genauigkeit der Koordinaten des Testfeldes bestimmen zu können, findet die eigentliche Berechnung der Parameter im Rahmen einer freien Netzausgleichung statt. Zur Behebung des Datumsdefekts erfolgt eine zwangsfreie Lagerung des Netzes über die Näherungskkoordinaten der Punkte des Testfeldes.

Die Verwendung der freien Netzausgleichung hat folgende Vorteile:

- Die Genauigkeit der ermittelten Parameter ist unabhängig von der Genauigkeit der Punkte des Testfeldes.
- Die Lösung erzeugt Kovarianzmatrizen der Neupunkte mit minimaler Spur. Die ermittelten Genauigkeitsmasse, geben die günstigste Genauigkeit, die sog. innere Genauigkeit des Netzes wieder.

Nach der Ausgleichung liegen die Parameter der inneren Orientierung des Projektors und aller Kameras sowie die äußere Orientierung von allen Standpunkten vor. Die Parameter der inneren Orientierung werden für jede Kamera als invariant betrachtet. Für die Definition des Sensorkoordinatensystems wird die äußere Orientierung des ersten Standpunktes verwendet. Tabelle 5 zeigt typische Werte für die Parameter sowie deren Standardabweichungen für die verschiedenen Sensoren.

Tabelle 5: Parameter der Inneren Orientierung und deren Standardabweichungen.

Sensor Parameter	Basler A113		ABW LCD 640 Cross		Davis DLX 10	
	Wert	σ	Wert	σ	Wert	σ
c	1.3102E+001	4.4349E-003	1.7953E+002	1.2574E+000	3.5605E+001	2.8971E-001
x₀	1.2719E-002	3.4706E-003	2.7605E-001	8.6587E-002	-2.6119E-001	1.9302E-001
y₀	-9.9614E-002	2.2114E-003	5.3628E-001	1.7420E-001	-7.7689E+000	2.4156E-002
K₁	7.7698E-004	1.2008E-005	-3.0502E-006	1.2006E-006	4.9662E-005	1.1350E-005
K₂	-2.1217E-005	1.3272E-006	1.3712E-009	3.9753E-010	-5.0750E-008	3.2800E-008
K₃	9.7242E-007	4.6245E-008	-6.7910E-013	2.1404E-013	5.8116E-011	1.5274E-010
P₁	-2.3057E-006	8.0114E-006	8.2287E-006	4.0909E-006	-3.6776E-005	1.2594E-005
P₂	2.7829E-005	5.8823E-006	2.2901E-005	1.1511E-005	-3.4030E-004	8.0415E-005
B₁	2.1224E-003	1.3647E-003	4.0920E-004	2.1873E-004	-4.3118E-003	1.1778E-003
B₂	2.1172E-003	1.6150E-003	-7.3847E-004	1.7409E-004	9.1701E-004	2.0601E-004

2.6.5 Kalibrierung der Aktorik

Die Kalibrierung der Aktorik erfolgt nach der Kalibrierung des Messsystems mit Hilfe eines speziellen Testfeldes. Das Testfeld besteht aus einer ebenen Aluminiumplatte, welche so auf einem zylindrischen Fuß angebracht ist, dass die Zylinderachse in der Ebene des Testfelds liegt. Der Fuß passt in eine Bohrung im Zentrum des Rotationstisches. Mit Hilfe von zwei auf der Achse liegenden, kreisförmigen Zielmarken kann die Orientierung der Drehachse im Raum bestimmt werden. Die Verschiebungsrichtung der beiden linearen Achsen erhält man durch die Bestimmung der unteren Zielmarke in der Grundstellung sowie in zwei weiteren, jeweils in Richtung der beiden Achsen verschobenen Positionen. Zur Bestimmung der Markenpositionen werden zunächst die 3D-Koordinaten wie bei einer gewöhnlichen Objektvermessung berechnet. Anschließend werden die Koordinaten für das nach (2.49) subpixelgenau bestimmte Markenzentrum durch bilineare Interpolation in den Koordinatenbildern berechnet. Durch diesen einfachen Kalibrierprozess können alle Parameter des Aktormodells (Abschnitt 2.4.7) bestimmt werden.

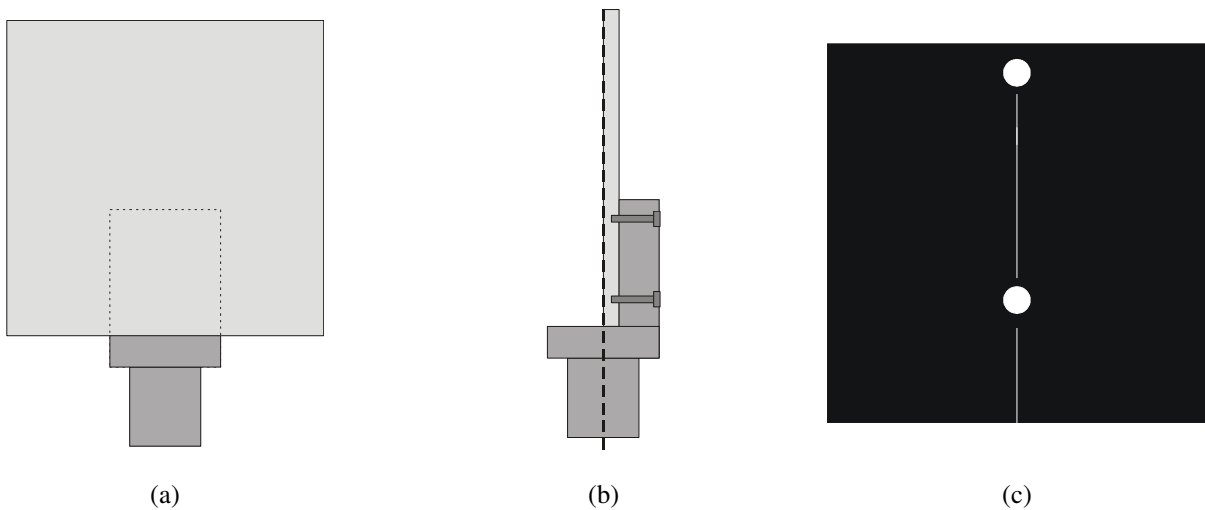


Abbildung 27: Testfeld für die Kalibrierung der Aktorik. Der zylindrische Fuß passt genau in eine Bohrung im Zentrum des Rotationstisches, welche mit der Drehachse zusammenfällt. (a) Frontalansicht. (b) Seitenansicht. (c) Kreisförmige Zielmarken dienen zur Bestimmung der Position und Orientierung der Drehachse.

2.7 Das Korrespondenzproblem

Ein grundlegendes Problem bei der optischen Triangulation ist das sogenannte Korrespondenzproblem. Darunter versteht man die Aufgabe, identische Objektmerkmale in mehreren Bildern zu identifizieren und einander zuzuordnen. Ist diese Zuordnung erfolgt, lassen sich bei bekannter innerer und äußerer Orientierung der Kameras die Objektkoordinaten des Merkmales bestimmen. Obwohl die Problemformulierung zunächst einfach klingt, stellt das Korrespondenzproblem seit Jahrzehnten den Inhalt vieler Forschungsarbeiten dar. Tatsächlich unterscheiden sich die meisten der in Wissenschaft und industrieller Praxis verwendeten Sensoren nach dem Triangulationsprinzip vorrangig darin, wie die Lösung des Korrespondenzproblems erfolgt.

Eine grundsätzliche Einteilung kann in aktive und passive Verfahren vorgenommen werden. Passive Verfahren nutzen die natürliche Variation der Reflexionseigenschaften der Oberfläche zur Identifikation homologer Bildpunkte. In texturarmen Bereichen wird die Zuordnung jedoch instabil oder ist gar nicht mehr möglich.

Bereits in den achtziger Jahren wurden daher Systeme entwickelt, welche die Projektion statischer Muster zur flächenhaften Erfassung nach dem Triangulationsprinzip verwenden. Ein Beispiel hierfür stellt das System InduSurf der Firma Zeiss dar [Schewe 1988; Kludas 1995]. Es besteht aus einer Stereokamera und einem Strukturprojektor, welcher ein Pseudo-Zufallsmuster auf das Objekt projiziert. Die Bestimmung der homologen Bildpunkte erfolgt entweder durch intensitätsbasierte oder merkmalsbasierte Bildzuordnung. Der Projektor selbst trägt nicht zur Punktbestimmung bei. Er dient lediglich dazu, eine hinreichend texturierte Oberfläche zu erzeugen. Die erzielbare Genauigkeit liegt unter Verwendung von analogen Messkammern im Bereich von 0,1 mm bei einem Messfeld von mehreren Metern. Nachteile dieses Verfahrens sind der hohe Rechenaufwand für die intensitätsbasierte Zuordnung und die durch die Maskengröße verursachte Glättung im Bereich von Geometriekanten¹.

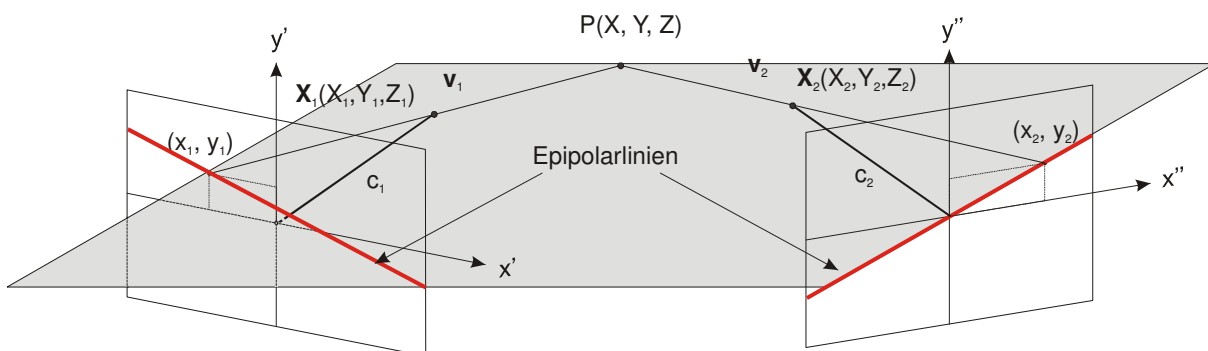


Abbildung 28: Skizze zur Epipolargeometrie. Ist die Lage eines Punktes in einem Bild bekannt, kann bei bekannter innerer und äußerer Orientierung die sog. Epipolarlinie berechnet werden, auf welcher der Punkt im zweiten Bild liegt. Dadurch wird eine effiziente Einschränkung des Suchraums ermöglicht.

Andere Systeme mit statischen Mustern projizieren regelmäßige Strukturen wie Gitter [Hu und Stockman 1989; Shrikhande und Stockman 1989] oder Punkte [Maas 1992] auf das Objekt. Im Rahmen der Auswertung wird zunächst die Lage der projizierten Merkmale (Schnittpunkte der Gitterlinien oder Ellipsenmittelpunkte etc.) bestimmt. Die detektierten Merkmale werden dann einander zugeordnet. Um diese Zuordnung robuster zu machen, wird häufig die sogenannte Epipolargeometrie ausgenutzt (Abbildung 28): Ist die relative Orientierung zweier Kameras bekannt, lässt sich für jeden Punkt der einen Kamera eine Linie berechnen, auf welcher der Punkt in der anderen Kamera liegen muss. Dadurch ist eine effiziente Einschränkung des Suchraumes möglich. Durch die räumliche Ausdehnung der projizierten Merkmale ergeben sich jedoch Einschränkungen hinsichtlich der erzielbaren lateralen Auflösung sowie im Bereich von Geometriekanten.

¹ Im Gegensatz zu einer Grauwertkante, welche auch durch Variationen in der Reflektivität der Objektoberfläche entstehen kann, wird eine Geometriekante durch die Unstetigkeit der Objektoberfläche selbst verursacht.

Beim sogenannten Lichtschnittverfahren werden Probleme bei der Zuordnung dadurch umgangen, dass lediglich eine einzelne Linie projiziert wird, welche eine Ebene im Raum definiert. Die aufgezeichnete Linie kann im Kamerabild zeilenweise detektiert und der durch die Position im Kamerabild und das Projektionszentrum definierte Strahl mit der Lichtebeine zum Schnitt gebracht werden. Im Gegensatz zu den oben vorgestellten Verfahren geht beim Lichtschnittverfahren die Projektionseinheit in die Punktbestimmung mit ein und muss daher bei der Systemkalibrierung berücksichtigt werden. Der Einsatz einer Laser-Lichtquelle erlaubt die Verwendung schmalbandiger spektraler Filter, wodurch sich der Einfluss von Umgebungslicht effektiv unterdrücken lässt. Für eine flächenhafte Erfassung der Oberfläche muss die Lichtebeine gegenüber dem Objekt verschoben oder verdreht werden, wobei für die Erzeugung von n Lichtebeinen n Projektionen notwendig sind. Aufgrund der hohen Robustheit ist diese Art von Sensor sehr populär. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die durch die Verwendung einer kohärenten Lichtquelle auftretenden Speckles eine fundamentale Beschränkung der Messgenauigkeit darstellen. Beispiele für derartige Sensoren finden sich in [Rioux et al. 1989] [Trucco et al. 1998] [Curless und Levoy 1995] [Pito 1996].

Eine umfangreiche Übersicht über verschiedene Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems mit Hilfe von strukturierter Beleuchtung enthält die Dissertation von [Salvi 1998].

2.7.1 Der Kodierte Lichtansatz

Mit dem Kodierten Lichtansatz wurde von [Altschuler und Altschuler 1979] [Wahl 1986] und [Stahs 1990] ein sehr effizientes Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems vorgeschlagen. Dazu wird in einer traditionellen Stereokonfiguration eine Kamera durch eine Projektionseinheit ersetzt. In der Bildebene des Projektors wird eine Folge flächenhafter binärer Streifenmuster erzeugt (zum Beispiel mit einer LCD-Einheit) und auf das Objekt projiziert. Eine synchron arbeitende Kamera erfasst die projizierten Muster, deren Frequenz sich von Aufnahme zu Aufnahme verdoppelt. Aus der Abfolge heller und dunkler Grauwerte lässt sich für jedes Kamerapixel die Nummer der korrespondierenden Lichtebeine eindeutig bestimmen. Es findet somit eine räumlich-zeitliche Kodierung der Korrespondenzinformation statt. Durch die gleichzeitige Projektion mehrerer Lichtebeinen lassen sich 2^n Lichtebeinen mit nur n Projektionen erfassen.

Streng genommen handelt es sich bei den projizierten Strukturen jedoch nicht um infinitesimal dünne Linien, sondern um schmale Streifen, deren Breite von der Auflösung des Projektors, der Optik und der Entfernung vom Objekt abhängt. [Stahs und Wahl 1990] beschränken sich daher bei der Berechnung der Objektpunkte auf Bildpunkte an den Streifenrändern, da dort die Projektionsrichtung präziser festgelegt ist.

Um eine noch höhere Genauigkeit zu erreichen, muss die Zuordnung zwischen Punkten auf der Bildebene der Kamera und des Projektors subpixelgenau erfolgen. Dazu wird die Kodesequenz mit einer Sequenz hochfrequenter Muster kombiniert. Die Kodesequenz liefert den diskreten, das hochfrequente Muster den kontinuierlichen Anteil der Messung. Diese sogenannten hybriden Muster erlauben eine hohe Genauigkeit, ohne die Eindeutigkeit der Messung zu verlieren.

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit verschiedenen Verfahren zur subpixelgenauen Lösung des Korrespondenzproblems und mit der Genauigkeit der gefundenen Zuordnungen.

2.7.2 Projektion von Graycodes

Die Kodierung der Liniennummern kann prinzipiell auf unterschiedliche Arten erfolgen. Am naheliegendsten ist die Verwendung eines n -stelligen Binärkodes. Der Nachteil des Binärkodes liegt darin, dass sich Fehler bei der Dekodierung abhängig von der Wertigkeit des aktuellen Musters unterschiedlich stark auswirken. Tritt der Dekodierfehler beispielsweise beim höchstwertigen Bit auf, beträgt der dadurch verursachte Fehler 2^{n-1} Linien, was der Hälfte des adressierbaren Bereichs entspricht. Die von Frank Gray 1953 patentierten Graycodes weisen hingegen die bemerkenswerte Eigenschaft auf, dass sich aufeinanderfolgende Codes jeweils nur um ein Bit unterscheiden. Ein Dekodierfehler im Bereich des Übergangs zwischen hellen und dunklen Linien des projizierten Musters verursacht daher eine Abweichung von lediglich einer Linie. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Breite des feinsten Musters doppelt so breit wie die erzielte Auflösung ist (Abbildung 30), was insbesondere in geneigten Objektbereichen die Robustheit der Dekodierung steigert.

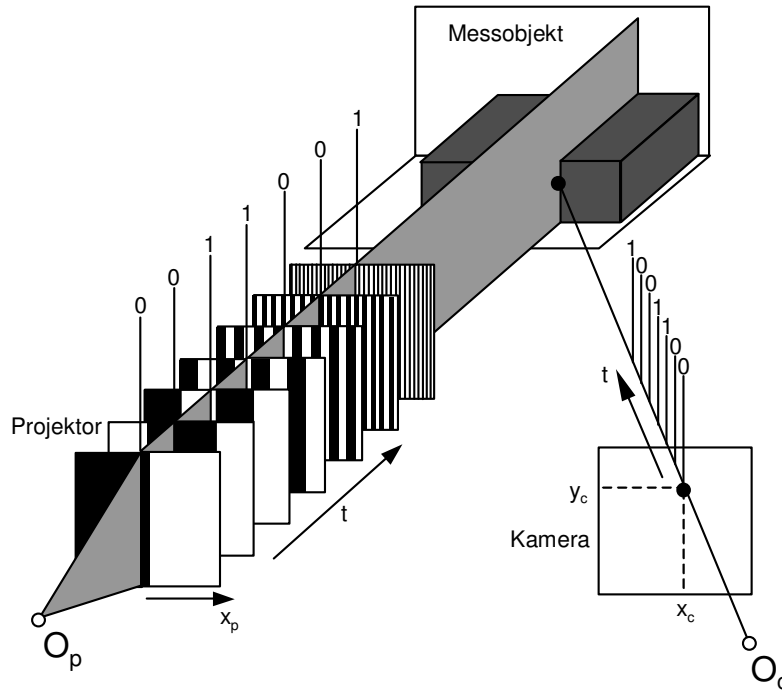


Abbildung 29: (a) Prinzipskizze zur räumlich-zeitlichen Kodierung der Korrespondenzinformation.

In der Praxis erfolgt die Kodierung durch eine Serie binärer Streifenmuster, wobei sich die Frequenz des Musters von einer Projektion zur nächsten verdoppelt. Eine synchron arbeitende Kamera erfasst die vom Objekt reflektierten Muster. Anschließend werden die Bilder binarisiert. Für jeden Bildpunkt ergibt sich somit ein binäres Kodewort $b_0b_1\cdots b_{n-1}$ dessen einzelne Bits b_i der an dieser Stelle beobachteten Folge heller (Wert 1) und dunkler (Wert 0) Streifen entsprechen. Das Kodewort identifiziert eindeutig die Lichtebene, welche den abgebildeten Objektpunkt enthält.

Die Binarisierung bestimmt für jedes Pixel, ob das dem Bild zugeordnete Bit gesetzt wird oder nicht. Aufgrund von Variationen in den Reflektionseigenschaften der Objektoberfläche, Fremdlicht und dem typischen Helligkeitsabfall zu den Bildrändern hin ist die Verwendung eines globalen Schwellwertes für das gesamte Messbild in der Regel unzureichend. Eine besonders robuste Dekodierung ergibt sich hingegen durch die Verwendung eines pixelweisen Schwellwerts.

Dazu wird die projizierte Sequenz um ein vollständig abgedunkeltes und ein vollständig beleuchtetes Bild erweitert (sogenannte Min-Max-Präambel). Diese zusätzlichen Bilder erlauben gleichzeitig, eine Klassifizierung der Pixel in gültige und ungültige Messungen vorzunehmen. Ungültige Messungen treten zum Beispiel dann auf, wenn Teile der Oberfläche zwar von der Kamera gesehen, diese aber aufgrund von Abschattungen vom Projektor nicht beleuchtet werden können. Falls die Gleichung

$$g_{conf} = \Delta g = g_{\max} - g_{\min} < t_g \quad (2.51)$$

erfüllt ist, das heißt falls die Differenz Δg zwischen Hellprojektion und Dunkelprojektion kleiner als ein gewisser Schwellwert t_g ist, wird das Pixel als unsicher eingestuft und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Das Bild, welches die Werte Δg enthält, wird auch als Konfidenzbild bezeichnet. Es ist der Ausgangspunkt für die Berechnung der Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche. Diese Information wird später für die Registrierung unter Verwendung von Grauwertinformation und für die Visualisierung verwendet. Der binarisierte Wert b ergibt sich zu

$$b = \begin{cases} 0 & g < \frac{g_{\max} + g_{\min}}{2} \\ 1 & g \geq \frac{g_{\max} + g_{\min}}{2} \end{cases} \quad (2.52)$$

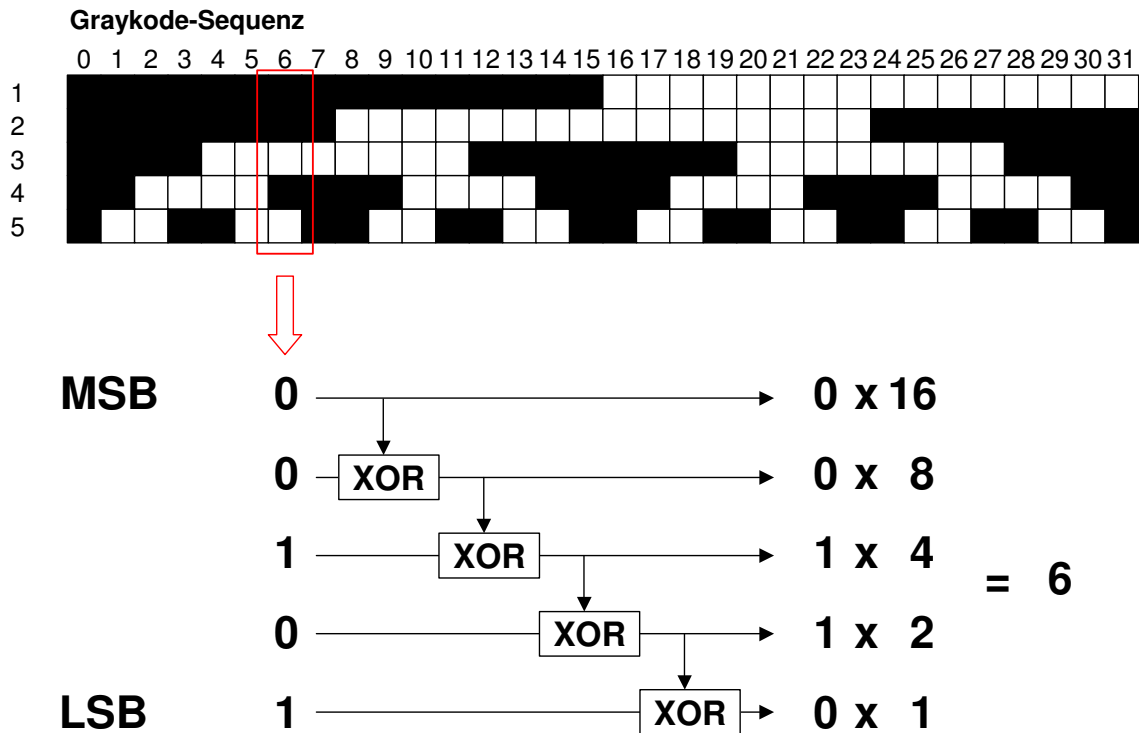


Abbildung 30: Graycode mit 5 Bits zur Kodierung von 32 Linien (oben) und Vorgehen zur Umwandlung in Binärdarstellung. MSB und LSB bezeichnen das höchstwertigste und das niederwertigste Bit (Most Significant Bit / Least Significant Bit) (unten).

Auf diese Weise wird eine schnelle und einfache Binarisierung unter Verwendung eines positionsabhängigen Schwellwertes realisiert. Abgeschattete Bildbereiche werden durch das Setzen eines Fehlerbits im sogenannten Maskenbild von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Die Umwandlung der Bits von Graycode- in Binärcodendarstellung kann mittels einer Folge von hintereinandergeschalteten XOR-Operationen erfolgen (Abbildung 30). Eine effiziente Implementierung wird diese Umwandlung jedoch nur einmal beim Programmstart durchführen und im weiteren Verlauf Look-Up-Tabellen für die schnelle Konvertierung der Codes verwenden.

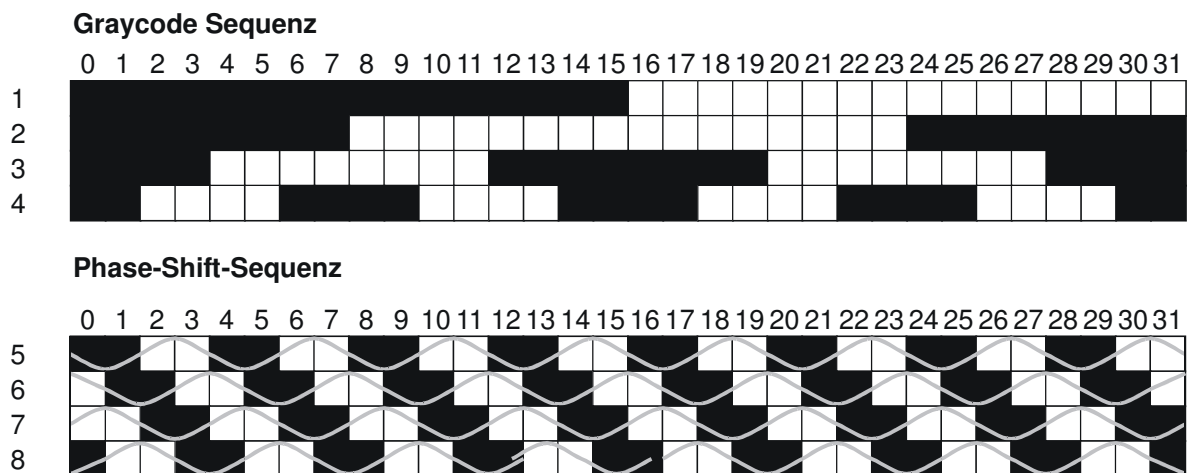


Abbildung 31: Graycode (oben) und Phase-Shift-Sequenz (unten) einer 32-Bit Kode-Sequenz. Besondere Beachtung verdient das Muster mit der Nummer 4 in der Graycode-Sequenz, welches zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten an den Streifengrenzen verwendet wird.

2.7.3 Phase-Shift-Verfahren

Das Phase-Shift-Verfahren ist das am häufigsten verwendete Verfahren zur subpixelgenauen Bildkoordinatenmessung für die flächenhafte Triangulation mit strukturierter Beleuchtung. Ein sinusförmiges Signal wird in x - und y -Richtung in mehreren Schritten phasenverschoben auf das Objekt projiziert. Aus den erfassten Bildern kann für jeden Bildpunkt die Phasenlage ϕ_0 bestimmt und damit die Zuordnung festgelegt werden. Aufgrund der kurzen Periodenlänge, typischerweise drei bis acht Linien, wird eine hohe Messgenauigkeit erzielt. Allerdings ist die Zuordnung nicht eindeutig möglich, da an jeder Stelle $\phi_0 + k \cdot 2\pi$ dieselbe Phase auftritt. Durch die Kombination der Phasenmessung mit der zuvor beschriebenen Graykodemessung ist jedoch eine eindeutige Zuordnung mit hoher Genauigkeit möglich.

In dieser Arbeit wird ein 4er-Phase-Shift-Verfahren verwendet, d. h. es werden vier um $\pi/2$ verschobene Muster projiziert. Ein Problem stellt noch die Erzeugung der sinusförmigen Modulation durch die Projektion binärer Streifenmuster dar.

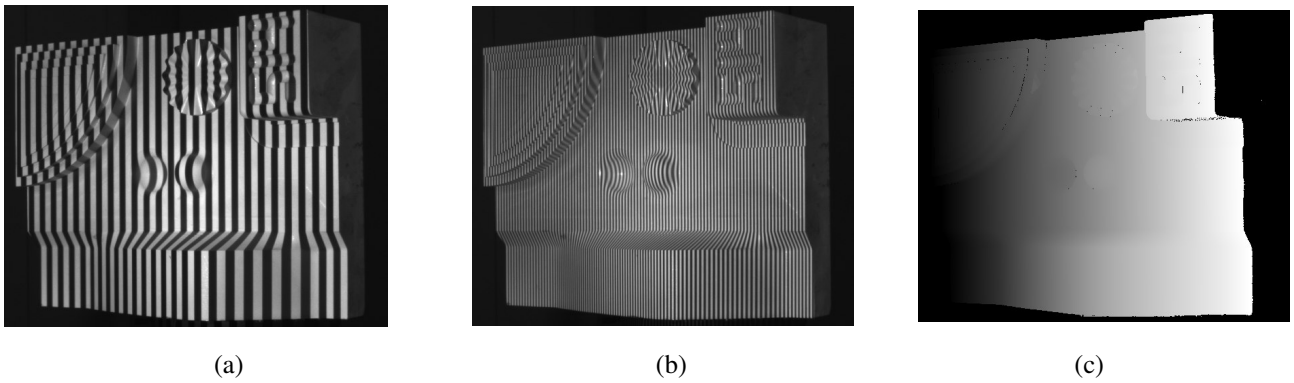


Abbildung 32: (a) Ausschnitt aus der projizierten Graycode-Sequenz. (b) Eines der vier Muster für das Phase-Shift-Verfahren. (c) Rekonstruierte Zuordnungen (x -Komponente).

Zu diesem Zweck wird ein periodisches Muster, bestehend aus jeweils zwei hellen und zwei dunklen Linien, in vier Schritten über das Objekt geschoben. Es wird davon ausgegangen, dass auf dem Übertragungsweg die hohen Frequenzen des Rechtecksignals abgeschwächt werden, wodurch eine sinusähnliche Modulation mit einer Phasenverschiebung von jeweils $\pi/2$ entsteht (Abbildung 31, unten).

Die beobachteten Werte $f(\phi_i)$ an einer bestimmten, festen Position werden durch

$$\begin{aligned} C \cdot \cos(\phi - \phi_0) &= C \cdot \cos \phi_0 \cos \phi + C \cdot \sin \phi_0 \sin \phi \\ &= A \cdot \cos \phi + B \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (2.53)$$

modelliert, wobei die Koeffizienten A und B mit Hilfe einer Fourier-Analyse bestimmt werden:

$$A = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(\phi_i) \cos \phi_i \quad \text{und} \quad B = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(\phi_i) \sin \phi_i \quad (2.54)$$

Die Phasenverschiebung ergibt sich zu $\phi_0 = \arctan(B/A)$, was sich für den speziellen Fall $N = 4$, $\phi_i = \{0, \frac{1}{2}\pi, \pi, \frac{3}{2}\pi\}$ vereinfachen lässt zu:

$$\phi_0 = \arctan \frac{f_1 - f_3}{f_0 - f_2} \quad (2.55).$$

Ein typisches Problem im Zusammenhang mit dem Phasenschiebungsverfahren sind grob falsche Messwerte im Bereich des Übergangs von 2π nach 0. Diese Messfehler entstehen durch kleine Fehler in der Phasenmessung und haben einen Betrag von annähernd einer Periode oder vier Projektorlinien (Abbildung 33 (b)).

Dieses Problem kann durch die Verwendung einer Oversampling-Technik gelöst werden: Wird die Auflösung des Graykodes auf eine halbe Periode der Phasenmessung gesteigert, kann für jede Stelle im Bild ein gültiger Bereich für die beobachteten Phasenwerte angegeben werden, was die Detektion und Korrektur der beschriebenen Phasenmessfehler erlaubt.

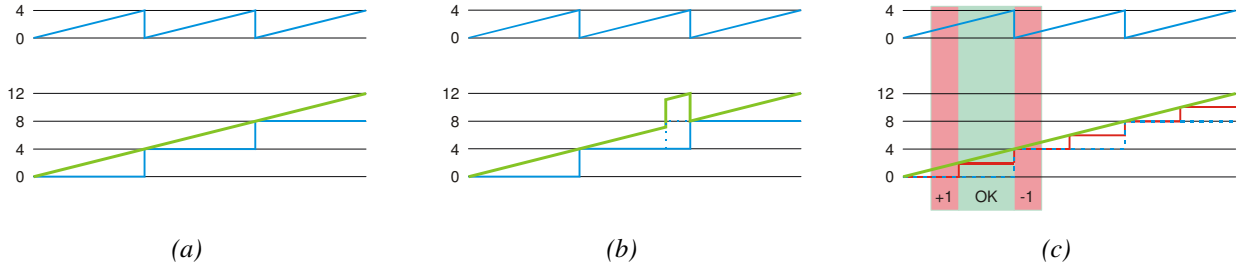


Abbildung 33: (a) Ideale Kombination von Graycode und Phasenmessung. (b) Kleine Fehler in der Kode- oder Phasenmessung führen zu großen Messfehlern in der kombinierten Messung. (c) Die Oversampling-Technik ermöglicht es, grobe Fehler zu detektieren und sogar zu korrigieren.

Hierbei ist zwischen geraden und ungeraden Graykodewerten zu unterscheiden:

Gerade Graykodewerte: Für gerade Graykodewerte liegen die gültigen Phasenwerte in dem Intervall $I_{\text{gerade}} = [0, \pi]$.

Bei Werten größer als $\frac{3}{2}\pi$ wird davon ausgegangen, dass sich der Punkt am Übergang zwischen zwei Graykodewerten befindet und der beobachtete Phasenwert zum nächstniedrigeren Graykodewert gehört. Der gemessene Wert ist daher um eine ganze Periodenlänge nach unten zu korrigieren:

$$\phi' = \begin{cases} \phi - 2\pi & \phi > \frac{3}{2}\pi \\ \phi & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.56)$$

Ungerade Graykodewerte: Bei ungeraden Graykodewerten liegen gültige Phasenwerte in dem Intervall $I_{\text{ungerade}} = [\pi, 2\pi]$. Da der Beginn einer Periode jeweils mit einem geraden Graykodewert zusammenfällt, muß jedoch um eine halbe Periode nach unten korrigiert werden. Ist der ermittelte Phasenwert hingegen kleiner als $\pi/2$, wird die Messung um eine halbe Periodenlänge nach oben korrigiert, was wiederum einer Verschiebung um eine ganze Periode entspricht (Abbildung 33 (c)):

$$\phi' = \begin{cases} \phi + \pi & 0 \leq \phi < \frac{1}{2}\pi \\ \phi - \pi & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.57)$$

Der endgültige Positionswert $\hat{x}$ ergibt sich aus der absolut eindeutigen Position x_{GC} , welche anhand der Graycodebilder berechnet wurde, und der Relativposition aus dem berechneten Phasenwert ϕ' :

$$\hat{x} = 2x_{GC} + \frac{2}{\pi}\phi' - \frac{1}{2} \quad (2.58)$$

Die Subtraktion von $\frac{1}{2}$ in (2.58) stammt aus der Definition des Bildkoordinatensystems (der äußerste Punkt in der linken unteren Ecke besitzt die Koordinaten $(-0.5, -0.5)$).

Der Algorithmus zur Auswertung der Phase-Shift-Bilder lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Berechne Konfidenzbild gemäß (2.51). Setze Fehlerbit in Maskenbild, falls Kontrast zu gering.
2. Binarisiere Graycodebilder für x - und y -Richtung nach (2.52). Wandle Bitfolge mittels LUT in absolut eindeutige Liniennummer.
3. Bestimme Phasenwerte (Relativposition, Feinmessung) nach (2.55).
4. Überprüfe, ob Phasenwerte und Liniennummern konsistent sind. Korrigiere Phasenwerte gemäß (2.56) und (2.57).
5. Berechne Koordinate des homologen Punktes in x - und y -Richtung gemäß (2.58).
6. Speichere Konfidenzbild, Maskenbild, x -Phase-Shift-Bild und y -Phase-Shift-Bild als Ergebnisbilder.

2.7.4 Genauigkeitsaspekte beim Phase-Shift-Verfahren

Um die in der Berechnung der Phasenwerte enthaltenen Fehler abzuschätzen, wird die Intensität der Phasen-Sequenz durch

$$f(C, D, \phi_0) = C \cdot \cos(\phi - \phi_0) + D \quad (2.59)$$

approximiert, wobei C , ϕ_0 und D die unbekannten Größen für die Amplitude, die Phasenverschiebung und die mittlere Helligkeit darstellen.

Die Bestimmung dieser Größen erfolgt durch eine Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate unter Verwendung von vier Beobachtungsgleichungen

$$g_i + v_i = C \cdot \cos(\phi_i - \phi_0) + D \quad (2.60)$$

wobei $\phi_i = \{0, \pi/2, \pi, 3\pi/2\}$. Werden die beobachteten Intensitätswerte als unkorreliert mit der Varianz σ_g^2 (Rauschen der Grauwerte) angenommen, ergibt sich die Kovarianzmatrix der Intensitätswerte zu $\Sigma_g = \text{diag}(\sigma_g^2, \dots, \sigma_g^2)$. Mit der Diagonalmatrix $A^T A = \text{diag}(4, 2, 2C^2)$ ergibt sich $\sigma_{\hat{\phi}_0}$ schließlich zu

$$\sigma_{\hat{\phi}_0} = \frac{\sigma_g}{\sqrt{2}C} \quad (2.61).$$

Wird $\sigma_g = 2$ und $C = 50$ angenommen, was einer Modulation von 100 Grauwerten entspricht, erhält man $\sigma_{\hat{\phi}_0} = 0.057$. Da 4 Projektorlinien den Bereich $[0, 2\pi]$ abdecken (Abbildung 31), resultiert eine Messgenauigkeit von ungefähr 1/55 der Linienbreite.

Die theoretische Fehleranalyse liefert also Genauigkeiten, welche mit den Bildmessgenauigkeiten in klassischen photogrammetrischen Aufgabenstellungen vergleichbar sind.

Diese Analyse setzt voraus, dass es sich bei den Fehlern um zufällige Messfehler handelt. Häufig ist beim Phasenshiftverfahren jedoch aufgrund von

- Variationen in den Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche
- Abweichungen des projizierten Musters von der im Modell angenommenen Sinusform

eine systematische Verschiebung der gemessenen Phase zu beobachten. In Abhängigkeit von der Messsituation und dem Messobjekt können diese systematischen Fehler die Größenordnung der zufälligen Fehler erreichen oder sogar

überschreiten. Der erste Fehlereinfluss ist ein grundsätzliches Problem bei der aktiven Triangulation. Die Ursache liegt darin, dass jedes Pixel der Kamera die reflektierte Strahlung von einem bestimmten Bereich der Objektoberfläche, dem sogenannten Footprint, integriert. Variationen in den Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche führen dazu, dass diese Integration ungleichmäßig erfolgt. Abbildung 34 zeigt den Footprint eines Pixels. Die schwarze Teilfläche strahlt überhaupt kein Licht zurück. Dies führt dazu, dass der Grauwert des Pixels nur durch den weiß dargestellten Teil der Objektoberfläche bestimmt wird. Die Analyse der Grauwerte führt deshalb zu einem systematisch nach links verschobenen Phasenwert.

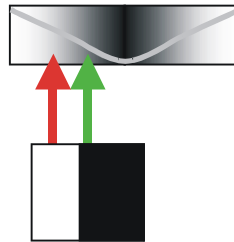


Abbildung 34: Systematische Verschiebung der gemessenen Phase aufgrund der Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche.

Das zweite Problem ist spezifisch für das Phasenshiftverfahren. Die Auswertung setzt ein ideal sinusförmiges Signal voraus. Tatsächlich wird jedoch ein Rechtecksignal projiziert. Falls sich die Objektoberfläche außerhalb der Fokalebene befindet, kann das Rechtecksignal nicht aufgelöst werden und es ergibt sich eine nahezu sinusförmige Helligkeitsmodulation auf dem Objekt. Befindet sich die Objektoberfläche hingegen im Fokus, ergibt sich eine schärfere Abtrennung zwischen dunkel und hell. Dadurch werden die Signalfanken steiler, was zu einer Verfälschung der Messwerte führt.

Abhilfe kann durch die Verwendung einer Projektionseinheit geleistet werden, deren optischer Aufbau die Erzeugung von exakt sinusförmigen Strukturen ermöglicht [Gruber und Häusler 1992]. Ein rein rechnerisches Verfahren, welches zudem Imperfektionen der Sensorhardware berücksichtigt, wurde von [Wiora 2000] vorgeschlagen. Es basiert auf einer Tabellierung der Abweichungen von Testmessungen einer ebenen Fläche und deren Berücksichtigung bei der Auswertung der Phasenbilder. In den meisten Systemen werden die beschriebenen systematischen Fehler jedoch einfach toleriert.

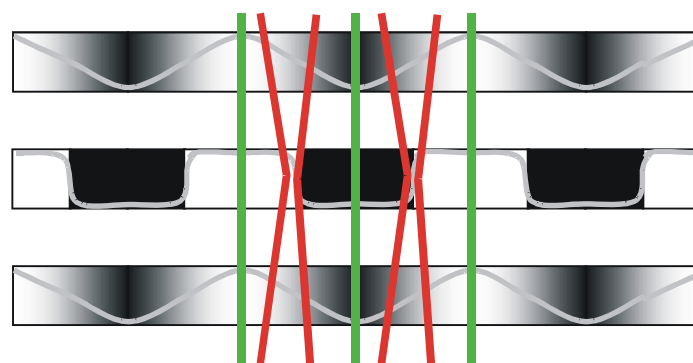


Abbildung 35: Systematische Verschiebung der gemessenen Phase aufgrund von Abweichungen des Musters von der Sinusform.

2.7.5 Line-Shift-Verfahren

Das beschriebene Phase-Shift-Verfahren findet in akademischen und kommerziellen Sensorsystemen breite Verwendung. Die damit erzielbaren Messungen weisen eine hohe Qualität auf, zeigen jedoch die beschriebenen systematischen Fehler. Ein weiterer Nachteil wird erst beim Einsatz mehrerer Kameras deutlich: Die Zuordnung erfolgt derart, dass für jedes Kamerapixel die zugehörige Position in der Bildebene des Projektors mit Subpixelgenauigkeit bestimmt wird. Die

Zuordnung von Messungen verschiedener Kameras ist dadurch jedoch nicht möglich. In diesem Abschnitt wird daher ein neues Verfahren zur Datenerfassung eingeführt, welches die in Abschnitt 2.2 gestellten Forderungen hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit besser erfüllt.

Das sogenannte Line-Shift-Verfahren stellt gewissermaßen eine Erweiterung der Lichtschnitttechnik dar, bei der mehrere Lichtebenen gleichzeitig projiziert werden. Im Unterschied zu bisherigen Ansätzen erfolgt die Identifizierung der Lichtebenen jedoch nicht durch Auszählen der Linien oder durch die Betrachtung derer nachbarschaftlichen Beziehungen, sondern anhand einer absoluten Adressierung über eine vorgeschaltete Graykodesequenz. Es sind daher keine Annahmen über die Form oder Kontinuität der Oberfläche notwendig.



Abbildung 36: Graycode (oben) und Line-Shift-Sequenz (unten) einer fiktiven Projektionseinheit mit 32-Linien. Mit nur sechs Projektionen lässt sich bei der Subpixelmessung die ganze Auflösung des Projektors ausnützen.

Die Erzeugung der Lichtebenen erfolgt durch das Hellschalten jeder n . Projektorlinie. Mit n Aufnahmen kann somit die volle Auflösung der Projektionseinheit ausgenutzt werden. Um die Zahl der notwendigen Aufnahmen zu reduzieren, ist n möglichst klein zu wählen. Andererseits können in steilen Objektregionen die beobachteten Linien im Bild stark zusammenrücken, was einen größeren Wert für n wünschenswert macht, um trotzdem eine sichere Auswertung zu ermöglichen. Es hat sich gezeigt, dass $n = 6$ einen guten Kompromiss zwischen Aufnahmegeschwindigkeit und -zuverlässigkeit darstellt. Soll die Robustheit weiter gesteigert werden, kann n jedoch auch größer gewählt werden.

Bei der Aufnahme wird zusätzlich zur Graycode-Sequenz eine Sequenz von Line-Shift-Mustern projiziert, bei der die hellen Linien jeweils um eine Linie verschoben sind (Abbildung 36). Die Graycode-Sequenz erlaubt es, die Position homologer Punkte bis auf zwei Projektorlinien genau aufzulösen. Die subpixelgenaue Messung der Punkte erfolgt dann mit Hilfe der Line-Shift-Bilder.

Im Rahmen der Datenauswertung werden die hellen Linien aus den Aufnahmen mit horizontalen und vertikalen Streifenmustern im Kamerabild bestimmt und miteinander verschnitten. Die Koordinaten des Schnittpunkts korrespondieren mit derjenigen ganzzahligen Projektorzeile und -spalte, durch welche die Linien erzeugt wurden. Bei der Verwendung mehrerer Kameras wird dieselbe Art der Auswertung für alle Kameras durchgeführt. Die Zuordnung zwischen beliebigen Kameras erhält man dann als Schnittpunkte der selben Projektorzeile und -spalte (Abbildung 37).

Der Übergang vom Raster der Kamera zum Raster der Projektionseinheit bei der Bestimmung der homologen Punkte stellt den entscheidenden Unterschied zwischen dem Phase-Shift-Verfahren und dem Line-Shift-Verfahren dar. Er ermöglicht eine wesentlich flexiblere und robustere Datenerfassung und Auswertung. So ist es zum Beispiel möglich, die Bildkoordinaten des Projektors bei der Berechnung der Objektpunkte gar nicht zu berücksichtigen und die Punktbestimmung nur mittels den Beobachtungen der Kameras durchzuführen. Wird hingegen ein kalibrierter Projektor verwendet, können die zusätzlichen Beobachtungen zu einer Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit beitragen.

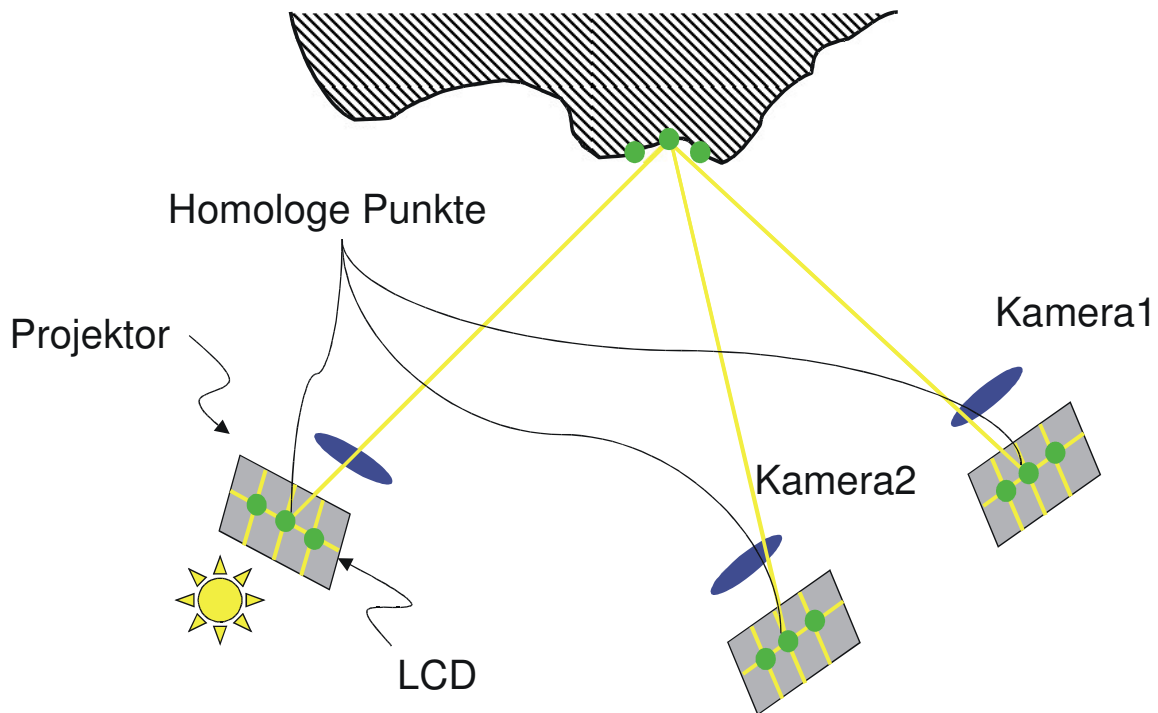


Abbildung 37: Skizze zur simultanen Lösung des Korrespondenzproblems für mehrere Kameras.

Wie beim Phase-Shift-Verfahren wird zunächst die Auswertung der Graycodebilder durchgeführt. Um den Einfluss von Fremdlicht zu verringern, werden die Line-Shift-Bilder durch Subtrahieren des Dunkelbildes aus der Min-Max-Präambel reduziert.

Die eigentliche Detektion der Linienzentren erfolgt mit einem sogenannten Peak-Zentrums-Operator (Abschnitt 2.7.9). Dieser Operator wird bei den Bildern mit vertikalen Streifen (x-Bilder) zeilenweise, bei den Bildern mit horizontalen Streifen (y-Bilder) spaltenweise auf die reduzierten Linienbilder angewandt.

Für jedes zuverlässig erkannte Linienzentrum wird die dazugehörige Liniennummer bestimmt. Durch den Einsatz einer Oversampling-Technik kann dieser Vorgang unter Verwendung der Graykodewerte sehr robust erfolgen. Die dekodierten Graycodebilder ermöglichen es zunächst, die absolute Position des Zentrums auf zwei Linien genau festzulegen. Von der Definition der Muster her ist bekannt, dass beim i . Line-Shift-Bild nur die Projektorlinien ($k n + i$) tatsächlich im Bild vorkommen. Für $n = 6$ bedeutet dies, dass jeweils drei mögliche Graykodewerte auf eine ganzzahlige Liniennummer abgebildet werden können. Somit ist auch bei der fehlerhaften Dekodierung eines Graycodebits noch eine korrekte Identifizierung der Liniennummer möglich (Abbildung 38).

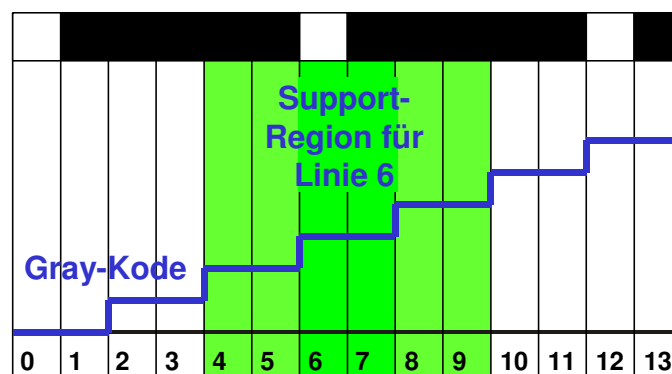


Abbildung 38: Die Verwendung einer Oversampling-Technik ermöglicht die robuste Dekodierung der Liniennummer: Aufgrund der Auflösung des Graycodes von zwei Projektorlinien ergibt sich bei einem Abstand der hellen Linien von $n=6$ Linien ein Bereich von drei Graykodewerten, welche der selben Linie zugeordnet werden.

Als Zwischenergebnis erhält man für die x - und die y -Komponente jeweils n symbolische Bilder (x -ID-Bild und y -ID-Bild), in denen die Nummern der detektierten Linien gespeichert sind, sowie jeweils n weitere Bilder, welche die subpixelgenaue Position (genauer: die subpixelgenaue x -Koordinate des Linienzentrums für vertikale Linien, die subpixelgenaue y -Koordinaten für horizontale Linien) der Linie im Kamerabild enthalten.

Im nächsten Schritt werden die vertikalen Linien jedes x -Bildes mit den horizontalen Linien aller y -Bilder verschnitten. Dazu werden an den Kreuzungspunkten zwei Geradengleichungen gemäß Abbildung 39 angesetzt. Die Koordinaten des Schnittpunktes der beiden Geraden geben die gesuchte Position des Schnittpunktes der Projektorlinien an.

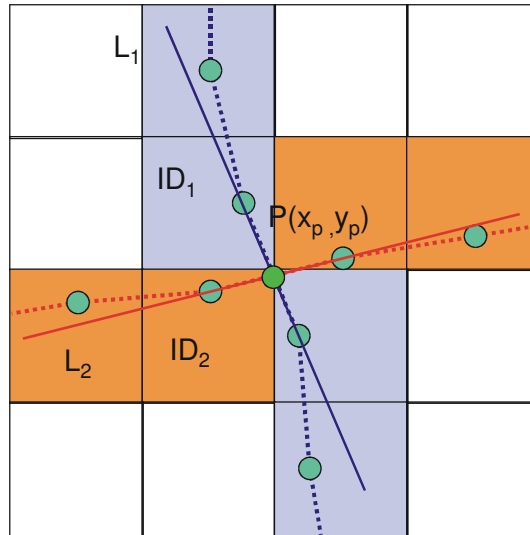


Abbildung 39: Verschneiden der detektierten Linien: Die Lage des Zentrums innerhalb eines jeden Pixels variiert nur in einer Koordinatenrichtung. Für das Aufstellen der Geradengleichungen werden auf jeder Seite der Kreuzung die jeweils nächsten Punkte verwendet. Die Position des zum Projektorpunkt (ID_1 , ID_2) homologen Punktes in der Bildebene der Kamera ergibt sich als Schnittpunkt der beiden Geraden.

Für die Kompensation von Fehlern aufgrund von Variationen in den Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche ist noch eine besondere Behandlung der Linienbilder erforderlich. Diese Variationen stören die symmetrische Gestalt der Intensitätsverteilung entlang des Grauwertprofils des reflektierten Signals.

Bei der Verwendung von mindestens zwei Kameras in Kombination mit einem (möglicherweise unkalibrierten) Projektor, der nicht zur Punktbestimmung beiträgt, sind keine besonderen Schritte notwendig, da alle Kameras gleichermaßen das gestörte Muster beobachten. Wird hingegen ein kalibrierter Projektor verwendet, wird die Zuordnung zwischen Kamera und Projektor durch die Oberflächeneigenschaften des Objekts verfälscht. Dieser Einfluss kann dadurch kompensiert werden, dass der Dynamikumfang jedes einzelnen Pixels durch eine lineare Skalierung des Grauwertes normalisiert wird

$$g_{norm} = \frac{255}{g_{conf}} g \quad (2.62)$$

Das bei der Auswertung der Graycodebilder berechnete Konfidenzbild enthält bereits pixelweise die Variationsbreite der Grauwerte.

Experimentelle Untersuchungen haben ergeben, dass durch die vorgeschlagene Normalisierung eine deutliche Verbesserung der oberflächeninduzierten Fehlereinflüsse erreicht werden kann (Abbildung 40). Es ist dabei jedoch zu beachten, dass das in den Grauwerten enthaltene Rauschen im selben Umfang skaliert wird.

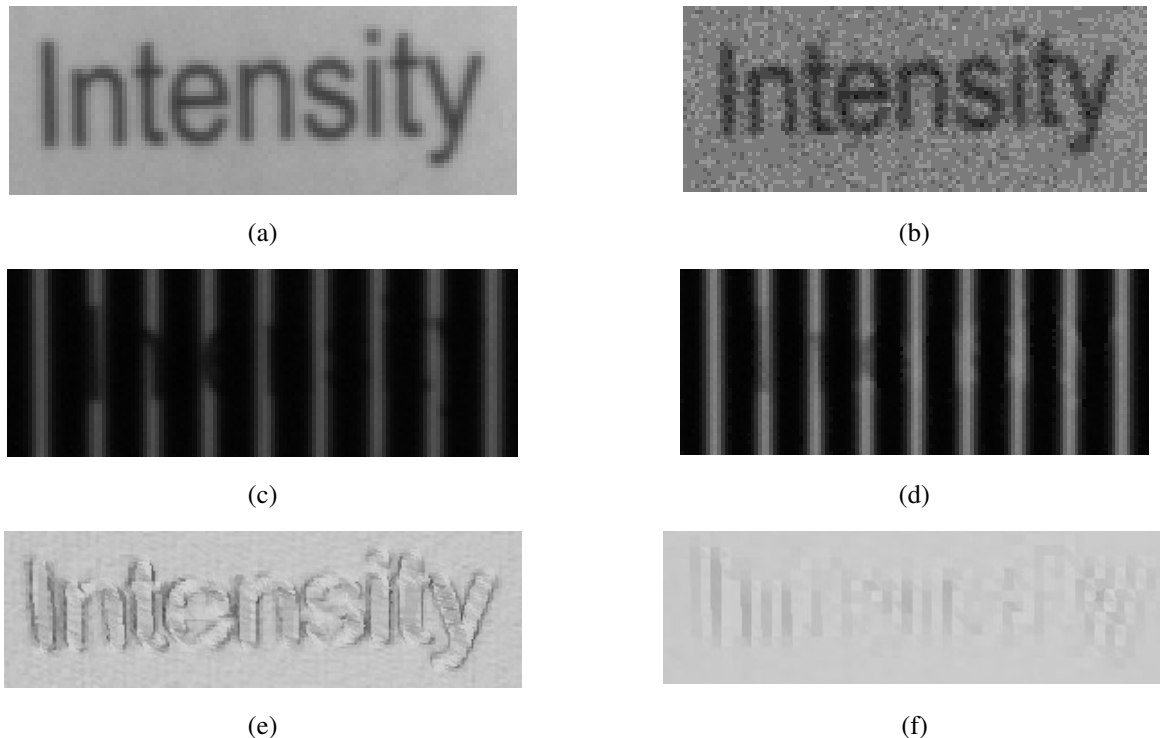


Abbildung 40: (a) Hellbild aus der Projektorsequenz. (b) Dunkelbild aus der Projektorsequenz (kontrastverstärkt). (c) Line-Shift-Bild auf einer Oberfläche mit großen Reflektivitätsunterschieden. (d) Korrigiertes Bild aus der Line-Shift-Sequenz. (e) Dreidimensionale Darstellung der Oberfläche nach Auswertung mittels Phasenschiebungsverfahren. (f) Dieselbe 3D-Oberfläche nach Auswertung mittels Line-Shift-Verfahren.

Zusammengefasst ergibt sich für die Line-Shift-Auswertung folgender Algorithmus:

1. Berechne Konfidenzbild gemäß (2.51). Setze Fehlerbit in Maskenbild, falls Kontrast zu gering.
2. Binarisiere Graycodebilder für x - und y -Richtung nach (2.52). Wandle Bitfolge mittels LUT in absolut eindeutige Liniennummer.
3. Detektiere die Mittelpunkte der Streifenlinien in den normalisierten x - und y -Line-Shift-Bildern (2.62) mittels Peak-Zentrums-Operator (Abschnitt 2.7.9) und identifiziere die zugehörige Projektorlinie anhand des Bildindex und den berechneten Liniennummern aus den Graycodebildern.
4. Finde alle Kreuzungspunkte zwischen horizontalen und vertikalen Linien. Berechne Schnittpunkte mittels Geradenschnitt.
5. Speichere Konfidenzbild, Maskenbild, x -Line-Shift-Bild und y -Line-Shift-Bild als Ergebnisbilder.

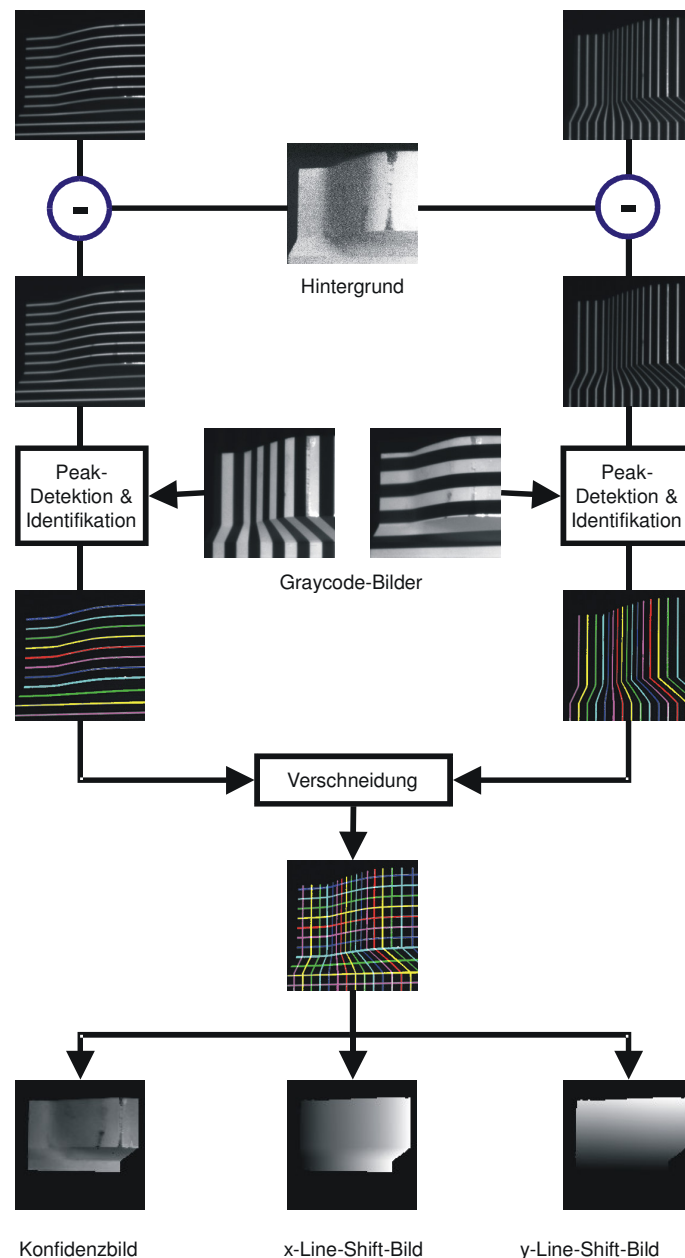


Abbildung 41: Schematische Darstellung des Line-Shift-Verfahrens.

2.7.6 Genauigkeitsaspekte beim Line-Shift-Verfahren

Die Genauigkeit des Line-Shift-Verfahrens hängt in erster Linie von der Genauigkeit der Peak-Zentrums-Detektion ab (Abschnitt 2.7.9). Die Form des Objekts selbst hat einen weiteren, wenn auch geringeren Einfluss auf die Bestimmung der Bildkoordinaten, da Verzerrungen des Linienmusters durch die Objektoberfläche die Schnittgeometrie beim Verschneiden der detektierten Linien verändern. Ein weitere Fehlerquelle stellt die lineare Approximation der Linien im Bereich des Schnittpunktes dar. Der Absolutbetrag beider Fehlerinflüsse ist umso geringer, je höher die Auflösung des Projektors gewählt wird. Er wird in dieser Arbeit vernachlässigt. Als Maß für die Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung wird ausschließlich die Güte der Peak-Zentrumsbestimmung verwendet (Abschnitt 2.7.9).

2.7.7 Space-Time-Verfahren

Mit dem Line-Shift-Verfahren wurde in den vergangenen Abschnitten ein Verfahren vorgestellt, welches die in Abschnitt 2.2 gestellten Anforderungen erfüllt. Ein Nachteil des Verfahrens in der vorgenommenen Implementierung ist der verhältnismäßig hohe Ressourcenverbrauch für die Speicherung von temporären Bildern beim Verschneiden der

Linien. Dafür ermöglicht das Line-Shift-Verfahren eine sehr genaue und flexible Datenerfassung, insbesondere beim Einsatz mehrerer Kameras. Für Messsysteme, welche lediglich einen kalibrierten Projektor in Kombination mit einer kalibrierten Kamera verwenden, wird diese Flexibilität nicht unbedingt benötigt.

Mit dem Space-Time-Verfahren wird deshalb ein weiteres, ressourcenschonendes Verfahren zur Bildkoordinatenmessung vorgestellt. Es verwendet dieselbe Mustersequenz wie das Line-Shift-Verfahren. Die Auswertung findet jedoch im Bildraum der Kamera statt. Zur Bestimmung der Bildkoordinaten wird der zeitliche Verlauf der pro Pixel erfassten Intensität betrachtet und der Zeitpunkt des Intensitätsmaximums ermittelt. Da die Position der projizierten Streifen in den n diskreten Zeitpunkten der Bildaufzeichnung bekannt ist, ist damit für jedes Kamerapixel die Position des korrespondierenden Punktes in der Bildebene des Projektors festgelegt.

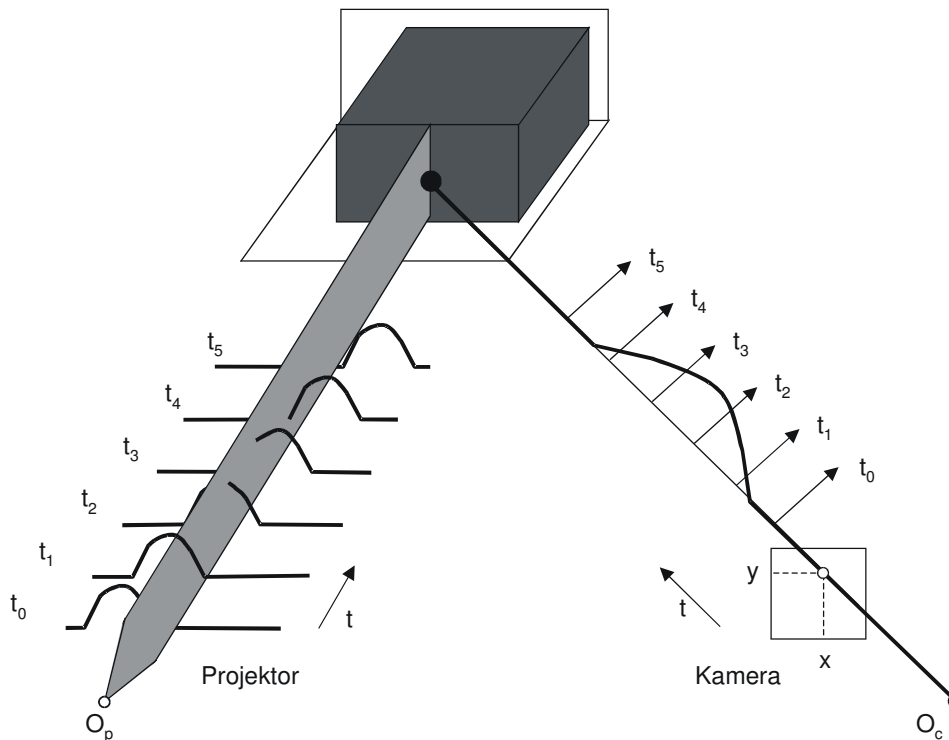


Abbildung 42: Der zeitliche Intensitätsverlauf ermöglicht die Bestimmung des Zeitpunktes, zu welchem die helle Linie eine bestimmte Position im Bild erreicht.

Der Name Space-Time-Verfahren entstammt einer Veröffentlichung von [Curless und Levoy 1995], welche die Betrachtung des zeitlichen Intensitätsverlaufs für die Eliminierung verschiedener Fehlerquellen bei Laser-Lichtschnittsensoren vorgeschlagen haben. Das dort vorgeschlagene Verfahren erfordert jedoch die Speicherung aller Aufnahmen, während die Laserlinie über das Objekt geführt wird (mehrere hundert Bilder), was die Verwendung eines digitalen Videorecorders oder einer Videokompressionskarte notwendig macht. Aufgrund des großen technischen Aufwands hat diese Methode bis jetzt keine weite Verbreitung gefunden. Die parallele Natur flächenhaft projizierender Projektionseinheiten ermöglichen hingegen mit nur n Aufnahmen die gesamte zur Verfügung stehende Auflösung des Meßsystems auszunützen (zuzüglich der Aufnahmen für die Erfassung der Graycode-Sequenz).

Die Auswertung ähnelt dem Vorgehen bei den beiden bereits beschriebenen Auswerteverfahren, d.h. es wird zuerst die Graycodesequenz ausgewertet. Bereiche mit geringem Kontrast werden durch Setzen eines Fehlerbits im Maskenbild von der weiteren Verarbeitung ausgeschlossen.

Um den Zeitpunkt zu bestimmen, in welchem das Peak-Zentrum ein bestimmtes Pixel erreicht hat, werden die n aufeinanderfolgenden Werte des Pixels als eindimensionales Signal betrachtet und mit Hilfe eines der in Abschnitt 2.7.9 beschriebenen Verfahren die Position des Intensitätsmaximums bestimmt. Um die Auswertung symmetrisch zur Position maximaler Intensität zu machen und um Randeffekte beim Positionieren der Operatoren zu vermeiden, wird das Signal zyklisch wiederholt.

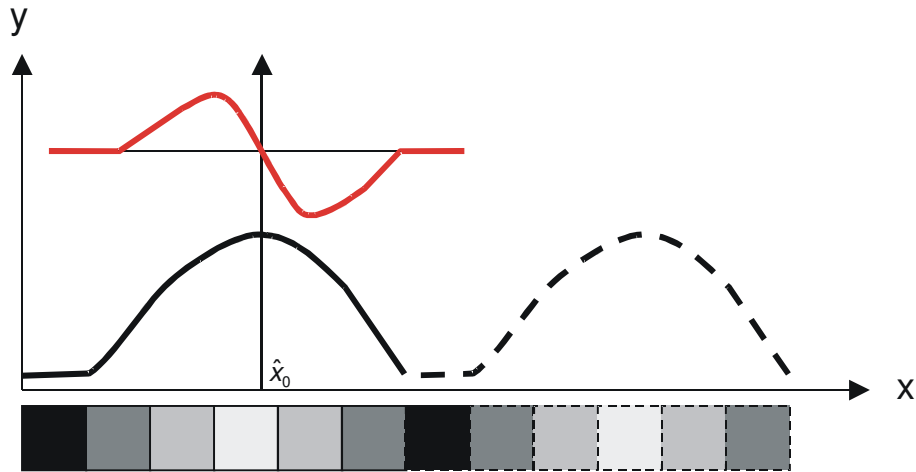


Abbildung 43: Die erfassten Grauwerte werden zyklisch wiederholt, um Randeffekte beim Positionieren der Operatoren zu vermeiden.

Die detektierte Position $\hat{x}_0$ fällt im Allgemeinen nicht exakt mit den ganzzahligen Positionen $i \in [0 \dots n-1]$, das heißt den Zeitpunkten, in welchen das Muster i projiziert wurde, zusammen. Für die Bestimmung der Absolutposition $\hat{x}$ wird $\hat{x}_0$ daher zunächst auf den nächsten ganzzahligen Wert i_0 gerundet. Der Index i_0 wird dann verwendet, um mit dem bei der Line-Shift-Auswertung beschriebenen Oversampling-Verfahren die Liniennummer k der nächstliegenden Linie robust zu bestimmen. Die absolute Position ergibt sich schließlich subpixelgenau aus der Liniennummer und der detektierten Position des Peak-Zentrums, wobei beachtet werden muss, ob bei der Ermittlung von i_0 auf- oder abgerundet worden ist:

$$\hat{x} = \begin{cases} k + \hat{x}_0 & \hat{x}_0 > i_0 \\ k - 1 + \hat{x}_0 & \hat{x}_0 < i_0 \end{cases} \quad (2.63)$$

2.7.8 Genauigkeitsaspekte beim Space-Time-Verfahren

Für die Genauigkeit des Space-Time-Verfahrens gilt weitgehend das beim Line-Shift-Verfahren Gesagte, das heißt die Genauigkeit hängt vor allem von der Detektion des Peak-Zentrums ab (Abschnitt 2.7.9). Im Gegensatz zum Line-Shift-Verfahren hat die Form des Objekts nahezu keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Bildkoordinaten, abgesehen von sehr schwer modellierbaren Effekten wie Mischpixel und Mehrwegereflektionen.

2.7.9 Bestimmung des Linienzentrums

Ein wichtiger Aspekt bei dem vorgestellten Line-Shift- und Space-Time-Verfahren ist die subpixelgenaue Bestimmung des Zentrums $\hat{x}_c$ einer hellen Linie auf dunklem Hintergrund. Die Aufgabenstellung entspricht der Detektion der Position der Lichtebeine bei den Laser-Lichtschnittsensoren. Für dieses Problem wurden in der Computer-Vision-Literatur eine Reihe verschiedener Verfahren vorgeschlagen. In [Trucco et al. 1998] werden insgesamt fünf Verfahren anhand von synthetischen Daten hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit und der Empfindlichkeit gegenüber Rauschen untersucht:

Gauß'sche Approximation: Dieses Verfahren passt eine Gauss-Kurve an die drei Bildpunkte um das Intensitätsmaximum an. Falls $g(x_0-1)$, $g(x_0)$ und $g(x_0+1)$ die Intensitätswerte an den Positionen x_0-1 , x_0 und x_0+1 sind, wobei $g(x_0)$ den größten Wert darstellt, dann ergibt sich die Subpixelposition $\hat{x}_c$ des Peak-Zentrums gemäß:

$$\hat{x}_c = x_0 - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln g(x_0 + 1) - \ln g(x_0 - 1)}{\ln g(x_0 - 1) + \ln g(x_0 + 1) - 2 \ln g(x_0)} \right) \quad (2.64)$$

Da die Grauwerte $g(x)$ ganzzahlige Werte im Bereich von 0 bis 255 sind, lassen sich die logarithmierten Werte in einer Look-Up-Tabelle speichern. Auf die aufwändige Berechnung der Logarithmen kann damit verzichtet werden. Die Autoren geben an, in der Literatur keine Referenz auf diese Art von Peak-Detektor gefunden zu haben. Es wird jedoch weiter unten gezeigt, dass die in [Curless 1997] beschriebene Art der Zentrumsbestimmung dieser Formulierung entspricht.

Schwerpunktsbestimmung: Bei der Schwerpunktbestimmung erfolgt die Berechnung des Peak-Zentrums durch das Bilden eines gewichteten Mittelwertes. Der Operator mit einer Maskenbreite von drei Pixel ist in Formel (2.65) gegeben. Er lässt sich jedoch leicht für andere Maskenbreiten erweitern.

$$\hat{x}_c = \left(\frac{g(x_0 - 1)(x_0 - 1) + g(x_0)x_0 + g(x_0 + 1)(x_0 + 1)}{g(x_0 - 1) + g(x_0) + g(x_0 + 1)} \right) = x_0 + \left(\frac{g(x_0 + 1) - g(x_0 - 1)}{g(x_0 - 1) + g(x_0) + g(x_0 + 1)} \right) \quad (2.65)$$

Lineare Interpolation: Die Position des Zentrums wird durch das Ansetzen einer linearen Beziehung für die Intensitätswerte entlang dem Profil ermittelt:

$$\hat{x}_c = \begin{cases} x_0 - \frac{g(x_0 - 1) - g(x_0 + 1)}{2(g(x_0) - g(x_0 - 1))} & g(x_0 + 1) > g(x_0 - 1) \\ x_0 - \frac{g(x_0 - 1) - g(x_0 + 1)}{2(g(x_0) - g(x_0 + 1))} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.66)$$

Parabelschätzung: Dieser Operator wird über eine Entwicklung in eine Taylor-Reihe an der Stelle x_0 (Position des Intensitätsmaximums) hergeleitet. Wenn sich die wahre Peak-Position bei $x_0 + \delta$ befindet, erhält man aus

$$f'(x_0 + \delta) = 0 = f'(x_0) + \delta f''(x_0) + O(\delta^2) \quad (2.67)$$

unter Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung die Position des Peak-Zentrums:

$$\hat{x}_c = x_0 + \delta = x_0 + \frac{g(x_0 + 1) - g(x_0 - 1)}{2(g(x_0 + 1) - 2g(x_0) + g(x_0 - 1))} \quad (2.68)$$

Der Name drückt aus, dass diese Lösung der Anpassung einer Parabel an die drei Punkte $g(x_0 - 1)$, $g(x_0)$ und $g(x_0 + 1)$ entspricht.

Blais-und-Rioux-Operatoren: [Blais und Rioux 1986] haben eine Reihe von Operatoren entwickelt, welche zunächst das Faltungsprodukt der Profilwerte mit einem Ableitungsoperator bilden. Das Zentrum des Peaks wird dann mittels einer linearen Interpolation des Nulldurchgangs im abgeleiteten Signal bestimmt. Eine genauere Beschreibung dieser Operatorenfamilie wird weiter unten angegeben.

Als Ergebnis der Untersuchungen berichten [Trucco et al. 1998], dass die Gauß'sche Approximation und die Familie der Blais-und-Rioux-Operatoren eine signifikant höhere Leistungsfähigkeit, insbesondere im Umgang mit verrauschten Signalen, besitzen. Es wurden daher beide Operatoren für die Auswertung nach dem Line-Shift und Time-Space-Verfahren verwendet. In den nachfolgenden Abschnitten werden beide Operatoren im Detail vorgestellt, sowie die in den Originalpublikationen nicht vorhandenen Gleichungen für Genauigkeitsabschätzungen hergeleitet.

2.7.9.1 Die Operatoren von Blais und Rioux

Die Operatoren von Blais und Rioux wurden ursprünglich für die Implementierung als Low-Cost-Hardwarelösung für Laser-Lichtschnittsensoren entwickelt [Blais und Rioux 1986]. Die verwendeten FIR-Filter haben den Vorteil, dass sie sich leicht als elektronische Schaltungen realisieren lassen. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Operatoren aufgrund ihrer Bandpass-Charakteristik hervorragend für die Auswertung verrauschter Signale eignen [Blais und Rioux 1986; Trucco et al. 1998; Reubelt 2001].

Für die Berechnung des Peak-Zentrums wird das Signal zunächst mit einem Ableitungsoperator gefaltet. Die hierzu verwendeten Filtermasken¹

$$br_5(x) = -g(x-2) - g(x-1) + g(x+1) + g(x+2) \quad (2.69)$$

und

$$br_7(x) = -g(x-3) - g(x-2) - g(x-1) + g(x+1) + g(x+2) + g(x+3) \quad (2.70)$$

sind Bandpassfilter, d.h. es findet neben der Ableitung gleichzeitig eine Glättung des Signals statt. Das resultierende Signal hat eine charakteristische Form: es steigt ausgehend von der Nulllinie zunächst an, erreicht das Maximum, hat im Zentrum des Peaks einen Nulldurchgang und taucht dann ab, um sein Minimum zu erreichen und anschließend zur Nulllinie zurückzukehren (Abbildung 44). Die Bestimmung des Peak-Zentrums selbst erfolgt mittels einer linearen Interpolation der Position des Nulldurchgangs des gefalteten Signals:

$$\hat{x}_c = x_0 + \delta = x_0 + \frac{g(x_0)}{g(x_0) - g(x_0 + 1)} \quad (2.71)$$

Die Position x_0 ist dabei so zu wählen, dass $g(x_0) \geq 0$ und $g(x_0 + 1) < 0$ gilt.

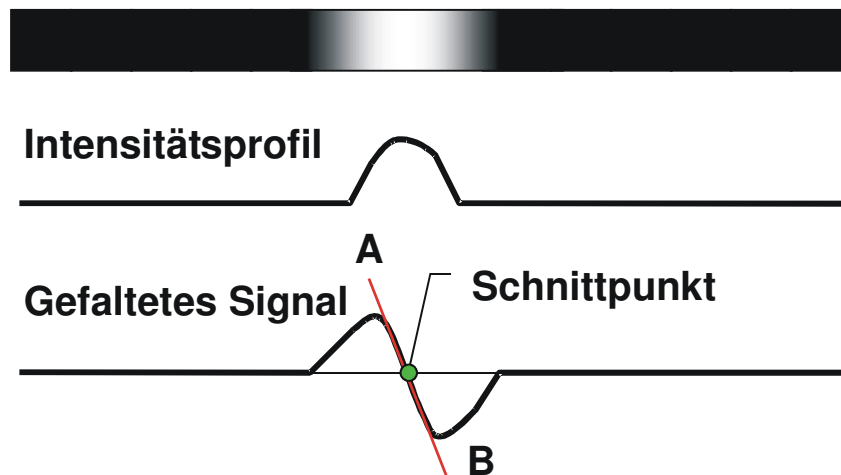


Abbildung 44: Zentrumsbestimmung beim Peak-Detektor von Blais und Rioux.

2.7.9.2 Genauigkeitsaspekte bei den Operatoren von Blais und Rioux

In diesem Abschnitt soll eine Abschätzung für die Genauigkeit der Zentrumsbestimmung mittels der Operatoren von Blais und Rioux hergeleitet werden. Das Fehlerbudget setzt sich zusammen aus:

¹ Der tiefgestellte Index gibt die Breite der Filtermaske in Pixel an. In der zitierten Literatur wird teilweise dagegen auch die Ordnung der Filter (vier und acht) als Index verwendet.

- Zufälligen Fehlern in den beobachteten Grauwerten
- Systematischen Fehlern durch die lineare Approximation bei der Interpolation der Nullstelle des gefalteten Signals.

Die Analyse der zufälligen Fehler erfolgt über eine Fortpflanzung der Varianz der beobachteten Grauwerte. Für den BR_5 -Operator ergeben sich als Zwischenwerte die mit der Faltungsmaske (2.69) berechneten Werte

$$\begin{aligned} br_5(x_0) &= -g(x_0 - 2) - g(x_0 - 1) + g(x_0 + 1) + g(x_0 + 2) \\ br_5(x_0 + 1) &= -g(x_0 - 1) - g(x_0) + g(x_0 + 2) + g(x_0 + 3) \end{aligned} \quad (2.72)$$

sowie deren Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{br_5} = \mathbf{J}_{br_5} \Sigma_g \mathbf{J}_{br_5}^T \quad (2.73)$$

wobei Σ_g die Kovarianzmatrix der beobachteten Grauwerte ist und die Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J}_{br_5} = \begin{bmatrix} \frac{\partial br_5(x_0)}{\partial g_i} \\ \frac{\partial br_5(x_0 + 1)}{\partial g_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

die partiellen Ableitungen der Faltungswerte nach den Grauwerten enthält. Werden die beobachteten Grauwerte als gleichgenau und unkorreliert angenommen, folgt die Kovarianzmatrix der gemessenen Grauwerte $\Sigma_g = \sigma_g^2 \mathbf{I}_6$, wobei σ_g die Standardabweichung der einzelnen Grauwerte darstellt. Somit ergibt sich die Kovarianzmatrix Σ_{br_5} der gefalteten Werte $br_5(x_0)$ und $br_5(x_0 + 1)$ zu:

$$\Sigma_{br_5} = \sigma_g^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Die Position des Peakzentrums erhält man durch eine lineare Interpolation gemäß (2.71)

$$\hat{x}_c = x_0 + \frac{g(x_0)}{g(x_0) - g(x_0 + 1)} = \frac{-g(x_0 - 2) - g(x_0 - 1) + g(x_0 + 1) + g(x_0 + 2)}{-g(x_0 - 2) + g(x_0) + g(x_0 + 1) - g(x_0 + 3)} \quad (2.76)$$

Die Standardabweichung $\sigma_{\hat{x}_c}$ des berechneten Peak-Zentrums $\hat{x}_c$ berechnet sich aus der Kovarianzmatrix Σ_{br_5} ebenfalls über eine Kovarianzfortpflanzung

$$\sigma_{\hat{x}_c}^2 = \mathbf{J}_{br_5} \Sigma_{br_5} \mathbf{J}_{br_5}^T \quad (2.77)$$

unter Verwendung der Jacobi-Matrix $\mathbf{J}_{br_5}$ der partiellen Ableitungen des Peak-Zentrums $\hat{x}_c$ nach den gefalteten Werten:

$$\mathbf{J}_{br_5} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{x}_c}{\partial br_5(x_0)} & \frac{\partial \hat{x}_c}{\partial br_5(x_0 + 1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-br_5(x_0 + 1)}{[br_5(x_0) - br_5(x_0 + 1)]^2} & \frac{br_5(x_0)}{[br_5(x_0) - br_5(x_0 + 1)]^2} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Somit ergibt sich für die geschätzte Varianz des Peak-Zentrums:

$$\sigma_{\hat{x}_c}^2 = 4\sigma_g^2 \frac{br_5(x_0)^2 - br_5(x_0) \cdot br_5(x_0+1) + br_5(x_0+1)^2}{[br_5(x_0) - br_5(x_0+1)]^4} \quad (2.79)$$

Für die Herleitung der Varianz des Peak-Zentrums unter Verwendung der Filtermaske br_7 müssen in der Herleitung für die Varianz des BR_5 -Operators die Gleichungen (2.72)-(2.75) durch die entsprechenden Gleichungen für den BR_7 -Operator ersetzt werden. Man erhält schließlich die Varianz des Peak-Zentrums:

$$\sigma_{\hat{x}_c}^2 = 2 \cdot \sigma_g^2 \cdot \left[\frac{3 \cdot br_7(x_0)^2 - 4 \cdot br_7(x_0) \cdot br_7(x_0+1) + 3 \cdot br_7(x_0+1)^2}{[br_7(x_0) - br_7(x_0+1)]^4} \right] \quad (2.80)$$

Für eine Abschätzung der Genauigkeit der Operatoren wird ein gaussförmiger Linienquerschnitt nach Gleichung (2.81) angenommen. Abbildung 45 zeigt die Genauigkeit der Operatoren BR_5 (Abbildung 45 (a)) und BR_7 (Abbildung 45 (b)) in Abhängigkeit von der Amplitude des Signals für die Peakbreiten $w = 1$ (rot), $w = 2$ (grün) und $w = 3$ (blau). Es zeigt sich deutlich, dass der Operator BR_5 wesentlich unempfindlicher auf Variationen in der Peakbreite reagiert als der Operator BR_7 . Es ist auch gut zu erkennen, dass eine Peakbreite $w_{opt} \approx 2$ existiert, für welche $\sigma_{\hat{x}_c}$ optimal klein wird.

Unter der Annahme einer Standardabweichung der Grauwerte von $\sigma_g = 2$ Grauwerte und eines gaussförmigen Signalquerschnitts nach Gleichung (2.81) mit Amplitude $A = 100$ Grauwerte und einer Breite $w = 2,5$ Pixel gelangt man zu einer für praktische Anwendungen realistischen Standardabweichung des Peak-Zentrums $\hat{x}_c$ von $\sigma_{\hat{x}_c} \approx 0.029 \approx \frac{1}{35}$ Pixel.

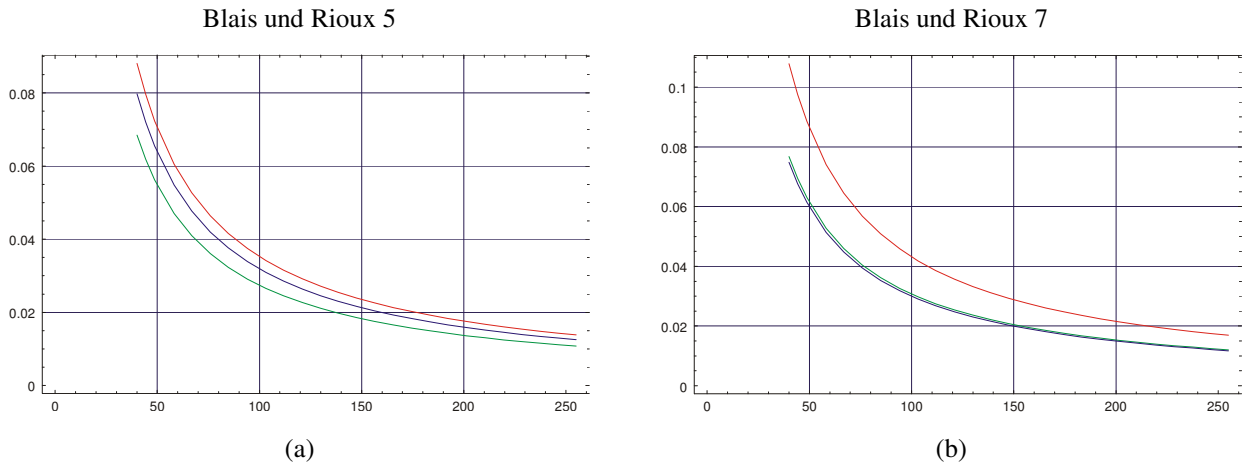


Abbildung 45: Genauigkeit der Operatoren BR_5 (a) und BR_7 (b) unter Annahme eines Gaussförmigen Linienquerschnitts in Abhängigkeit von der Amplitude. Die Genauigkeit hängt zudem von der Peakbreite w ab (rot: $w = 1$, grün: $w = 2$, blau: $w = 3$).

Neben den zufälligen Beobachtungsfehlern treten auch systematische Fehler auf. Die Ursache für die systematischen Fehler liegen in der Approximation des gekrümmten Funktionsverlaufs durch eine Gerade für die Berechnung der Nullstelle des gefalteten Signals. Die Größe des Interpolationsfehlers hängt von der Lage der Stützpunkte für die Interpolationsgerade und damit von der subpixelgenauen Position des Peak-Zentrums ab (Abbildung 46). Abbildung 47 zeigt das Ausmaß dieses Effekts. Für typische Signale beträgt der Maximalfehler weniger als $\frac{1}{50}$ Pixel und kann daher für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden. Prinzipiell lässt sich der Interpolationsfehler durch die Verwendung einer Interpolation höherer Ordnung, z.B. Lagrange-Interpolation, weiter reduzieren.

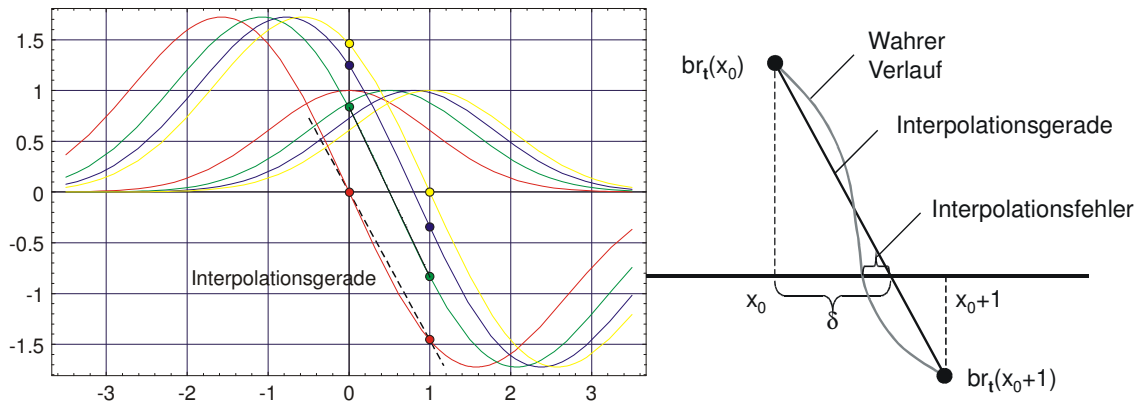


Abbildung 46: Skizze zur Entstehung der Interpolationsfehler. Dargestellt sind jeweils ein Gaußförmiges Signal und das mit der Maske br_5 gefaltete Signal mit Zentrum bei 0 (rot), 0,5 (grün), 0,8 (blau) und 1 (gelb). Die Punkte geben die Position der Stützpunkte für die Interpolationsgerade an. Für die rote Gerade ist zudem die Interpolationsgerade eingezeichnet. Die Abweichungen von der Interpolationsgeraden sind der Grund für das Entstehen des systematischen Interpolationsfehlers.

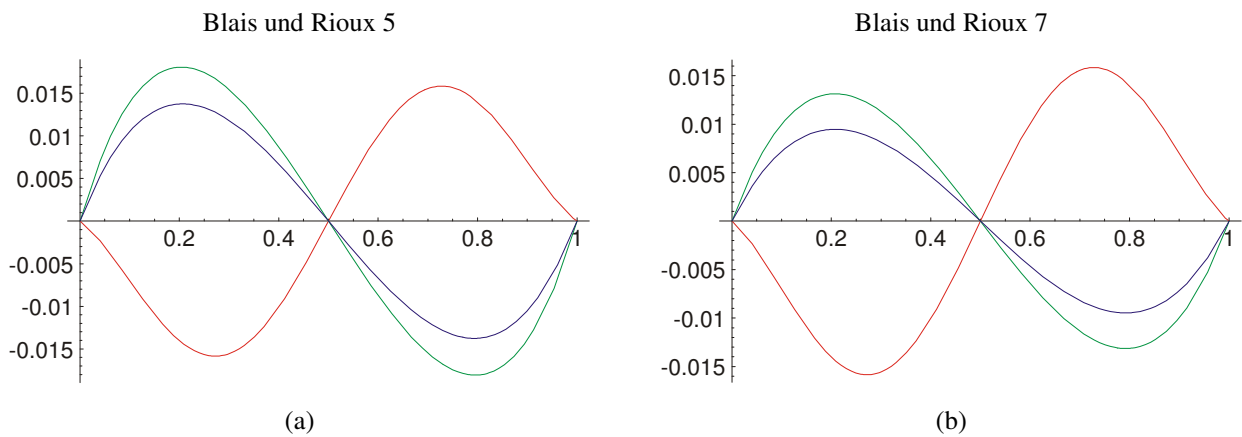


Abbildung 47: Systematischer Fehler (in Pixel) bei der Bestimmung der Nullstelle für die Operatoren BR_5 (a) und BR_7 (b) in Abhängigkeit von der wahren Position des Peakzentrums unter Annahme eines Gaußförmigen Linienschnitts. Die Diagramme zeigen auch die Abhängigkeit des Fehlers von der Peakbreite w (rot: $w = 1$, grün: $w = 2$, blau: $w = 3$).

2.7.9.3 Die Gauss-Operatoren

[Curless 1997] skizziert eine weitere Art von Peak-Detektor. In einem ersten Schritt werden die Grauwerte logarithmiert. Anschließend wird eine Regressionskurve in Form einer Parabel für die logarithmierte Grauwertkurve in einem Ausgleichungsverfahren geschätzt. Das Verfahren setzt ein gaußförmiges Intensitätsprofil voraus. Natürlich ist diese Voraussetzung aufgrund von Imperfektionen bei der Musterprojektion und bei der Bildaufzeichnung in der Praxis nicht exakt erfüllt. Der Vergleich zwischen der Modellfunktion und realen Intensitätsprofilen zeigt jedoch, dass die Gauss-Funktion durchaus eine gute Näherung für das Intensitätsprofil der projizierten Linien darstellt. Auf die Parameterschätzung selbst wird in [Curless 1997] nicht näher eingegangen. Anhand der geschätzten Parameter können die Position des Peak-Zentrums, dessen Unsicherheit sowie die Amplitude und Breite der Gauss-Kurve berechnet und für explizite Konsistenzbedingungen verwendet werden.

Die Modellfunktion wird gemäß

$$g(x) = A \exp \left[-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2} \right] \quad (2.81)$$

mit: $g(x)$: Grauwert an der Stelle x
 A : Amplitude des Signals
 x_c : Peak-Zentrum
 w : Breite des Peaks. w wird derart bestimmt, dass in der Entfernung w vom Peak-Zentrum die Stärke des Signals noch Ae^{-2} beträgt.

angesetzt. Zur Berechnung der Position b des Peak-Zentrums wird das Signal zunächst logarithmiert. Um die Rechenzeit zu verringern, kann hierfür eine Look-Up-Tabelle mit 256 Einträgen eingesetzt werden. Es ergibt sich das logarithmierte Signal zu:

$$\log g(x) = \log A - \frac{2(x - x_c)^2}{w^2} = -\frac{2}{w^2}x^2 + \frac{4x_c}{w^2}x + \log A - \frac{2x_c^2}{w^2} = \alpha x^2 + \beta x + \gamma \quad (2.82)$$

Die logarithmierten Grauwerte können also durch eine Parabel 2. Ordnung mit den Parametern α , β , γ beschrieben werden (siehe auch Abbildung 48):

$$\log g(x) = \alpha x^2 + \beta x + \gamma \quad (2.83)$$

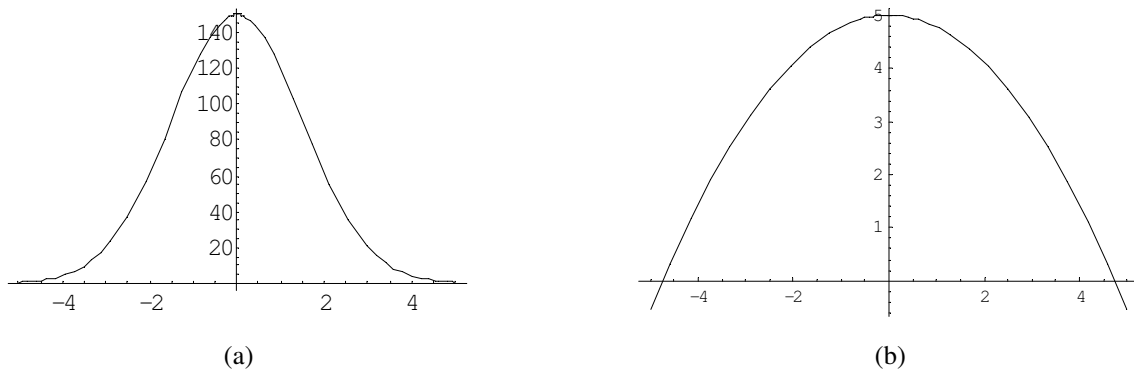


Abbildung 48: (a) Modellfunktion für das Intensitätsprofil der projizierten Linien (Gausskurve) für $a=150$, $b=0$ und $w=3$. (b) Modellfunktion nach der Logarithmierung.

Nach der Logarithmierung wird in einem Ausgleichungsverfahren eine Regressionskurve in Form einer quadratischen Parabel durch die erhaltenen Werte geschätzt.

Hat man die Parameter α , β , γ der Parabel berechnet, lassen sich daraus die gesuchten Parameter der Gauss-Kurve ermitteln:

$$\begin{aligned} x_c &= -\frac{\beta}{2\alpha} \\ A &= \exp \left[\gamma - \frac{\beta^2}{4\alpha} \right] \\ w &= \sqrt{-\frac{2}{\alpha}} \end{aligned} \quad (2.84)$$

Der Parameter x_c entspricht der gesuchten Position des Peak-Zentrums. Die Amplitude A und die Peak-Breite w beschreiben die Form des detektierten Peaks und lassen sich zur Durchführung von Konsistenztests verwenden. Um eine hohe Effizienz der Operatoren sicherzustellen, kann die Kenntnis der Struktur der Normalgleichungsmatrix dafür verwendet werden, unnötige Rechenoperationen zu vermeiden. Es wurde im Folgenden darauf geachtet, Matrixoperationen möglichst zu vermeiden und stattdessen geschlossene Formeln anzugeben.

Als Breite für die Operatorfenster werden, wie in der Bildverarbeitung üblich, ungerade Werte verwendet. Näherungswerte für das Peak-Zentrum erhält man durch die Bestimmung der Position des Intensitätsmaximums. Die Operatoren werden anschließend so aufgesetzt, dass sich das Maximum im Zentrum des Operatorfensters befindet.

2.7.9.4 Der Gauss-Operator mit Filterbreite 3 (G_3)

Der Gauss-Operator mit einer Filterbreite von drei Bildpunkten stellt den kleinsten Operator dar, der eine subpixelgenaue Bestimmung des Peak-Zentrums erlaubt. Für die beobachteten Grauwerte $g_i = g(x_0 + x_i)$; $i = \{1, 2, 3\}$ gilt nach (2.83):

$$\begin{aligned} y_1 &= \log g_1 = \alpha x_1^2 + \beta x_1 + \gamma \\ y_2 &= \log g_2 = \alpha x_2^2 + \beta x_2 + \gamma \\ y_3 &= \log g_3 = \alpha x_3^2 + \beta x_3 + \gamma \end{aligned} \quad (2.85)$$

mit $x_1 = -1$, $x_2 = 0$, $x_3 = 1$. Das zu lösende Gleichungssystem

$$\mathbf{l} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (2.86)$$

mit

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

mit drei Beobachtungsgleichungen für drei Unbekannte ist nicht überbestimmt. Mit Hilfe der invertierten Koeffizientenmatrix $\mathbf{A}^{-1}$

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

erhält man für die drei Parameter der Parabel α, β, γ :

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} y_1 - y_2 + \frac{1}{2} y_3 \\ -\frac{1}{2} y_1 + \frac{1}{2} y_3 \\ y_2 \end{pmatrix} \quad (2.89)$$

Es ergibt sich nun für die gesuchten Werte der Gauss-Kurve nach Gleichung (2.84):

$$\begin{aligned}\hat{x}_c &= -\frac{\beta}{2\alpha} = \frac{1}{2} \frac{y_1 - y_3}{y_1 - 2y_2 + y_3} \\ \hat{A} &= \exp\left(\gamma - \frac{\beta^2}{4\alpha}\right) = \exp\left(-\frac{1}{8} \frac{y_1^2 + 16y_2^2 + y_3^2 - 8y_1y_2 - 8y_2y_3 - 2y_1y_3}{y_1 - 2y_2 + y_3}\right) \\ \hat{w} &= \sqrt{-\frac{2}{\alpha}} = \frac{2}{\sqrt{-y_1 + 2y_2 - y_3}}\end{aligned}\quad (2.90)$$

Der Operator entspricht dem in [Trucco et al. 1998] beschriebenen Gauss-Operator.

2.7.9.5 Der Gauss-Operator mit Filterbreite 5 (G_5)

Der Gauss-Operator mit einer Filterbreite von fünf Bildpunkten weist bereits eine Überbestimmung von 2 Beobachtungen auf. Für die beobachteten Grauwerte $g_i = g(x_0 + x_i)$; $i = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ergeben sich nach (2.83) folgende Beobachtungsgleichungen:

$$\begin{aligned}y_1 + v_1 &= \log g_1 + v_1 = \alpha x_1^2 + \beta x_1 + \gamma \\ y_2 + v_2 &= \log g_2 + v_2 = \alpha x_2^2 + \beta x_2 + \gamma \\ y_3 + v_3 &= \log g_3 + v_3 = \alpha x_3^2 + \beta x_3 + \gamma \\ y_4 + v_4 &= \log g_4 + v_4 = \alpha x_4^2 + \beta x_4 + \gamma \\ y_5 + v_5 &= \log g_5 + v_5 = \alpha x_5^2 + \beta x_5 + \gamma\end{aligned}\quad (2.91)$$

mit $x_1 = -2$, $x_2 = -1$, $x_3 = 0$, $x_4 = 1$, $x_5 = 2$. Analog zum G_3 -Operator ergibt sich das zu lösende Gleichungssystem zu

$$\mathbf{l} = \mathbf{A}\mathbf{x}\quad (2.92)$$

mit

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 & 1 \\ x_5^2 & x_5 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}\quad (2.93)$$

Die Lösung dieses überbestimmten Gleichungssystems erfolgt im Rahmen einer Ausgleichung im Gauss-Markov-Modell

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{l}\quad (2.94)$$

Für die Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N}$ sowie ihre Inverse $\mathbf{N}^{-1}$ erhält man:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 34 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 0 \\ 10 & 0 & 5 \end{bmatrix}\quad (2.95)$$

$$\mathbf{N}^{-1} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{14} & 0 & -\frac{1}{7} \\ 0 & \frac{1}{10} & 0 \\ -\frac{1}{7} & 0 & \frac{17}{35} \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

Unter Berücksichtigung der Nullelemente ergibt sich folgende Lösung für die Parameter α , β und γ der quadratischen Regressionsparabel

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{7} y_1 - \frac{1}{14} y_2 - \frac{1}{7} y_3 - \frac{1}{14} y_4 + \frac{1}{7} y_5 \\ -\frac{1}{5} y_1 - \frac{1}{10} y_2 + \frac{1}{10} y_4 + \frac{1}{5} y_5 \\ -\frac{3}{35} y_1 + \frac{12}{35} y_2 + \frac{17}{35} y_3 + \frac{12}{35} y_4 - \frac{3}{35} y_5 \end{pmatrix} \quad (2.97)$$

Nach Gleichung (2.84) lassen sich daraus schließlich die gesuchten Parameter der Gauss-Kurve herleiten:

$$\begin{aligned} \hat{x}_c &= -\frac{\beta}{2\alpha} = \frac{7}{10} \cdot \frac{2y_1 + y_2 - y_4 - 2y_5}{2y_1 - y_2 - 2y_3 - y_4 + 2y_5} \\ \hat{A} &= \exp\left(\gamma - \frac{\beta^2}{4\alpha}\right) = \exp\left(-\frac{1}{1400} \cdot \frac{k}{2y_1 - y_2 - 2y_3 - y_4 + 2y_5}\right) \\ k &= 436y_1^2 - 884y_1y_2 - 1600y_1y_3 - 1276y_1y_4 + 88y_1y_5 + 529y_2^2 + \\ &\quad 1640y_2y_3 + 862y_2y_4 - 1276y_2y_5 + 1360y_3^2 + 1640y_3y_4 - \\ &\quad 1600y_3y_5 + 529y_4^2 - 884y_4y_5 + 436y_5^2 \\ \hat{w} &= \sqrt{\frac{-2}{\alpha}} = \frac{2\sqrt{7}}{\sqrt{-2y_1 + y_2 + 2y_3 + y_4 - 2y_5}} \end{aligned} \quad (2.98)$$

2.7.9.6 Der gewichtete Gauss-Operator mit Filterbreite 5 (G_{5w})

Bei der Herleitung des G_5 Operators wurde in (2.94) die Einheitsmatrix als Gewichtsmatrix angesetzt, da die einzelnen Grauwerte als gleichgenau und unkorreliert angenommen wurden. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass in den Beobachtungsgleichungen (2.91) die logarithmierten Grauwerte $y_i = \log g_i$ als abgeleitete Beobachtungen auftreten. Unter der Annahme identischer Standardabweichungen $\sigma_{g_i} = \sigma_g$ haben die abgeleiteten Beobachtungen jedoch eine von dem jeweiligen Grauwert abhängige Standardabweichung. Streng genommen muss dies mittels einer Gewichtsmatrix $\mathbf{W} \neq \mathbf{I}$ in der Ausgleichung berücksichtigt werden. Beim G_3 Operator tritt dieses Problem übrigens nicht auf, da kein überbestimmtes Gleichungssystem vorliegt.

In der zitierten Literatur finden sich für diesen Umstand keine Hinweise.

Die Herleitung für den gewichteten Gauss-Operator G_{5W} entspricht weitgehend der Herleitung des Operators G_5 . Die zu den beobachteten Grauwerten g_i gehörende Kovarianzmatrix lautet:

$$\Sigma_g = \sigma_g^2 \mathbf{I}_5 \quad (2.99)$$

Durch eine Kovarianzfortpflanzung kann nun die Kovarianzmatrix Σ_y der logarithmierten Grauwerte bestimmt werden, deren Inverse

$$\mathbf{W}_g = \frac{1}{\sigma_g^2} \text{Diag} \begin{bmatrix} g_1^2 & g_2^2 & g_3^2 & g_4^2 & g_5^2 \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

die gesuchte Gewichtsmatrix ist. Die Parameter α , β und γ der Regressionsparabel ergeben sich unter Berücksichtigung der Gewichtsmatrix $\mathbf{W}_g$ zu

$$\hat{\mathbf{x}} = \underbrace{(\mathbf{A}^T \mathbf{W}_g \mathbf{A})^{-1}}_{\mathbf{N}^{-1}} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{I} \quad (2.101)$$

Die eigentlichen Zielgrößen $\hat{x}_c$, $\hat{A}$, $\hat{w}$ erhält man schließlich nach Gleichungen (2.84) aus den geschätzten Parametern α , β und γ . Durch die Gewichtung ändert sich leider die Besetzungsstruktur der Matrizen des Gleichungssystems [Reubelt 2001]. Als Folge davon lassen sich, im Gegensatz zu den Operatoren G_3 und G_5 , keine geschwindigkeitsoptimierten Formeln zur direkten Berechnung der Zielgrößen angeben. Stattdessen muss auf allgemeine Methoden zur Lösung linearer Gleichungssysteme für symmetrische, positiv definite Matrizen zurückgegriffen werden.

2.7.9.7 Genauigkeitsaspekte bei den Gauss-Operatoren

Das Fehlerbudget für die Gauss-Operatoren setzt sich wiederum zusammen aus:

- Einem zufälligen Anteil aufgrund von zufälligen Fehlern der einzelnen Grauwerte der Pixel
- Systematischen Fehlern aufgrund von Abweichungen des Signals von der Modellfunktion (Gauss-Kurve).

Bei der Herleitung der Varianz des bestimmten Peak-Zentrums ist zwischen dem Operator G_3 und den G_5 -Operatoren zu unterscheiden, da die Bestimmung des Peak-Zentrums beim G_3 -Operator über das Lösen eines linearen Gleichungssystems erfolgt, bei den G_5 -Operatoren jedoch aus dem Ergebnis einer Ausgleichung hergeleitet wird.

Für den Fall des G_3 -Operators wird die Varianz des Peak-Zentrums über eine Fortpflanzung der Kovarianz der beobachteten Grauwerte berechnet. Unter der Annahme, dass die Grauwerte gleich genau und unkorreliert mit Varianz σ_g^2 erfasst wurden, ergibt sich die Kovarianzmatrix Σ_y der logarithmierten Grauwerte zu

$$\Sigma_y = \mathbf{J}_y \Sigma_g \mathbf{J}_y^T = \sigma_g^2 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{g_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{g_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{g_3^2} \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

mit $\Sigma_g = \sigma_g^2 \mathbf{I}_3$ und der Jacobi-Matrix

$$\mathbf{J}_y = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial g_i} \\ \frac{\partial y_2}{\partial g_i} \\ \frac{\partial y_3}{\partial g_i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{g_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{g_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{g_3} \end{bmatrix} \quad (2.103)$$

welche die partiellen Ableitungen der logarithmierten Grauwerte y_i nach den Grauwerten g_i enthält. Die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\alpha\beta\gamma}$ der Parameter der quadratischen Parabel ergibt sich aus der Kovarianzmatrix Σ_y der logarithmierten Grauwerte ebenfalls durch eine Kovarianzfortpflanzung

$$\Sigma_{\alpha\beta\gamma} = \mathbf{J}_{\alpha\beta\gamma} \Sigma_y \mathbf{J}_{\alpha\beta\gamma}^T = \sigma_g^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{4g_1^2} + \frac{1}{g_2^2} + \frac{1}{4g_3^2} & -\frac{1}{4g_1^2} + \frac{1}{4g_3^2} & -\frac{1}{g_2^2} \\ -\frac{1}{4g_1^2} + \frac{1}{4g_3^2} & \frac{1}{4g_1^2} + \frac{1}{4g_3^2} & 0 \\ -\frac{1}{g_2^2} & 0 & \frac{1}{g_2^2} \end{bmatrix} \quad (2.104)$$

mit der Jacobi-Matrix $\mathbf{J}_{\alpha\beta\gamma}$ der partiellen Ableitungen der Parabelparameter α, β, γ nach den logarithmierten Grauwerten y_i

$$\mathbf{J}_{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial y_i} \\ \frac{\partial \beta}{\partial y_i} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial y_i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.105)$$

Durch eine erneute Anwendung des Kovarianzfortpflanzungsgesetzes mit der Jacobi-Matrix $\mathbf{J}_{Ax_c w}$

$$\mathbf{J}_{Ax_c w} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial \alpha} & \frac{\partial A}{\partial \beta} & \frac{\partial A}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial x_c}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_c}{\partial \beta} & \frac{\partial x_c}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial w}{\partial \alpha} & \frac{\partial w}{\partial \beta} & \frac{\partial w}{\partial \gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\beta^2}{4\alpha^2} A & -\frac{\beta}{2\alpha} A & A \\ \frac{\beta}{2\alpha^2} & -\frac{1}{2\alpha} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}w\alpha^2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

mit den Ableitungen der zu bestimmenden Parameter nach den Hilfsgrößen α, β, γ erhält man schließlich die gesuchte Kovarianzmatrix $\Sigma_{Ax_c w}$ der Größen A, x_c, w

$$\Sigma_{Ax_c w} = \mathbf{J}_{Ax_c w} \Sigma_{\alpha\beta\gamma} \mathbf{J}_{Ax_c w}^T \quad (2.107)$$

Da die Berechnung der Parameter A, x_c, w im Falle der Operatoren G_5 und G_{5w} im Rahmen einer Ausgleichung im Gauss-Markov-Modell erfolgt, können Teilergebnisse aus der Ausgleichung für die Bestimmung der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\alpha}\hat{\beta}\hat{\gamma}}$ verwendet werden

$$\Sigma_{\hat{\alpha}\hat{\beta}\hat{\gamma}} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{N}^{-1} \quad (2.108)$$

mit $\mathbf{N}^{-1}$ aus Gleichung (2.96) bzw. (2.101). Die benötigte Varianz der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0^2$ kann nach den Formeln (2.29) und (2.30) erwartungstreu aus den Residuen geschätzt werden. Dies hat den Vorteil, dass keine Annahmen über die Varianz der beobachteten Grauwerte getroffen werden müssen.

Die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{w}}}$ der zu bestimmten Parameter der Gauss-Kurve erhält man schließlich durch eine Kovarianzfortpflanzung nach den Gleichungen (2.106) und (2.107).

Der systematische Fehleranteil wird durch Abweichungen des erfassten Linienquerschnitts von der Modellfunktion verursacht. Ein qualitativer Vergleich anhand von Stichproben hat gezeigt, dass das Intensitätsprofil der Linien gut mit der Modellfunktion übereinstimmt (Abbildung 49). Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die Gauss-Operatoren, wenn die Signalbreite kleiner als die Maskengröße ist, sehr empfindlich auf Rauschen reagieren. Dies tritt insbesondere dann auf, wenn Masken größer als fünf Elemente verwendet werden (z.B. G₇-Operator). Sie sind daher für die Verwendung im Zusammenhang mit den beschriebenen Messsystemen ungeeignet [Reubelt 2001]. Da sie darüber hinaus einen höheren Rechenaufwand verursachen, wird hier auf ihre Darstellung verzichtet.

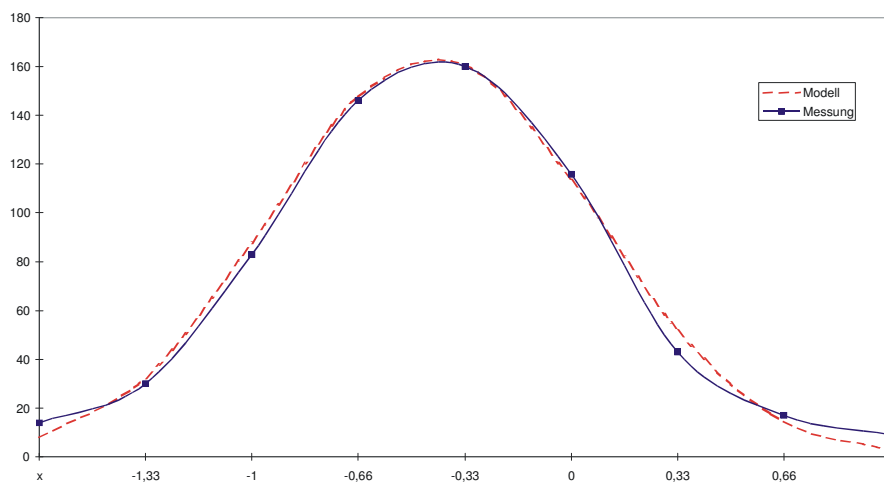


Abbildung 49: Vergleich zwischen Messung (blau) und Modellfunktion (rot).

2.7.10 Diskussion der Verfahren zur Zentrumsdetektion

Um die Leistungsfähigkeit der Operatoren von Blais und Rioux und der Gauss-Operatoren vergleichen zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen mit simulierten und realen Daten durchgeführt [Reubelt 2001]. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Gauss-Operatoren sehr empfindlich auf Variationen in der Linienbreite reagieren. Ausserdem sind sie empfindlicher gegen Rauschen. Als Pluspunkt muss jedoch gewertet werden, dass sich die verringerte Qualität in der Varianz des bestimmten Peakzentrums widerspiegelt.

Im Gegensatz dazu haben sich die Operatoren von Blais und Rioux gegenüber Variationen in der Linienbreite und Rauschen als sehr robust erwiesen, wobei der Operator mit einer Filterbreite von fünf Elementen dem Operator mit einer Maskengröße von drei Elementen überlegen ist.

Aus diesen Gründen heraus wurden die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse unter Verwendung des Operators von Blais und Rioux mit einer Maskengröße von fünf Elementen erzeugt.

2.8 Berechnung der Objektkoordinaten

Die im Abschnitt 2.7 beschriebenen Verarbeitungsschritte finden allesamt im Bildraum der Kameras und des Projektors statt. Sie dienen dazu, das Korrespondenzproblem zu lösen, d.h. die Koordinaten homologer Punkte zu bestimmen. Sind diese Zuordnungen bekannt, lassen sich bei bekannter Position und Orientierung der Kameras und des Projektors nach Abschnitt 2.4.6 die dreidimensionalen Koordinaten im Sensorkoordinatensystem bestimmen.

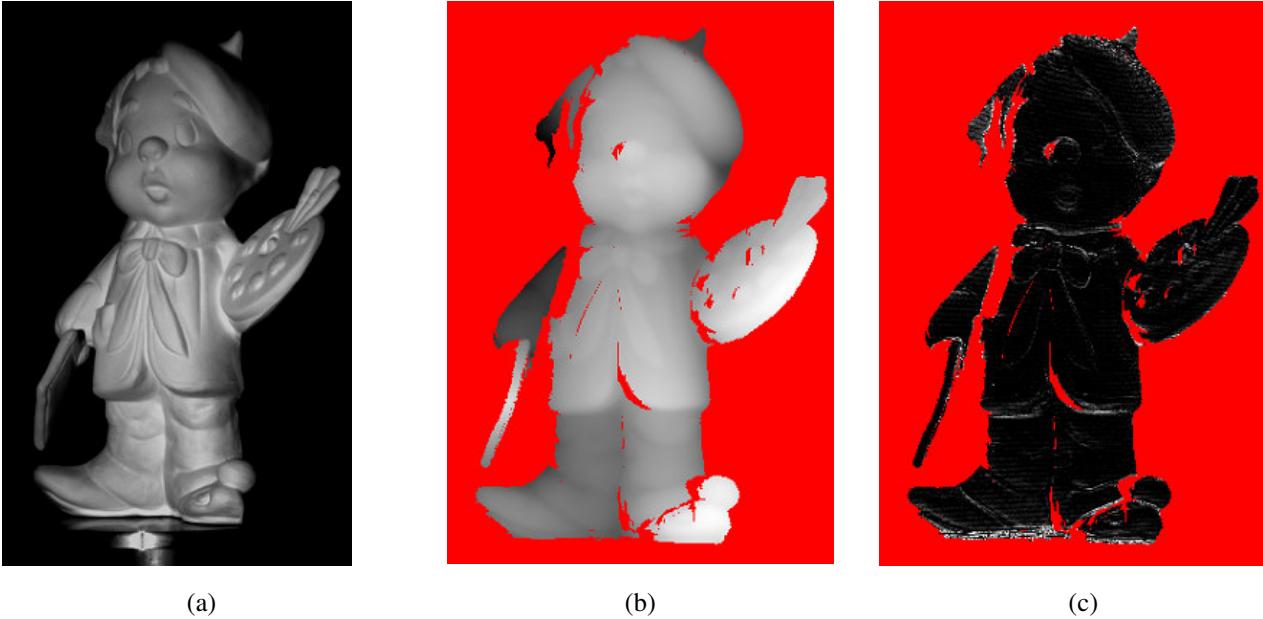


Abbildung 50: (a) Hellbild aus der Messsequenz einer Gipsfigur. (b) Berechnetes Tiefenbild. (c) Varianzbild der Z-Komponente. Die aus den Residuen bestimmten Kovarianzmatrizen zeigen eine deutlich größere Messunsicherheit im Bereich von Oberflächendiskontinuitäten (z.B. entlang der Falten der Kleidung). Sie können daher für Konsistenztests verwendet werden.

In der Praxis stellt sich das Problem, dass neben den beschriebenen zufälligen und systematischen Fehlern bei der Lösung des Korrespondenzproblems auch grobe Fehler als Folge von z.B. Mehrfachreflektionen, Mischpixeln und Fehldekodierungen der Graycodebilder auftreten. Bei der Auswertung muss diesem Umstand durch das Einführen von Konsistenztests Rechnung getragen werden. Viele Probleme können bereits bei den Operationen im Bildraum detektiert und korrigiert oder durch das Setzen eines Fehlerbits im Maskenbild eliminiert werden. Um die Zuverlässigkeit der Messungen weiter zu steigern, werden verschiedene implizite und explizite Konsistenztests bei der Berechnung der Objektraumkoordinaten durchgeführt:

Standardabweichung der 3D-Koordinaten: Das mathematische Modell erlaubt es, neben den dreidimensionalen Koordinaten eines Messpunktes auch deren Kovarianzmatrix zu bestimmen. Abbildung 50 zeigt ein Beispiel für einen Datensatz mit der berechneten Messunsicherheit der Z-Koordinate. Um Ausreißer zu detektieren, wird der aus der Kovarianzmatrix berechnete Helmertsche Punktlagefehler (2.32) mit einem Schwellwert t_H verglichen. Übersteigt der Fehler diesen Schwellwert, wird die Punktmessung für ungültig erklärt.

Orientierung der Oberfläche zum Messsystem: Die Orientierung der Objektoberfläche in Bezug auf das Sensorsystem hat einen weiteren Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Messungen. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Unsicherheit der Messstrahlen in der lateralen Komponente in Abhängigkeit vom Winkel zwischen der Flächennormalen $\vec{n}$ und der entgegengesetzten Blickrichtung $-\vec{v}$, d.h. der Verbindungslinie zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt, eine zusätzliche Unsicherheit in Richtung des Messstrahls bewirkt. Ist die Oberfläche senkrecht zum Messstrahl orientiert, verschwindet dieser Effekt. Je größer der Winkel α zwischen $\vec{n}$ und $-\vec{v}$ ist, desto größer ist die verursachte longitudinale Unsicherheit. Abbildung 51 zeigt, dass die durch die Orientierung verursachte longitudinale Unsicherheit

$$\sigma_{\text{longitudinal}}^2 = \frac{1 - \cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha} \sigma_{\text{lateral}}^2 \quad (2.109)$$

bei einem Winkel von 45° gerade der lateralen Unsicherheit entspricht. Für große Winkel steigt die Unsicherheit dagegen sehr stark an.

Bei der Berechnung der Objektkoordinaten wird der Winkel zwischen der aus den Messdaten ermittelten Oberflächennormalen $\vec{n}$ und den Messstrahlen $-\vec{v}_i$ der Kameras und des Projektors berechnet und mit einem Schwellwert t_a verglichen. Übersteigt der Winkel diesen Schwellwert, nimmt die entsprechende Beobachtung nicht an der Punktbestimmung teil.

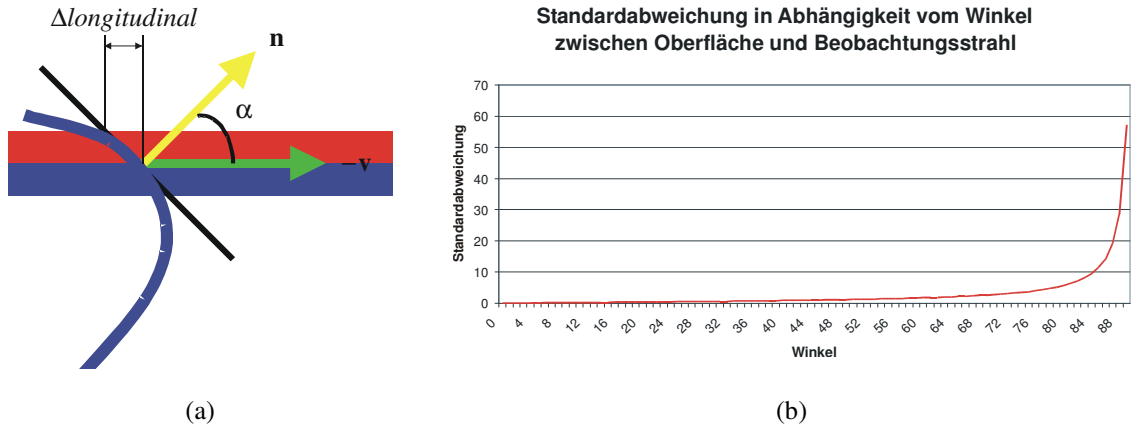


Abbildung 51: (a) Die laterale Unsicherheit definiert einen Unsicherheitsbereich rund um den Messstrahl. Die Differenz $\Delta_{\text{longitudinal}}$ zwischen den Schnittpunkten des Strahles und des Randes dieses Bereichs mit der lokalen Tangentialebene der Objektoberfläche legt das Ausmaß der zusätzlichen longitudinalen Unsicherheit fest. (b) Darstellung der Unsicherheit als Funktion des Winkels α .

Gegenseitige Konsistenz der 3D-Koordinaten: Werden mehr als eine Kamera (mehr als zwei Kameras, falls der Projektor nicht zur Punktbestimmung beiträgt) zur Messung verwendet, lassen sich die dreidimensionalen Koordinaten der Punkte unter Verwendung von unterschiedlichen Kamera-Projektor-Paaren berechnen. Da die Punkte bei der Line-Shift-Auswertung im selben Raster vorliegen, lassen sich die 3D-Koordinaten von unterschiedlichen Paaren leicht miteinander vergleichen. Treten inkonsistente Paare, d.h. Paare, welche einen geometrischen Abstand größer als einen bestimmten Schwellwert t_{geom} haben, auf, kann die entsprechende Position durch das Setzen eines Fehlerbits im Maskenbild ausgeblendet werden. In einem zweiten Schritt werden dann die entgültigen Koordinaten der Punkte unter Verwendung aller Beobachtungen bestimmt.

Medianfilterung: Eine gegenüber Ausreißern robuste und weitgehend kantenerhaltende Filterung der Messdaten erhält man durch eine Medianfilterung des Z-Bildes. Voraussetzung dabei ist, dass die Objektoberfläche hinreichend dicht erfasst wurde und sich daher benachbarte Werte im Tiefenbild nur geringfügig voneinander unterscheiden. Der Median ist ein Rangordnungsfiler und damit ein nichtlinearer Filter. Der Median von N Werten entspricht für ungerades N dem Element mit Index $k = N/2$ in einer sortierten Liste der Werte, wobei das erste Element den Index 0 besitzt. Für gerades N ist der Median das arithmetische Mittel aus den Werten mit den Indizes $N/2 - 1$ und $N/2$. Die Filterung selbst wird mittels einer 3×3 Maske durchgeführt. Es ist dabei zu beachten, dass nicht zwingend alle 9 Werte gültig sind. Eine sehr konservative Strategie stellt den Vergleich des Wertes $Z(x, y); x, y \in \mathbb{N}$ mit dem Median $\text{median}(Z(x, y))$ an dieser Position dar, wobei im Falle von $\|Z(x, y) - \text{median}(Z(x, y))\| > t_{\text{med}}$ der Objektpunkt an der Stelle x, y verworfen wird. Ist man hingegen an einer möglichst vollständigen Beschreibung der Oberfläche interessiert, kann man den Wert $Z(x, y)$ auch durch den Median an dieser Stelle ersetzen.

Durch die Kombination dieser Konsistenztests wird die Ableitung qualitativ hochwertiger Oberflächenmodelle möglich. Die Verwendung redundanter Beobachtungen erweist sich dabei als Vorteil, da viele Fehler standpunktabhängig sind

und sich deren Wirkung von unterschiedlichen Kamerapositionen aus unterscheidet. Sie ermöglichen es, die noch in den homologen Punkten vorhandenen Fehler zu detektieren, deren Erkennung durch eine ausschließliche Betrachtung des Bildraums nicht möglich ist.

2.9 Berechnung von Oberflächenfarbe und Oberflächenreflektivität

Die in einem Bild enthaltenen Grauwerte entsprechen nicht direkt den Oberflächeneigenschaften des aufgezeichneten Objekts. Sie entstehen vielmehr durch die Kombination verschiedener Effekte:

- Fremdlicht
- Radiometrische Eigenschaften der Kamera
- Radiometrische Eigenschaften der Projektionseinheit
- Geometrische Konfiguration bei der Aufnahme
- Materialeigenschaften des Objekts

In den folgenden Abschnitten werden Maßnahmen zur Behandlung der verschiedenen Effekte dargestellt.

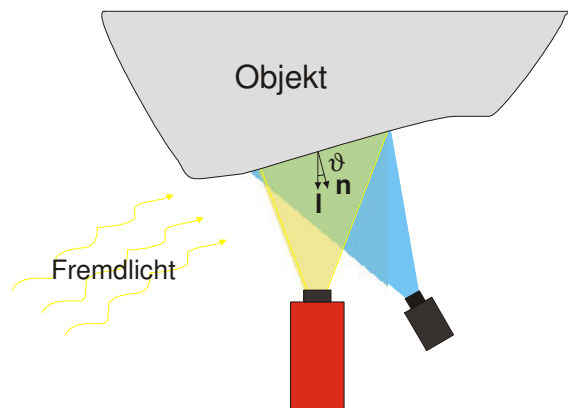


Abbildung 52: Einflüsse bei der Entstehung eines Bildes.

2.9.1 Fremdlicht

Der Einfluss von Fremdlicht lässt sich leicht mit den in der Sequenz enthaltenen vollständig beleuchteten und unbeleuchteten Bildern korrigieren. Das neue Bild entsteht, indem vom Grauwert jedes Bildpunktes des hellen Bildes g_{max} der Grauwert des entsprechenden Bildpunktes des unbeleuchteten Bildes g_{min} abgezogen wird:

$$g_I(r, c) = g_{max}(r, c) - g_{min}(r, c) \quad (2.110)$$

Es ergibt sich ein neues Bild gleicher Dimension, welches nur noch die Wirkung des Lichts der Projektionseinheit enthält.

2.9.2 Radiometrische Eigenschaften – Kameras

Die radiometrischen Eigenschaften der Kamera werden von zwei Effekten dominiert:

1. Empfindlichkeit und Dynamik von Kamera und Digitalisierungseinheit
2. Helligkeitsabnahme zum Bildrand hin

Der erste Effekt ist vor allem dann von Bedeutung, wenn mehrere Kameras bei der Bildaufnahme beteiligt sind und Grauwerte aus den Bildern unterschiedlicher Kameras zur Weiterverarbeitung oder Visualisierung der Messdaten verwendet werden. Die Korrektur erfolgt mit Hilfe einer linearen Transformation der Grauwerte:

$$g_{II}(r, c) = s_{cam} \cdot g_I(r, c) + o_{cam} \quad (2.111)$$

Die Skalierung s und der Offsetparameter o lassen sich mit Hilfe einer speziellen Testkarte, welche Felder wohldefinierter Dichte aufweist (FotowandTM Greystep-Target 4913), so bestimmen, dass die einzelnen Kameras für die helle und die dunkle Fläche jeweils identische Grauwerte liefern.

Die natürliche Abnahme der Beleuchtungsstärke E mit zunehmendem Feldwinkel Ω ist die Ursache des zweiten Effekts. Dieser Effekt kann in guter Näherung mit dem sogenannten $\cos^4$ -Gesetz modelliert werden:

$$E(\Omega) = E \cos^4 \Omega \quad (2.112)$$

Unter Ausnützung der geometrischen Beziehungen in der Kamera kann die Korrektur der Grauwerte unter Vermeidung von trigonometrischen Funktionen effizient berechnet werden. Mit den zu r und c korrespondierenden Bildkoordinaten x und y ergibt sich

$$g_{III}(x, y) = \frac{(x^2 + y^2 + c^2)^2}{c^4} g_{II}(x, y) \quad (2.113)$$

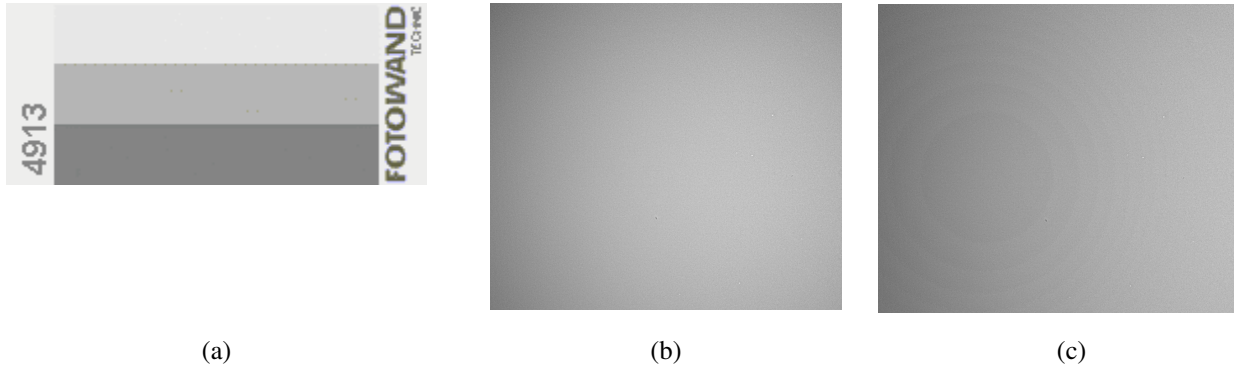


Abbildung 53: (a) FotowandTM Greystep-Target 4913 zur Kalibrierung von Skalierung und Offset einer Kamera. (b) Unkorrigiertes Bild einer Fläche homogener Dichte mit Helligkeitsabnahme zum Bildrand hin (nach Histogrammdehnung). (c) Unter Ansatz des Modells für die Helligkeitsabnahme korrigiertes Bild (nach Histogrammdehnung).

2.9.3 Radiometrische Eigenschaften – Projektor

Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Projektionseigenschaften des Projektors mit einem der Formel (2.112) vergleichbaren Modell nur unzureichend modellieren lassen. Die Aufnahmen einer geeichten Graukarte (FotowandTM Großformat-Graukarte) weisen eine deutlich inhomogene Intensitätsverteilung mit einer sternförmigen Struktur auf. Die Kompensation dieses Effekts erfolgt daher unter Verwendung einer zweidimensionalen Look-Up-Tabelle, in der für jedes Projektorpixel ein Korrekturfaktor enthalten ist.

Die Korrektur erfolgt, nachdem die Korrespondenz zwischen Kamera- und Projektorpixel hergestellt ist:

$$g_{IV}(x_{cam}, y_{cam}) = s_{proj}(x_{proj}, y_{proj}) g_{III}(x_{cam}, y_{cam}) \quad (2.114)$$

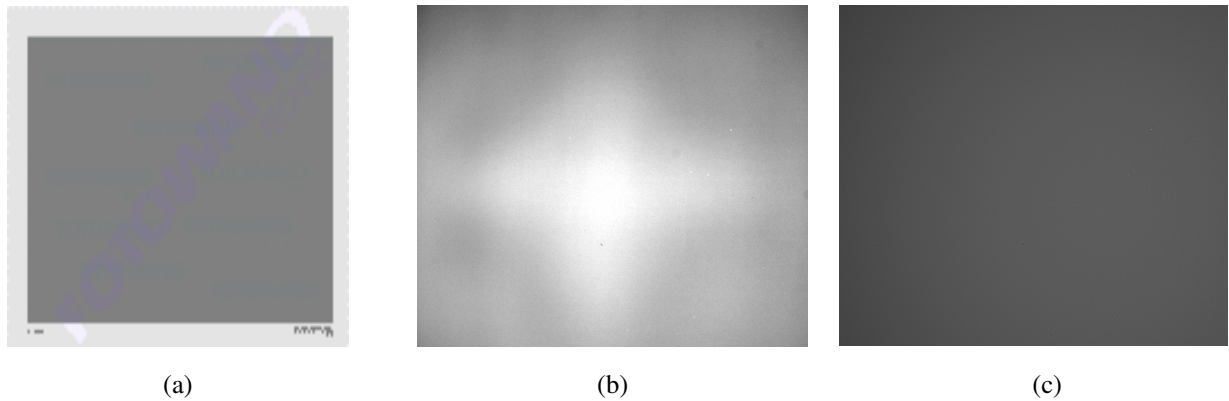


Abbildung 54: (a) Fotowand™ Großformat-Graukarte zur Kalibrierung der Projektionseigenschaften des Projektors. (b) Unkorrigiertes Bild bei Projektion auf eine Fläche homogener Dichte mit sternförmiger Struktur der Intensitätsverteilung (nach Histogrammdehnung). (c) Unter Ansatz des Modells für die Projektionseinheit korrigiertes Bild (nach Histogrammdehnung).

2.9.4 Beleuchtungsmodell

In der Computergraphik werden Beleuchtungsmodelle dazu verwendet, um realitätsnahe Darstellungen einer im Computer gespeicherten Szenenbeschreibung zu generieren. Neben der geometrischen Beschreibung ist daher eine Vorschrift notwendig, nach der die Farb- oder Grauwerte der einzelnen Bildpunkte der virtuellen Kamera berechnet werden. In der Computergraphik wird diese Vorschrift Beleuchtungsmodell genannt. In einem solchen Modell werden die Eigenschaften der Lichtquellen (Position, Farbe etc.) und die Oberflächenbeschaffenheit (Geometrie, Farbe, Reflexionsverhalten) festgelegt.

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie ein solches Beleuchtungsmodell umgekehrt dazu verwendet werden kann, um auf die Oberflächenbeschaffenheit des erfassten Objekts zu schließen. In diesem Zusammenhang sind besonders lokale Beleuchtungsmodelle interessant. Sie vernachlässigen sekundäre Effekte, wie Strahlungsaustausch zwischen benachbarten Flächen, und erlauben daher eine punktweise Auswertung ohne Betrachtung der Umgebung.

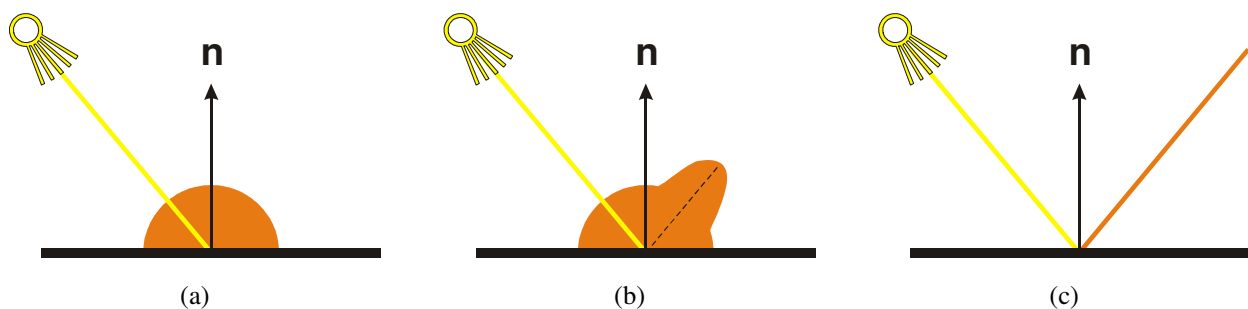


Abbildung 55: Verschiedene Arten von Reflexion: (a) ideal diffuse Reflexion, (b) gerichtet diffuse Reflexion, (c) ideal spiegelnde Reflexion.

Neben dem Grad der Reflexion, beschrieben durch den Reflexionsfaktor ρ , ist weiterhin die Art der Reflexion von Bedeutung. Man unterscheidet ideal diffuse Reflexion, gerichtet diffuse Reflexion und ideal spiegelnde Reflexion (Abbildung 55). Die in der optischen 3D-Vermessung gestellten Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften, häufig unter dem Begriff „optisch kooperative Oberflächen“ zusammengefasst, sehen eine ideal diffus reflektierende Oberfläche vor.

Eine ideal diffus reflektierende Oberfläche reflektiert einfallendes Licht richtungsunabhängig. Oberflächen, welche diese Eigenschaft aufweisen, werden als Lambertsche Oberflächen bezeichnet. Sie erscheinen unabhängig von der Beobachtungsrichtung gleich hell. Die Helligkeit hängt lediglich von der Stärke der Lichtquelle und vom Cosinus des Winkels ϑ zwischen der Oberflächennormalen $\mathbf{n}$ und der Beleuchtungsrichtung $\mathbf{l}$ ab (Lambertsches Cosinus-Gesetz,).

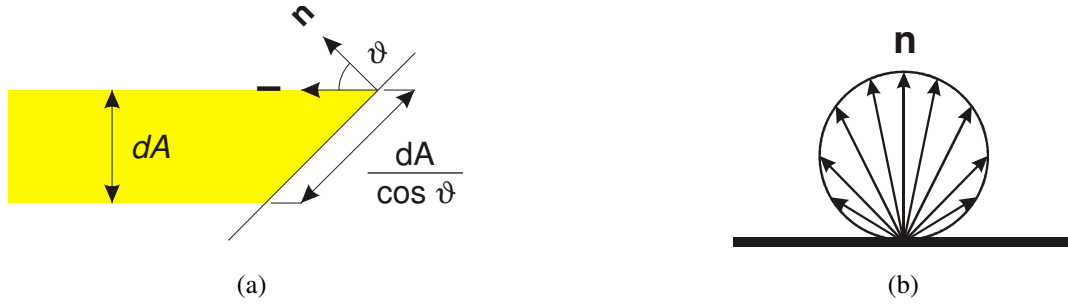


Abbildung 56: (a) Lambertsches Cosinus-Gesetz: Ein Lichtstrahl mit infinitesimalem Querschnitt dA schneidet eine Fläche unter dem Schnittwinkel ϑ . (b) Resultierende Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Winkels ϑ .

Aufgrund der im Vergleich zur Aufnahmeentfernung kleinen Blendenöffnung wird die Projektionseinheit als Punktlichtquelle modelliert. Im Abstand r erzielt eine Punktlichtquelle mit Strahlungsintensität I_p die Beleuchtungsstärke [Foley et al. 1993]

$$E = \frac{1}{r^2} \cos \vartheta \cdot I_p = \frac{1}{r^2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} \cdot I_p \quad (2.115)$$



Abbildung 57: (a) Bild einer homogen gefärbten Kugel. Infolge der Variation des Winkels zwischen Beleuchtungsquelle und Oberfläche nimmt die Helligkeit zu den Rändern hin deutlich ab. (b) Mit Hilfe des Beleuchtungsmodells korrigiertes Bild. Die Helligkeitsverteilung ist homogener. Der helle Fleck in der Mitte der Kugel wird durch Glanz verursacht, welcher im verwendeten Modell nicht berücksichtigt wird.

2.9.5 Berechnung der Oberflächenreflektivität

Die von einer Kamera empfangene Beleuchtungsstärke hängt zusätzlich noch vom Reflexionskoeffizient der Oberfläche ab. Mit Gleichung (2.115) ergibt sich die empfangene Beleuchtungsstärke zu

$$E_{cam} = \rho \cdot E = \rho \cdot \frac{1}{r^2} \cos \vartheta \cdot I_p = \rho \cdot \frac{1}{r^2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} \cdot I_p \quad (2.116)$$

Der Reflexionsfaktor ρ ist charakteristisch für den betrachteten Punkt der Oberfläche. Er stellt das Ziel der Auswertung dar. Da die Strahlungsintensität I_p des Projektors und die Empfindlichkeit der Kamera nicht bekannt sind, lässt sich der Reflexionsfaktor ρ anhand des erfassten Grauwerts g nur bis auf einen konstanten Faktor c bestimmen:

$$\rho = c \cdot g \cdot \frac{r^2}{\cos \vartheta} \cdot I_p = c \cdot g \cdot \frac{r^2}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}} \cdot I_p \quad (2.117)$$

Der absolute Wert des Reflexionsfaktors kann durch die Erfassung einer Oberfläche mit bekannter Reflektivität ermittelt werden:

$$\rho = \frac{\rho_c \cdot \cos \vartheta_c}{g_c \cdot r_c^2} \cdot \frac{g \cdot r^2}{\cos \vartheta} = k_c \cdot \frac{g \cdot r^2}{\cos \vartheta} \quad (2.118)$$

mit	ρ_c	Reflexionsfaktor der Graukarte (Dichtenormal)
	g_c	Grauwert des Bildpunkts im Bild der Graukarte
	r_c	Abstand der Graukarte
	ϑ_c	Winkel zwischen Projektionsrichtung und Graukarte

Für viele Anwendungen ist ein relativer Wert für die Reflektivität ausreichend. In diesem Fall kann für k_c der quadrierte Kehrwert der mittleren Entfernung zwischen Projektionseinheit und Objektoberfläche angenommen werden.

2.9.6 Farbe

Für messtechnische Anwendungen werden vorzugsweise monochrome Kameras verwendet. Sie erlauben eine höhere Messgenauigkeit als Farbkameras mit aufgedampften Farbfiltern, bei welchen die fehlende Information anhand der benachbarten Bildpunkte interpoliert wird. Die Verwendung einer Projektionseinheit, welche die additiven Grundfarben Rot, Grün und Blau projizieren kann, erlaubt die Ableitung von Farbinformation aus den Aufnahmen monochromer Kameras. Dazu wird die projizierte Sequenz um drei Bilder erweitert, welche die Messszene bei roter, grüner und blauer Beleuchtung zeigen. Basierend auf diesen Bildern erfolgt die Berechnung dann, getrennt für jeden Farbkanal, analog zu der Berechnung der Oberflächenreflektivität (Abschnitte 2.9.1 bis 2.9.5).

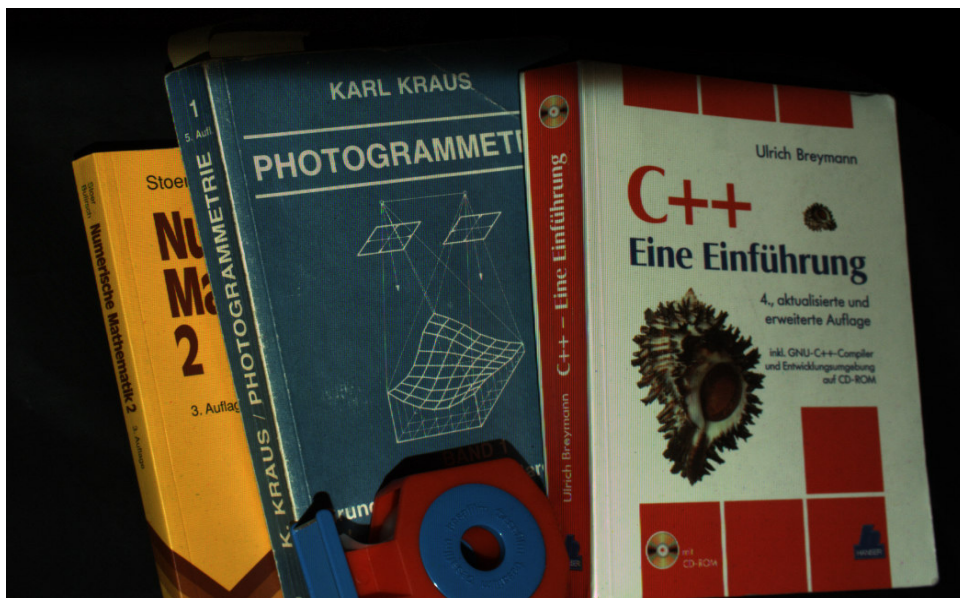


Abbildung 58: Beispiel für ein aus den Aufnahmen einer Monochromkamera abgeleitetes Farbbild.

2.10 Genauigkeitsprüfung mittels Referenzkörper

In der industriellen Koordinatenmesstechnik ist es üblich, die Genauigkeit eines Messsystems anhand von Messungen an Referenzkörpern (sog. Kalibriernormalen) zu überprüfen. Die relevanten geometrischen Eigenschaften dieser Kalibriernormale (z.B. Distanz zwischen zwei Punkten oder Radius einer Kugel) sind mit übergeordneter Genauigkeit bekannt. Während die Abnahme und Überwachung von Koordinatenmessgeräten durch verschiedene Vorschriften geregelt sind [VDI/VDE 2617 1986-1998; ISO 10 360-2 1997], befinden sich Richtlinien für die optische Formmessung derzeit noch in der Entwurfsphase [VDI/VDE 2634-2 2000]. Es sind daher noch keine vorschriftengerechte Prüfkörper erhältlich. In Anlehnung an die im Entwurf befindliche Richtlinie wurden unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit für die hier gemachten Untersuchungen folgende Referenzkörper verwendet:

Ebene Granitplatte: Bei diesem Referenzkörper handelt es sich um eine ebene Granitplatte mit einer zertifizierten Ebenheitsabweichung von maximal $7\text{ }\mu\text{m}$. Um eine bessere optische Antastbarkeit zu erreichen, wurde auf einer Fläche von $20\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ eine selbstklebende Papierbeschichtung angebracht.

Hantelförmiges Kalibriernormal: Bei diesem Referenzkörper handelt es sich um ein von der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt in Braunschweig zertifiziertes Kalibriernormal. Der Prüfkörper besteht aus zwei Kugeln, welche über einen Metallstab miteinander verbunden sind. Die Radien der Kugeln sind mit einer Genauigkeit von $5\text{ }\mu\text{m}$ bekannt. Der Abstand der beiden Kugelzentren wurde mit einer Genauigkeit von $8\text{ }\mu\text{m}$ bestimmt.

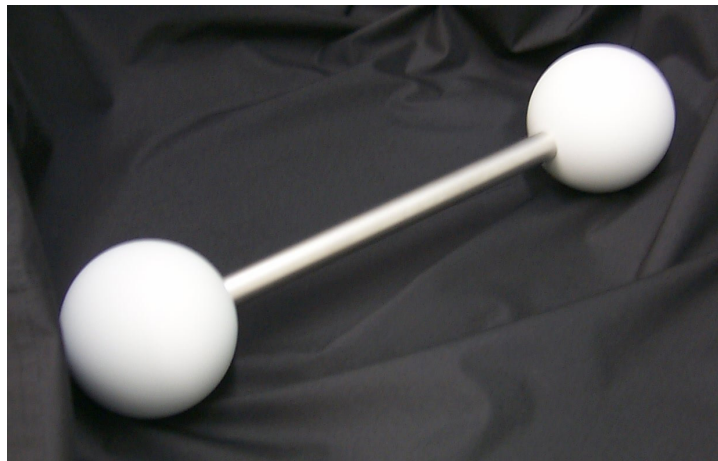


Abbildung 59: Hantelförmiger Prüfkörper für die Genauigkeitsuntersuchungen.

2.10.1 Ebener Prüfkörper

Die ebene Granitplatte ist gut geeignet, um sowohl hochfrequente Fehler infolge von Messrauschen als auch niederfrequente Fehlereinflüsse, wie etwa systematische Messfehler aufgrund von Fehlern in den Kalibrierparametern, aufzudecken. Als Maß für die erzielte Genauigkeit wird die Abweichung der Messdaten von einer an die Messdaten angepassten Ebene verwendet. Die Anpassung findet im Rahmen einer Kleinste-Quadrate-Ausgleichung statt.

Für die Bestimmung der Ebenenparameter wird zunächst der Schwerpunkt $\bar{\mathbf{x}}$ der N gültigen Messpunkte $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3$ berechnet

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{x}_i \quad (2.119)$$

Anschließend wird die Matrix der zweiten zentralen Momente aufgebaut

$$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} (x-x_0)^2 & \sum_{i=0}^{N-1} (x-x_0)(y-y_0) & \sum_{i=0}^{N-1} (x-x_0)(z-z_0) \\ \sum_{i=0}^{N-1} (x-x_0)(y-y_0) & \sum_{i=0}^{N-1} (y-y_0)^2 & \sum_{i=0}^{N-1} (y-y_0)(z-z_0) \\ \sum_{i=0}^{N-1} (x-x_0)(z-z_0) & \sum_{i=0}^{N-1} (y-y_0)(z-z_0) & \sum_{i=0}^{N-1} (z-z_0)^2 \end{bmatrix} \quad (2.120)$$

Der normierte Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert der Matrix $\mathbf{M}_x$ stellt den Normalenvektor $\mathbf{n}$ der Ebene dar. Da die Ebene durch den Schwerpunkt $\bar{\mathbf{x}}$ verläuft, erhält man mit $d = -\mathbf{n} \cdot \bar{\mathbf{x}}$ die Hessesche Normalform (HNF)

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d = 0 \quad (2.121)$$

der Ebene. Den Abstand eines beliebigen Punktes von der Ebene berechnet man durch Einsetzen der Punktkoordinaten in Gleichung (2.121). Eine einzelne, genauigkeitsbeschreibende Kenngröße erhält man durch die Berechnung der Quadratsumme der Abweichungen (RMS-Wert, Root Mean Square Error)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + d)^2} \quad (2.122)$$

Für die einzelnen Messsysteme ergeben sich folgende Ergebnisse:

Tabelle 6: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen unter Verwendung eines ebenen Prüfkörpers für verschiedene Sensorkonfigurationen.

Messsystem	Projektor kalibriert	Anzahl Kameras	Verfahren	Messfeld [mm]	Mittlerer Fehler [mm]	Maximaler Fehler [mm]	Mittlerer Fehler / Messfeld
Messsystem 1	Ja	1	Line-Shift	200 × 200	0.019	0.096	1 : 14 800
	Ja	1	Time-Shift	200 × 200	0.025	0.117	1 : 11 300
	Ja	1	Phase-Shift	200 × 200	0.025	0.113	1 : 11 300
Messsystem 2	Nein	2	Line-Shift	300 × 300	0.031	0.120	1 : 13 600
Messsystem 3	Nein	2	Line-Shift	300 × 300	0.028	0.118	1 : 15 000

Eine genauere Analyse zeigt, dass die Abweichungen für jedes der drei Sensorsysteme eine charakteristische Struktur aufweisen: Beim Messsystem 1 sind die Fehler nahezu zufällig verteilt (Abbildung 60 (a)). Dagegen weisen die Abweichungen im Falle von Messsystem 2 deutliche Moirémuster auf. Die Ursache hierfür liegt in den durch das LCD des Projektors erzeugten dunklen Linien, welche die einzelnen Bildpunkte voneinander trennen. Diese Linien sind in den Aufnahmen der hochauflösenden Kameras teilweise noch zu erkennen. Es kommt zu einer Überlagerung des projizierten Gitters mit der gitterförmigen Struktur des CCD-Chips, was die Ursache der Moiré-Struktur darstellt (Abbildung 60 (b)). Die Residuen unter Verwendung des DMD-Projektors weisen dagegen eine charakteristische Struktur in Form von vertikalen Streifen auf, welche auf eine deutlich reduzierte Qualität der Wiedergabe von vertikalen Linien zurückzuführen ist.

Es handelt sich dabei um ein prinzipbedingtes Problem: Die zur Bilderzeugung verwendeten Mikrospiegel sind derart aufgehängt, dass ihre Schwingungsebene horizontal orientiert ist. Die vertikale Ausrichtung der Spiegel bleibt hingegen weitgehend stabil. Dies führt zu einem mit bloßem Auge erkennbaren Zittern von dünnen vertikalen Strukturen (Abbildung 60 (c)).

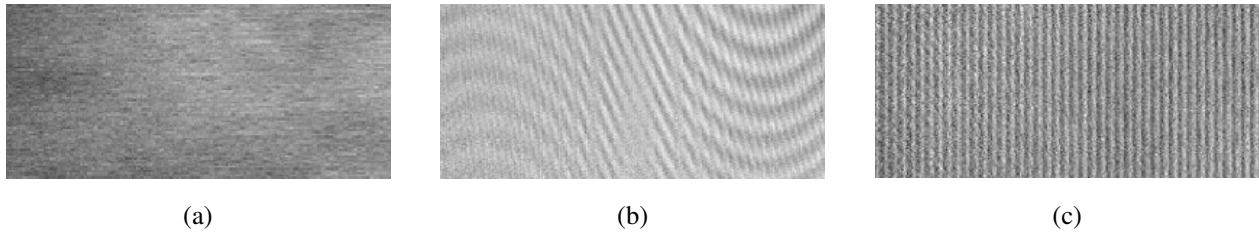


Abbildung 60: Struktur der Residuen der Ebenenschätzung: (a) Messsystem 1 (ABW), (b) Messsystem 2 (LCD), (c) Messsystem 3 (DMD).

2.10.2 Kugelförmiger Prüfkörper

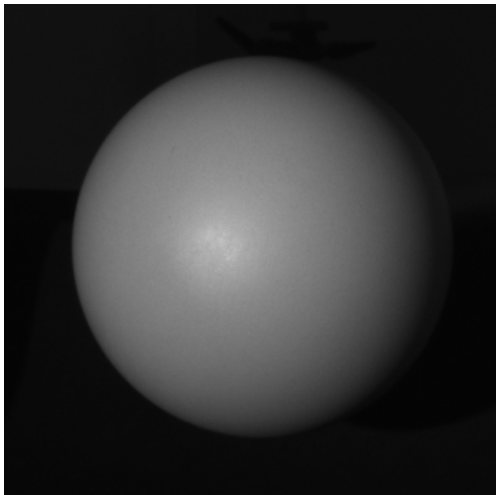
Bei dem hantelförmigen Prüfkörper stellt sich das Problem, dass der Messbereich von Messsystem 1 zu klein ist, um beide Kugeln in einer Aufnahme abzubilden. Um alle Messsysteme gleichartig behandeln zu können, wurde daher lediglich eine der Kugeln gemessen bzw. ausgewertet. Ein weiteres Problem bestand darin, dass zu dem Zeitpunkt, als der Prüfkörper von der Firma GOM mbh, Braunschweig, zur Verfügung gestellt wurde, kein kalibriertes Längennormal zur Verfügung stand. Die Kalibrierung des Messsystems konnte daher lediglich bis auf einen Maßstabsfaktor erfolgen. Zur Bestimmung der Abweichungen wurde deshalb eine Kugel an die Messdaten angepasst. Die nichtlineare Beobachtungsgleichung

$$0 + v_i = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 + (z_i - z_m)^2} - r \quad (2.123)$$

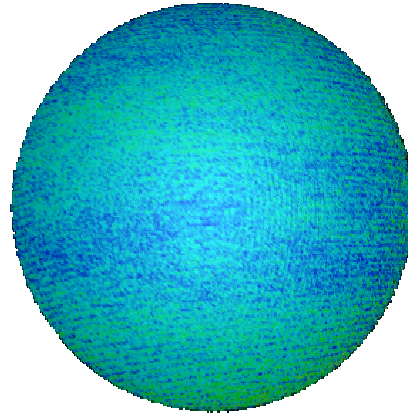
dient als Basis für eine Parameterschätzung im Gauss-Markov-Modell, in welcher die Koordinaten des Mittelpunktes und der Radius mit Hilfe von Näherungswerten iterativ bestimmt werden. Die Residuen v_i geben die Abweichung zwischen Messdaten und Kugelmodell wieder und werden analog zu (2.122) zur Berechnung der RMS-Werte verwendet. Bei den Untersuchungen wurde also lediglich die Formtreue des Prüfkörpers, nicht aber die Kenntnis der Kugelradien, ausgenutzt. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Genauigkeitsprüfung für den kugelförmigen Prüfkörper.

Tabelle 7: Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen unter Verwendung eines kugelförmigen Prüfkörpers für verschiedene Sensorkonfigurationen.

Messsystem	Projektor kalibriert	Anzahl Kameras	Verfahren	Messfeld [mm]	Mittlerer Fehler [mm]	Maximaler Fehler [mm]	Mittlerer Fehler / Messfeld
Messsystem 1	Ja	2	Line-Shift	200 × 200	0.016	0.092	1 : 17 500
	Nein	2	Line-Shift	200 × 200	0.015	0.055	1 : 18 800
Messsystem 2	Nein	2	Line-Shift	300 × 300	0.021	0.106	1 : 20 000
Messsystem 3	Nein	2	Line-Shift	300 × 300	0.019	0.136	1 : 22 300



(a)



(b)

Abbildung 61: (a) Ausschnitt aus dem zur Messung verwendeten Hellbild des kugelförmigen Referenzkörpers. (b) Farbkodierte Darstellung der Abweichungen.

2.11 Beschreibung der Software

Für die Verifikation der entwickelten Verfahren wurde ein interaktives Programm zur Datenerfassung entwickelt. Die auf Microsoft Windows basierende Software verfügt über eine graphische Benutzeroberfläche, welche die Kontrolle des gesamten Messablaufes ermöglicht. Die *Grab3D* genannte Anwendung weist folgende Leistungsmerkmale auf:

Offene Softwarearchitektur: Das Programm ermöglicht, mehrere unterschiedliche Framegrabber, Kameras, Projektoren und Positioniereinheiten über eine Bedienoberfläche zu steuern und zu verwalten.

Hilfsmittel zur Systemeinrichtung: Zur Einrichtung des Messsystems kann ein Live-Bild einer beliebigen Kamera betrachtet werden. Weiterhin ist die Projektion eines beliebigen Musters aus der Sequenz möglich, was die Ausrichtung der Komponenten und die Fokussierung von Projektor und Kameras erleichtert.

Flexible Datenverarbeitung: Es ist möglich, alle beschriebenen Verfahren auf die Daten anzuwenden. Es lassen sich sowohl die Rohdaten wie auch Zwischenergebnisse und endgültige Resultate abspeichern. Dies erlaubt es, dieselben Messungen auf unterschiedliche Art und Weise auszuwerten und zu vergleichen.

Durchführung der Kalibrierung: Die Bestimmung der Bildkoordinaten der Kalibrierung und deren Identifizierung erfolgt vollautomatisch. Da keine Positioniereinheit mit den benötigten Freiheitsgraden zur Verfügung stand, muss die Orientierung des Kalibrierfelds zwischen den Aufnahmen jedoch von Hand verändert und anschließend die Messung von Hand ausgelöst werden.

Berücksichtigung von Genauigkeitsinformation: Das beschriebene Modell zur Ableitung der Genauigkeitsinformation der Messpunkte ist realisiert.

Flexible Konfigurierbarkeit: Alle von den Verfahren verwendeten Schwellwerte sind durch die Benutzeroberfläche nach außen geführt. Dadurch kann das Zuverlässigkeitsniveau durch den Benutzer festgelegt werden. Dies hat den Vorteil, dass für Aufgaben, welche ein geringeres Genauigkeitsniveau erfordern, z.B. für Visualisierungsaufgaben, die Konsistenzbedingungen lockerer formuliert werden können, was in der Regel die vollständige Überdeckung der Oberfläche mit weniger Messungen erlaubt.

Interaktive Analyse und Korrektur: Die Software bietet verschiedene Werkzeuge zur interaktiven Analyse der Daten. Verbleibende Fehler lassen sich mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren korrigieren. So ist es beispielsweise möglich, die Daten einer Medianfilterung zu unterziehen oder durch eine Dilatation des Maskenbildes

unsichere Messungen entlang der Objektränder auszublenzen. Es ist ebenfalls möglich, Bereiche interaktiv mit der Maus zu markieren und auszumaskieren.

Interaktive Punktmessung: Es ist möglich, Einzelpunkte interaktiv in den Bildern anzumessen. Kreisförmige Merkmale lassen sich automatisiert mit Subpixelgenauigkeit bestimmen. Das Programm bestimmt zu den zweidimensionalen Bildkoordinaten durch Interpolation die entsprechenden dreidimensionalen Koordinaten. Es können somit Verknüpfungspunkte für die Registrierung von Teilmessungen über natürliche oder signalisierte Objektmerkmale bestimmt werden.

Datenexport: Das Programm stellt verschiedene Schnittstellen für den Export der Daten zur Verfügung. Neben einer Reihe von Bildformaten ist auch die Erzeugung triangulierter Oberflächen (Dreiecksnetze) und deren Export in verschiedene Polygonformate möglich (z.B. VRML, PLY). Neben den reinen Geometriedaten ist auch die punktweise Ausgabe von Farbe oder Intensität (Reflexionsfaktor) sowie von korrigierten Texturbildern möglich.

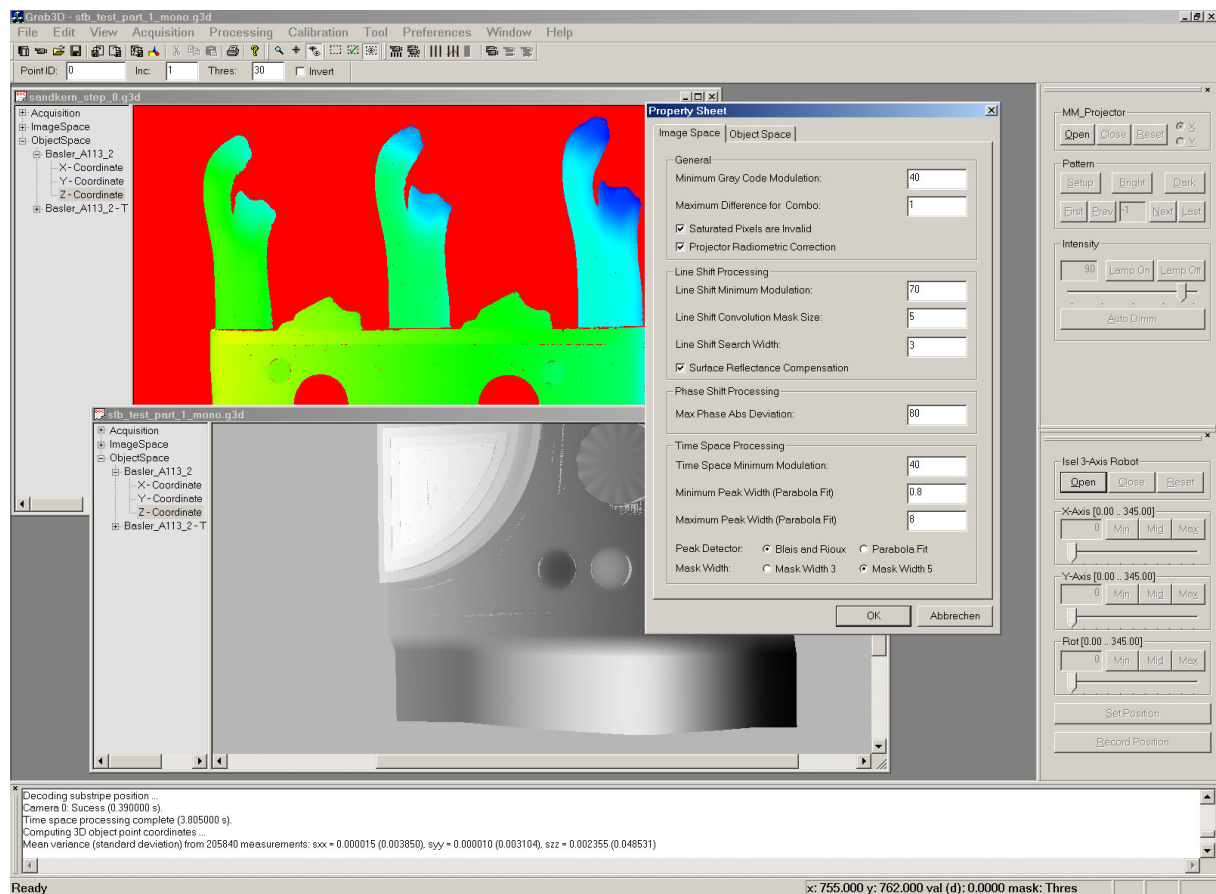


Abbildung 62: Bildschirmansicht einer Sitzung mit dem zur Datenerfassung und Objektpunktberechnung entwickelten Programm „Grab3D“.

2.12 Experimentelle Ergebnisse

Alle gezeigten Datensätze wurden mit den beschriebenen Verfahren unter Verwendung der Software Grab3D (vgl. Abschnitt 2.11) erfasst. Es handelt sich um ungefilterte Rohdaten. Die dreidimensionalen Darstellungen stammen von dem in Abschnitt 6.1 vorgestellten Programm Reg3D. Bei einigen Objekten wurden Bereiche, welche gültige Messungen des Hintergrunds enthielten, interaktiv ausmaskiert. Die Rechenzeit auf einer Dell Precision Workstation 530 mit 1,4 GHz Pentium 4 Xeon-Prozessor und 1 GB Hauptspeicher betrug unter 10 s pro auszuwertender Kamera.

Tabelle 8 Überblick über die Beispieldatensätze

<i>Datensatz</i>	<i>Konfiguration¹</i>	<i>Anz. Punkte</i>	<i>Anz. Dreiecke</i>	<i>Lat. Auflösung [mm]</i>	<i>Genauigkeit² [mm]</i>
Bücher	LCD / 2 / N	133 000	261 000	0,75	0.25
Testkörper Aluminium	LCD / 2 / N	67 000	130 000	0,75	0.16
Testkörper Aluminium	DMD / 1 / J	235 000	462 000	0,45	0.24
Testkörper Aluminium	ABW / 1 / J	177 000	346 000	0,45	0.04
Hand	ABW / 1 / J	114 000	224 000	0,45	0.20
Orchidee	ABW / 1 / J	8 000	16 000	0,45	0.08

2.12.1 Bücher – Kindermann CPD Omega XV



Abbildung 63: Gerenderte Farbansicht einer Testszene, aufgenommen mit dem Kindermann LCD-Projektor.

¹ Format: Projektortyp, Anzahl der Kameras, Projektor nimmt an Triangulation teil [(J)a / (N)ein]

² Mittlerer Helmertscher Punktlagefehler aus der Ausgleichung

2.12.2 Testkörper Aluminium – Kindermann CPD Omega XV

Bei diesem aus Aluminium gefrästen Objekt handelt es sich um einen innerhalb des Sonderforschungsbereiches 514 verwendeten Testkörper, der verschiedene geometrische Merkmale bereitstellt.

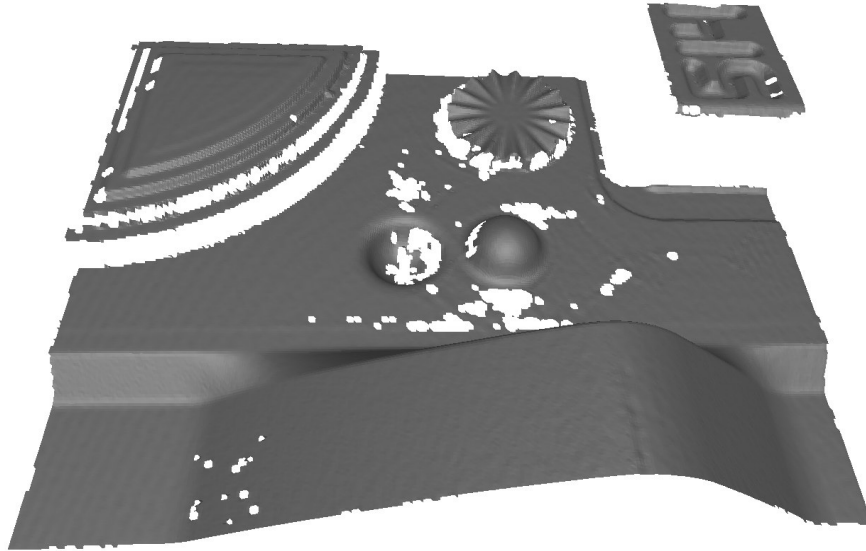


Abbildung 64: Datensatz eines Testkörpers aus Aluminium, aufgenommen mit dem Kindermann LCD -Projektor.

2.12.3 Testkörper Aluminium – Davis DLX 10

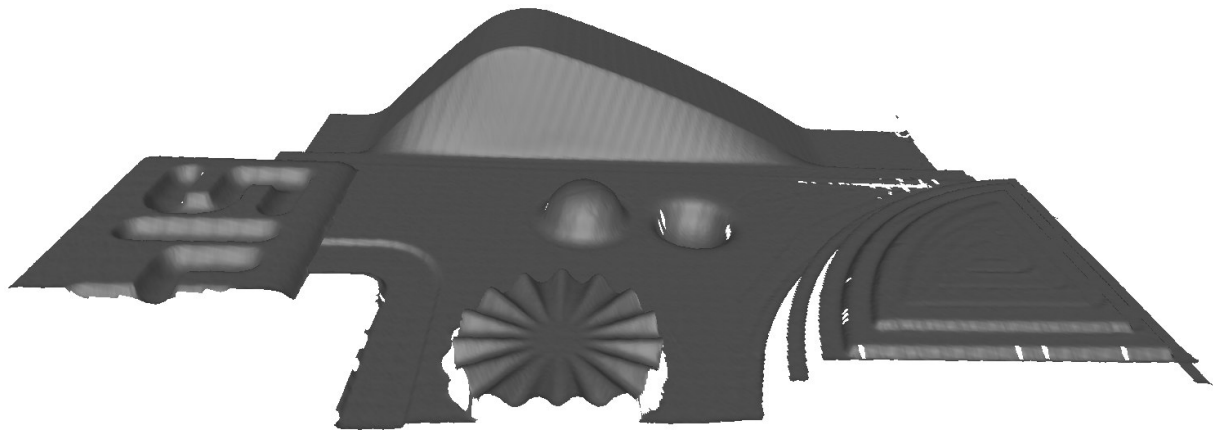
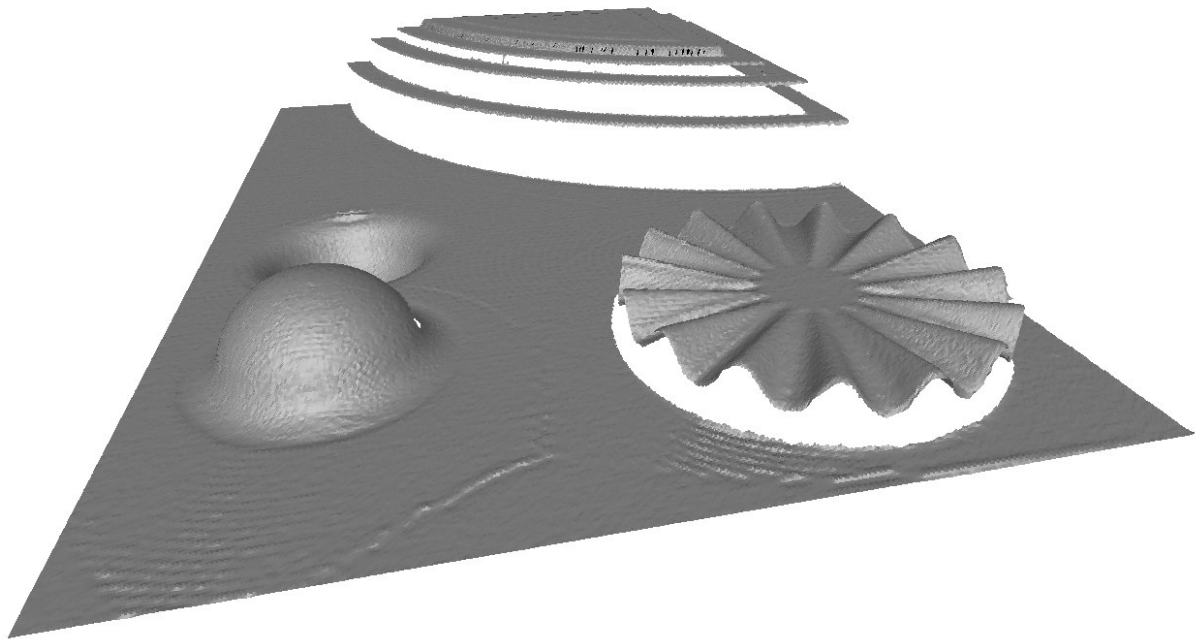
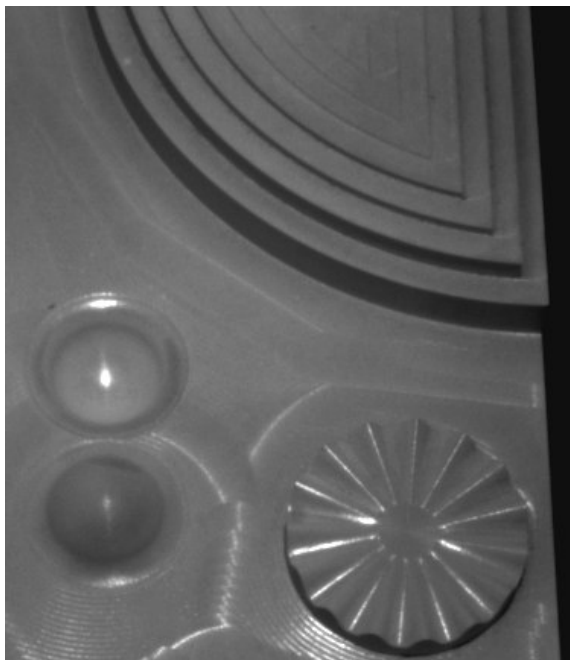


Abbildung 65: Datensatz eines Testkörpers aus Aluminium, aufgenommen mit dem Davis DMD –Projektor.

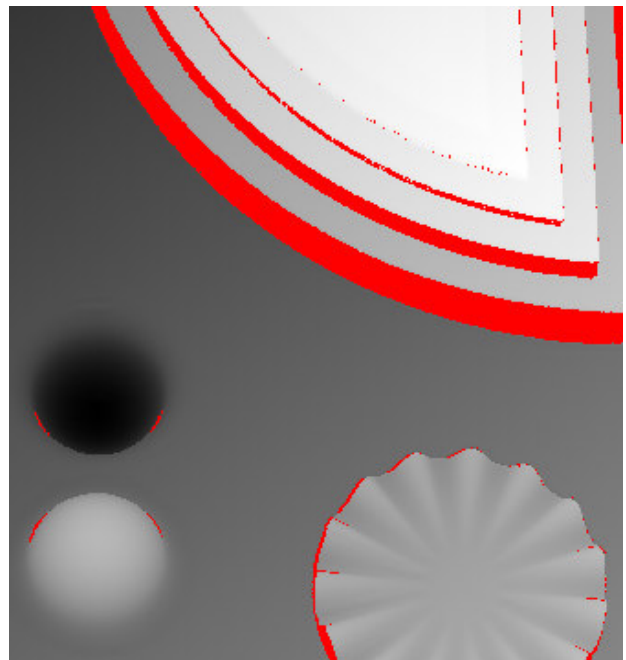
2.12.4 Testkörper Aluminium – ABW 640



(a)



(b)



(c)

Abbildung 66: (a) Ausschnitt einer Aufnahme eines Testkörpers aus Aluminium.
 (b) Hellbild aus der Messsequenz. (c) Abgeleitetes Koordinatenbild (z-Komponente).

2.12.5 Orchideen – ABW 640

Die Blütenblätter von Orchideen wurden für eine Analyse ihrer statischen Struktur erfasst, um Ansätze für die Konstruktion von Schalenbauwerken in der Architektur zu erhalten [Balz und Gühring 2001].

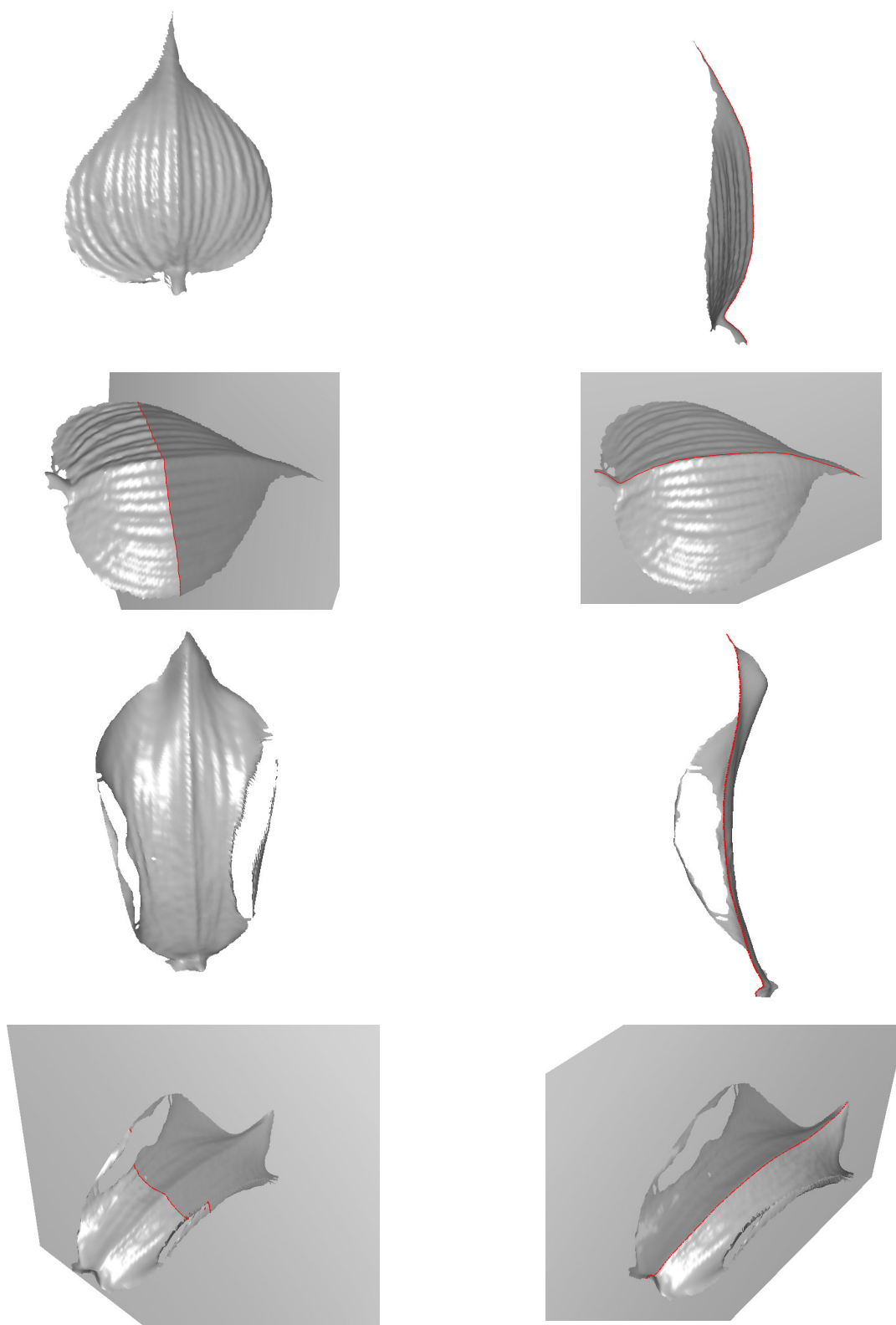


Abbildung 67: Gerenderte Darstellung und Schnittbilder von Orchideenblüten.

2.12.6 Hand – ABW 640

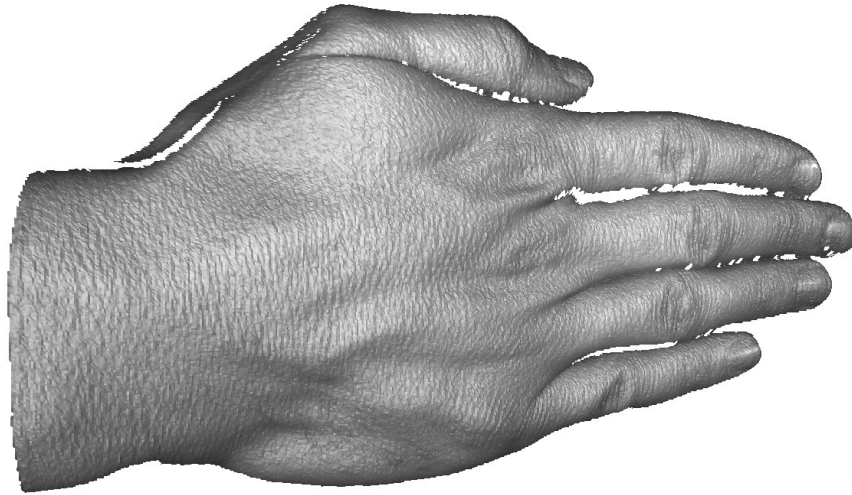


Abbildung 68: Gerenderte Darstellung der Aufnahme einer menschlichen Hand.

2.13 Diskussion

In diesem Kapitel wurden Verfahren und Konzepte vorgestellt, welche alle notwendigen Schritte für die Datenerfassung und -verarbeitung zur Ableitung dreidimensionaler Oberflächenbeschreibungen abdecken. Es wurden Beispiele für den Aufbau verschiedener triangulationsbasierter Sensorsysteme nach dem Prinzip des Kodierten Lichtansatzes gegeben. Dabei wurden ausschließlich Standardkomponenten verwendet.

Eine der wesentlichen Aufgaben der Datenverarbeitung ist die Lösung des Korrespondenzproblems. Anhand des häufig verwendeten Phasenshiftverfahrens wurden Schwachpunkte bisheriger Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems aufgezeigt. Mit dem Line-Shift- und Space-Time-Verfahren wurden zwei neue Verfahren vorgestellt, welche die gestellten Anforderungen besser erfüllen.

Um der Forderung nach einer transparenteren Darstellung der Datenqualität gerecht zu werden, wurde die Genauigkeit der beschriebenen Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems untersucht. Ein wesentlicher Schritt in diese Richtung liegt auch in der durchgängigen Modellierung des Gesamtsystems durch die Übertragung von etablierten Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie. Sie erlauben die simultane Bestimmung der Koordinaten der Objektpunkte und deren Kovarianzmatrix.

Voraussetzung für die Ableitung metrischer Information aus den Messbildern ist die Kalibrierung des Sensorsystems. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten direkten Kalibrierverfahren wurden die Parameter eines Modells, welche die Geometrie der optischen Abbildung unter Berücksichtigung von Fehlern des optischen und mechanischen Aufbaus beschreiben, bestimmt. Als Verfahren wurde die in der Photogrammetrie weit verbreitete Bündelausgleichung gewählt. Der Projektor wurde als inverse Kamera modelliert und ebenfalls kalibriert. Unter Verwendung von mindestens zwei Kameras kann der Projektor jedoch auch lediglich zur Bestimmung der homologen Punkte verwendet werden, ohne zu der eigentlichen Punktberechnung beizutragen. Dies macht die Verwendung von Projektoren mit unbekannter oder instabiler inneren Orientierung möglich.

Neben der geometrischen Information wurde auch die bei der Erfassung der Messdaten aufgezeichnete radiometrische Information in der Auswertung berücksichtigt. Unter der Annahme einer ideal diffus reflektierenden Oberfläche wurde die Ableitung von Farb- und Reflektivitätswerten unter Berücksichtigung verschiedener Effekte vorgestellt.

Anhand von Messungen hochgenau bekannter Referenzkörper sowie weiterer Beispielobjekte wurde die praktische Leistungsfähigkeit der beschriebenen Verfahren gezeigt. Die erzielte relative Genauigkeit bewegt sich, abhängig von den Oberflächeneigenschaften, im Bereich von 1:5000 bis 1:20.000.

Die Grenzen der Verfahren sind einerseits durch den physischen Aufbau der Sensoren, andererseits durch das Messprinzip im Zusammenspiel mit den Oberflächeneigenschaften des zu erfassenden Objekts bedingt.

Die für die Untersuchungen zur Verfügung stehenden Projektionseinheiten offenbarten dabei unterschiedliche Schwachpunkte. Der Projektor der Firma ABW hat sich hinsichtlich der Stabilität der Kalibrierung als sehr robust herausgestellt. Bei dunklen Objekten ist der erzielbare Kontrast für eine zuverlässige Messung häufig jedoch nicht ausreichend. Außerdem ist die Helligkeitsverteilung über das Projektionsfeld hinweg sehr inhomogen. Die Schärfentiefe ist zwar klein, für viele Objekte jedoch ausreichend. Die Multimediaprojektoren zeigten ebenfalls prinzipbedingte Schwachpunkte. Beim LCD-Projektor werden die einzelnen Pixel durch dunkle Linien getrennt, welche im Zusammenspiel mit den CCD-Sensoren der Kameras zu deutlichen Moiré-Effekten führen. Bei DMD-Projektoren erweist sich die qualitativ deutlich schlechtere Wiedergabe von dünnen vertikalen Strukturen als dominante Fehlerquelle.

Es ist zu erwarten, dass die in zukünftigen Projektoren zur Verfügung stehende LCOS¹-Technologie besser für die hier beschriebene Anwendung geeignet ist. LCOS-Chips weisen einen hohen Kontrast und einen höheren Füllfaktor als die verwendeten Technologien auf. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Chips in einem Halbleiterprozess sehr präzise gefertigt werden. Die Größe der Chips entspricht ungefähr der Größe eines 1"-CCD-Chips, was eine andere Auslegung der optischen Komponenten ermöglicht. Es ist daher mit einer größeren Schärfentiefe zu rechnen. Da ein solches System keine bewegten Teile besitzt, sind die beim DMD-Projektor auftretenden Schwierigkeiten nicht zu befürchten.

Mischpixel, Mehrfachreflexionen und Variationen der Oberflächenbeschaffenheit unterhalb der Auflösungsgrenze der Kameras und/oder der Projektionseinheit bilden die systemimmanente Grenze für die erzielbare Genauigkeit.

Als Mischpixel werden Störungen durch die geometrische Struktur des Objekts bezeichnet, wenn die Integration bei der Erfassung eines Pixels über unterschiedliche Bereiche des Objekts erfolgt. Mischpixel treten daher im Bereich von Geometriekanten auf (Abbildung 69 (a)). Mehrfachreflexionen kommen an reflektierenden Objektbereichen vor (Abbildung 69 (b)). Variationen in den Reflektionseigenschaften der Oberfläche führen zu einer Verschiebung des homologen Punktes und damit zu Messfehlern.

Diese Effekte lassen sich mit den beschriebenen Verfahren nur unzureichend korrigieren. Größere Fehler können jedoch aufgrund der beschriebenen Konsistenzbedingungen detektiert werden. Der fehlerhafte Messpunkt ist dann zu verwerfen.

Durch die konservative Strategie im Umgang mit unsicheren Messwerten konnte ein hohes Niveau an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der abgeleiteten Oberflächenbeschreibungen erreicht werden.

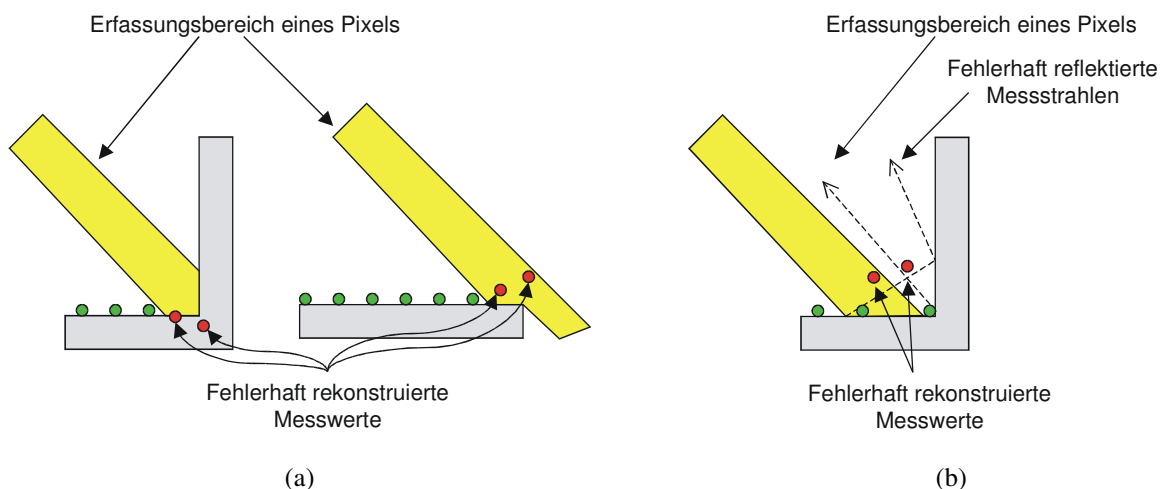


Abbildung 69: (a) Zur Entstehung von Mischpixeln: Die Integration über verschiedene Objektbereiche innerhalb eines Pixels führt zu fehlerhaften Messwerten. (b) Reflektionen an glänzenden Objektbereichen führen zu fehlerhaften Messwerten.

¹ LCOS: Liquid Crystal On Silicon

3 Registrierung

3.1 Einleitung

Im vorherigen Kapitel wurden Verfahren zur messtechnischen Erfassung der Oberfläche von Objekten vorgestellt. Alle diese Verfahren benötigen eine freie optische Sichtverbindung zwischen den Messpunkten und mindestens zwei Kameras.

Um die gesamte Oberfläche eines Objekts zu erfassen, sind daher mehrere Aufnahmen notwendig. Zwischen den Aufnahmen wird entweder das Objekt oder das Sensorsystem in seiner Position und Orientierung verändert. Die Messdaten liegen nach der Berechnung der dreidimensionalen Koordinaten im Sensorkoordinatensystem vor (vergl. Abschnitt 2.4.8). Punkte, welche sich im Überlappungsbereich zweier Aufnahmen befinden, haben daher in beiden Datensätzen unterschiedliche Koordinaten. Für die weitere Verarbeitung der Messdaten ist es aber häufig notwendig, dass die Datensätze im selben Koordinatensystem vorliegen.

Der Prozess, verschiedene Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen, wird *Registrierung* genannt. Das Problem der Registrierung stellt sich jedoch nicht nur beim Zusammenführen von Messungen, sondern ist von wesentlich allgemeinerer Natur. Es tritt beispielsweise auch bei der industriellen Qualitätssicherung im eigentlichen Prüfschritt auf, wenn Messwerte mit dem CAD-Modell des Prüflings in Bezug zu setzen sind, um anschließend die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Zustand zu bestimmen. Weitere Anwendungen ergeben sich im Bereich der medizinischen Bildverarbeitung, z.B. beim Vergleich von multitemporalen oder multimodalen Datensätzen oder in der Robotik (z.B. Fügetechnik).

3.2 Problemformulierung

Aufgrund der vielfältigen Anwendungen gibt es ein breites Spektrum unterschiedlicher Verfahren zur Registrierung dreidimensionaler Datensätze. In der Photogrammetrie ist es beispielsweise üblich, Messungen, welche in unterschiedlichen Stereomodellen gewonnen wurden, anhand von wenigen, wohldefinierten und gut identifizierbaren Passpunkten mittels einer räumlichen Affin- oder Ähnlichkeitstransformation in das Landeskoordinatensystem zu überführen. Bei der Registrierung von multimodalen Datensätzen in der Medizin ist dagegen die Deformation des Gewebes im Transformationsmodell zu berücksichtigen. Die beiden Beispiele zeigen, dass die Formulierung des Problems der Registrierung einer anwendungsabhängigen Präzisierung bedarf. Im Kontext dieser Arbeit sind folgende Anforderungen und Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Bei den Daten handelt es sich um Beschreibungen von Oberflächen, nicht etwa um Volumendaten oder Einzelpunkte. Sie können sowohl synthetischen Ursprungs und damit kompakt, vollständig und konsistent (CAD-Daten) als auch aufgrund von Messungen an realen Objekten entstanden sein. Im Falle von Messdaten handelt es sich um dichte Messdaten, welche prinzipbedingt einen großen Ressourcenbedarf haben und in der Regel unvollständig und inkonsistent sind.
- Neben der Registrierung von zwei Datensätzen (z.B. Messung und CAD-Modell) ist auch die Registrierung mehrerer Datensätze (z.B. mehrere Messdatensätze untereinander) zu berücksichtigen.
- Die innere Geometrie der Datensätze ist, von verbleibenden Messfehlern abgesehen, konsistent und soll bei der Registrierung nicht verändert werden.
- Um Aussagen über die Qualität der registrierten Daten machen zu können, ist die Ableitung von statistischen Kenngrößen für die Genauigkeit der Registrierung notwendig.
- Eventuell vorhandene Information über die Genauigkeit der Eingangsdaten soll bei der Registrierung berücksichtigt werden.

- Die Kenntnis korrespondierender Objektmerkmale darf nicht vorausgesetzt werden. Stattdessen soll die Registrierung anhand der Beschreibung der Flächen selbst erfolgen. Sind korrespondierende Punkte bekannt (z.B. signalisierte Passpunkte), soll diese Information bei der Registrierung jedoch mitverwendet werden können.
- Die Repräsentation der Daten soll möglichst allgemein sein, d.h. CAD-Daten und Messdaten sollen mit den gleichen Verfahren verarbeitet werden können.
- Aufgrund der großen Datenmengen von mehreren hunderttausend bis hin zu mehreren Millionen Messpunkten, müssen die Verfahren hinsichtlich Speicherbedarf und Rechenaufwand effizient sein.

3.3 Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus

[Besl und MacKay 1992] haben mit dem *Iterative-Closest-Point-Algorithmus* (ICP-Algorithmus) eine allgemeine, repräsentationsunabhängige und genaue Methode zur Registrierung dreidimensionaler Datensätze vorgeschlagen. Variationen dieses Verfahrens haben inzwischen eine weite Verbreitung gefunden.

In der ursprünglichen Formulierung ermöglicht der Algorithmus die Registrierung von zwei Datensätzen, wobei vorausgesetzt wird, dass einer der Datensätze (Quelldatensatz, Messung) eine Teilmenge des zweiten Datensatzes (Zieldatensatz, Modell) darstellt. Die Datensätze müssen bereits näherungsweise im selben Koordinatensystem vorliegen (z.B. durch einen interaktiven Vorverarbeitungsschritt). Wären homologe Punkte in beiden Datensätzen bekannt, ließe sich mit etablierten Verfahren die Transformation zwischen den beiden Datensätzen bestimmen. Die Grundidee des ICP-Algorithmus liegt nun darin, anstatt der unbekannten, wahren Zuordnungen für jeden Punkt des Quelldatensatzes den jeweils nächsten Punkt des Modelldatensatzes zu finden und diese Punktpaare statt der homologen Punkte zu verwenden. Anhand dieser Punkte wird dann eine räumliche Transformation T bestimmt, welche die Quellpunkte im Sinne einer vorgegebenen Zielfunktion optimal in die Zielpunkte überführt. Da es sich bei den Punkten im Allgemeinen nicht um die exakten Korrespondenzen handelt, wird die Transformation auf die Quellpunkte angewandt und anschließend mit den verbesserten Startwerten so lange eine neue Iteration gestartet, bis die Konvergenz eingetreten ist.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist die Verfügbarkeit eines Operators, der zu einem Punkt $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^3$ des Messdatensatzes den nächsten Punkt $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^3$ des Modelldatensatzes ermittelt. Die Fehlerfunktion, welche bei der Bestimmung der räumlichen Transformation $T: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ minimiert wird, ist die Summe der quadrierten Abstände zwischen den Punkten $\mathbf{d}_i$ des Modelldatensatzes und den transformierten Punkten $T(\mathbf{s}_i)$ des Quelldatensatzes:

$$E: \sum_i \|\mathbf{d}_i - T(\mathbf{s}_i)\|^2 \rightarrow \min \quad (3.1)$$

Die Schritte des Algorithmus sind im Einzelnen:

1. Berechne für jeden Punkt $\mathbf{s}_i$ des Quelldatensatzes den nächsten Punkt $\mathbf{d}_i$ des Zieldatensatzes.
2. Berechne die räumliche Transformation T , welche die Zielfunktion (3.1) minimiert.
3. Transformiere die Quelldaten mit der Transformation T .
4. Beende die Iteration, falls $E^{(k-1)} - E^{(k)} < t_{it}$, ansonsten gehe zurück zu (1).

Die Autoren des Algorithmus haben bewiesen, dass der Algorithmus monoton gegen das nächstliegende lokale Minimum konvergiert.

In der vorgeschlagenen Form weist der ICP-Algorithmus für die Registrierung von Messdaten eine Reihe von Unzulänglichkeiten auf:

- Die Forderung, dass jeder Punkt des Quelldatensatzes einen korrespondierenden Punkt im Zieldatensatz besitzt, ist für Messdatensätze oft nicht erfüllt. Stattdessen überlappen sich die Datensätze häufig nur teilweise.
- Der Algorithmus löst das Problem der Registrierung zweier Datensätze. Eine Lösung für die Registrierung mehrerer Datensätze wird nicht gegeben.
- Gültige Messungen, welche nicht zum Objekt gehören, oder grobe Messfehler führen zu systematischen Fehlern in den Registrierparametern.
- Der Algorithmus benötigt eine große Anzahl von Iterationen und hat damit einen hohen Zeitbedarf.
- Die Genauigkeit der Messdaten wird nicht berücksichtigt.

3.4 Bisherige Arbeiten

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über verschiedene Varianten des ICP-Algorithmus zur Registrierung von Oberflächen gegeben. Abhängig von der Anzahl der gleichzeitig berücksichtigten Datensätze lassen sich die Verfahren generell einteilen in:

- Verfahren zur paarweisen Registrierung
- Verfahren zur simultanen Registrierung mehrerer Datensätze.

Um eine noch präzisere Einteilung vornehmen zu können, werden die einzelnen Verarbeitungsschritte isoliert betrachtet und in entsprechende Kategorien eingeteilt. Die Schritte sind im einzelnen:

Auswahl der Quellpunkte: Die Auswahl der Quellpunkte legt fest, welche Punkte zur Bestimmung der nächsten Punkte verwendet werden.

Varianten:

- Auswahl der Punkte in nur einem Datensatz vs. Auswahl aus beiden (mehreren) Datensätzen
- Zufällige Auswahl vs. gezielte Auswahl von Punkten mit besonderen Eigenschaften
- Auswahl aller Punkte vs. zufällige oder regelmäßige Reduzierung der Punktzahl
- Auswahl von originalen Messpunkten vs. sonstige Punkte

Bestimmung der Zielpunkte: Bei der Bestimmung der Zielpunkte werden den Quellpunkten korrespondierende Punkte auf einem oder mehreren Datensätzen zugeordnet.

Varianten:

- Verwendete Datenstrukturen zur effizienten Suche
- Zuordnung zwischen Originalpunkten (Punkt-Punkt) vs. interpolierter Punkte (Punkt-Fläche)
- Verwendete Konsistenzbedingungen, welchen eine gültige Zuordnung genügen muss

Bestimmung der Transformationsparameter: Die Bestimmung der Transformationsparameter ist das eigentliche Ziel der Registrierung. Da von einer großen Anzahl von Zuordnungen ausgegangen wird, erfolgt die Berechnung der Transformationsparameter im Rahmen einer Ausgleichung.

Varianten:

- Verfahren zur Parameterschätzung

- Zielfunktion bei der Parameterschätzung (z.B. Minimierung des Abstandsquadrates zwischen zwei Punkten vs. Minimierung des Abstandsquadrates zwischen Quellpunkt und Tangentialebene im Zielpunkt)
- Berücksichtigung der Unsicherheit der Zuordnungen

Im Folgenden werden verschiedene Varianten getrennt nach Verfahren zur paarweisen Registrierung und zur Registrierung von mehreren Datensätzen vorgestellt. Dabei werden vor allem die Besonderheiten der einzelnen Verfahren dargestellt. Einige der Arbeiten sind doppelt aufgeführt, da sie Ansätze für beide Techniken enthalten.

3.4.1.1 Verfahren zur paarweisen Registrierung

[Besl und MacKay 1992] (Originalpublikation des ICP-Algorithmus) verwenden alle Punkte des Quelldatensatzes zur Bestimmung des jeweils nächsten Punktes des Zieldatensatzes. Sie zeigen die Anwendbarkeit für verschiedene Datenrepräsentationen, wie z.B. Punktmengen, Kurven, Implizite Funktionen etc. Es werden keine speziellen Datenstrukturen zur Beschleunigung der Nächsten-Punkt-Suche verwendet und keine Konsistenztests durchgeführt, wodurch sich die bereits in Abschnitt 3.3 beschriebenen Probleme ergeben. Die Konvergenz des Verfahrens wird durch eine Extrapolation der Transformationsparameter beschleunigt.

[Chen und Medioni 1992] minimieren die Abstandsquadratsumme zwischen den Quellpunkten auf dem Ausgangsdatsatz und der lokalen Tangentialebene in den jeweils nächsten Punkten des Zieldatensatzes zur Registrierung von Distanzdatensätzen und erreichen dadurch eine beschleunigte Konvergenz. Die Nächste-Punkt-Suche erfolgt entlang der Richtung der Oberflächennormalen, wobei die Ausgangspunkte regelmäßig ausgedünnt und gezielt in glatten Objektbereichen gewählt werden.

[Turk und Levoy 1994] verwenden einen Distanzschwellwert, um ungültige Korrespondenzen zurückzuweisen. Ausserdem werden Korrespondenzen mit Punkten auf dem Rand der Oberflächen verworfen. Sie berechnen den Abstand zwischen den Quellpunkten und einer, in einer Hierarchie von mehreren Auflösungsstufen vorgehaltenen, triangulierten Oberfläche. Die Suche nach den nächsten Punkten wird über eine Einteilung des Raumes in ein regelmäßiges Gitter beschleunigt.

[Godin, Rioux und Baribeau 1994] wählen die Quellpunkte gleichmäßig auf beiden Oberflächen und suchen die jeweils nächsten Punkte unter den Originalpunkten des anderen Datensatzes. Sie verwenden einen Lasersensor, welcher gleichzeitig Intensitätsinformation liefert. Diese Information wird dazu verwendet, Punktkorrespondenzen zurückzuweisen, falls sich die Intensität der beiden Punkte zu sehr unterscheidet.

[Blais und Levine 1995] verwenden die Position und Orientierung des Sensors, um durch die Rückprojektion der Punkte in die Bildebene das nächstliegende Distanzbildpixel zu finden. Die Bestimmung der nächsten Punkte wird dadurch erheblich beschleunigt. Um das Verfahren einfach auf die Registrierung mehrerer Datensätze erweitern zu können, verwenden sie Very-Fast-Simulated-Reannealing zur Bestimmung der Transformationsparameter.

[Boulanger, Moron und Redarce 1996] beschäftigen sich mit der Registrierung von Punktwolken mit CAD-Modellen für die Qualitätskontrolle. Sie berechnen korrespondierende Punkte auf NURBS-Flächen, indem zunächst der nächste Punkte auf einem Dreiecksnetz bestimmt wird, dessen Scheitelpunkte die Parameterwerte der NURBS-Oberfläche speichern. In einem zweiten Schritt wird dann die exakte Punktlage bestimmt. Die Parameterschätzung ist ebenfalls zweistufig. Zunächst wird mit einer Least-Median-of-Squares-Ausgleichung (LMedS-Ausgleichung), welche einen theoretischen Breakdown-Punkt von 50 % Ausreißern besitzt, eine Näherungstransformation bestimmt. In Abhängigkeit der Abstände der korrespondierenden Punkte wird eine Einteilung in gültige Punkte und Ausreißer vorgenommen. Anschließend wird unter Verwendung aller gültiger Punkte die endgültige Transformation bestimmt.

- [Eggert, Fitzgibbon und Fisher 1996] modellieren die Punktkorrespondenzen mit Hilfe von Federn. Sie setzen voraus, dass jeder Punkt einen korrespondierenden Punkt besitzt. Der Algorithmus ist daher vor allem für die Registrierung mehrerer Datensätze geeignet.
- [Bergevin et al. 1996] verwenden die gegenseitige Orientierung der Oberflächennormalen zur Eliminierung ungültiger Korrespondenzen.
- [Pennec und Thirion 1997] verwenden einen erweiterten Kalman-Filter zur Bestimmung der Transformationsparameter und deren Kovarianzmatrix unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Eingangsdaten. Das stochastische Modell wird mit Hilfe von Simulationsrechnungen verifiziert.
- [Pulli 97] beschreibt in seiner Dissertation ein Verfahren unter Verwendung von Farbinformation. Die Datensätze werden zunächst in zweidimensionale Bilder gerendert. Die korrespondierenden Punkte werden über die Registrierung dieser Bilder ermittelt.
- [Dorai et al. 1998] fordern die Kompatibilität benachbarter Punktpaare, welche über deren Abstand und Orientierung geprüft wird. Ausserdem werden die Paare mit einem Gewichtungsfaktor für deren Zuverlässigkeit in die Ausgleichung eingeführt.
- [Jokinen und Haggren 1998] haben eine statistische Analyse der Fehler in einem rekonstruierten Modell unter Verwendung einer paarweisen Registrierung mittels Quaternionen und einer auf dem Levenberg-Marquardt-Methode basierenden Mehrbildregistrierung durchgeführt.
- [Stoddart et al. 1998] haben auf Grundlage der Arbeit von [Pennec und Thirion 1997] eine einzige Größe, den sog. Registrierungsindex, zur Beschreibung der Qualität einer Registrierung vorgeschlagen.
- [Johnson und Kang 1999] verwenden die von ihrem omnidirektionalen Mehrfachstereo-Sensor simultan erfasste Farbinformation zur Berechnung des Abstandes zwischen den Punkten. Für Geometrie und Farbe wird jeweils der euklidische Abstand angesetzt, wobei der Abstand aus den Farbkanälen zusätzlich mit einem Gewichtungsfaktor versehen ist, der den Einfluß der Farbinformation steuert.
- [Pulli 1999] verwendet den Abstand zu Dreiecksoberflächen, eine Reihe von Konsistenzbedingungen und Zielfunktion, welche die quadrierte Punkt-zu-Tangentialebene-Distanz minimiert. Diese Methode wurde innerhalb des Digital-Michelangelo-Projekt der Universität Stanford, Kalifornien, verwendet [Levoy et al. 2000].
- [Williams und Bennamoun 1999] verwenden basierend auf der Grundlage von [Pennec und Thirion 1997] eine robuste LMedS-Parameterschätzung zur Bestimmung einer Näherungstransformation, welche mit Hilfe eines M-Estimators verfeinert wird.
- [Langis, Greenspan und Godin 2001] haben eine parallele Version des ICP-Algorithmus entwickelt und die Registrierung von Punktmengen in einem Cluster von 24 vernetzten PCs demonstriert.
- [Rusinkiewicz und Levoy 2001] schlagen eine geschwindigkeitsoptimierte Variante des ICP-Algorithmus vor, welche die Registrierung der Daten eines Online-Messsystems in Echtzeit ermöglicht.

Tabelle 9: Überblick über Verfahren zur paarweisen Registrierung

<i>Publikation</i>	<i>Datenrepräsentation</i>	<i>Auswahl Quellpunkte</i>	<i>Auswahl Zielpunkte</i>	<i>Datenstruktur für N.-Punkt-Suche</i>	<i>Berücksichtigung Datenunsicherheit</i>	<i>Abstandsdefinition / Parameterschätzung</i>
[Besl und MacKay 1992]	Verschiedene (Punktmengen, Kurven, Flächen, etc.)	Alle	Nächste Punkte			Punkt-zu-Punkt Extrapolation der Transformationsparameter
[Chen und Medioni 1992]	Distanzbilder	Auswahl glatter Regionen, Ausdünnung		Suche in Richtung der Flächennormalen		Punkt-zu-Tangentialebene
[Turk und Levoy 1994]	Hierarchie von Dreiecksnetzen	Regelmäßige Ausdünnung	Nächster Flächenpunkt, Distanzschwellwert, Maskierung der Flächenränder	Regelmäßiges Gitter	Isotrope Gewichtung mit Skalarprodukt zwischen Normale und Projektionslaser	Punkt-zu-Punkt Extrapolation der Transformationsparameter
[Godin, Rioux und Baribeau 1994]	Distanzbilder + Farbe / Intensität	Alle in beiden Datensätzen	Nächste Punkte mit kompatibler Intensität.		Gewicht nimmt mit steigendem Abstand ab.	Punkt-zu-Punkt
[Blais und Levine 1995]	Distanzbilder	Regelmäßige Ausdünnung	Distanzschwellwert	Rückprojektion		Komplexe Zielfunktion (Bewertung von Überlappungsbereich etc.) Lösung über Very Fast Simulated Reannealing (stochastische Suche im Parameterraum)
[Boulanger, Moron und Redarce 1996]	Distanzbilder	Regelmäßige Ausdünnung	Nächster Punkt auf NURBS-Oberfläche, Distanzschwellwert zur Klassifizierung von Ausreißern nach robuster Näherungslösung	Regelmäßiges Gitter		Punkt-zu-Punkt Robuste Least-Median-of-Squares Ausgleichung
[Eggert, Fitzgibbon und Fisher 1996]	Distanzbilder	Hierarchische, regelmäßige Ausdünnung + gezielte Punktauswahl im Bereich von Diskontinuitäten	Nächster Flächenpunkt	k-d-Baum		Punkt-zu-Tangentialebene Lösung verwendet dynamisches Federmodell. Numerische Integration der Differentialgleichungen für das Kräftesystem.
[Bergevin et al. 1996]	Distanzbilder	Regelmäßige Ausdünnung, Glattheitsbedingung	Nächster Flächenpunkt, Konsistente Orientierung der Normale in Quell- und Zielpunkt	Suche in Richtung der Flächennormalen		Punkt-zu-Tangentialebene
[Pulli 97]	Distanzbilder + Farbe	Color-Rendering des Datensatzes	Color-Rendering des Datensatzes	Registrierung von 2D-Farbbildern		Punkt-zu-Punkt Ausscheidung von Beobachtungen mit großen Residuen
[Stoddart et al. 1998]					Isotrope Gewichtung	Punkt-zu-Punkt Berücksichtigung des Fehlers in Normalenrichtung
[Pennec und Thirion 1997]			Zurückweisung von Ausreißern über Mahalanobis-Distanz		Gewichtung über Kovarianzmatrix der Punkte / Transformationen	Punkt-zu-Punkt Transformationsbestimmung über erweiterten Kalman-Filter
[Neugebauer 1997]	Distanzbilder	Regelmäßige Ausdünnung	Distanzschwellwert	Rückprojektion		Punkt-zu-Tangentialebene
[Dorai et al. 1998]	Distanzbilder	Alle	Paarweise Konsistenz	Rückprojektion		Punkt-zu-Tangentialebene
[Johnson und Kang 1999]	Dreiecksnetze + Farbe	Alle	Nächster Punkt in 6D-Raum (Geometrie + RGB-Farbe). Distanzschwellwert	k-d-Tree (6D)		Punkt-zu-Punkt + Farbe-zu-Farbe Gewichtsfaktor für

Publikation	Datenrepräsentation	Auswahl Quellpunkte	Auswahl Zielpunkte	Datenstruktur für N.-Punkt-Suche	Berücksichtigung Datenunsicherheit	Abstandsdefinition / Parameterschätzung
[Pulli 1999]	Dreiecksnetze	Zufällige Ausdünnung	Distanzschwellwert Nächster Flächenpunkt, Distanzschwellwert, kompatible Normaleinrichtung ($<45^\circ$), Maskierung der Flächenränder			Farbinformation Punkt-zu-Tangentialebene
[Williams und Bennamoun 1999]						Punkt-zu-Punkt Robuste Least-Median-of-Squares Ausgleichung, gefolgt von M-Estimator
[Langis, Greenspan und Godin 2001]	Punktmengen	Alle		Regelmäßiges Gitter. Parallele Suche (PC-Cluster, 24 CPUs).		Punkt-zu-Punkt
[Rusinkiewicz und Levoy 2001]	Distanzbilder	Zufällige Ausdünnung	Distanzschwellwert	Rückprojektion		Punkt-zu-Tangentialebene

3.4.1.2 Verfahren zur Registrierung mehrerer Datensätze

Die grundsätzlichen Verfahrensmerkmale der Verfahren sind in Abschnitt 3.4.1.1 und in Tabelle 9 beschrieben. Hier werden lediglich die Besonderheiten, welche die Registrierung mehrerer Datensätze betreffen, vorgestellt.

[Chen und Medioni 1992] schlagen vor, neue Datensätze mit allen bisherigen Datensätzen über ein paarweises Verfahren zu registrieren.

[Turk und Levoy 1994] verwenden einen zylindrischen Scan, welcher nahezu das ganze Objekt abdeckt, als Ankerfläche für die paarweise Registrierung der einzelnen Datensätze mit diesem Scan.

[Blais und Levine 1995] verwenden Very-Fast-Simulated-Reannealing zur Bestimmung der Transformation aller Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem. Die Suche im Parameterraum erweist sich jedoch mangels Effizienz als Schwachpunkt der Technik.

[Bergevin et al. 1996] berechnen iterativ die Registrierung der Datensätze untereinander. Zur Vermeidung der Akkumulation von Restfehlern verwenden sie eine graphbasierte Technik zur Minimierung der Pfade im Netzwerk zusammenhängender Datensätze.

[Eggert, Fitzgibbon und Fisher 1996] verwenden ein dynamisches Federmodell. Korrespondierende Punkte werden durch Federn verbunden. Das Modell setzt voraus, dass jeder Punkt in mindestens zwei Datensätzen enthalten ist, kommt dafür jedoch ohne Schwellwerte für Konsistenzbedingungen aus. Die Lösung erfolgt über eine numerische Integration der Differentialgleichungen des Kräftesystems. Durch die Modellierung von Geschwindigkeit und Beschleunigung besteht die Möglichkeit, dass lokale Minima aufgrund von Trägheit überwunden werden können.

[Pulli 97; Pulli 1999] hält die gefundenen Korrespondenzen aus der paarweisen Registrierung fest und bestimmt in einer gemeinsamen Ausgleichung gleichzeitig die Transformationsparameter aller Datensätze.

[Neugebauer 1997] minimiert gleichzeitig die Transformation aller Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem mit Hilfe der Levenberg-Marquardt-Methode.

[Williams und Bennamoun 1999] schlagen die gleichzeitige Bestimmung der Transformationsparameter in ein gemeinsames Koordinatensystem mit Hilfe einer iterativen Kleinste-Quadrate-Ausgleichung vor.

3.5 Datenrepräsentation

3.5.1 Geometrische Information

Bei der Datenerfassung haben sich Bilder zur Verwaltung der Messwerte bewährt. Es konnte dort sehr effektiv die regelmäßige Struktur der Bildmatrix ausgenutzt werden. Für die weitere Verarbeitung der Geometriedaten weisen Bilder jedoch eine Reihe von Nachteilen auf:

- Nach der Auswertung liegt eine Klassifizierung in gültige und ungültige Messwerte vor. Häufig nehmen Hintergrund und ungültige Messwerte einen beträchtlichen Teil der Bildmatrix ein. Es wird jedoch immer die gesamte Bildmatrix gespeichert.
- Die Darstellung ist nicht echt dreidimensional. Es lassen sich zwar Messungen dreidimensionaler Oberflächen beschreiben, da es aber nicht möglich ist, an einer bestimmten Stelle im Bild zwei Koordinatenwerte zu speichern, können beispielsweise keine geschlossenen Objekte repräsentiert werden.
- Es findet keine explizite Beschreibung der Topologie der Daten statt. Die Topologie ist lediglich implizit durch die nachbarschaftliche Position der Pixel gegeben. Im Bereich von Diskontinuitäten der Oberfläche führt die Betrachtung der Nachbarschaft alleine jedoch zu einer inkorrekten Topologiebeschreibung.
- Die Darstellung ist nicht kompatibel mit der Darstellung von CAD-Daten, das heißt Messdaten und CAD-Modell können nicht mit den gleichen Algorithmen verarbeitet werden.

Um diese Nachteile zu umgehen, werden die in Form von Bildern gespeicherten Objektpunkte in eine triangulierte Flächenbeschreibung (Dreiecksnetz) überführt¹. Unter einer Fläche ist dabei eine kompakte, orientierte, zusammenhängende, möglicherweise von einem Rand Ω eingeschlossene, zweidimensionale Mannigfaltigkeit S , eingebettet in den $\mathbb{R}^3$, zu verstehen. Eine Fläche ohne Rand wird als geschlossene Fläche bezeichnet, andernfalls heißt die Fläche berandet.

Ein Dreiecksnetz M wird beschrieben durch ein Paar (V, F) , welches aus einer Liste von Scheitelpunkten V und einer Liste von Dreiecksflächen F besteht. Die Liste V stellt eine geordnete Liste dar, in welcher die einzelnen Punkte $\mathbf{v}_i(x_i, y_i, z_i) \in \mathbb{R}^3$ durch einen Index i eindeutig identifiziert werden können. Die Flächenliste F ist ebenfalls geordnet. Die Dreiecke $f_j(a_j, b_j, c_j)$ selbst werden über einen eindeutigen Index j identifiziert und bestehen aus einer geordneten Liste von Indextripeln, welche die Indizes der zu einem Dreieck gehörenden Scheitelpunkte $\{\mathbf{v}_{a_j}, \mathbf{v}_{b_j}, \mathbf{v}_{c_j}\}$ enthält. Durch die Dreiecke wird die Topologie der Scheitelpunkte festgelegt.

Die Triangulierung soll in Anlehnung an [Hoscheck und Lasser 1992], S. 379ff folgenden Bedingungen genügen:

1. Die Scheitelpunkte $\{\mathbf{v}_{a_j}, \mathbf{v}_{b_j}, \mathbf{v}_{c_j}\}$ eines Dreiecks f_j bilden für jeden Index $j = 0, \dots, N_f - 1$ ein nicht entartetes Dreieck.
2. Jedes Dreieck wird durch exakt 3 Punkte von V definiert, welche die Ecken des Dreiecks bilden.
3. Der Durchschnitt des Inneren zweier Dreiecke f_j und f_k mit $j \neq k$ ist leer.

Die Orientierung der Fläche ist durch die Richtung der Oberflächennormalen $\vec{\mathbf{n}}_i \in \mathbb{R}^3, \|\vec{\mathbf{n}}_i\| = 1$ gegeben. Die Reihenfolge der Scheitelpunkte innerhalb eines Dreiecks wird derart festgelegt, dass das Vektorprodukt von je zwei aufeinanderfolgenden Dreieckskanten konsistent mit der Richtung der Oberflächennormalen ist.

¹ Dreiecksnetze stellen die allgemeinste Form der Beschreibung einer Fläche durch ebene Polygone dar, da sich jedes polygonal beschriebene Flächenstück in Dreiecke zerlegen lässt.

3.5.2 Transformationen

Das Ziel der Registrierung nach Abschnitt 3.1 ist die Bestimmung der Transformation der Datensätze, welche im jeweiligen Sensorkoordinatensystem gegeben sind, in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem. Die Art der Transformation und deren Repräsentation wurde bis jetzt noch nicht festgelegt.

Eine der in Abschnitt 3.2 formulierten Anforderungen ist, dass die innere Geometrie der Messdaten bei der Registrierung nicht verändert werden soll, da von einem Sensorsystem ausgegangen wird, welches konsistente Messwerte liefert, die nicht systematisch verfälscht sind.

Die zu bestimmende Transformation verfügt daher über sechs Freiheitsgrade: Drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade. Eine solche Transformation nennt man auch *Starrkörpertransformation*. Sie ist als Abbildung $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$$\mathbf{d} = f(\mathbf{s}) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{t} \quad (3.2)$$

mit

- $\mathbf{s}$: Punkt im Quellsystem, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$
- $\mathbf{d}$: Punkt im Zielsystem, $\mathbf{x}' \in \mathbb{R}^3$
- $\mathbf{R}$: Rotationsmatrix, $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \mid \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}, \det \mathbf{R} = 1$
- $\mathbf{t}$: Translationsvektor, $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$

definiert und besitzt folgende Eigenschaften [Murray, Li und Sastry 1994]:

1. Längentreue: $\|f(\mathbf{p}) - f(\mathbf{q})\| = \|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|$ für alle Punkte $\mathbf{p}, \mathbf{q} \in \mathbb{R}^3$.
2. Erhaltung des Kreuzprodukts: $f(\mathbf{v} \times \mathbf{w}) = f(\mathbf{v}) \times f(\mathbf{w})$ für alle Vektoren $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbb{R}^3$

Diese Definition impliziert eine Reihe weiterer, wichtiger Eigenschaften, insbesondere die Erhaltung des Skalarprodukts zweier Vektoren, d.h. $\mathbf{v} \cdot \mathbf{w} = f(\mathbf{v}) \cdot f(\mathbf{w})$, für alle Vektoren $\mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbb{R}^3$. Die Abbildung ist somit auch winkeltreu.

Aus den genannten Eigenschaften ergibt sich, dass rechtshändige, orthonormale Koordinatensysteme wieder auf rechtshändige, orthonormale Koordinatensysteme abgebildet werden. Eine Starrkörpertransformation f kann damit einerseits dazu verwendet werden, die Position und Orientierung eines Datensatzes, d.h. dessen Koordinatensystems, bezüglich einem Referenzkoordinatensystem zu beschreiben, andererseits legt sie eine Rechenvorschrift zur Transformation von Punkten oder Vektoren von einem Koordinatensystem in ein anderes Koordinatensystem fest.

Die Parametrisierung der Rotationsmatrix in Gleichung (3.2) ist bis jetzt noch ungeklärt, da sie für die bisherigen Überlegungen irrelevant war. Für die nachfolgenden Betrachtungen ist jedoch die Festlegung der Rotationsparameter erforderlich. Im wissenschaftlichen und technischen Umfeld sind eine Vielzahl unterschiedlicher Parametersätze für die Beschreibung von Rotationen gebräuchlich:

Parametrisierung mittels Drehwinkel: Aus Gründen der Anschaulichkeit werden Drehmatrizen häufig mittels drei Winkelparameter beschrieben. Die endgültige Drehmatrix ergibt sich dann als Produkt von Einzeldrehungen um starre oder mitbewegte Koordinatenachsen. Häufig verwendet werden die Parametrisierungen mittels Euler-Winkel ψ, θ, ϕ

$$\mathbf{R}(\psi, \theta, \phi) = \mathbf{R}_3(\phi) \mathbf{R}_1(\theta) \mathbf{R}_3(\psi) \quad (3.3)$$

oder Cardan-Winkel ω, ϕ, κ

$$\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) = \mathbf{R}_1(\omega) \mathbf{R}_2(\phi) \mathbf{R}_3(\kappa) \quad (3.4)$$

Die Darstellung einer Drehmatrix durch drei Winkelparameter besitzt jedoch grundsätzliche Nachteile:

1. Jede Parametrisierung, welche auf drei Winkelparametern beruht, weist singuläre Stellen auf.
2. Die Parametrisierung ist nicht eindeutig, sondern es existieren duale Lösungen, welche zur selben Rotationsmatrix führen.
3. Die Elemente der Drehmatrix ergeben sich als Produkt trigonometrischer Funktionen. Da trigonometrische Funktionen stark nichtlinear sind, müssen sie für die Lösung von Ausgleichungsaufgaben linearisiert werden und verlangsamen die Konvergenz iterativer Verfahren.

Parametrisierung mittels Drehachse und Winkel: In technischen Anwendungen tritt häufig die Rotation eines Körpers um einen Winkel θ um eine Rotationsachse $\mathbf{n}$, $\|\mathbf{n}\| = 1$ auf. Mit Hilfe der Formel von Rodriguez

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \sin \theta \tilde{\mathbf{n}} + (1 - \cos \theta) \tilde{\mathbf{n}}^2 \quad (3.5)$$

kann man aus diesen Parametern die zugehörige Drehmatrix $\mathbf{R}$ berechnen. Die Tilde $\sim$ steht für den Operator, welcher einem Einheitsvektor $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ eine Matrix

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

zuordnet, für die $\tilde{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{x} \times \mathbf{v}$, $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ gilt. Bei bekannter Matrix $\mathbf{R}$ erhält man die Parameter gemäß

$$\theta = \arccos\left(\frac{\text{tr}(\mathbf{R}) - 1}{2}\right) \text{ und } \tilde{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}^T}{2 \cdot \sin \theta} \quad (3.7)$$

Diese Parametrisierung ist ebenfalls nicht eindeutig, da $\theta' = 2\pi - \theta$ und $\mathbf{n}' = -\mathbf{n}$ dieselbe Rotationsmatrix repräsentieren wie θ und $\mathbf{n}$. Für $\theta = 0$ weist sie eine Singularität auf, da die Drehachse für die Einheitsmatrix $\mathbf{I}$ nicht definiert ist.

Parametrisierung mittels Rotationsvektor: Die Parametrisierung der Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ mittels Drehachse und Winkel ist nicht minimal, da vier Parameter zur Beschreibung der drei Freiheitsgrade der Rotationsmatrix verwendet werden. Zu einer minimalen Darstellung gelangt man mit dem Rotationsvektor $\mathbf{r} = \theta \mathbf{n}$, $\|\mathbf{n}\| = 1$. Er kann aus der Darstellung mittels Drehachse und Winkel berechnet werden und weist ebenfalls Singularitäten und Mehrdeutigkeiten auf. Diese Parametrisierung wird vor allem im Zusammenhang mit Verfahren verwendet, die eine minimale Repräsentation voraussetzen (z.B. Kalman-Filter [Ayache 1991]).

Parametrisierung mittels Quaternionen: Die Menge $\mathbb{Q}$ der Quaternionen stellt eine Verallgemeinerung der komplexen Zahlen dar. Quaternionen können in ähnlicher Weise für die Repräsentation von räumlichen Drehungen verwendet werden wie komplexe Zahlen für die Beschreibung von ebenen Drehungen in der Gauß'schen Zahlenebene. Im Gegensatz zu den anderen Parametrisierungen ist die Parametrisierung mittels Quaternionen singularitätenfrei. Dafür müssen jedoch vier Werte zur Beschreibung der drei Freiheitsgrade einer Rotationsmatrix verwendet werden:

$$\hat{\mathbf{q}} = q_0 + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k} \quad q_i \in \mathbb{R}, i = 0, \dots, 3 \quad (3.8)$$

q_0 wird als Skalarteil, $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)$ wird als Vektorteil des Quaternions bezeichnet. Der Einfachheit halber schreibt man häufig $\hat{\mathbf{q}} = (q_0, \mathbf{q})$ mit $q_0 \in \mathbb{R}$ und $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^3$.

Quaternionen werden wie Vektoren komponentenweise addiert

$$\hat{\mathbf{q}}'' = \hat{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{q}}' = (q_0 + q_0', \mathbf{q} + \mathbf{q}') \quad (3.9)$$

Die Quaternionenmultiplikation ist distributiv und assoziativ, aber nicht kommutativ. Es gelten die Bedingungen

$$a\mathbf{i} = \mathbf{i}a \quad a\mathbf{j} = \mathbf{j}a \quad a\mathbf{k} = \mathbf{k}a \quad a \in \mathbb{R}$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = -1 \quad (3.10)$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{k} \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{i} \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = -\mathbf{i} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{j}$$

Für das Produkt zweier Quaternionen $\hat{\mathbf{q}}$ und $\hat{\mathbf{q}}'$ ergibt sich demnach

$$\hat{\mathbf{q}}'' = \hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{q}}' = (q_0 + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k})(q_0' + q_1' \mathbf{i} + q_2' \mathbf{j} + q_3' \mathbf{k}) \quad (3.11)$$

was sich auch schreiben lässt als

$$\hat{\mathbf{q}}'' = \hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{q}}' = (q_0 q_0' - \mathbf{q} \cdot \mathbf{q}', q_0 \mathbf{q}' + q_0' \mathbf{q} + \mathbf{q} \times \mathbf{q}') \quad (3.12)$$

Das konjugierte Quaternion $\hat{\mathbf{q}}^*$ ist durch

$$\hat{\mathbf{q}}^* = (q_0 - \mathbf{q}) \quad (3.13)$$

gegeben. Den Betrag erhält man gemäß

$$\|\hat{\mathbf{q}}\|^2 = \hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{q}}^* = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 \quad (3.14)$$

Weiterhin sind die Inverse eines Quaternions

$$\hat{\mathbf{q}}^{-1} = \frac{\hat{\mathbf{q}}^*}{\|\hat{\mathbf{q}}\|^2} \quad (3.15)$$

sowie das Identitätselement der Quaternionenmultiplikation

$$\hat{\mathbf{q}}_I = (1, \mathbf{0}) \quad (3.16)$$

definiert. Die Einheitsquaternionen stellen eine Untermenge von $\mathbb{Q}$ dar und genügen der Bedingung

$$\|\hat{\mathbf{q}}\|^2 = 1 \quad (3.17)$$

Einheitsquaternionen besitzen also nur drei unabhängige Elemente.

Sie können zur Parametrisierung einer Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ gemäß

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_2q_1 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_3q_1 - q_0q_2) & 2(q_3q_2 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

verwendet werden. Diese Parametrisierung ist singularitätenfrei. Da das Quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ und das negierte Quaternion $-\hat{\mathbf{q}} = (-q_0, -\mathbf{q})$ die selbe Matrix $\mathbf{R}$ beschreiben, ist die Parametrisierung jedoch nicht eindeutig. Man spricht auch von einer dualen Lösung oder Dualität der Parametrisierung.

Quaternionenparameter lassen sich leicht in die Darstellung mittels Achse und Winkel umrechnen:

$$\theta = 2 \cdot \arccos q_0 \quad \mathbf{n} = \begin{cases} \frac{\mathbf{q}}{\sin \frac{\theta}{2}} & \text{falls } \theta \neq 0 \\ \mathbf{0} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.19)$$

Die Gleichung erlaubt gleichzeitig die Interpretation der Quaternionenparameter: Quaternionen beschreiben ebenfalls eine Drehung um eine Achse, wobei der Skalarteil $q_0 = \cos \frac{\theta}{2}$ festlegt, wie viel um die Achse $\mathbf{q} = \sin \frac{\theta}{2} \mathbf{n}$ gedreht wird.

Im Vergleich zur Parametrisierung mittels Drehwinkel sind Quaternionen für die Formulierung von Ausgleichungsproblemen besser geeignet, da die Parameter lediglich in zweiter Potenz auftreten und die Repräsentation damit „linearer“ als die Darstellung mittels transzendenter Funktionen ist [Hinsken 1987]. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Normalisierungsbedingung (3.17) im Ausgleichungsmodell berücksichtigt wird.

Da bei der Registrierung grundsätzlich beliebige Rotationen vorkommen können, ist es wünschenswert, dass die Parametrisierung der Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ in Gleichung (3.2) keine Singularitäten aufweist.

Es wird daher eine Parametrisierung mittels Einheitsquaternionen gewählt. Die Dualität der Parametrisierung stellt hierbei kein Problem dar. Ein weiterer Vorteil dieser Parametrisierung liegt in der Verfügbarkeit effizienter Verfahren zur Bestimmung der Rotationsparameter.

Es ist noch anzumerken, dass die Koordinaten der Punkte während der Registrierung nicht verändert werden. Stattdessen wird mit jedem Datensatz die Transformation vom lokalen Koordinatensystem (Sensorkoordinatensystem) in das globale Koordinatensystem gespeichert. Softwareseitig ist die Repräsentation für die aufrufende Instanz nicht sichtbar. Die Transformation wird stattdessen beim Abrufen von Daten auf die gespeicherten Daten angewandt. Dies hat den Vorteil, dass die Daten nur bei Bedarf umgerechnet werden müssen, was zu einer beträchtlichen Reduzierung der Rechenoperationen führt.

3.5.3 Radiometrische Information

Die erfassten Bilder enthalten die radiometrische Information der Szene. Sie kann nach Abschnitt 2.9 korrigiert und zur Ableitung von Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Reflektivität verwendet werden. Wie später noch gezeigt wird, kann diese zusätzliche Information einen wertvollen Beitrag zur Registrierung strukturarmer Oberflächen liefern. Zur Verwaltung dieser Information sieht das Datenmodell pro Scheitelpunkt einen einzelnen Intensitätswert oder ein RGB-Tripel vor (Abbildung 70).

3.5.4 Genauigkeitsinformation

Im Kontext dieser Arbeit spielt die Unsicherheit der Messungen und der daraus abgeleiteten Größen eine bedeutende Rolle. Neben den Koordinaten $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3$ der Messpunkte werden daher bei der Objektpunktberechnung auch deren Kovarianzmatrizen $\Sigma_{\mathbf{x}_i} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ berechnet. Da für die weiteren Verarbeitungsschritte die Geometrie der Oberfläche in Form von Dreiecksnetzen repräsentiert wird, sind Fließkommabilder für die Verwaltung der Kovarianzmatrizen nicht mehr geeignet.

Zur Speicherung der Kovarianzmatrizen werden die Scheitelpunkte der Dreiecksnetze um zusätzliche Attribute erweitert. Aufgrund der Symmetrie der Kovarianzmatrizen reichen sechs Fließkommawerte zur Beschreibung der Messgenauigkeit aus. Die Beschreibung eines Punktes erfolgt also durch die Angabe eines Paares aus Punktposition und Kovarianzmatrix.

$$P_i = (\mathbf{x}_i, \Sigma_{\mathbf{x}_i}) \quad (3.20)$$

Transformationen werden, ähnlich wie Punkte, durch ein Paar

$$T = (\mathbf{M}(\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{t}), \Sigma_{\mathbf{M}}) \quad (3.21)$$

bestehend aus der den Transformationsparametern zugeordneten Transformationsmatrix $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$

$$\mathbf{M} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}) & \mathbf{t} \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.22)$$

(in homogener Schreibweise) und der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\mathbf{M}} \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ der Transformationsparameter $\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{t}$

$$\Sigma_{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \sigma_{q_0}^2 & \sigma_{q_0 q_1} & \sigma_{q_0 q_2} & \cdots & \sigma_{q_0 t_z} \\ & \sigma_{q_1}^2 & \sigma_{q_1 q_2} & \cdots & \sigma_{q_1 t_z} \\ & & \sigma_{q_2}^2 & \cdots & \sigma_{q_2 t_z} \\ & sym. & & \ddots & \vdots \\ & & & & \sigma_{t_z}^2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

repräsentiert.

3.5.5 Zusätzliche Attribute

Für die in diesem Kapitel vorgestellten Registrierungsalgorithmen, aber auch für die dreidimensionale Visualisierung der Daten, wird neben den Geometriedaten auch die Richtung der Oberflächennormalen benötigt. Außerdem erfordern bestimmte Verfahrensschritte die Attributierung von Datenelementen (z.B. Kennzeichnung des Randes oder ungültiger Objektbereiche). Das endgültige Datenmodell weist daher für Scheitelpunkte und Dreiecke noch weitere Attribute auf. Es ist in Abbildung 70 dargestellt.

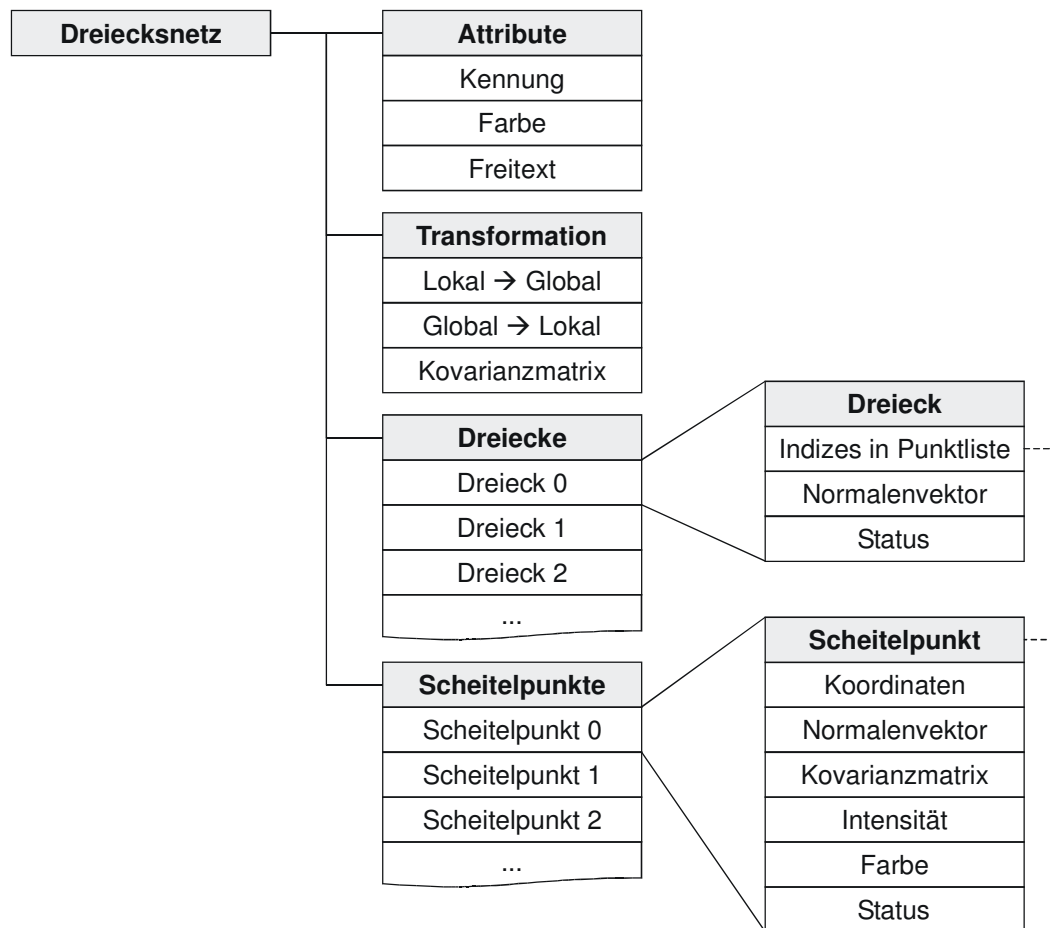


Abbildung 70: Das verwendete Datenmodell zur Repräsentation der Dreiecksnetze für die Registrierung.

3.6 Generierung von Dreiecksnetzen

Für die weitere Verarbeitung werden die Koordinatenbilder zeilenweise in Dreiecksnetze überführt. Unter Verwendung der Information der aktuellen Zeile und der Folgezeile werden in jeder Rechteckmasche (c, r) , $(c+1, r)$, $(c+1, r+1)$, $(c, r+1)$ maximal zwei Dreiecke f_1 und f_2 gebildet. Ist mindestens einer der Scheitelpunkte eines Dreiecks ungültig, wird das Dreieck nicht erzeugt.

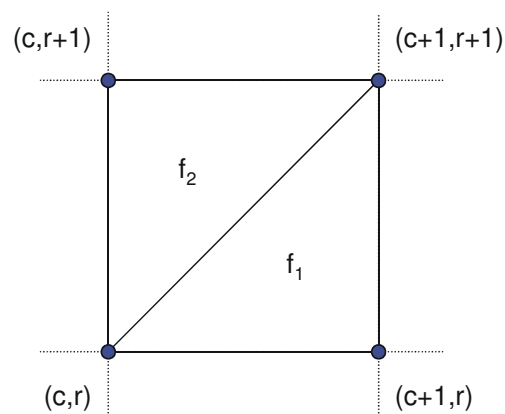


Abbildung 71: Skizze zur Triangulierung der rasterförmig angeordneten Punktdaten. In jeder Rechteckmasche werden maximal zwei Dreiecke erzeugt.

Im Bereich von Diskontinuitäten der Oberfläche gibt die Nachbarschaft in der Bildmatrix alleine die topologische Beziehung der Messpunkte nicht hinreichend wieder. Es muss daher darauf geachtet werden, dass nicht über Unstetigkeitsstellen hinweg trianguliert wird und Punkte dadurch fehlerhaft durch Dreiecksseiten verbunden werden.

Um die Bildung derartiger Dreiecke zu vermeiden, wird die Länge der entstehenden Dreiecksseiten bestimmt und mit einem Schwellwert t_e verglichen. Es hat sich gezeigt, dass sich das Dreifache bis Fünffache der Abtastdichte gut als Schwellwert eignet. Bei diesem Vorgehen ist nicht auszuschließen, dass auch korrekt verbundene Dreiecke verworfen werden. Es wird jedoch darauf vertraut, dass diese Messungen in anderen Ansichten unter einem besseren Winkel gemessen wurden.

Wird ein neues Dreieck erzeugt, wird zunächst geprüft, ob die Scheitelpunkte bereits in der Punktliste enthalten sind. Ist dies nicht der Fall, wird die Punktliste um die fehlenden Punkte ergänzt. Falls die Punkte über weitere Attribute (Intensität, Farbe, Kovarianzmatrix) verfügen, wird diese Information ebenfalls den entsprechenden Listen angehängt. Anschließend wird ein neues Indextripel (a, b, c) der Dreiecksliste zugefügt, welches auf die entsprechenden Punkte in der Punkteliste verweist.

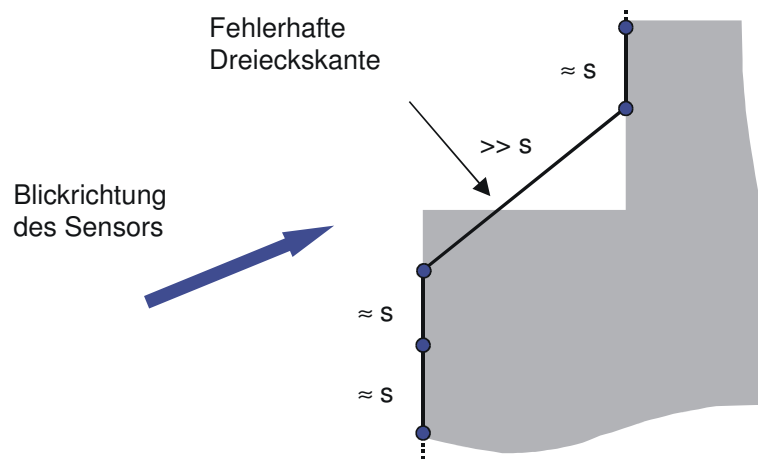


Abbildung 72: Beispiel für die Erzeugung einer fehlerhaften Dreiecksseite aufgrund von Verdeckungen im Bereich einer Diskontinuität der Objektoberfläche.

3.7 Bestimmung der Transformationsparameter

Beim ICP-Algorithmus [Besl und MacKay 1992] wird die Bestimmung der Transformation zwischen zwei Datensätzen auf die Bestimmung der Transformation (Gleichung (3.2)) zwischen zwei Mengen korrespondierender Punkte zurückgeführt. Prinzipiell sind mindestens drei Punkte zur Bestimmung der sechs Transformationsparameter notwendig¹. Bei den zu registrierenden Datensätzen handelt es sich jedoch um dicht erfasste Messdaten, so dass die Minimalkonfiguration für die Lösung keine Rolle spielt. Stattdessen soll die Lösung unter Verwendung aller Beobachtungen im Rahmen einer Ausgleichung ermittelt werden.

Dieses Problem wurde in der Literatur ausführlich diskutiert, z.B. [Arun, Huang und Blostein 1987; Ayache 1991; Eggert, Lorusso und Fisher 1997; Horn 1987; Horn, Hilden und Negahdaripour 1988; Murray, Li und Sastry 1994; Sanso 1973; Wheeler und Ikeuchi 1995].

¹ In der Photogrammetrie sind auch Verfahren gebräuchlich, die die Bestimmung einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter) aus nur 2 Lage- und 3 Höhenpasspunkten erlauben. Aufgrund der dreidimensionalen Betrachtungsweise bei der Registrierung soll hier jedoch stets von Vollpasspunkten ausgegangen werden.

Die vorgeschlagenen Verfahren können grundsätzlich eingeteilt werden in

- geschlossene Lösungen
- iterative Lösungen.

Der Vorteil von geschlossenen Lösungen ist, dass keine Näherungswerte benötigt werden. Sie sind in der Regel auch schneller als iterative Lösungen. Einen ausführlichen Vergleich von vier häufig verwendeten Verfahren zur geschlossenen Lösung der Transformationsparameter findet sich in [Eggert, Lorusso und Fisher 1997].

Iterative Lösungen haben hingegen den Vorteil, dass die bei der Ausgleichung zu bildende Inverse der Normalgleichungsmatrix die Kofaktorenmatrix¹ der Transformationsparameter darstellt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Genauigkeit der Beobachtungen leicht über eine Gewichtsmatrix in die Ausgleichung eingeführt werden kann. Ausserdem lassen sich die iterativen Lösungsverfahren flexibel erweitern, z. B. um Bedingungen zwischen den ausgeglichenen Größen festzulegen.

In dieser Arbeit werden daher beide Ansätze verfolgt. Werden die Vorteile der iterativen Lösung nicht benötigt, kann die geschlossene Lösung verwendet werden. Sie wird auch dazu benutzt, Näherungswerte für das iterative Verfahren bereitzustellen.

3.7.1 Geschlossene Lösung der Starrkörpertransformation

Die geschlossene Lösung, die in dieser Arbeit verwendet wird, stammt von [Sanso 1973]. Sie stimmt jedoch weitgehend mit der von [Horn 1987] vorgeschlagenen Lösung überein und soll kurz dargestellt werden.

Es sei S eine Menge von N Punkten $\mathbf{s}_i \in \mathbb{R}^3$, gegeben im Quellkoordinatensystem und D eine Menge korrespondierender Punkte $\mathbf{d}_i \in \mathbb{R}^3$ im Zielkoordinatensystem. Gesucht ist die Starrkörpertransformation $T(\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{t}) = T(\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}), \mathbf{t})$ mit Rotationsmatrix $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \mid \mathbf{R}\mathbf{R}^T = \mathbf{I}_3, \det \mathbf{R} = 1$ und Translationsvektor $\mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$, welche die Fehlerfunktion

$$E : \sum_{i=0}^{N-1} \|\mathbf{d}_i - \mathbf{R} \cdot \mathbf{s}_i + \mathbf{t}\|^2 \quad (3.24)$$

minimiert. Die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})$ sei mit dem Einheitsquaternion $\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{Q} \mid \|\hat{\mathbf{q}}\|^2 = 1$ parametrisiert.

Die Lösung des Problems wird in zwei Teilaufgaben zerlegt: Die Bestimmung der Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ und des Translationsvektors $\mathbf{t}$.

Mit den Schwerpunkten der beiden Punktmengen

$$\bar{\mathbf{d}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{d}_i, \quad \bar{\mathbf{s}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{s}_i \quad (3.25)$$

werden zunächst reduzierte Koordinaten berechnet

$$\mathbf{d}'_i = \mathbf{d}_i - \bar{\mathbf{d}}, \quad \mathbf{s}'_i = \mathbf{s}_i - \bar{\mathbf{s}} \quad (3.26)$$

Es wird eine Hilfsmatrix $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$

¹ Die Kofaktorenmatrix enthält die relative Genauigkeit der Parameter. Wird sie mit der Varianz der Gewichtseinheit σ_0^2 multipliziert, erhält man deren Kovarianzmatrix.

$$\mathbf{M} = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{d}_i' \cdot \mathbf{s}_i'^T = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

eingeführt, deren Elemente Summen von Produkten der Koordinaten von $\mathbf{d}_i'$ und $\mathbf{s}_i'$ sind. Mit den Elementen dieser Matrix wird eine symmetrische Matrix $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} & S_{yz} - S_{zy} & S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} - S_{yx} \\ S_{yz} - S_{zy} & S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{xy} + S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} \\ S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} + S_{yx} & -S_{xx} + S_{yy} - S_{zz} & S_{yz} + S_{zy} \\ S_{xy} - S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} & S_{yz} + S_{zy} & -S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

aufgebaut. Die Elemente des normierten Eigenvektors zum größten, positiven Eigenwert $\mathbf{N}$ entsprechen den Elementen desjenigen Einheitsquaternions $\hat{\mathbf{q}}$, welches die gesuchte Rotation repräsentiert. Die zugehörige Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})$ kann nach Gleichung (3.18) berechnet werden.

Bei bekannter Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ lässt sich der Translationsvektor $\mathbf{t}$ berechnen:

$$\mathbf{t} = \bar{\mathbf{d}} - \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{s}} \quad (3.29)$$

Falls die Punkte nicht gleichgenau sind, kann jedem Paar korrespondierender Punkte $(\mathbf{d}_i, \mathbf{s}_i)$ in den Gleichungen (3.25) und (3.27) ein Gewichtungsfaktor w_i zugeordnet werden. Es werden also die gewichteten Schwerpunkte

$$\bar{\mathbf{d}}^* = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \mathbf{d}_i / \sum_{i=0}^{N-1} w_i, \quad \bar{\mathbf{s}}^* = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \mathbf{s}_i / \sum_{i=0}^{N-1} w_i \quad (3.30)$$

verwendet. Die Hilfsmatrix $\mathbf{M}$ lautet dann

$$\mathbf{M} = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \mathbf{d}_i' \cdot \mathbf{s}_i'^T \quad (3.31)$$

Die restlichen Berechnungen erfolgen wie im ungewichteten Fall. Das Verfahren erlaubt keine individuelle Gewichtung der einzelnen Koordinaten. Die Gewichtung findet immer pro Punktpaar statt. Die Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter wird nicht bestimmt.

Es sei hier noch bemerkt, dass [Horn 1987] für die Bestimmung der Eigenwerte der Matrix $\mathbf{N}$ eine Aufspaltung der Gleichung 4. Grades in zwei quadratische Gleichungen vorschlägt, um aus deren Lösung den gesuchten Eigenvektor zu berechnen. Werden hingegen Standardbibliotheken zur Lösung des Eigenwertproblems verwendet, arbeiten diese vielfach iterativ (vergl. [Press et al. 1992], Kapitel 11). Es wird dann kurioserweise innerhalb der geschlossenen Lösung iteriert. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da die Verfahren zur Behandlung von Eigensystemen sehr stabil sind und die Vorzüge der geschlossenen Lösung, z.B. dass keine Näherungswerte benötigt werden, erhalten bleiben.

3.7.2 Iterative Lösung der Starrkörpertransformation

Bei der iterativen Bestimmung der Transformationsparameter nach der Methode der kleinsten Quadrate wird das Problem unter Verwendung von Näherungswerten $\mathbf{x}_0$ für die zu bestimmenden Parameter linearisiert. Es ergibt sich ein lineares Gleichungssystem, wobei die Komponenten des Lösungsvektors $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ Zuschläge für die Korrektur der Näherungswerte darstellen. Die korrigierten Parameter bilden dann den Ausgangspunkt für die nächste Iteration. Die Parameter nähern sich dadurch den gesuchten Transformationsparametern immer mehr an.

Die gewählte Parametrisierung verwendet sieben Parameter für die Beschreibung der sechs unbekannten Transformationsparameter (vergl. Abschnitt 3.5.2). Das Problem ist daher überparametrisiert. Grund dafür ist, dass die vier Quaternionenparameter zugunsten einer singularitätenfreien Beschreibung der Rotationsmatrix voneinander abhängig sind.

Ein gängiges Vorgehen zur Behandlung von überparametrisierten Ausgleichungsproblemen ist die Einführung einer Restriktionsmatrix $\mathbf{H}$ in das Modell der vermittelten Ausgleichung (Gauss-Markov-Modell mit Restriktionen). Das Ausgleichungsmodell lautet dann

$$E(\mathbf{l}) = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad \text{unter} \quad \mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{w} ; \quad \Sigma(\mathbf{l}) = \sigma_0^2 \mathbf{P}^{-1} \quad (3.32)$$

Die Rotationsparameter q_i sind über die Normierungsbedingung

$$h(\hat{\mathbf{q}}) = \|\hat{\mathbf{q}}\| = \sqrt{\sum_{i=0}^3 q_i^2} = 1 \quad (3.33)$$

miteinander verknüpft, welche die Orthonormalität der Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ in Gleichung (3.2) sicherstellt. Die Bedingungs-gleichung (3.33) wird wie die Verbesserungsgleichungen mit Hilfe der Näherungswerte für $\mathbf{x}_0$ linearisiert. Falls der Unbekanntenvektor $\mathbf{x}$ entsprechend $\mathbf{x} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad t_x \quad t_y \quad t_z]^T$ angeordnet ist lautet die 1×7 Matrix $\mathbf{H}$ der linearisierten Bedingungs-gleichung

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \|\hat{\mathbf{q}}\|}{\partial q_0} & \frac{\partial \|\hat{\mathbf{q}}\|}{\partial q_1} & \frac{\partial \|\hat{\mathbf{q}}\|}{\partial q_2} & \frac{\partial \|\hat{\mathbf{q}}\|}{\partial q_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}} [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (3.34)$$

und der 1×1 Vector $\mathbf{w}$

$$\mathbf{w} = [1 - \|\hat{\mathbf{q}}_0\|] \quad (3.35)$$

Die Jacobi-Matrix $\mathbf{A}$ enthält wie üblich die Ableitungen der rechten Seite der nichtlinearen Verbesserungsgleichung

$$\mathbf{x}_d + \mathbf{v}_{\mathbf{x}_d} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})\mathbf{x}_s + \mathbf{t} \quad (3.36)$$

nach den gesuchten Parametern. Es zeigt sich, dass insgesamt nur vier unterschiedliche Ableitungen berechnet werden müssen. Bezeichnen a, b, c, d die Ableitungen der x -Koordinate von $\mathbf{x}_d$ nach den Parametern q_i gemäß

$$\begin{aligned} a &= \frac{\partial x_d}{\partial q_0} = 2 (q_0 x_s' - q_3 y_s' + q_2 z_s') \\ b &= \frac{\partial x_d}{\partial q_1} = 2 (q_1 x_s' + q_2 y_s' + q_3 z_s') \\ c &= \frac{\partial x_d}{\partial q_2} = 2 (-q_2 x_s' + q_1 y_s' + q_0 z_s') \\ d &= \frac{\partial x_d}{\partial q_3} = -2 (q_3 x_s' + q_0 y_s' - q_1 z_s') \end{aligned} \quad (3.37)$$

dann hat die Matrix $\mathbf{A}$ die einfache Struktur

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b & c & d & 1 & 0 & 0 \\ -d & -c & b & a & 0 & 1 & 0 \\ c & -d & -a & b & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Dieser Ansatz führt mit dem reduzierten Beobachtungsvektor $\mathbf{l}$

$$\mathbf{l} = \mathbf{x}_d - \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) = \mathbf{x}_d - \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}_0)\mathbf{x}_s + \mathbf{t}_0 \quad (3.39)$$

zu dem wohlbekannten Normalgleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Die 7×7 Submatrix $\mathbf{Q}$ in der linken oberen Ecke der invertierten Normalgleichungsmatrix

$$\begin{bmatrix} \underbrace{\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}}_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}}} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.41)$$

stellt die Kofaktorenmatrix der Transformationsparameter dar. Eine erwartungstreue Schätzung der Varianz der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0^2$ erfolgt unter Verwendung des Vektors der Verbesserungen $\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}$ gemäß

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{v}}}{n - u + r} \quad (3.42)$$

mit:

- n: Anzahl Beobachtungen
- u: Anzahl Unbekannte
- r: Anzahl der Restriktionen

sodass die Kovarianzmatrix der unbekannten Transformationsparameter schließlich lautet:

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}} \quad (3.43)$$

Durch die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$ kann jede Beobachtung individuell gewichtet werden. Näherungswerte für die Transformationsparameter können durch eine vorgeschaltete geschlossene Lösung bereitgestellt werden. Diese Lösung ist jedoch relativ aufwändig.

Zu einer effizienteren Lösung gelangt man mit der Annahme, dass die Transformationsmatrix nur wenig von der Einheitsmatrix abweicht. Dies stellt für die gegebene Problemstellung keine Einschränkung dar, da bei der Registrierung ohnehin von einer hinreichend genauen Anfangsorientierung $T_0(\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0)$ ausgegangen wird, welche z.B. durch den Benutzer interaktiv festgelegt oder durch eine vorgeschaltete geschlossene Lösung bestimmt werden kann. Diese Transformation wird vorbereitend auf die Quellpunkte angewandt. Anstatt der Gesamttransformation wird jetzt die inkrementelle Transformationsmatrix $T(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ bestimmt, welche mit der Transformation T_0 zusammen die Gesamttransformation T_g ergibt:

$$T_g(\mathbf{R}_g(\hat{\mathbf{q}}_g), \mathbf{t}_g) = T(\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}), \mathbf{t}) \cdot T_0(\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}_0), \mathbf{t}_0) \quad (3.44)$$

Die Verbesserungsgleichung des Ausgleichungsproblems lautet mit $\mathbf{s}_0 = \mathbf{R}_0 \mathbf{s} + \mathbf{t}_0$:

$$\mathbf{d}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{s}_0 + \mathbf{t} \quad (3.45)$$

Für die Untersuchung der differentiellen Eigenschaften der Rotationsparameter wird der Ausdruck

$$\mathbf{s}_0' = \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{s}_0 \quad (3.46)$$

zunächst getrennt betrachtet. In Anlehnung an [Wheeler und Ikeuchi 1995] wird ein Normierungsfaktor $z(\hat{\mathbf{q}})$ eingeführt, der die Orthonormalität von $\mathbf{R}$ für beliebige Quaternionen $\hat{\mathbf{q}}$ sicherstellt

$$\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}) = z(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{R}_z(\hat{\mathbf{q}}) = \frac{1}{\hat{\mathbf{q}} \cdot \hat{\mathbf{q}}} \mathbf{R}_z(\hat{\mathbf{q}}) \quad (3.47)$$

Die Ableitung der Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})$ nach dem Quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ an der Stelle $\hat{\mathbf{q}} = \hat{\mathbf{q}}_I = (1, \mathbf{0})$ unter Verwendung von $\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}_I) = \mathbf{I}$ und $z(\hat{\mathbf{q}}_I) = 1$ ergibt

$$\left. \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} = z(\hat{\mathbf{q}}_I) \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} + \left. \frac{\partial z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} \mathbf{R}_z(\hat{\mathbf{q}}_I) = \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} + \left. \frac{\partial z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} \mathbf{I} \quad (3.48)$$

Der erste Term dieser Gleichung kann mit Hilfe von Gleichung (3.18) leicht ausgewertet werden. An der Stelle $\hat{\mathbf{q}}_I$ besitzen lediglich diejenigen Komponenten von $\mathbf{R}_z$ einen Wert ungleich Null, welche q_0 enthalten:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} &= \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial q_0} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} & \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial q_1} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} & \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial q_2} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} & \left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial q_3} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Für den zweiten Term ergibt sich

$$\left. \frac{\partial z}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} \mathbf{I} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Setzt man die Gleichungen (3.49) und (3.50) in Gleichung (3.48) ein, erkennt man, dass der Ausdruck $\left. \frac{\partial \mathbf{R}_z}{\partial q_0} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I}$ an der Stelle $\hat{\mathbf{q}} = \hat{\mathbf{q}}_I$ verschwindet. Dies bedeutet, dass die Jacobi-Matrix (3.48) in einer Ausgleichung nur die Änderung der drei Parameter q_1 , q_2 und q_3 bewirkt.

Für die Jacobi-Matrix $\mathbf{J}_{\mathbf{x}'}$ von Gleichung (3.46) erhält man durch Ausmultiplizieren:

$$\mathbf{J}_{\mathbf{x}'} = \frac{\partial \mathbf{s}_0'}{\partial \hat{\mathbf{q}}} = \left. \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \hat{\mathbf{q}}} \right|_{\hat{\mathbf{q}}=\hat{\mathbf{q}}_I} \cdot \mathbf{s}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2z_{s_0} & -2y_{s_0} \\ 0 & -2z_{s_0} & 0 & 2x_{s_0} \\ 0 & 2y_{s_0} & -2x_{s_0} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Ignoriert man die erste Spalte von $\mathbf{J}_x$, entspricht (3.51) –2 Mal der schiefsymmetrischen Matrix $\tilde{\mathbf{x}}$ aus Gleichung (3.6).

Nach dieser Umformulierung der Problemstellung sind nur noch sechs unabhängige Unbekannte zu berechnen. Die Bestimmung von $T(\mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}}), \mathbf{t})$ kann daher innerhalb des gewöhnlichen Gauss-Markov-Modells erfolgen. Die Jacobi-Matrix $\mathbf{A}$ lautet jetzt einfach

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{d}_0}{\partial \hat{\mathbf{q}}} & \frac{\partial \mathbf{d}_0}{\partial \mathbf{t}} \end{bmatrix} = [\mathbf{S}(\mathbf{s}_0) \quad \mathbf{I}_3] = \begin{bmatrix} 0 & 2z_{s_0} & -2y_{s_0} & 1 & 0 & 0 \\ -2z_{s_0} & 0 & 2x_{s_0} & 0 & 1 & 0 \\ 2y_{s_0} & -2x_{s_0} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Anstelle der Quaternionenelemente $q_i \mid 0 < i < 3$ werden jetzt die Hilfsgrößen $\omega_i \mid 0 < i < 2$ bestimmt. Der Unbekanntenvektor $\mathbf{x}$ lautet daher

$$\mathbf{x} = [\omega_0 \quad \omega_1 \quad \omega_2 \quad t_x \quad t_y \quad t_z]^T \quad (3.53)$$

Das gesuchte Quaternion $\hat{\mathbf{q}}$ kann mit Hilfe der bestimmten ω_i berechnet werden. Für differentielle Rotationen gilt [Horn 1990]:

$$\hat{\mathbf{q}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}\omega_0^2 + \frac{1}{4}\omega_1^2 + \frac{1}{4}\omega_2^2}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}\omega_0 & \frac{1}{2}\omega_1 & \frac{1}{2}\omega_2 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Das Ergebnis der Parameterschätzung dient zum Aktualisieren der Näherungswerte $T_0(\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0)$ in Gleichung (3.44). Die endgültige Transformation T_g ergibt sich durch Iteration. Zur Berechnung der Kovarianzmatrix der Transformationsparameter dient eine Iteration der zuvor beschriebenen iterativen Schätzung im Gauss-Markov-Modell mit Restriktionen.

3.7.3 Berücksichtigung der Kovarianzmatrizen der homologen Punkte

Für die Berücksichtigung der Genauigkeit der Punkte bei der Bestimmung der Transformationsparameter werden die Residuen $\mathbf{v}_i$ zwischen den transformierten Quellpunkten $\mathbf{s}'_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{s}_i + \mathbf{t}$ und den Zielpunkten $\mathbf{d}_i$ eingeführt:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{d}_i - \mathbf{R} \cdot \mathbf{s}_i + \mathbf{t} \quad (3.55)$$

Bei der Parameterschätzung ist dann die modifizierte Fehlerfunktion E' zu minimieren:

$$E' = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{v}_i^T \mathbf{W}_i \mathbf{v}_i \quad (3.56)$$

mit $\mathbf{W}_i$: Gewichtsmatrix $\mathbf{W}_i = \Sigma_i^{-1}$

Während die Kovarianzmatrizen $\Sigma_{\mathbf{d}_i}$ der Zielpunkte $\mathbf{d}_i$ bereits im richtigen Koordinatensystem vorliegen, müssen die Kovarianzmatrizen $\Sigma_{\mathbf{s}_i}$ der Quellpunkte $\mathbf{s}_i$ zuerst in das Koordinatensystem der Zielpunkte transformiert werden. Unter Annahme der Unabhängigkeit von $\mathbf{s}_i$ und $\mathbf{d}_i$ lassen sich die kombinierten Kovarianzmatrizen Σ_i unter Verwendung der Näherungsweise bekannten Rotationsmatrix $\mathbf{R}$ gemäß

$$\Sigma_i = \Sigma_{\mathbf{d}_i} + \mathbf{R} \Sigma_{\mathbf{s}_i} \mathbf{R}^T \quad (3.57)$$

berechnen. Die Bestimmung der Transformationsparameter muss dann iterativ nach Abschnitt 3.7.2 erfolgen.

Eine geschlossene Näherungslösung erhält man, indem man aus der Spur der Matrix Σ_i den skalaren Gewichtungsfaktor

$$w_i = \frac{1}{\text{tr } \Sigma_i} \quad (3.58)$$

bildet und in die Gleichungen (3.30) und (3.31) der geschlossenen Lösung aus Abschnitt 3.7.1 einführt.

3.8 Bestimmung von Näherungswerten

Beim ICP-Algorithmus werden die unbekannten, wahren Zuordnungen zwischen Punkten durch die Zuordnung nächster Punkte ersetzt. Diese Annahme ist nur dann gerechtfertigt, wenn die beiden Datensätze bereits eine ähnliche Position und Orientierung besitzen. Es sind also Näherungswerte für die Ausgangsorientierung notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Strategien für die Beschaffung von Näherungswerten verfolgt:

Interaktive Ausrichtung der Datensätze: Innerhalb des Programms Reg3D (vergl. Abschnitt 6.1) ist es möglich, die Datensätze in einer 3D Ansicht interaktiv mit der Maus aneinander auszurichten.

Transformationsbestimmung über signalisierte Verknüpfungspunkte: Innerhalb des Programms Grab3D (vergl. Abschnitt 2.11) ist es möglich, interaktiv signalisierte Verknüpfungspunkte mit Subpixelgenauigkeit zu bestimmen. Den Punkten kann dabei eine eindeutige Nummer zugeordnet werden. Die Bestimmung der Transformationsparameter kann dann gemäß Abschnitt 3.7 über diese Verknüpfungspunkte im Rahmen einer Ausgleichung erfolgen. Dieses Verfahren kann durch die automatische Interpretation kodierter Zielmarken zu einer vollautomatischen Lösung zur Bestimmung der Näherungstransformation erweitert werden. Es setzt jedoch signalisierte Punkte am Objekt voraus, was bei vielen Anwendungen unerwünscht oder gar unmöglich ist.

Transformationsbestimmung über Methoden der Objekterkennung: Zu einem vollautomatischen Verfahren zur datengetriebenen Bestimmung der Näherungstransformation gelangt man mit Hilfe der Methoden der Objekterkennung. Innerhalb des Sonderforschungsbereiches 514 „Aktive Exploration mittels Sensor/Aktor-Kopplung für adaptive Meß- und Prüftechnik“ (Abschnitt 1.4) wurde ein derartiges Verfahren entwickelt. Es eignet sich für polyedrische Objekte und basiert auf einer Segmentierung der triangulierten Oberflächen in ebene Bereiche, Merkmalsextraktion und Zuordnung von Regionen über eine beschränkte Baumsuche [Böhm et al. 1999]. Es ist jedoch nicht für beliebige Objekte einsetzbar, insbesondere wenn diese einen hohen Anteil von Freiformflächen aufweisen (der durchschnittliche Anteil von Freiformflächen an Werkstücken beträgt derzeit in der industriellen Praxis allerdings lediglich ca. 10-20% [Weckenmann und Gawande 1999]). Verfahren unter Verwendung von volumetrischen Daten (vergl. z.B. [Thirion 1993]) und von Dreiecksnetzen (vergl. z.B. [Johnson und Hebert 1999]) wurden in der Literatur ebenfalls behandelt.

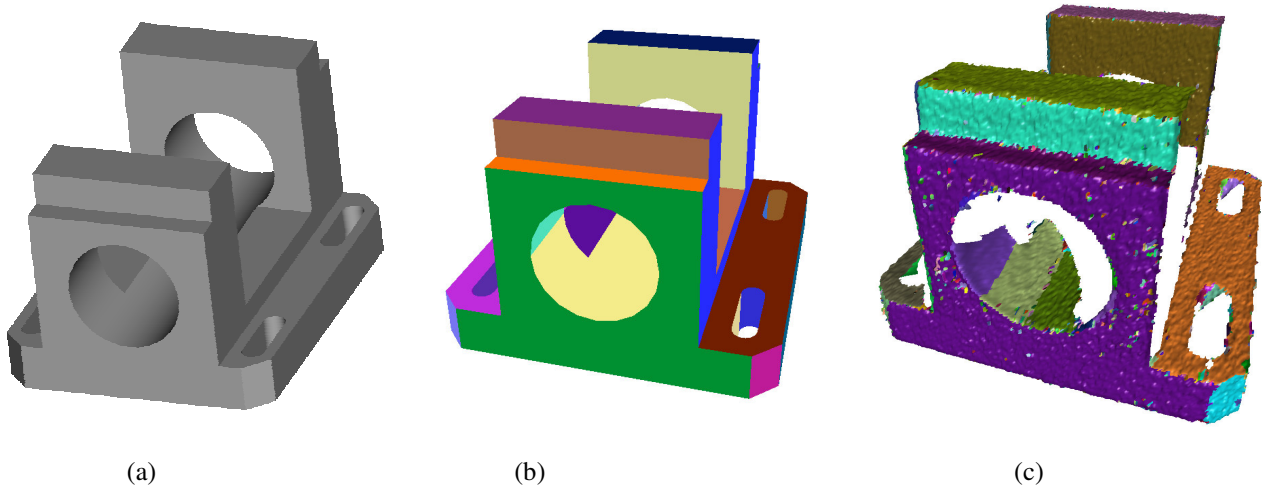


Abbildung 73: (a) CAD-Modell. (b) Im CAD-Modell definierte Flächen. (c) In den Sensordaten durch Ebenensegmentierung gefundene Regionen. Die Zuordnung von Regionen erlaubt die Bestimmung einer Näherungstransformation.

3.9 Bestimmung der Quellpunkte

Die Ermittlung korrespondierender Punkte setzt zunächst die Festlegung einer Menge von Quellpunkten oder Kontrollpunkten voraus. Für diese Punkten wird versucht, einen kompatiblen Punkt auf einem anderen Datensatz zu bestimmen. Abbildung 72 zeigt, dass Punkte, welche auf dem Flächenrand liegen, häufig zu fehlerhaften Zuordnungen führen. Die Kontrollpunkte C werden daher auf der Ausgangsfläche ohne deren Rand $C \in M_S \setminus \Omega_{M_S}$ festgelegt.

Da es sich bei den Datensätzen in der Regel um eine dichte Beschreibung der Oberfläche handelt, verbleibt eine große Anzahl von Kontrollpunktkandidaten. In grober Näherung kann die Unsicherheit $\sigma_{\hat{x}}$ der zu schätzenden Transformationsparameter umgekehrt proportional zur Wurzel der Anzahl n der Beobachtungen, d.h. $\sigma_{\hat{x}} \sim \frac{1}{\sqrt{n}}$, abgeschätzt werden. Der Genauigkeitsgewinn durch die Hinzunahme einer zusätzlichen Beobachtung wird also immer geringer. Die Rechenzeit nimmt jedoch linear mit der Anzahl der Kontrollpunkte zu. Zur Beschleunigung der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Verfahren kann die Anzahl der Quellpunkte daher unter geringem Genauigkeitsverlust reduziert werden. Dies geschieht dadurch, dass lediglich jeder k . Punkt in die Menge der Kontrollpunkte aufgenommen wird. k wird problemabhängig so gewählt, dass wenige tausend Kontrollpunkte verbleiben. Durch eine Variation des Startindex von $0 - k-1$ wird zwischen k verschiedenen Mengen von Quellpunkten gewechselt. Diese regelmäßige Ausdünnung setzt voraus, dass die Oberflächen genügend Strukturinformation zur Beschränkung der Freiheitsgrade der Transformation besitzen. Besitzen die Oberflächen nur wenige Strukturmerkmale, besteht die Gefahr, dass diese in der Menge der Kontrollpunkte nicht erfasst werden. In diesem Fall muss entweder k geringer gewählt oder aber ein Verfahren zur Bestimmung der Quellpunkte verwendet werden, welches gezielt Punkte im Bereich von Strukturmerkmalen auswählt (vergl. [Rusinkiewicz und Levoy 2001]).

3.10 Bestimmung korrespondierender Punkte

In Abschnitt 3.3 wurde der ICP-Algorithmus als „repräsentationsunabhängiges“ Verfahren zur Registrierung beschrieben. Die einzige Voraussetzung liegt in der Verfügbarkeit eines Operators, welcher innerhalb eines Datensatzes den nächsten Punkt zu einem gegebenen Punkt findet.

Diesem Operator kommt eine große Bedeutung zu, da er die für die Transformationsbestimmung verwendeten Punkt-paare festlegt. Tatsächlich ist jeder der zitierten Schwachpunkte des ICP-Algorithmus direkt oder indirekt mit dem Nächsten-Punkt-Operator verknüpft.

Ansonsten wird eine nach dem Abstand sortierte Liste PQ (*priority queue*) mit G_{k_0, l_0, m_0} initialisiert. Der Variablen d_{min} , welche den bisher kürzesten Abstand speichert, wird der Schwellwert t_d zugewiesen. In einer Schleife werden nun die Zellen G_{k_c, l_c, m_c} mit geringstem Abstand zu s_i aus der Liste PQ entnommen und deren Nachbarzellen in PQ eingefügt. Ist G_{k_c, l_c, m_c} belegt, wird der Abstand zu allen Dreiecken von G_{k_c, l_c, m_c} berechnet und geprüft, ob die Entfernung zu demjenigen Dreieck f_c , welches zu s_i den für diese Zelle kürzesten Abstand d_c aufweist, kleiner als d_{min} ist. Ist dies der Fall, wird $d_{min} = d_c$ gesetzt und der zugehörige Punkt $\mathbf{d}_c$ auf f_c als derzeit bester Kandidat $\mathbf{d}_{min}$ für $\mathbf{d}_i$ gespeichert. Die Schleife wird beendet, falls entweder PQ leer oder der kürzeste Abstand zwischen s_i und G_{k_c, l_c, m_c} größer als d_{min} ist.

War die Bestimmung von $\mathbf{d}_{min}$ erfolgreich, werden die beschriebenen Konsistenztests durchgeführt. Sind alle Bedingungen erfüllt, stellt das Paar $(s_i, \mathbf{d}_i = \mathbf{d}_{min})$ eine gültige Korrespondenz dar.

Zusammengefasst ergibt sich folgender Algorithmus für die Bestimmung des nächsten Punktes $\mathbf{d}_i$ zum Quellpunkt s_i unter Verwendung der Schwellwerte t_a und t_d :

1. Finde zu s_i nächstliegende Zelle G_{k_0, l_0, m_0} .
2. Initialisiere Priority-Queue PQ mit G_{k_0, l_0, m_0} und setze aktuell kürzesten Abstand $d_{min} = t_d$.
3. Entnehme Zelle G_{k_c, l_c, m_c} aus PQ . Falls PQ leer ist oder der kürzeste Abstand von G_{k_c, l_c, m_c} zu s_i größer ist als d_{min} , gehe zu (8).
4. Falls G_{k_c, l_c, m_c} nicht belegt ist, füge Nachbarzellen ein und gehe zurück zu (3).
5. Bestimme aus allen Dreiecken von G_{k_c, l_c, m_c} den Punkt $\mathbf{d}_c$ mit kürzestem Abstand d_c .
6. Falls $d_c < d_{min}$, setze $d_{min} = d_c$ und $\mathbf{d}_{min} = \mathbf{d}_c$.
7. Gehe zurück zu (3).
8. Falls $d_c < d_{min}$ und $\mathbf{d}_{min}$ kompatibel mit Konsistenzbedingungen, gebe Paar $(\mathbf{d}_i = \mathbf{d}_{min}, \Sigma_d)$ zurück, sonst „ungültig“.

Da die Anzahl der Dreiecke innerhalb einer Gitterzelle im Sinne einer Aufwandsabschätzung konstant ist und die Anzahl der zu betrachtenden Gitterzellen innerhalb der Entfernung t_d ebenfalls begrenzt ist, ist der Aufwand zur Bestimmung des nächsten Punktes unabhängig von der Gesamtzahl der Punkte oder Dreiecke von M_D . Er hängt lediglich von der Wahl der Zellgröße, t_d und in geringem Maße auch von der Neigung der Oberfläche zu Undulationen ab.

3.11 Verfahren zur paarweisen Registrierung

Die paarweise Registrierung dient dazu, um zwei Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem, das Koordinatensystem des Zieldatensatzes, zu transformieren. Sie wird z.B. eingesetzt, um eine gemessene Oberfläche mit einem CAD-Modell in Bezug zu setzen oder um Näherungswerte für die simultane Registrierung mehrerer Datensätze bereitzustellen.

Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Algorithmus zur paarweisen Registrierung eines Quelldatensatzes M_S und eines Zieldatensatzes M_D – beide repräsentiert als Dreiecksnetze –, mit Rändern Ω_{M_S} und Ω_{M_D} besteht aus folgenden Schritten:

1. Vorverarbeitung
 - Erzeuge Sparse-Gitterstruktur für den beschleunigten Zugriff auf die nächsten Punkte.
 - Definiere eine Menge von Kontrollpunkten $C \in M_S \setminus \Omega_{M_S}$ auf der Ausgangsfläche.
2. Bestimme die Menge korrespondierender Punkte S und D und deren Kovarianzmatrizen mit $S = \{\mathbf{s}_i\}, D = \{\mathbf{d}_i\} \mid S \subset C \wedge \mathbf{d}_i = C(\mathbf{s}_i, \mathbf{n}_{s_i}, t_d, t_a)$.
3. Bestimme die Starrkörpertransformation T , welche (3.56) minimiert.
4. Aktualisiere den Distanzschwellwert t_d (Abschnitt 3.12.1).
5. Wende die Transformation T auf M_S an.
6. Beende Iteration, falls Konvergenz erreicht ist oder wiederhole die Schritte 2-5.

Die zeitliche Komplexität des Algorithmus pro Iteration ist linear in der Anzahl der Kontrollpunkte C ¹. Aufgrund der Definition des Operators C ist der Algorithmus in der Lage, auch sich nur teilweise überlappende Datensätze und Datensätze, welche grobe Fehler enthalten, zu registrieren. Wird die iterative Lösung aus Abschnitt 3.7 verwendet, steht auch die Kovarianzmatrix der Transformationsparameter zur Verfügung. Sie kann analysiert werden, um die Zuverlässigkeit der Registrierung zu beurteilen.

3.12 Verbesserung des Konvergenzverhaltens

3.12.1 Dynamisierung des Distanzschwellwerts

Die Festlegung des Distanzschwellwerts t_d innerhalb des modifizierten ICP-Algorithmus stellt in der Regel einen Kompromiß dar: Einerseits wünscht man eine möglichst geringe Schwelle t_d , um eine hohe Geschwindigkeit und Robustheit gegenüber Fehlzuordnungen zu erhalten, andererseits ist gerade in den ersten Iterationen eine größere Schwelle notwendig, damit bei einer schlechten Näherungsorientierung Zuordnungen überhaupt gefunden werden.

Um diesen kontroversen Anforderungen gerecht zu werden, wird statt eines festen Schwellwertes ein dynamischer Schwellwert verwendet. Er wird zunächst vom Benutzer auf einen Startwert festgelegt. Nach der Bestimmung der Transformationsparameter wird der Schwellwert restklaffenabhängig modifiziert. Der neue Schwellwert t_d ergibt sich als Produkt eines Faktors c_d (z.B. 10) mal dem RMS-Wert

$$t_d = c_d \cdot RMS = c_d \cdot \sqrt{\frac{\sum \|\mathbf{d}_i - \mathbf{R}\mathbf{s}_i + \mathbf{t}\|^2}{N-1}} \quad (3.62)$$

Die Festlegung dieses Faktors ist unproblematisch und ergibt in der Regel eine gute Anpassung an den Fortschritt des Verfahrens, was zu einer Reduzierung der Anzahl der Iterationen führt.

¹ Die Vorverarbeitungsschritte sind linear in der Anzahl der Quellpunkte (Maskierung der Ränder etc.) bzw. der Anzahl der Zielpunkte (Maskierung der Ränder, Aufbau der räumlichen Zugriffsstrukturen). Sie sind jedoch sehr effizient und werden lediglich einmal pro Sitzung durchgeführt.

3.12.2 Modifikation der Gewichtsmatrix

Die Konvergenzgeschwindigkeit, aber auch die Genauigkeit des Verfahrens hängt sehr stark davon ab, wie gut die überlappenden Bereiche der beiden Datensätze die Freiheitsgrade der Transformation beschränken. [Pito 1996] hat in seiner Dissertation eine qualitative Analyse dieses Sachverhaltes durchgeführt. Wie Abbildung 76 zeigt, ist die Orientierung der Oberflächen für die Beschränkung der Freiheitsgrade verantwortlich. Pitos Vorschlag zur Behebung des Problems ist eine „Registrierhilfe“ – ein Objekt, welches bei der Datenaufnahme mit erfasst wird und Flächen unterschiedlicher Orientierung besitzt. Über die Messungen dieses Objekts lassen sich auch Datensätze registrieren, welche nur eine gering strukturierte Oberfläche aufweisen.

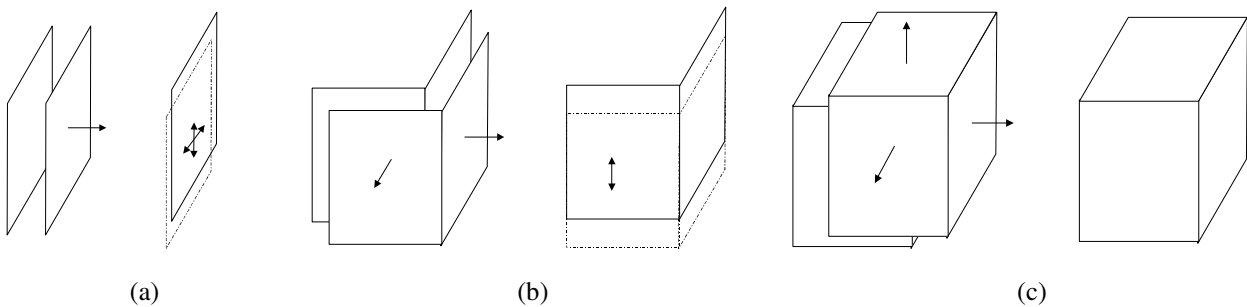


Abbildung 76: Beschränkung der translatorischen Freiheitsgrade aufgrund der Geometrie der Objektoberfläche: (a) Beschränkung einer Raumrichtung, (b) Beschränkung zweier Raumrichtungen, (c) vollständige Beschränkung aller drei translatorischen Freiheitsgrade.

Im Fall von Abbildung 76 (a) ist lediglich eine Raumrichtung, die Richtung der Oberflächennormalen, beschränkt. Jede Verschiebung senkrecht dazu ist uneingeschränkt möglich. Erst durch die Hinzunahme von korrespondierenden Punkten auf weiteren Flächen (Abbildung 76 (c)) werden die verbleibenden Freiheitsgrade beschränkt. Der Grund dafür liegt in der Art, wie die Punktkorrespondenzen gebildet werden. Das Kriterium ist: Der Abstand $d \in \mathbb{R}$ der beiden Punkte soll minimal sein. Da der Abstand eine eindimensionale Größe ist, sollte der Zwang, den eine Korrespondenz in der Ausgleichung ausübt, ebenfalls nur in eine Richtung, die Richtung der Verbindungslinie der beiden Punkte, wirken (Abbildung 77).

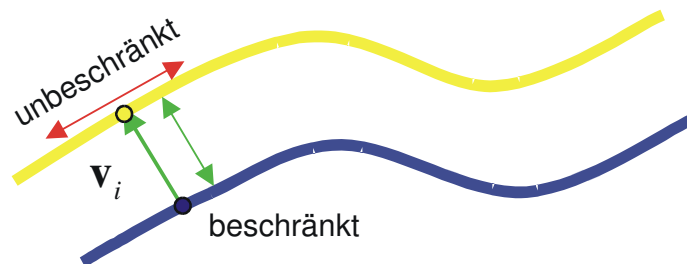


Abbildung 77: Aufgrund der Art und Weise, wie die Korrespondenzen gebildet werden, beschränkt jede Punktkorrespondenz die Transformation nur in Richtung der Verbindungslinie der beiden Punkte.

Bei der Bestimmung der Transformationsparameter wurden die Punkte aber eingeführt, als wären alle Koordinaten beobachtet. Während dieses Vorgehen für signalisierte Verknüpfungspunkte oder Verknüpfungen, welche anhand der Zuordnung wohldefinierter Objektmerkmale gebildet wurden, angemessen ist, führt es bei ICP-Verfahren zu Problemen:

1. **Langsame Konvergenz:** Die Oberflächen werden künstlich „aneinandergeklebt“, da die korrespondierenden Punkte das Gleiten senkrecht zu der Verbindungslinie der beiden Punkte verhindern.
2. **Mangelnde Interpretierbarkeit der Kovarianzmatrix der Transformationsparameter:** Die Richtungen senkrecht zu der Verbindungslinie der beiden Punkte werden ebenfalls beschränkt, unabhängig davon, ob die Objektgeometrie eine Beschränkung dieser Richtungen überhaupt zulässt. Die Kovarianzmatrix der Transformationsparameter kann daher keinen Aufschluß über die Bestimmbarkeit der Parameter geben.

Die für die Translationskomponenten durchgeführten Betrachtungen gelten in analoger Weise auch für die Rotationsparameter.

Eine quantitative Behandlung des Problems kann mit Hilfe einer modifizierten Gewichtsmatrix erfolgen. Mit dem normierten Vektor $\mathbf{v}_i^0 \in \mathbb{R}^3$

$$\mathbf{v}_i^0 = \frac{\mathbf{d}_i - \mathbf{s}_i}{\|\mathbf{d}_i - \mathbf{s}_i\|} \quad (3.63)$$

der in Richtung der Verbindungslinie der beiden homologen Punkte $\mathbf{s}_i$ und $\mathbf{d}_i$ zeigt, kann unter Verwendung von Gleichung (3.57) die Varianz in Richtung der Verbindungslinie berechnet werden

$$\sigma_{\mathbf{v}_i^0}^2 = \mathbf{v}_i^{0T} \boldsymbol{\Sigma}_i \mathbf{v}_i^0 \quad (3.64)$$

Die modifizierte Gewichtsmatrix $\mathbf{W}_i'$ muss die Tatsache widerspiegeln, dass der durch die Korrespondenz ausgeübte Zwang nur in eine Richtung wirkt. Sie kann über das dyadische Produkt von $\mathbf{v}_i^0$ bestimmt werden und hat daher den Rang $\text{rg } \mathbf{W}_i' = 1$.

$$\mathbf{W}_i' = \frac{1}{\sigma_{\mathbf{v}_i^0}^2} \mathbf{v}_i^0 \mathbf{v}_i^{0T} = \frac{1}{\sigma_{\mathbf{v}_i^0}^2} \begin{bmatrix} v_x^{02} & v_x^0 v_y^0 & v_x^0 v_z^0 \\ v_x^0 v_y^0 & v_y^{02} & v_y^0 v_z^0 \\ v_x^0 v_z^0 & v_y^0 v_z^0 & v_z^{02} \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Die Verwendung der Gewichtsmatrix $\mathbf{W}_i'$ in Gleichung (3.56) hat mehrere Vorteile:

1. Es ergibt sich eine deutliche Verringerung der notwendigen Anzahl von Iterationen (oft mehr als eine Größenordnung) verglichen mit der klassischen Lösung.
2. Das Verfahren wird deutlich robuster. Insbesondere bei schwach gekrümmten Objekten treten weniger „Hänger“ in lokalen Minima auf.
3. Schlecht bestimmte Konfigurationen sind anhand der Kovarianzmatrix der bestimmten Transformationsparameter erkennbar.

Es sei hier noch angemerkt, dass [Chen und Medioni 1992] und [Stoddart et al. 1998] auch alternative Lösungsverfahren eingeführt haben. [Chen und Medioni 1992] minimieren den Abstand zwischen den Punkten des Quelldatensatzes und der lokalen Tangentialebene in den nächsten Punkten des Zieldatensatzes. Ihre Lösung ist rechentechnisch aufwändiger. [Stoddart et al. 1998] minimieren den Fehler in Richtung der Oberflächennormalen und verwenden einen erweiterten Kalman-Filter zur Berechnung der Transformationsparameter. Sie wählen einen anderen Zugang zu dem Problem und berücksichtigen nicht die Genauigkeit der korrespondierenden Punkte. Trotzdem ergeben sich für den Fall gleichgenauer Beobachtungen ähnliche Beziehungen wie hier angegeben.

3.13 Konzeptvalidierung

Zur Validierung der entwickelten Konzepte, welche in den nachfolgenden Verfahren ebenfalls verwendet werden, wurde zunächst eine Reihe von Experimenten durchgeführt. Dabei wurden drei Datensätze verwendet. Der erste Datensatz (Abbildung 78 (a)) ist eine synthetische Szene aus [Rusinkiewicz 2001]. Aufgrund seines fraktalen Ursprungs treten die geometrischen Strukturen mit unterschiedlicher Größe auf. Beim zweiten Datensatz (Abbildung 78 (b)) handelt es sich um reale Messdaten des bereits bei der Datenerfassung gezeigten Testkörpers aus Aluminium. Er weist ausgeprägte Strukturen auf. Der dritte Datensatz, eine reale Messung eines Telefonhörers, ist dagegen glatt und strukturarm (Abbildung 78 (c)).

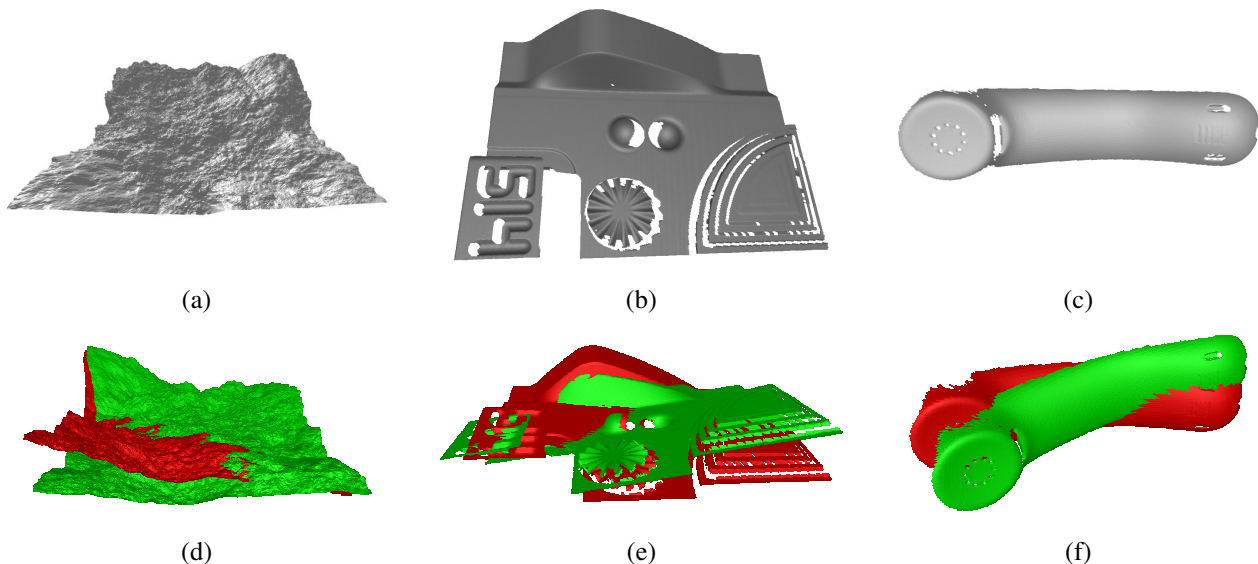


Abbildung 78: Datensätze für die experimentelle Validierung der paarweisen Registrierung: (a) Fraktale Landschaft (aus [Rusinkiewicz 2001]), (b) Testkörper aus Aluminium. (c) Telefonhörer. d)-(f) Ausgangskonfigurationen für die Registrierung.

Um die berechneten Punktpositionen mit ihrem wahren Wert vergleichen zu können, wurde jeder Datensatz mit einer Kopie von sich selbst registriert. Für die Untersuchung des Einflusses von Sensorrauschen wurde jede Koordinatenkomponente mit normalverteiltem Rauschen mit einer zufälligen Standardabweichung von maximal einem Zehntel der lateralen Auflösung versehen. Die Ausgangsorientierung wurde durch eine Verschiebung in alle Koordinatenrichtungen um die zehnfache laterale Auflösung und eine Rotation um 15° festgelegt. Als Ergebnis der Untersuchungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

Modifizierte Gewichtsmatrix: Die modifizierte Gewichtsmatrix stellt die gravierendste Verbesserung des ICP-Algorithmus dar. Die Anzahl notwendiger Iterationen wird deutlich verringert und die Robustheit des Algorithmus bezüglich lokaler Minima (vergl. Abbildung 79 (b)) signifikant verbessert.

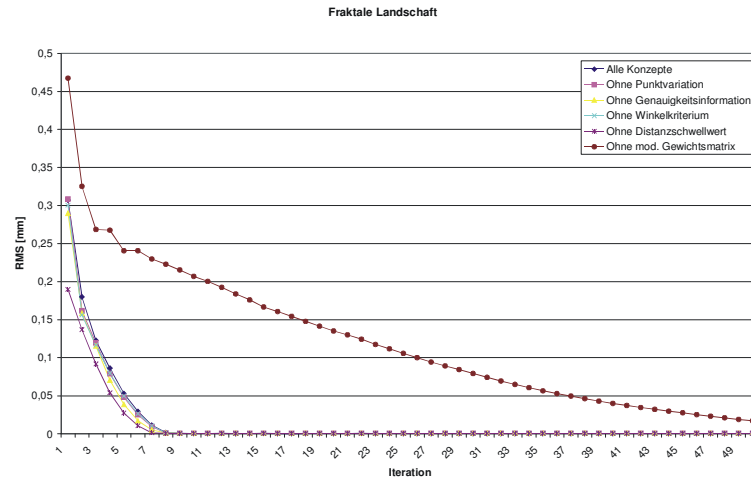
Variation der Quellpunkte: Die Variation der Quellpunktmenge durch eine zyklische Variation des Startpunktindex zwischen 0 und $k-1$, falls jeder k . Punkt als Quellpunkt dient, führt zu besseren Ergebnissen.

Genauigkeitsinformation: Die Verwendung von Genauigkeitsinformation bei der Transformationsbestimmung führt durchgängig zu besseren Ergebnissen. Dies gilt für unterschiedlich starkes Rauschen ($1, 0.1, 0.01 \times$ laterale Auflösung) und für eine Veränderung der Anzahl der verwendeten Punkte (Grad der Ausdünnung).

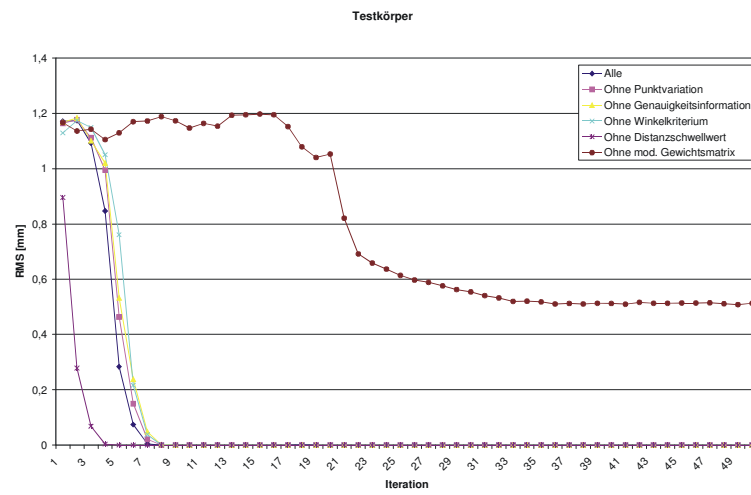
Abstandskriterium und Winkelkriterium: Die beiden Kriterien ergeben bezüglich der Genauigkeit des Endergebnisses keine signifikante Veränderung. Betrachtet man den Verlauf des Fehlers über die Iterationen hinweg, ist zu erkennen, dass der Verzicht auf das Entfernungskriterium in den frühen Iterationen bei den verwendeten Datensätzen eine Beschleunigung ergibt. Diese Aussage ist jedoch nicht von allgemeiner Gültigkeit, da bei der Registrierung von sich nur teilweise überlappenden Flächen Fehlzugeordnungen zu einer schlechteren Konvergenz oder zum Scheitern des Verfahrens führen.

Abbildung 81 stellt eine Zusammenfassung der Ergebnisse dar. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen pro Iteration den RMS-Wert nach Gleichung (3.62)¹ unter Variation verschiedener Prozessierungsparameter.

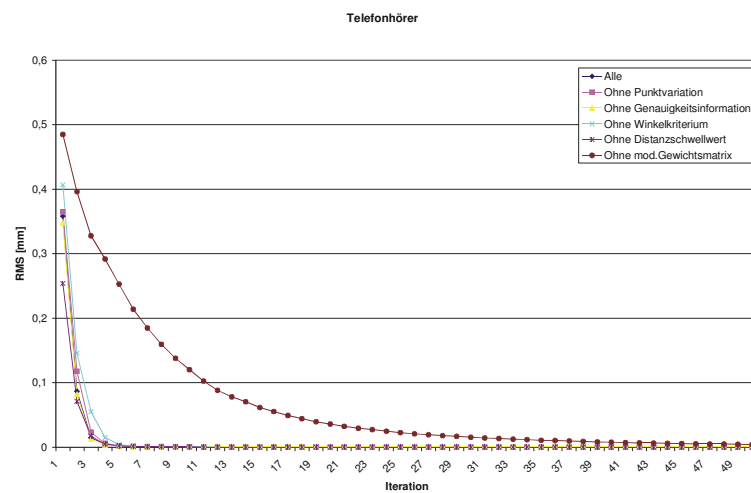
¹ Streng genommen ist bei Kenntnis des wahren Wertes in (3.62) durch N , statt durch $N-1$ zu dividieren.



(a)

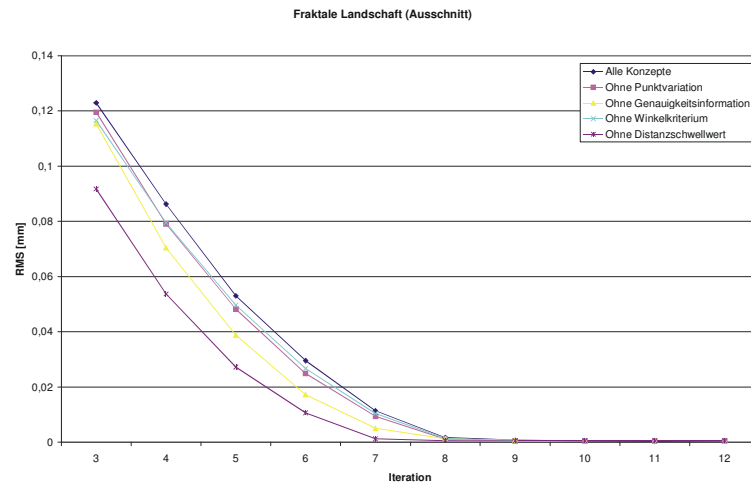


(b)

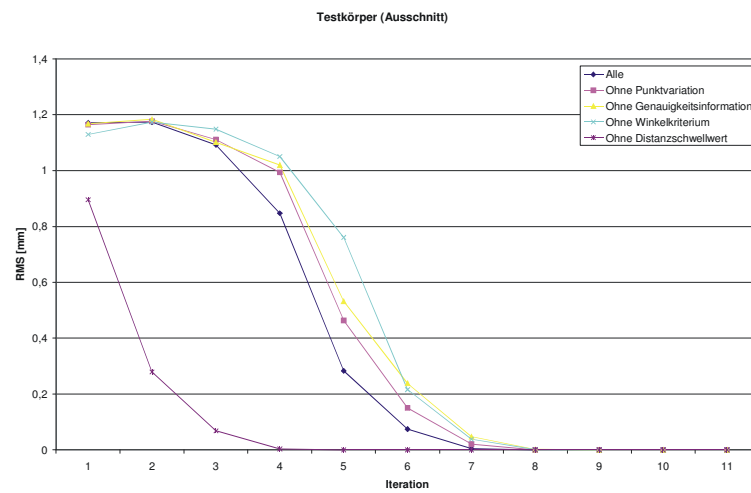


(c)

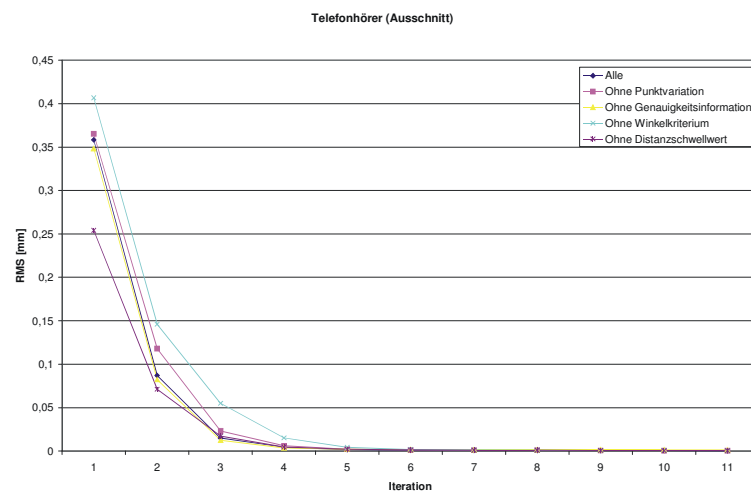
Abbildung 79: Registrierfehler in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern.
(a) Fraktale Landschaft. (b) Testkörper. (c) Telefonhörer.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 80: Detaildarstellung der Diagramme aus Abbildung 79 unter Auslassung des Ergebnisses der Registrierung ohne die modifizierte Gewichtsmatrix: (a) Fraktale Landschaft. (b) Testkörper. (c) Telefonhörer.

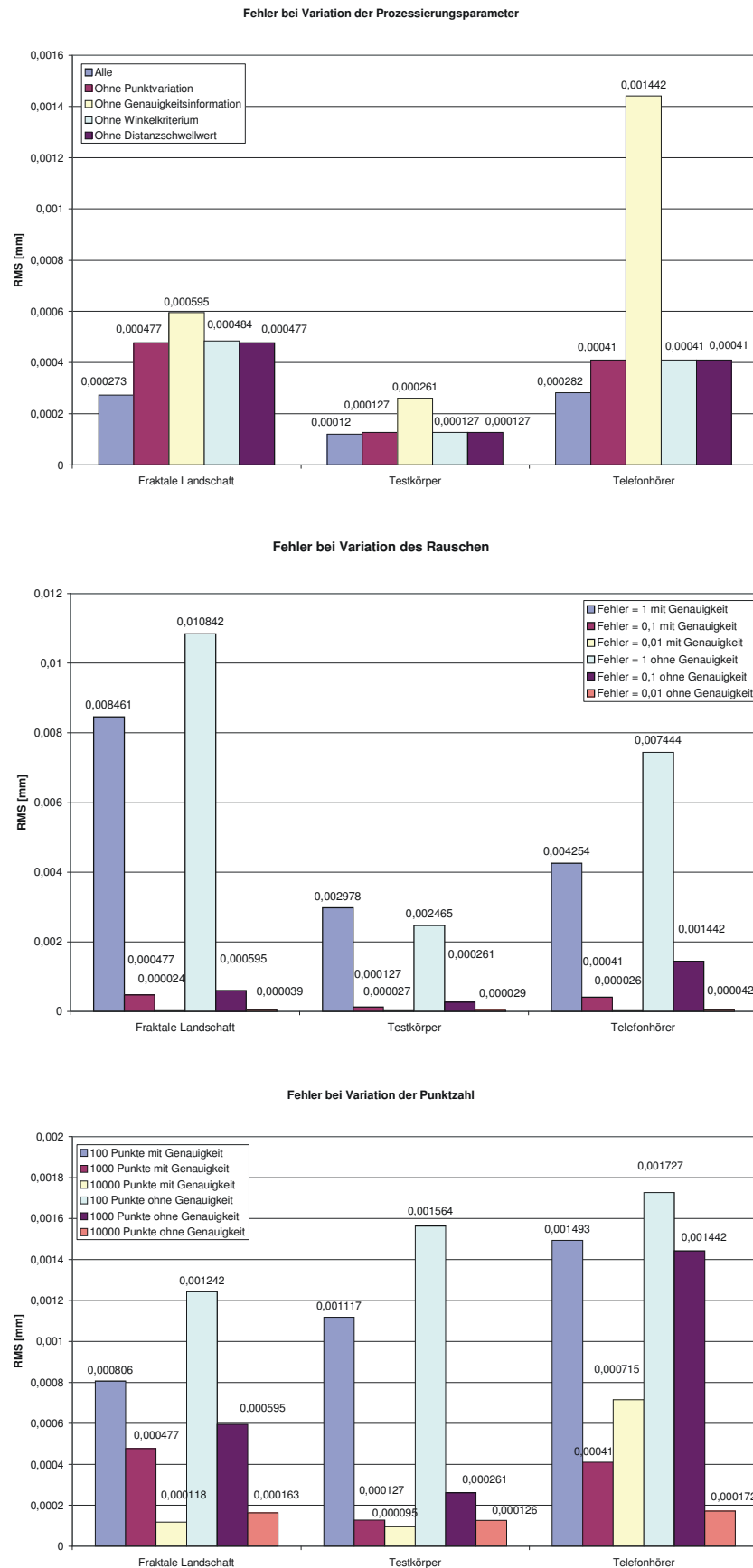


Abbildung 81: Zusammenfassung der Ergebnisse: Die Diagramme zeigen den Registrierfehler in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern.

3.14 Verfahren zur paarweisen Registrierung unter Verwendung von Intensitätsinformation

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Geometrie des Objekts bestimmten Anforderungen genügen muss, um die Freiheitsgrade der Transformation zu beschränken und damit die Bestimmung der Transformationsparameter zu ermöglichen. Diese Anforderungen sind für nahezu ebene Objektbereiche ohne räumliche Struktur nicht erfüllt. Weist ein solches Objekt jedoch eine hinreichend texturierte Oberfläche auf, können durch die Einbeziehung der punktwise gespeicherten, nach Abschnitt 2.9.5 korrigierten Intensität in die Registrierung dennoch die Transformationsparameter bestimmt werden.

Dazu werden die nach Abschnitt 3.9 bestimmten Zielpunkte $\mathbf{d}_i$ auf M_D so in ihrer Position verschoben, dass ihr interpolierter Grauwert mit dem Grauwert g_{s_i} des Quellpunktes s_i übereinstimmt. Da nur eine Gleichung für die Bestimmung von zwei Lageparametern (die Position innerhalb der Fläche ist zweidimensional) vorliegt, verbleibt als möglicher Ort des Zielpunktes noch eine Gerade $L: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$. Der neue Punkt $\mathbf{d}_i^*$ wird daher so festgelegt, dass er den kürzesten Abstand zum Punkt $\mathbf{d}_i$ aufweist. Er kann als senkrechte Projektion von $\mathbf{d}_i$ auf L berechnet werden.

Dieses Vorgehen erfordert, dass innerhalb des Dreieckes f_j , in welchem $\mathbf{d}_i$ liegt, der Grauwert g_{s_i} auch tatsächlich vorkommt. Ist dies nicht der Fall, so wird anhand der Grauwerte der Scheitelpunkte von f_j der Punkt $\mathbf{d}_i^*$ prädiiziert, in welchem der Grauwert g_{s_i} zu erwarten ist. Ist die Entfernung zu diesem Punkt kleiner als ein Schwellwert t_d , wird das in Richtung von $\mathbf{d}_i^*$ liegende Nachbardreieck f_k betrachtet. Eine kurze Entfernung bedeutet, dass sich die Grauwerte des Dreiecks stark ändern, was auf das Vorhandensein einer Textur- oder Grauwertkante schließen lässt. Dieses Vorgehen wird gegebenenfalls wiederholt, bis entweder ein gültiger Punkt $\mathbf{d}_i^*$ gefunden wird oder aber sich der Punkt $\mathbf{d}_i^*$ um mehr als t_{dmax} von $\mathbf{d}_i$ entfernt hat, bzw. die Maximalzahl von N_{max} Iterationen überschritten wurde.

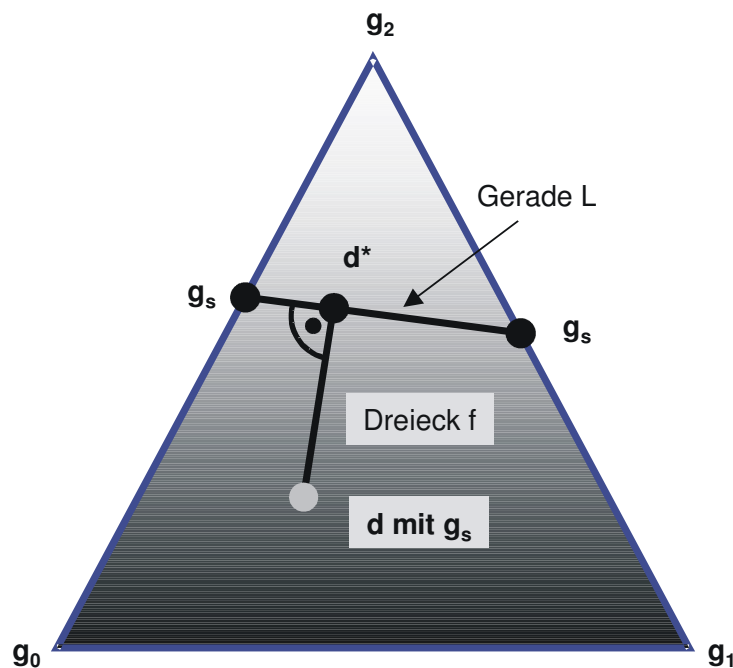


Abbildung 82: Die modifizierte Position des Zielpunktes $\mathbf{d}_i^*$ liegt auf einer Geraden, entlang derer die Punkte des Dreiecks denselben Grauwert g_s wie der Quellpunkt s_i besitzen. Die endgültige Position auf der Geraden L ergibt sich als senkrechte Projektion von $\mathbf{d}$ auf L .

Für das Verfahren ist es erforderlich, dass der relative Reflexionsfaktor durch das in Abschnitt 2.9.5 beschriebene Beleuchtungsmodell bestimmt werden kann. Ist dies nicht der Fall, kann dies zu systematischen Fehlern bei der Bestimmung der Transformationsparameter führen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Voraussetzungen z.B. im Fall von matten Papieroberflächen gegeben sind. Zur Untersuchung auf Biasfreiheit wurden auch Ausschnitte desselben Datensatzes miteinander registriert, was nach wenigen Iterationen zur exakten Bestimmung der Einheitsmatrix führte.

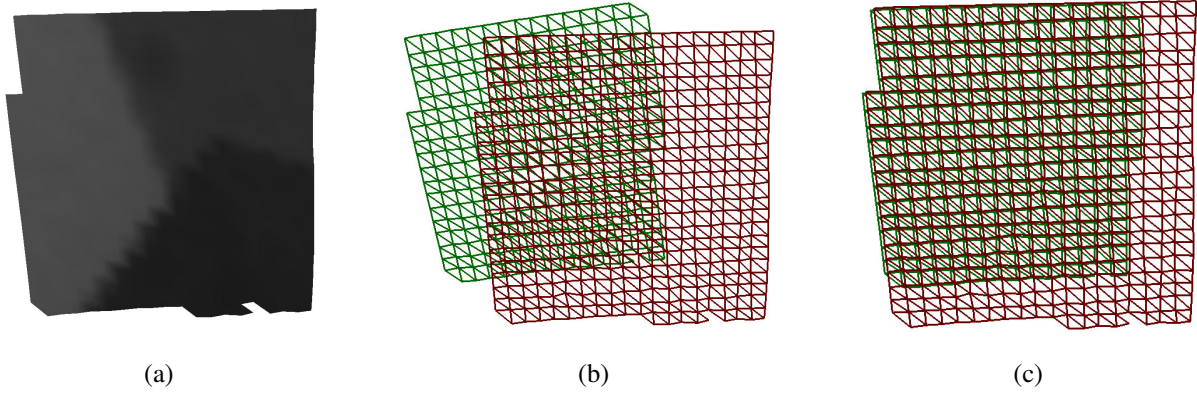


Abbildung 83: Registrierung zweier Ausschnitte desselben Datensatzes unter Verwendung von Intensitätsinformation: (a) 3D-Ansicht eines nahezu ebenen Datensatzes mit pro Scheitelpunkt gespeicherter Intensität. (b) Mögliche Startposition für die Registrierung. (c) Die korrekte Lage des Datensatzes wurde nach ungefähr 15 Iterationen bestimmt. Beide Datensätze kommen exakt zur Deckung. Die grüne Fläche wurde lediglich für die Darstellung leicht verschoben.

Für die Berücksichtigung der Intensitätsinformation ist eine Erweiterung des Algorithmus zur paarweisen Registrierung aus Abschnitt 3.11 notwendig:

1. Vorverarbeitung
 - Erzeuge Sparse-Gitterstruktur für den beschleunigten Zugriff auf die nächsten Punkte.
 - Erzeuge Feld von Integer-Tripel, welches für jedes Dreieck die Indizes seiner Nachbardreiecke speichert.
 - Definiere eine Menge von Kontrollpunkten $C \in M_S \setminus \Omega_{M_S}$ auf der Ausgangsfläche.
2. Bestimme die Menge korrespondierender Punkte S und D sowie die Menge der Dreiecksindizes I , der Dreiecke, in welchen die Punkte aus D liegen $S = \{s_i\}, D = \{d_i\}, I = \{i_i\} \mid S \subset C \wedge (d_i \in f_{i_i}, i_i) = C'(s_i, n_{s_i}, t_d, t_a)^1$.
3. Prüfe für jeden Punkt s_i , ob der Grauwert g_{s_i} des Punktes entlang der Kanten des Dreieckes f_{i_i} linear interpoliert werden kann.
 - Falls möglich: Berechne die korrigierte Position d_i^* durch senkrechte Projektion von d_i auf die Gerade, welche die zwei Positionen mit Grauwert g_{s_i} enthält. Setze $d_i = d_i^*$
 - Falls nicht möglich: Prädiziere die Position d_i^* mit Grauwert g_{s_i} . Falls $\|d_i - d_i^*\| < t_{d \max}$ und die maximale Anzahl von Wiederholungen noch nicht erreicht ist, verwende das in Richtung des Punktes d_i^* liegende Nachbardreieck und wiederhole Punkt 3, ansonsten behalte die Originalposition d_i .

¹ Der Operator C' sei so modifiziert, dass er zusätzlich den Index des Dreiecks liefert, in welchem der Zielpunkt d_i liegt.

4. Bestimme die Starrkörpertransformation T , welche (3.56) minimiert.
5. Aktualisiere den Distanzschwellwert t_d (Abschnitt 3.12.1).
6. Wende die Transformation T auf M_s an.
7. Beende Iteration, falls Konvergenz erreicht ist oder wiederhole die Schritte 2-6.

Da die maximale Anzahl der Wiederholungen von Punkt 3 begrenzt ist (z.B. 5), hat sich an der asymptotischen Zeitkomplexität des Algorithmus nichts geändert und ist damit pro Iteration ebenfalls linear in der Anzahl der Kontrollpunkte C . Aufgrund der zusätzlichen Betrachtung der Grauwerte erhöht sich jedoch selbstverständlich die Konstante für die Nächste-Punkt-Operation.

3.15 Verfahren zur simultanen Registrierung mehrerer Datensätze

Häufig stellt sich das Problem, dass eine Messung aus mehr als zwei Datensätzen besteht. Prinzipiell ist es möglich, die Datensätze durch das sequentielle Anwenden der paarweisen Registrierung in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. Dieses Vorgehen hat jedoch zur Folge, dass sich Registrierfehler akkumulieren können. Im Falle geschlossener Oberflächen kommt es dann beim Zusammentreffen des letzten Datensatzes mit dem ersten Datensatz zu Klaffungen (Abbildung 84 (b)).

Es ist daher wünschenswert, die Abweichungen zwischen allen Datensätzen simultan zu minimieren.

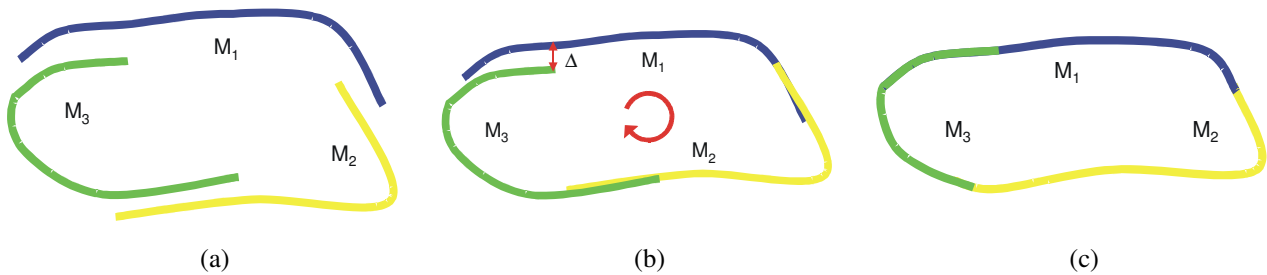


Abbildung 84: Registrierung mehrerer Datensätze: (a) Ausgangssituation mit drei Datensätzen. (b) Das Vorgehen der Verkettung paarweiser Registrierungen führt zu Klaffungen Δ . (c) Bei der simultanen Registrierung der drei Datensätze werden die Fehler zwischen allen Datensätzen minimiert. Klaffungen treten nicht auf.

Für eine Menge von N Dreiecksnetzen M_{s_i} minimiert der Algorithmus zur simultanen Registrierung mehrerer Datensätze die Quadratsumme der Abweichungen zwischen den Überlappungsbereichen aller N Oberflächen. Er kann als eine Verallgemeinerung der Idee des ICP-Algorithmus auf mehrere Datensätze betrachtet werden.

Zunächst wird eine Menge TP von L sogenannten Verknüpfungspunkten eingeführt, welche in jeder Iteration auf einer lokalen Consensusfläche aller Datensätze liegen. Ausgehend von Näherungswerten für die Transformationen, welche zum Beispiel über paarweise Registrierungen bereitgestellt werden können, wird die Ausgangslage für diese Verknüpfungspunkte durch eine regelmäßige Abtastung des Raumes festgelegt. Ein Verknüpfungspunkt wird dabei immer dann erzeugt, wenn sich mindestens zwei Flächen innerhalb eines Initialisierungsschwellwertes $t_{d_{init}}$ befinden. Die Verknüpfungspunkte speichern neben ihrer geometrischen Position und ihrer Kovarianzmatrix auch einen Verweis auf die zur Initialisierung verwendeten Flächen. In den folgenden Schritten werden für jeden Verknüpfungspunkt nur noch diese Flächen betrachtet. Nach der Initialisierung wird die Position der Verknüpfungspunkte $\mathbf{t}_j$ iterativ verfeinert. Dies geschieht durch eine gewichtete Mittelwertbildung zwischen gültigen Punkten $\mathbf{s}_{ji}$ auf allen Oberflächen, welche durch den Operator $C(M_{s_i}, \mathbf{t}_j, \mathbf{n}_{t_j}, t_d, t_a)$ gefunden werden

$$\mathbf{t}_j = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right)^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} = \left(\sum \hat{\Sigma}_{s_{ji}}^{-1} \right)^{-1} \cdot \left(\sum \hat{\Sigma}_{s_{ji}}^{-1} \cdot \mathbf{s}_{ji} \right) \quad (3.66)$$

unter Verwendung der zugehörigen Gewichtsmatrizen $\hat{\Sigma}_{s_{ji}}$

$$\hat{\Sigma}_{s_{ji}} = \mathbf{R}_i \Sigma_{s_{ji}} \mathbf{R}_i^T + \mathbf{J}_{T_i}(\mathbf{s}_{ji}) \Sigma_{T_i} \mathbf{J}_{T_i}(\mathbf{s}_{ji})^T \quad (3.67)$$

welche neben der Unsicherheit in den Punktpositionen auch die Unsicherheit der Transformationsparameter berücksichtigt. $\mathbf{J}_{T_i}$ ist die Jacobi-Matrix (3.38) der Transformationsparameter $\hat{\mathbf{q}}$ und $\mathbf{t}$.

Im nächsten Schritt wird für jeden Datensatz M_{S_i} diejenige Starrkörpertransformation T_i bestimmt, welche die Summe der quadrierten Abstände zu allen Verknüpfungspunkten, welche mit dem Datensatz M_{S_i} verbunden sind, minimiert. Die bestimmten Transformationen werden an den Datensätzen angebracht. Das Vorgehen wird solange wiederholt, bis die Änderungen in den Parametern unter einen Schwellwert fallen oder die Maximalzahl der Iterationen erreicht ist. Da die Positionen der durch die Mittelwertbildung festgelegten Verknüpfungspunkte iterativ verfeinert werden, trägt der Algorithmus in Anlehnung an die englische Bezeichnung für Mittelwert den Namen *Iterative Mean Point Algorithm* (IMP). Die einzelnen Schritte sind:

1. Vorverarbeitung

- Aufbau der Sparse-Gitterstruktur für den beschleunigten Zugriff auf die nächsten Punkte.
- Bestimmung einer Menge TP von L Verknüpfungspunkten durch regelmäßiges Abtasten des Raumes innerhalb der kombinierten Bounding-Box aller Oberflächen. Ein Verknüpfungspunkt wird erzeugt, falls korrespondierende Punkte innerhalb eines größeren Distanzschwellwerts $t_{d_{init}}$ in mindestens zwei Datensätzen gefunden werden. Jeder Verknüpfungspunkt speichert die Indizes aller Datensätze, mit welchen er verbunden ist. Nur diese Datensätze brauchen in weiteren Iterationen bei der Suche nach korrespondierenden Punkten berücksichtigt werden.

2. Bestimme die Menge der Verknüpfungspunkte TP , der korrespondierenden Punkte S_j , sowie deren Kovarianzmatrizen unter Berücksichtigung der relevanten Datensätze aus (1)

$$TP = \{\mathbf{t}_j\}, S_j = \{\mathbf{s}_{ji}\} \mid s_{ji} = C\left(M_{S_i} \mathbf{t}_j, \mathbf{n}_{t_j}, t_d, t_a\right).$$

3. Bestimme die Position der Verknüpfungspunkte über eine gewichtete Mittelwertbildung.

4. Bestimme die N Starrkörpertransformationen T_i , die die Gleichung (3.56) minimieren. Verwende dazu alle Konzepte der paarweisen Registrierung und die Kovarianzmatrix der Verknüpfungspunkte $\bar{\mathbf{t}}_j$.

5. Aktualisiere den Distanzschwellwert t_d (Abschnitt 3.12.1).

6. Wende Transformation T_i auf Datensätze M_{S_i} an.

7. Ende der Iteration, falls Konvergenz erreicht ist oder Wiederholung der Schritte 2-6.

Wie der ICP-Algorithmus ist dieser Algorithmus "allgemein und repräsentationsunabhängig", da im Prinzip lediglich die Verfügbarkeit eines Operators notwendig ist, der den nächsten Punkt liefert. Der Algorithmus lässt sich problemlos auf andere Dimensionen übertragen. Da die Bestimmung der nächsten Punkte für jeden Datensatz unabhängig durchgeführt werden kann, ist der Algorithmus auch für eine parallele Implementierung geeignet. Die zeitliche Komplexität pro Iteration ist proportional zu $L \times N$.

3.16 Diskussion

Zur Registrierung von Datensätzen wurden in diesem Kapitel drei optimierte Varianten des Iterative-Closest-Point-Algorithmus [Besl und MacKay 1992] entwickelt. Sie ermöglichen die paarweise Registrierung von Datensätzen, die

paarweise Registrierung von Datensätzen unter Verwendung von Intensitätsinformation und die simultane Registrierung mehrerer Datensätze.

Das Verfahren zur paarweisen Registrierung beinhaltet verschiedene Erweiterungen um Problemen des klassischen ICP-Algorithmus zu begegnen. Die Wirksamkeit dieser Erweiterungen wurde anhand von künstlichen und realen Daten verifiziert. Als Besonderheiten des Verfahrens sind insbesondere eine modifizierte Gewichtsmatrix, welche die laterale Unsicherheit bei der Bestimmung korrespondierender Punkte in Betracht zieht und die Berücksichtigung von Genauigkeitsinformation bei der Transformationsbestimmung zu nennen.

Für die Behandlung von Oberflächen, welche mangels geometrischer Struktur keine hinreichende Beschränkung der Freiheitsgrade der Transformation bieten, wurde ein Verfahren unter Verwendung von Intensitätsinformation entwickelt. Das Verfahren setzt korrigierte Intensitätswerte (vergl. Abschnitt 2.9) und texturierte Oberflächen voraus.

Für die simultane Registrierung mehrerer Datensätze wurde eine allgemeine Methode entwickelt, welches wie der ICP-Algorithmus auf andere Dimensionen und Repräsentationen übertragbar ist.

Ein Nachteil aller drei Verfahren liegt darin, dass sie in der implementierten Form nicht für Echtzeitanwendungen geeignet sind. Während die Verfahren zur paarweisen Registrierung ein flüssiges, interaktives Arbeiten erlauben, erfordert das Verfahren zur globalen Registrierung typischerweise mehrere Minuten an Rechenzeit, wobei sich der Operator zur Bestimmung der nächsten Punkte als Flaschenhals erweist. Durch eine problemspezifische Implementierung könnte, unter Verzicht auf die Allgemeingültigkeit des Verfahrens, eine Beschleunigung erzielt werden. Eine derartige Lösung wird zum Beispiel in [Blais und Levine 1995] geschildert, wo das Modell eines Triangulationssensors zum direkten Nachschlagen korrespondierender Punkte verwendet wird.

4 Integration

4.1 Einführung

Nach der Registrierung der Datensätze liegen die Datensätze in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor. Die Objektoberfläche wird jedoch nach wie vor durch eine Anzahl sich überlappender Dreiecksnetze beschrieben. Die Zusammenführung aller Dreiecksnetze in eine gemeinsame Oberflächenbeschreibung wird in der Literatur als Integration bezeichnet. Ihr Ziel ist die Bestimmung einer Mannigfaltigkeit, welche die erfasste Oberfläche beschreibt. Während die Registrierung ausschließlich die geometrischen Aspekte der Datenfusion abdeckt, dient die Integration vor allem dazu, die topologische Beziehung der Messpunkte untereinander zu verändern.

Die in der Literatur behandelten Verfahren können in drei Kategorien eingeteilt werden:

Oberflächenrekonstruktion aus unorganisierten Punktwolken: Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion aus unorganisierten Punktwolken verwenden keine Information über den Zusammenhang der Punkte und stellen damit die allgemeinste Verfahrensklasse dar. Während frühe Arbeiten (z.B. [Bolle und Vemuri 1991]) Annahmen über die Topologie der Daten gemacht haben, hat [Hoppe 1994] ein Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächen beliebigen topologischen Typs entwickelt. Das Verfahren arbeitet in mehreren Schritten und kann auch auf berandete Oberflächen und Oberflächen mit Löchern und Kanten angewandt werden. Im ersten Schritt wird die Richtung der Oberflächennormalen ermittelt und ein grobes Netz rekonstruiert, welches bereits die korrekte Topologie aufweist. In einem zweiten Schritt wird dieses Netz dann optimiert, um zu einer hochwertigen Oberflächenbeschreibung zu gelangen. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt unter anderem in der zuverlässigen Bestimmung der lokalen Tangentialebene aus „naheliegenden“ Punkten.

Ein anderer Ansatz verwendet eine verallgemeinerte Mittelachsentransformation, um die Oberfläche zu rekonstruieren (z.B. [Amenta, Choi und Kolluri 2001]). Die Mittelachse ergibt sich bei diesen Verfahren als Vereinigung der Mittelpunkte von Bällen maximaler Ausdehnung, welche in die Körper eingeschrieben werden, wohingegen die Oberfläche durch die Vereinigung der Oberfläche der Bälle definiert wird. Der Vorteil dieser Verfahren ist, dass sie immer geschlossene („wasserdichte“) Oberflächen liefern.

Ein Problem all dieser Verfahren ist die korrekte Rekonstruktion der Topologie, insbesondere bei variierender Abtastdichte. Liegen die Eingangsdaten bereits strukturiert vor, können Verfahren, welche diese Struktur ausnützen, häufig effektiver arbeiten.

Netzbasierte Verfahren: Diese Verfahren setzen voraus, dass die Eingangsdaten bereits in Form von mehreren sich überlappenden Netzen vorliegen. [Turk und Levoy 1994] erodieren die Netze im Überlappungsbereich, bis diese lediglich an den Kanten aneinanderstoßen. Anschließend werden die Randpunkte durch das Einfügen neuer Dreiecke miteinander verbunden. Abschließend wird die Position der Scheitelpunkte im Überlappungsbereich unter Verwendung aller Datensätze korrigiert. [Soucy und Laurendeau 1995] erzeugen durch die Projektion der Datensätze auf eine Ebene zunächst getrennte Triangulationen für Teilbereiche des Objekts, welche dann durch eine Delauny-Triangulierung mit Zwangskanten miteinander verbunden werden.

Der Ansatz von [Pito 1996] und das Verfahren von [Karbacher 1997] arbeiten ähnlich wie das Mesh-Zippering-Verfahren von Turk und Levoy. Pito berücksichtigt dabei zusätzlich die Sensorkonfiguration bei der Aufnahme, um die Robustheit des Verfahrens zu steigern und erlaubt die Rekonstruktion scharfer Kanten. Bei [Karbacher 1997] werden bei der Erodierung die Scheitelpunkte des erodierten Netzes in das verbleibende Netz aufgenommen. Anschließend werden die Lücken geschlossen.

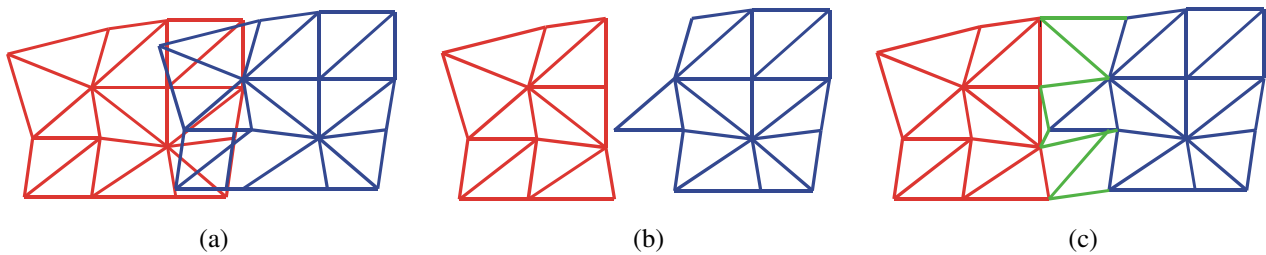


Abbildung 85: Mesh-Zippering: (a) Ausgangssituation mit zwei Datensätzen. (b) Die sich überlappenden Bereiche werden erodiert. (c) Das endgültige Netz ergibt sich durch Überbrücken der Freiräume zwischen den Netzen. Anschließend wird die Information aller Netze verwendet, um die Position der Scheitelpunkte zu verbessern.

[Borgeat et al. 1999] haben ein Verfahren entwickelt, welches das inkrementelle Aktualisieren der rekonstruierten Oberfläche erlaubt. Die Daten werden auf eine Ebene projiziert und im Zweidimensionalen trianguliert. Verschiedene Konsistenzbedingungen stellen die Plausibilität der erzeugten Triangulierung sicher.

Volumetrische Verfahren: Volumetrische Verfahren greifen die Idee von [Hoppe 1994] auf, Oberflächen in einem Zwischenschritt als vorzeichenbehaftete Abstandsfunktion zu beschreiben. [Curless und Levoy 1996] haben ein Voxel-Gitter zur Speicherung der Abstandsfunktion eingeführt. Die Oberfläche kann dann sehr effizient mit Hilfe des Marching-Cubes-Algorithmus [Lorensen und Cline 1987] als Iso-Fläche mit Niveau Null erzeugt werden. Durch eine Klassifizierung des Gitters in Freiraum und vom Objekt abgeschattete Bereiche wird das Volumen zudem segmentiert (space carving). Der Algorithmus verwendet diese Segmentierung zum Schließen von Löchern zur Erzeugung geschlossener Oberflächen. Das Verfahren hat sich aufgrund seiner Leistungsfähigkeit bewährt und wurde für die Rekonstruktion großer Modelle eingesetzt [Levoy et al. 2000]. Der Nachteil dieser Beschreibung liegt in der durch die Rasterweite des Gitters festgelegten Auflösung. Um dieses Problem zu lösen, schlagen [Hilton und Illingworth 1997] die Verwendung eines krümmungsabhängig dichteren Gitters als Zwischenschritt zur Oberflächenrekonstruktion vor.

4.2 Überblick über das Verfahren zur Integration von Datensätzen

Eine Betrachtung der Literatur hinsichtlich der Größe der rekonstruierten Datensätze legt nahe, dass volumetrische Verfahren derzeit wohl die leistungsfähigsten Verfahren zur Integration von Datensätzen darstellen. Im Kontext dieser Arbeit ist es jedoch erforderlich, dass der Beitrag der einzelner Messungen identifizierbar bleibt. Dies ist aufgrund der Mittelwertbildung und Glättung innerhalb des Voxel-Gitters jedoch nicht möglich. Netzbasierte Verfahren repräsentieren die Messungen explizit in Form von Scheitelpunkten. Die vorgeschlagenen Konzepte zur Topologierekonstruktion sind jedoch weniger robust und leistungsfähig als volumetrische Verfahren.

Es wird daher ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Im ersten Schritt wird zur Topologierekonstruktion ein grobes Netz mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens abgeleitet. Dieses Netz wird anschließend durch eine adaptive Unterteilung der Dreiecke verdichtet, wobei die Position und Attribute der erzeugten Punkte durch Rückprojektion auf die Originaldaten bestimmt werden. Das Verfahren kombiniert damit die Vorzüge beider Technologien.

4.3 Topologierekonstruktion

Zur Rekonstruktion der Topologie werden die Daten durch eine über diskrete Punkte definierte, vorzeichenbehaftete Abstandsfunktion repräsentiert. Dazu wird der Raum innerhalb eines fiktiven, alle Objekte einschließenden Quaders regelmäßig gerastert. Für jeden Rasterpunkt wird der in Abschnitt 3.10 beschriebene Nächste-Punkt-Operator zur Ermittlung des kürzesten Abstands zu allen Datensätzen verwendet.

Der Abstand zur Objektoberfläche ergibt sich dann als gewichteter Mittelwert aller gültigen Abstandsberechnungen. Für die Bestimmung des Vorzeichens wird die Orientierung der Oberfläche verwendet. Der Abstand zu Punkten welche

in Normalenrichtung (d. h. außerhalb der Fläche) liegen bekommt ein positives Vorzeichen, der Abstand zu Punkten welche entgegen der Normalenrichtung liegen bekommen ein negatives Vorzeichen. Die Objektoberfläche entspricht damit der Isofläche mit Niveau Null.

4.3.1 Generierung des Ausgangsnetzes

Zur Erzeugung des Ausgangsnetzes wird ein modifizierter Marching-Cubes-Algorithmus verwendet [Lorenson und Cline 1987]. Beim Marching-Cubes-Algorithmus handelt es sich um ein sehr effizientes Verfahren zur Ableitung von Dreiecksnetzen aus Skalarfeldern. Die einzelnen Gitterzellen, definiert durch ihre acht Eckpunkte, werden getrennt betrachtet. Jedem Eckpunkt ist ein Element in einer acht Bit großen Maske zugeordnet. Für alle Eckpunkte wird nun geprüft, ob sich der zugeordnete Wert oberhalb des Niveaus der zu ermittelnden Iso-Fläche befindet. Ist dies der Fall, so wird das dem Eckpunkt zugeordnete Bit gesetzt. Insgesamt ergeben sich damit $2^8 = 256$ verschiedene Kombinationen. Die sich ergebende Zahl wird als Index in eine Tabelle verwendet, welche für jede Kombination die zu erzeugende Dreieckskonfiguration speichert. Die Lage der Scheitelpunkte der Dreiecke wird entlang der Kanten des Gitters linear interpoliert und ist über benachbarte Zellen hinweg konsistent. Abbildung 86 zeigt eine zweidimensionale Darstellung der Arbeitsweise des Algorithmus.

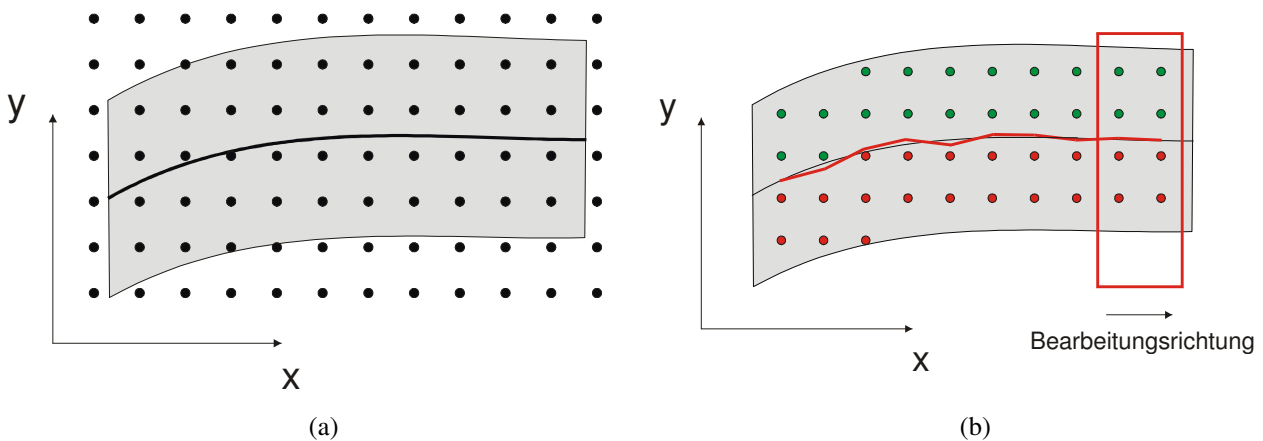


Abbildung 86: Zweidimensionale Darstellung der Arbeitsweise des Marching-Cubes-Algorithmus. (a) Lage der Gitterpunkte innerhalb des einschließenden Rechtecks. (b) Für jeden Gitterpunkt wird der vorzeichenbehaftete Abstand zu allen Datensätzen bestimmt (grün: positiver; rot: negativer Abstand). Die Lage der Oberfläche wird durch lineare Interpolation des Nulldurchgangs entlang der Gitterkanten bestimmt. Für die Auswertung einer Gitterzelle sind lediglich die Werte aus dem vorhergehenden und dem aktuellen Schritt notwendig (Rahmen). Der grau dargestellte Bereich markiert den Suchbereich des Nächsten-Punkte-Operators.

Da die Skalarfunktion ausschließlich zur Erzeugung der Ausgangstriangulierung benötigt wird, brauchen die ermittelten Gitterwerte nicht gespeichert zu werden. Die Abstandsermittlung benötigt jedoch den größten Teil der Rechenzeit des Verfahrens. Die mehrfache Ermittlung der nächsten Punkte ist daher zu vermeiden. Das Gitter wird deshalb schrittweise in Richtung der x -Koordinate durchwandert. In jedem Schritt wird für alle Gitterpunkte der aktuellen y - z -Ebene der vorzeichenbehaftete Abstand ermittelt. Die gültigen Abstände werden in einem Suchbaum gespeichert, welcher dem Indextripel eines Gitterpunktes dessen vorzeichenbehafteten Abstandswert zuordnet.

Nach der Abstandsberechnung wird für alle Gitterzellen, welche aus den Gitterpunkten des aktuellen x -Schrittes und den Gitterpunkten des vorhergehenden Schrittes gebildet werden können, geprüft, ob ein gültiger Abstand ermittelt werden konnte. Falls alle acht Eckpunkte einer Gitterzelle im Suchbaum enthalten sind, wird die Gitterzelle ausgewertet. Die Tabelle für die Dreiecksgenerierung und Teile des Codes wurden von [Bourke 1997] übernommen. Für jede Gitterzelle werden dabei zwischen Null und Fünf Dreiecke erzeugt. Sind alle Gitterzellen des aktuellen x -Schrittes untersucht, werden die Einträge des Suchbaumes für den vorhergehenden Schritt gelöscht und es wird zum nächsten Schritt übergegangen bis alle Gitterzellen ausgewertet sind. Abbildung 87 zeigt die 15 unterschiedlichen Dreieckskonfigurationen beim Marching-Cubes-Algorithmus.

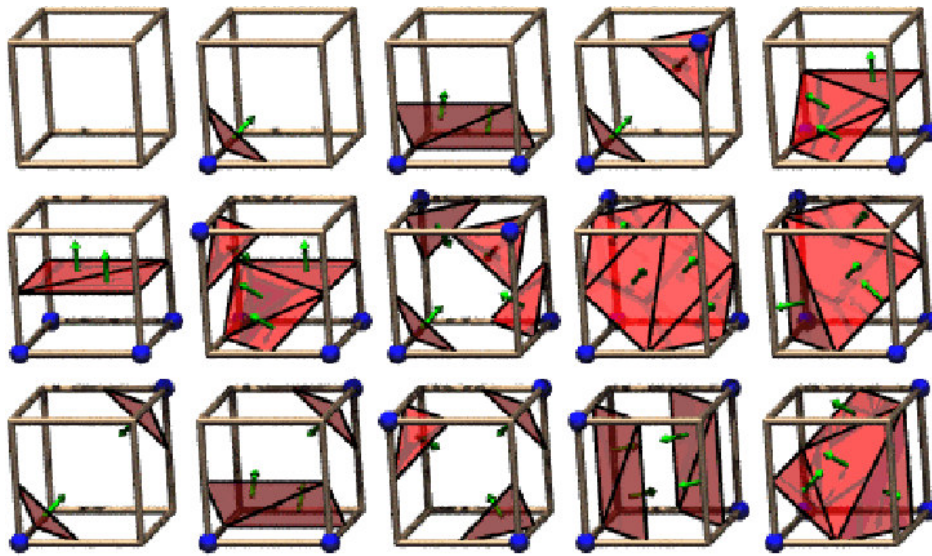


Abbildung 87: Die 15 verschiedenen Dreieckskonfigurationen beim Marching-Cubes-Algorithmus. Gitterpunkte mit einem Wert unterhalb des Niveaus der Iso-Fläche sind mit einem blauen Kreis dargestellt. (Quelle unbekannt.)

4.3.2 Netzoptimierung

Die mit Hilfe des Marching-Cubes-Algorithmus erzeugte Triangulierung ist für die anschließende Verfeinerung des Netzes durch Unterteilen der Dreiecke noch nicht geeignet, da sie eine große Anzahl kleiner und spitzwinkliger Dreiecke aufweist (Abbildung 90 (a)). Zur Verbesserung der Struktur der Dreiecke werden deshalb zwei Verfahrensschritte mehrfach hintereinander ausgeführt:

Eliminieren kleiner Dreiecke und Kanten (triangle / edge collapse): Bei diesem Schritt wird die Länge der drei Seiten eines Dreiecks betrachtet. Ist sie geringer als ein Schwellwert (z.B. ein Viertel der Gitterweite), wird die Kante zum Löschen markiert. Sind mindestens zwei Kanten eines Dreiecks zu kurz, werden das Dreieck und seine drei Nachbardreiecke aus der Triangulierung entfernt (Abbildung 88 (a)). Damit kein Loch in der Triangulierung entsteht, wird ein neuer Scheitelpunkt im Schwerpunkt des Dreiecks eingeführt. Alle Dreiecke, welche einen Scheitelpunkt mit dem gelöschten Dreieck gemeinsam hatten, sind von dieser Änderung betroffen und müssen aktualisiert werden.

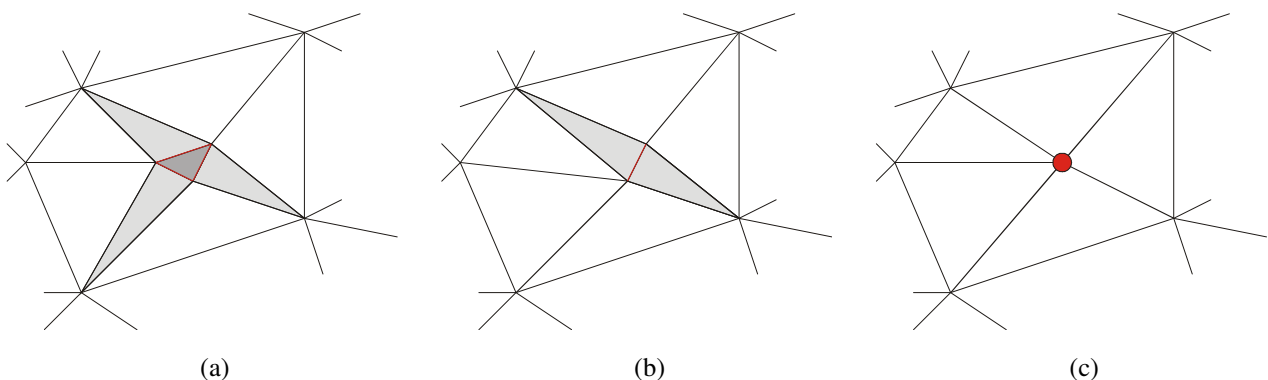


Abbildung 88: Netzoptimierung durch Eliminieren von kleinen Dreiecken (a) und kurzen Kanten (b). In beiden Fällen wird das fehlende Element durch einen neuen Scheitelpunkt im Schwerpunkt der entfernten Punkte ersetzt (c).

Ist nur eine Dreiecksseite zu kurz, wird eine Kante aus der Triangulierung entfernt und dafür ein neuer Scheitelpunkt in der Mitte der Kante eingeführt (Abbildung 88 (b)). Gleichzeitig mit der Kante werden die beiden benachbarten Dreiecke aus der Triangulierung entfernt. Alle Dreiecke, welche einen Scheitelpunkt mit der gelöschten Kante gemeinsam hatten, müssen aktualisiert werden. Da das Ergebnis von der Reihenfolge der Verarbeitung abhängt, wird das Verfahren wiederholt auf die Daten angewandt, bis sich die Triangulierung nicht mehr ändert.

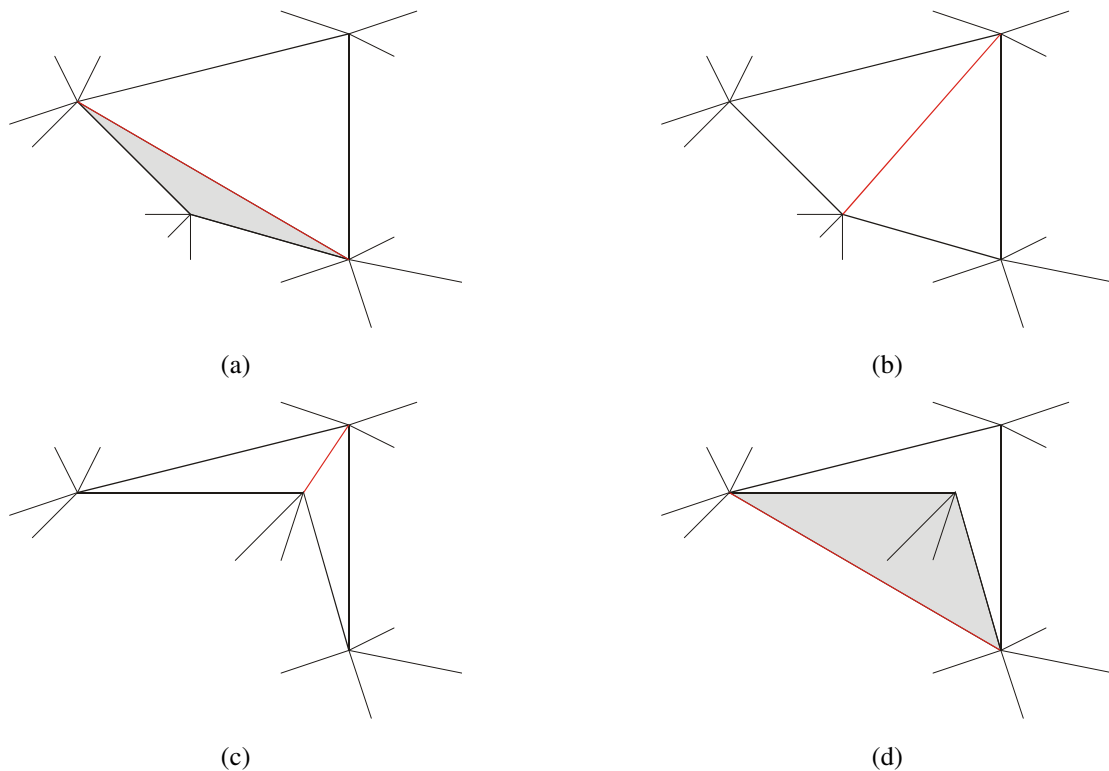


Abbildung 89: Verbesserung der Netzstruktur. (a) Das grau hinterlegte Dreieck besitzt einen kleineren Innenwinkel als jedes der beiden Dreiecke in (b). Die Kante wird daher verdreht. Die beiden spitzwinkligen Dreiecke in (c) besitzen ebenfalls einen kleineren Innenwinkel als jedes der beiden Dreiecke in (d). Das Verdrehen der Kante führt in diesem Fall jedoch zum Umklappen des grau hinterlegten Dreiecks und verändert damit die Orientierung der Oberfläche.

Vertauschen von Kanten spitzwinkliger Dreiecke (edge flip): In diesem Schritt wird die Struktur des Netzes weiter verbessert. Da bereits die Triangulierung von vier Punkten nicht eindeutig ist, ist eine Technik zur Auswahl der „besseren“ Triangulierung notwendig. Es muss also ein Qualitätskriterium festgelegt werden. In der geometrischen Datenverarbeitung sind verschiedene lokale Kriterien gebräuchlich. Ein lokales Kriterium legt fest, wie ein Viereck durch zwei Dreiecke trianguliert wird. Das sogenannte Max-Min-Winkelkriterium wählt dabei diejenige gemeinsame Kante, welche den minimalen Winkel in den beiden anliegenden Dreiecken maximiert. Das Kriterium erweist sich im Vergleich zu anderen Kriterien (z.B. Maximierung des kleinsten Flächeninhaltes) robust gegenüber lokalen Minima. Im Zweidimensionalen erzeugt die nach dem Max-Min-Kriterium lokal optimierte Triangulierung eine global optimale Triangulierung (Delauney-Triangulierung). Dieses Kriterium wird daher zur Optimierung des Dreiecksnetzes verwendet. Dazu wird für jeden Nachbar eines Dreiecks geprüft, ob der minimale Innenwinkel der beiden Dreiecke durch das Verdrehen der gemeinsamen Kante vergrößert wird. Diese Operation darf jedoch nur dann durchgeführt werden, wenn die anderen vier Kanten ein konvexes Viereck bilden, da das Dreieck sonst umklappen und sich damit die Orientierung der Oberfläche ändern würde. Dieser Fall kann durch einen Vergleich der Oberflächennormalen vor und nach der Operation detektiert werden. Im Bereich von Kanten ist zusätzlich darauf zu achten, dass Dreieckskanten, welche parallel zu Objektkanten ausgerichtet sind, nicht senkrecht zu der Objektkante

gestellt werden. Ein Vertauschen der Kanten wird daher nur durchgeführt, falls die Normalenrichtung der beiden Dreiecke ähnlich ist.

Als Ergebnis der beiden Verfahrensschritte liegt eine Triangulierung vor, welche eine für die nachfolgenden Schritte wesentlich günstigere Struktur besitzt (Abbildung 90).

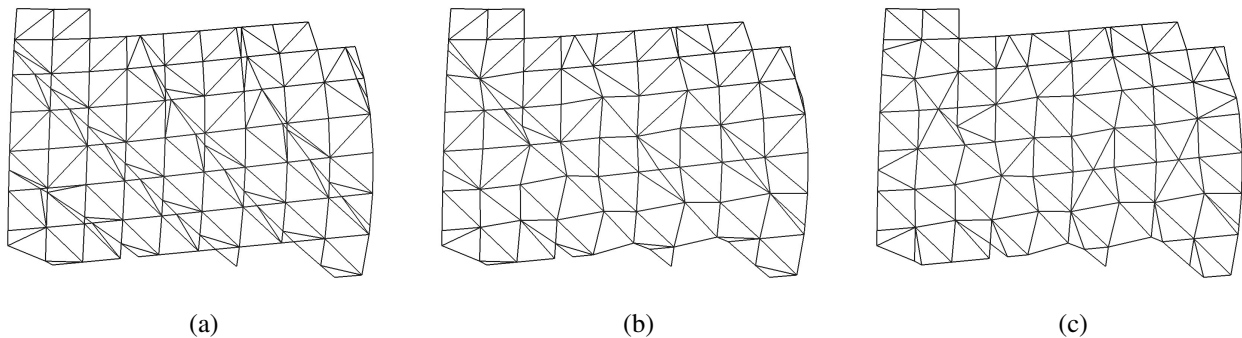


Abbildung 90: Verfahren zur Netzoptimierung: (a) Ergebnis des Marching-Cubes-Algorithmus. (b) Ergebnis der Netzoptimierung nach der Eliminierung kleiner Dreiecke und Dreieckskanten. (c) Ergebnis nach dem Umdrehen von Dreieckskanten. Die abgebildeten Netze (b) und (c) sind ein Zwischenergebnis nach der 2. Iteration.

4.4 Rückprojektion und Netzverdichtung

Um die Redundanz der Eingangsdaten ausnützen zu können, wird das optimierte Netz verdichtet, bis die vom Benutzer gewünschte Auflösung am Objekt erreicht ist. Dazu wird zunächst, vergleichbar der Ermittlung der Verknüpfungspunkte bei der Mehrbildregistrierung, für jeden Scheitelpunkt der nächste Punkt auf allen Oberflächen berechnet. Die endgültige Lage des Punktes wird wiederum durch eine gewichtete Mittelbildung nach (3.66) bestimmt. Der Punkt liegt damit gewissermaßen auf einer Consensusfläche aller Datensätze, welche die Oberfläche in diesem Punkt beschreiben. Die inverse Normalgleichungsmatrix der Punktbestimmung stellt die Kovarianzmatrix des Punktes dar und wird mit diesem gespeichert. Weitere Attribute wie z.B. Farbe oder Intensitätswerte werden für jeden Datensatz, gewichtet mit den baryzentrischen Koordinaten des korrespondierenden Punktes, innerhalb des Dreieckes in welchem der nächste Punkt liegt interpoliert. Der endgültige Attributwert ergibt sich dann als arithmetisches Mittel der Einzelwerte. Durch dieses Vorgehen werden auch eventuell noch vorhandene Intensitätsunterschiede, welche durch das Beleuchtungsmodell nicht vollständig kompensiert werden konnten, ausgemittelt.

Das dadurch erhaltene Dreiecksnetz weist im allgemeinen jedoch noch eine unzureichende Auflösung auf. Um keine in den Ausgangsdaten enthaltenen Details zu verlieren, werden daher zusätzliche Scheitelpunkte in die Triangulierung eingefügt. Da die günstige Struktur des Netzes erhalten bleiben soll, ist die Art der Unterteilung von Bedeutung. Das simple Einfügen neuer Punkte, z.B. im Schwerpunkt der Dreiecke, führt nach wenigen Schritten zu schlanken und spitzwinkligen Dreiecken. Die Netzverdichtung geschieht deshalb durch eine adaptive Unterteilung der Dreiecke in bis zu vier Unterdreiecke.

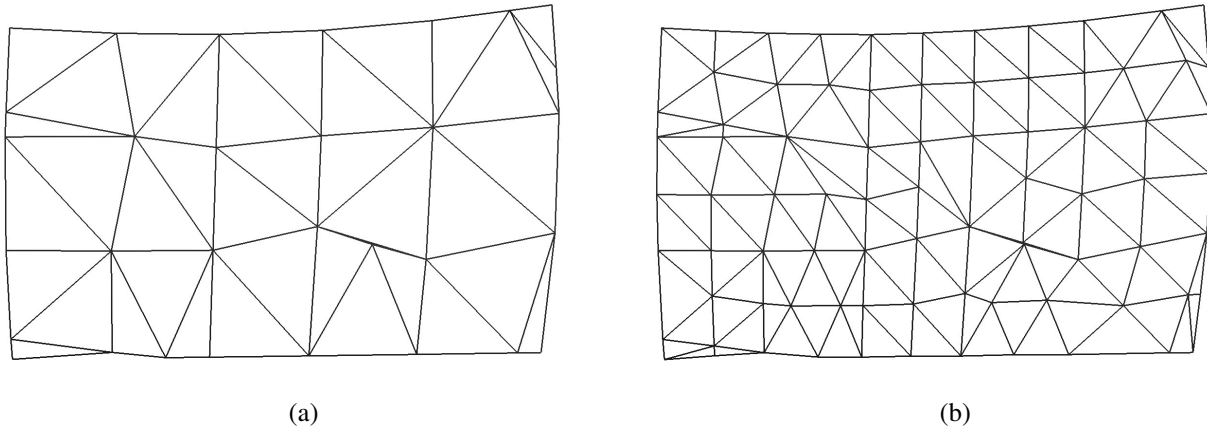


Abbildung 91: (a) Ausgangsnetz nach der Topologierekonstruktion.
(b) Verdichtetes Netz nach einem Unterteilungsschritt.

Die Entscheidung, wie die Aufteilung vorgenommen werden soll, wird – ähnlich wie beim Marching-Cubes-Algorithmus – über eine Tabelle getroffen. Für jede der Dreiecksseiten wird zunächst geprüft, ob die Länge die zulässige maximale Kantenlänge überschreitet. Falls ja, wird das der Kante zugehörige Bit gesetzt. Abbildung 92 zeigt die acht verwendeten Unterteilungen eines Dreiecks. Nach der Unterteilung wird die Position der neu eingefügten Punkte wieder durch Rückrechnen auf die Ausgangsdatensätze verbessert und deren Attributwerte bestimmt. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis die gewünschte Auflösung erreicht ist.

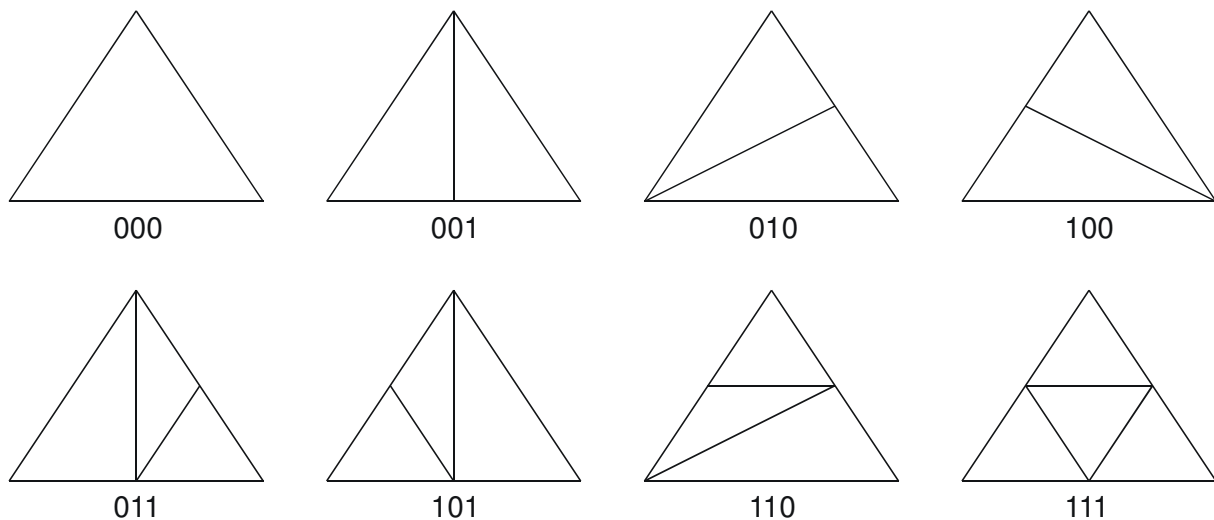


Abbildung 92: Die acht möglichen Unterteilungen eines Dreiecks bei der Netzverdichtung.

4.5 Formulierung des Integrationsalgorithmus

Der in den vorangehenden Abschnitten beschriebene Algorithmus zur Integration der Datensätze besteht aus folgenden Teilschritten:

1. Vorverarbeitung
 - Registrierung der Datensätze mit Hilfe der Verfahren aus Kapitel 3.
 - Aufbau der Sparse-Gitterstruktur für den beschleunigten Zugriff auf die nächsten Punkte.
2. Gehe in x -Richtung durch die Punkte eines regelmäßigen, dreidimensionalen Gitters. Berechne für alle Gitterpunkte $\mathbf{s}(x_i, y_j, z_k)$ mit dem aktuellen x -Index $i = i_c$ die nächsten Punkte auf allen Datensätzen unter Verwendung des Operators C aus Abschnitt 3.10. Falls ein gültiger Punkt gefunden wird, berechne den

vorzeichenbehafteten Abstand. Berechne den Abstand des Gitterpunktes mit Hilfe einer gewichteten Mittelbildung über alle gültigen Punkte. Speichere den ermittelten Abstand in einem Suchbaum, welcher einem Indextripel (i, j, k) den dazugehörigen Abstand zuordnet.

3. Falls $i_c > 0$: Finde alle Gitterzellen, deren 8 Eckpunkte im Suchbaum enthalten sind. Wende den Marching-Cubes-Algorithmus [Lorensen und Cline 1987] an, um die Gitterzellen zu triangulieren (Iso-Wert = 0).
4. Verbessere durch das Entfernen von kleinen Dreiecken und kurzen Kanten die Struktur der Triangulierung.
5. Verbessere durch das Umdrehen von gemeinsamen Kanten benachbarter Dreiecke die Struktur der Triangulierung. Iteriere über Punkt 4 und 5 bis sich die Triangulierung nicht mehr ändert.
6. Berechne nach einer weiteren Anwendung des Operators C die endgültige Position der Gitterpunkte nach (3.66) als gewichtetes Mittel der gültigen Korrespondenzen auf allen Datensätzen. Berechne Attributwerte als arithmetisches Mittel der interpolierten Attributwerte jedes Datensatzes.
7. Verdichte das Netz durch Einfügen von Dreiecken und Scheitelpunkten.
8. Wiederhole die Schritte 6 und 7 bis die gewünschte Auflösung erreicht ist.

4.6 Diskussion

Das beschriebene Verfahren zur Registrierung von Datensätzen kombiniert in zwei Verarbeitungsschritten Konzepte volumetrischer und netzbasierter Verfahren. Im ersten Schritt wird zur Topologierekonstruktion ein grobes Dreiecksnetz abgeleitet. Dazu wird für jeden Punkt eines regelmäßigen, dreidimensionalen Gitters der vorzeichenbehaftete Abstand zur Oberfläche berechnet. Die Ableitung der triangulierten Oberfläche erfolgt unter Verwendung des Marching-Cubes-Algorithmus [Lorensen und Cline 1987] als Iso-Fläche mit Niveau Null. Es werden keine Annahmen über den topologischen Typ der Oberfläche gemacht. Anschließend wird die Struktur der Triangulierung verbessert, indem kleine Dreiecke und kurze Dreieckskanten eliminiert werden. Die Form spitzwinkliger Dreiecke wird durch das Vertauschen von Kanten benachbarter Dreiecke verbessert. Nach der Optimierung des Netzes werden die Scheitelpunkte auf die ursprünglichen Datensätze zurückgerechnet. Dabei werden für die Scheitelpunkte zusätzliche Attribute (Farbe, Intensität, Kovarianzmatrix) durch Interpolation bestimmt. Um die Auflösung zu erhöhen, wird in einem zweiten Schritt das rekonstruierte Dreiecksnetz verdichtet. Dies geschieht iterativ durch eine Unterteilung der Dreiecke in bis zu vier Unterdreiecke. Die endgültige Position der dabei neu entstehenden Scheitelpunkte wird wiederum durch Rückrechnen auf die ursprünglichen Datensätze mit anschließender Attributberechnung bestimmt.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass der Informationsgehalt redundanter Messungen voll ausgeschöpft wird. Die Genauigkeit der Scheitelpunkte im Überlappungsbereich von Datensätzen ist höher als die Genauigkeit der Einzelmessungen. Sie ist auch höher, als die Genauigkeit der durch den Marching-Cubes-Algorithmus interpolierten Punkte. Zusätzliche Attribute lassen sich einfach auf die integrierte Oberflächenbeschreibung übertragen.

Das Verfahren wurde anhand mehrerer Datensätze getestet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6 dargestellt. Sie lassen eine Reihe von Möglichkeiten für zukünftige Verbesserungen erkennen:

Geschwindigkeitsoptimierung: Während die Geschwindigkeit des Integrationsverfahrens für viele Offline-Anwendungen ausreicht, sind für Online-Anwendungen zusätzliche Optimierungen notwendig. Die Geschwindigkeit des Verfahrens wird weitgehend durch die Berechnung der nächsten Punkte bestimmt. Sie findet im asymptotischen Sinne in konstanter Zeit statt und ist damit unabhängig von der Größe der einzelnen Datensätze. Die Größe der Konstante wird jedoch durch die Prozessierungsparameter bestimmt. Wird eine große Gitterweite bei der Topologierekonstruktion gewählt, so ergibt sich ein großer Suchradius bei der Bestimmung nächster Punkte und damit eine große Konstante. Wird die Gittergröße dagegen klein gewählt, kann die Nächste-Punkt-Suche sehr schnell erfolgen. Sie muss dann jedoch viel häufiger durchgeführt werden. Die optimale Wahl der Gittergröße, welche auch andere Aspekte wie Abtastdichte etc. berücksichtigen muss, kann daher zu einer Steigerung der Geschwindigkeit beitragen. Anwendungsspezifische Lösungen

könnten, z.B. durch Ausnutzen der Sensorgeometrie [Blais und Levine 1995], unter Verzicht auf die allgemeine Anwendbarkeit der Lösung eine zusätzliche Beschleunigung ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit zur Geschwindigkeitsoptimierung ergibt sich durch Parallelisierung.

Schwellwerte: Das Verfahren setzt die Vorgabe einer Reihe von Schwellwerten, z.B. die Gitterweite bei der Topologierekonstruktion, voraus. Es wäre wünschenswert, wenn diese Schwellwerte automatisch anhand des Datmaterials bestimmt würden. Alternativ dazu ist auch die interaktive Bestimmung der Schwellwerte über eine Vorschaufunktion unter Verwendung eines kleinen Objektausschnittes vorstellbar.

Objektränder: Das endgültige Dreiecksnetz ergibt sich durch das Unterteilen bereits vorhandener Dreiecke. Die Auflösung der Ränder wird daher durch die Wahl der Gitterweite bei der Topologierekonstruktion bestimmt. Um diese zu erhöhen müssen die Randbereiche besonders behandelt werden (z.B. mittels „Netzwachstum“ [Karbacher 1997]). Abbildung 93 zeigt die Auflösung der Ränder eines gemessenen und eines rekonstruierten Datensatzes.

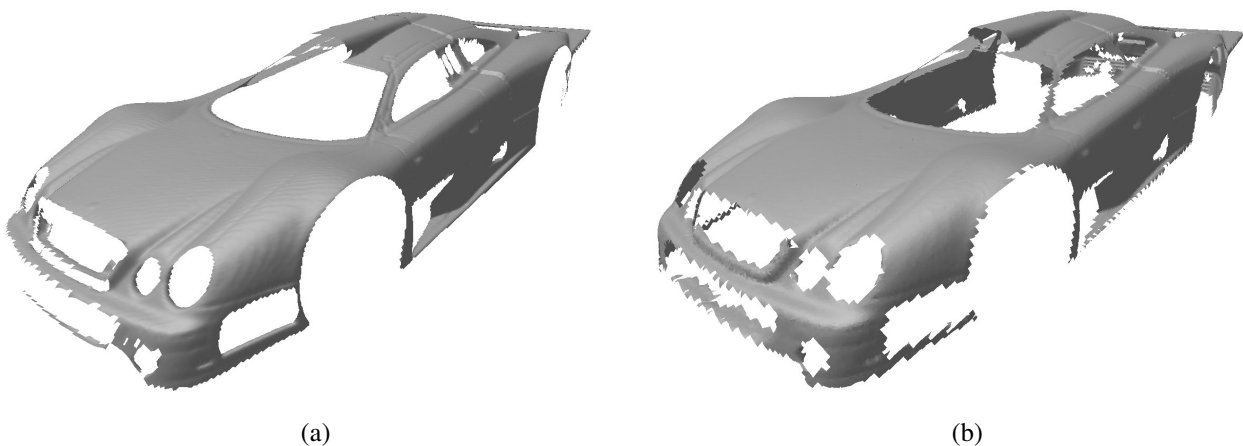


Abbildung 93: (a) Ansicht einer Einzelmessung. (b) Ansicht des integrierten Datensatzes. Die Ränder wirken „ausgefranst“, da deren Auflösung durch die Gitterweite bei der Topologierekonstruktion bestimmt wird.

Datenkonsistenz: Bei ausgeprägten Undulationen unterhalb der Gitterweite der Topologierekonstruktion kann es bei der Rückprojektion zu Selbstüberschneidungen kommen. Diese werden teilweise bereits durch Konsistenztests detektiert und korrigiert. Durch zusätzliche Konsistenzbedingungen (z.B. Vergleich der Orientierung mit Nachbardreiecken oder Überprüfung auf Schnitt) lässt sich die Konsistenz der Ergebnisse weiter steigern.

Schließen von Lücken: Manche Aufgaben erfordern die Ableitung „wasserdichter“ Modelle und damit das Schließen von Lücken in der rekonstruierten Oberfläche. Dies kann auf einfache Weise dadurch erreicht werden, dass die Konsistenzbedingungen bei der Berechnung nächster Punkte gelockert werden und korrespondierende Punkte auf den Objekträndern zugelassen werden. Dadurch ergibt sich bei der Topologierekonstruktion eine geschlossene Oberfläche, falls die Lücken kleiner als die gewählte Gitterweite sind. Es sind dann jedoch zusätzliche Maßnahmen notwendig, um die Konsistenz der Triangulierung nach der Rückrechnung auf die Ausgangsdaten sicherzustellen, da alle Punkte im inneren der Lücke auf die Randkanten gerechnet werden. Das Verfahren ist in dieser Form bereits implementiert. Die Sicherstellung einer konsistenten Triangulierung stellt jedoch teilweise ein Problem dar. Es wäre daher besser, wenn Lücken explizit detektiert und durch zusätzliche Dreiecke geschlossen würden.

5 Bezug zur industriellen Qualitätskontrolle

5.1 Einleitung

Die industrielle Fertigungsmesstechnik stellt einen wichtigen Faktor für einen funktionierenden Produktionsablauf dar. Ohne die Einhaltung spezifizierter Toleranzen wäre z.B. die globalisierte Produktion von Gütern undenkbar. Erst durch eine konsequente Überwachung der Produktionsqualität wird es möglich, negative Trends in der Produktion zu erkennen und rechtzeitig steuernd entgegenzuwirken. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist für eine optimale Produktion die frühzeitige Erkennung von Defekten wünschenswert, um Ausschussteile bereits vor Verarbeitungsschritten mit großer Wertschöpfung auszuschneiden.

Aufgrund immer komplexer gestalteter Werkstücke, kleinerer Toleranzen und der immer häufiger gestellten Forderung nach einer 100%-Kontrolle sind die Ansprüche an die Messtechnik stark gestiegen. Sie unterliegt daher einer Reihe von Anforderungen:

- Hohe Messgeschwindigkeit
- Hohe Messgenauigkeit
- Hohe Zuverlässigkeit
- Einfache Bedienbarkeit
- Automatisierbarkeit
- Flexibilität (Ableitung verschiedener Merkmale wie Maße, Lage, Form)
- Online-Anbindung an Prüfspezifikation / Qualitätssicherungssystem
- Ableitung interpretierbarer Daten und Rückkopplung in die Produktion
- Visualisierungsmöglichkeiten
- Geringe Kosten (Anschaffung, Folgekosten)

Beim Messen und Prüfen von Werkstücken wird in Grob- und Feingestalt der Werkstücke unterschieden. Bei der Grobgestalt handelt es sich häufig um eine Kombination von Standardformelementen wie Ebenen, Zylinder, Kegel etc. Bei der Prüfung der Grobgestalt werden Maß- und Formabweichungen dieser Standardformelemente sowie deren Beziehungen (z.B. Rechtwinkligkeit etc.) und Lage zueinander erfasst und auf Basis ihrer Spezifikation bewertet. Es treten aber auch mathematisch komplizierter zu beschreibende Formen wie z.B. Freiformflächen auf. Unter der Feingestalt versteht man dagegen die Welligkeit und Rauheit einer Werkstückoberfläche.

Ein typischer Prüfablauf für die Überprüfung der Grobgestalt eines Werkstücks besteht aus folgenden Schritten:

Messung: Zunächst werden die Messdaten mit Hilfe des Messgerätes erfasst.

Korrektur: Die erfassten Messwerte unterliegen häufig einer Reihe von Fehlereinflüssen. Viele dieser Fehlereinflüsse sind systematischer Natur. Sie können durch eine Kalibrierung des Messgerätes erfasst und korrigiert werden (z.B. Korrektur für Tastkugelradius bei Koordinatenmessmaschinen oder Verzeichnungskorrektur bei optischen Sensoren).

Transformation: Die Festlegung der Toleranzen bezieht sich gewöhnlich auf ein Bezugskoordinatensystem. Für die Berechnung der Abweichungen von der Spezifikation müssen die Messdaten daher in das Bezugskoordinatensystem transformiert werden.

Berechnung: Anhand der transformierten Messdaten werden die zu überprüfenden Größen berechnet. Bei diesen Größen handelt es sich beispielsweise um Strecken, Geometrielemente, Formabweichungen etc.

Interpretation: Die berechneten Größen werden mit ihrer Spezifikation verglichen und auf eine Überschreitung der Toleranzgrenzen hin überprüft. Die Ergebnisse werden dokumentiert und statistisch ausgewertet. Häufig ist auch eine Klassifizierung der Fehler gefordert, um korrigierend in den Produktionsprozess eingreifen zu können.

Präsentation: Die Ergebnisse müssen in einer geeigneten Form präsentiert werden. Neben quantitativen Angaben werden die Ergebnisse häufig auch visuell, z.B. mit Hilfe einer farbkodierten Darstellung der Abweichungen, präsentiert.

Aufgrund der erhöhten Ansprüche hat sich in den letzten Jahren ein Wandel in der industriellen Messtechnik vollzogen, welcher von der Messung geometrischer Formelemente mit Hilfe weniger Punkte hin zur Erfassung einer großen Anzahl von Messpunkten geht, mit welchen die zu ermittelnden Größen durch Ausgleichungsverfahren bestimmt werden. Auch der zunehmende Freiformflächenanteil macht eine dichtere Erfassung der Werkstückoberfläche notwendig. Insbesondere im Designbereich wird die dichte Erfassung der Oberfläche zur Ableitung einer CAD-tauglichen Beschreibung mehr und mehr zum Standard.

Taktile Koordinatenmessmaschinen (vergl. Abschnitt 2.1.1) haben sich für die vielfältigen Aufgaben der Mess- und Prüftechnik als Standardtechnik durchgesetzt. Sie verfügen über eine sehr hohe Messgenauigkeit und einen grossen Dynamikbereich von mehr als 1:1.000.000, welcher prinzipbedingt von optischen Sensoren nicht erreicht werden kann [Häusler 2001]. Darüberhinaus können sie mit Hilfe verschiedener Messtaster auch Bereiche des Prüflings erreichen, zu denen keine Sichtverbindung besteht. In der Messgeschwindigkeit sind sie optischen Sensoren jedoch weit unterlegen. Es ist daher zu erwarten, dass beide Techniken in Zukunft koexistieren. Für Anwendungen, in denen die Genauigkeit optischer Sensoren ausreichend und die dichte Erfassung sichtbarer Objektbereiche notwendig ist, werden optische Messsysteme in Zukunft mit zu den Standardtechniken gehören.

Während dieser Schritt im Designbereich bereits weitgehend vollzogen ist, mangelt es den optischen Sensoren in der Fertigungsmesstechnik jedoch noch an breiter Akzeptanz. Ein Grund dafür ist das Fehlen von Normen für die Abnahme und Überwachung solcher Systeme. Im Fall der Koordinatenmessmaschinen existieren hierfür Vorschriften auf nationaler und internationaler Ebene [ISO 10 360-2 1997; VDI/VDE 2617 1986-1998]. Um diesen Missstand zu beheben, arbeitet derzeit der GMA/DGPF-Fachausschuss 3.32 „Optische 3D-Messtechnik“ an der Ausarbeitung der VDI/VDE Richtlinie 2634, um die Abnahme optischer Messsysteme zu vereinheitlichen [VDI/VDE 2634-1 2000; VDI/VDE 2634-2 2000].

Ein wesentliches Problem optischer Messsysteme ist, dass die erzielbare Messgenauigkeit über das Messvolumen hinweg nicht konstant ist, sondern von einer Reihe von Faktoren wie der verwendeten Sensorhardware, der Aufnahmegeometrie sowie von der Form und den Oberflächeneigenschaften des zu erfassenden Objekts abhängt.

5.2 Berücksichtigung der Messunsicherheit

Das Prüfen eines Merkmals dient dazu, festzustellen, ob das Merkmal mit seiner Spezifikation übereinstimmt oder nicht. Für eine sichere Aussage über die Einhaltung bzw. Nichteinhaltung der Spezifikation ist die Kenntnis der Unsicherheit eines Messergebnisses notwendig. Bei Kenntnis der Unsicherheit kann ein sogenannter Unsicherheitsbereich festgelegt werden, in welchem keine sichere Aussage getroffen werden kann. Unter Verwendung dieses Unsicherheitsbereiches kann dann eine Entscheidung über die Qualität des Prüflings z.B. nach [DIN EN ISO 14253-1 1999] erfolgen (vergl. Abbildung 94).

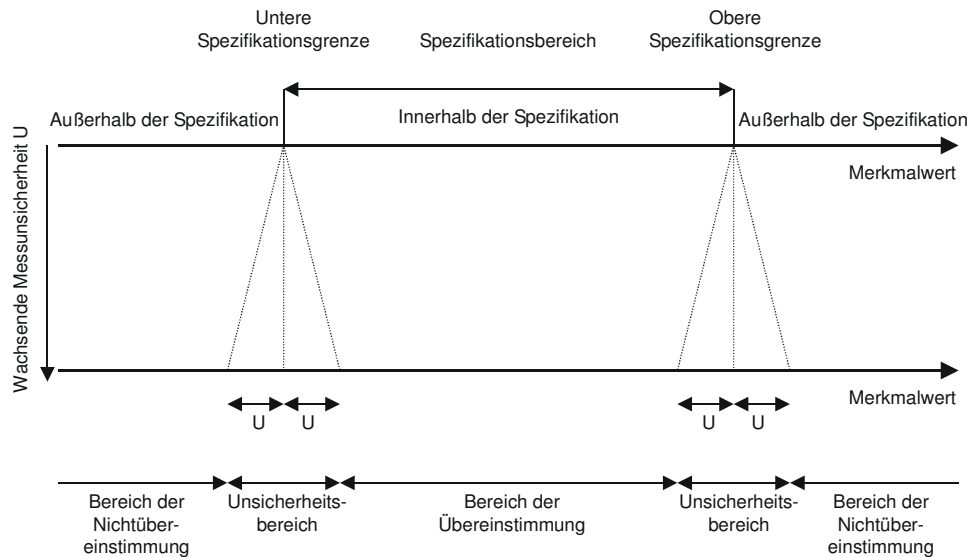


Abbildung 94: Festlegung der Bereiche für die Entscheidung über die Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen nach [DIN EN ISO 14253-1 1999].

Die Festlegung der Messunsicherheit U ist für die Beurteilung der Messergebnisse von großer Bedeutung. Der Iso-Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, [GUM 1995], gibt daher Hinweise, wie man die Gesamtmessunsicherheit aus einzelnen Einflußgrößen bestimmt (Abbildung 95).

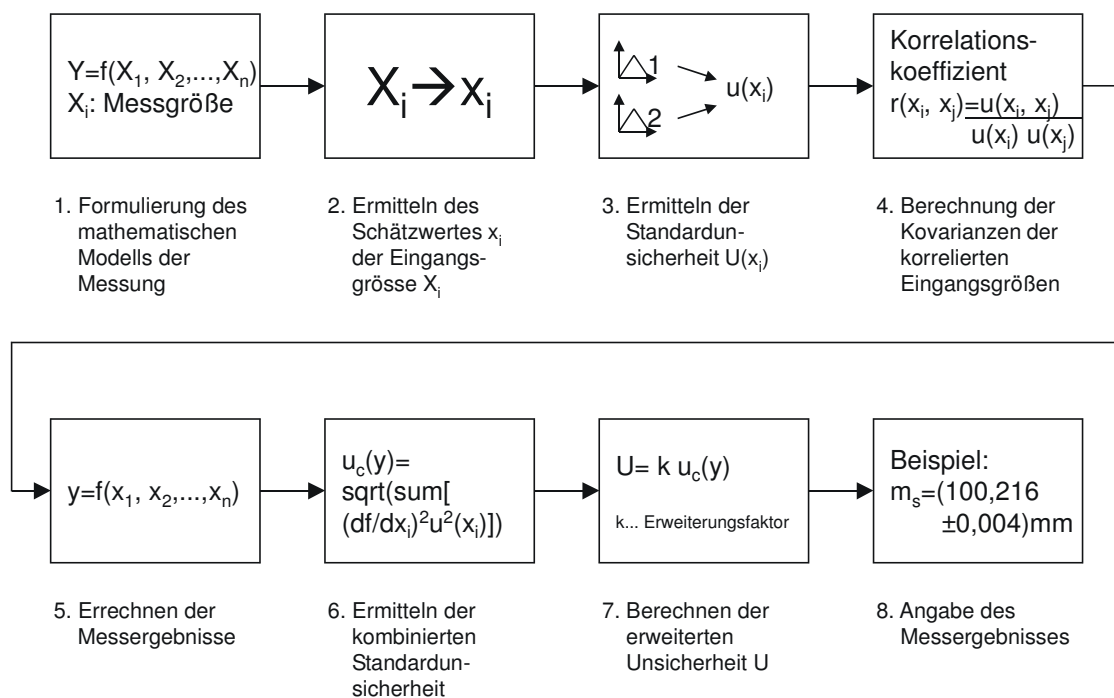


Abbildung 95: Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit nach GUM.

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Techniken erlauben es, für jeden gemessenen Punkt $\hat{\mathbf{x}}_i$ dessen Positionsunsicherheit, beschrieben durch dessen Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}_i}$, anzugeben. Sie kann dazu verwendet werden, die Unsicherheit der Messergebnisse zu bestimmen, welche aus der analytischen Auswertung der Messpunkte erzeugt werden. Häufig geschieht dies über das Bestimmen von Ersatzelementen wie Ebenen oder Zylinder.

Zur Ableitung des Prüfergebnisses werden aus diesen Messergebnissen dann Aussagen über die zu untersuchenden Merkmale abgeleitet:

Masstoleranzen: Zur Überprüfung von Masstoleranzen wird das aus den Messdaten abgeleitete Ist-Mass mit dem funktionell erforderlichen Mass verglichen.

Formtoleranz: Zur Überprüfung der Formtoleranz wird die Formabweichung mit der spezifizierten Formtoleranz verglichen. Die Einhaltung der Formtoleranz ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass alle Messpunkte nach dem Einpassen in die Sollgestalt innerhalb der spezifizierten Toleranzzone liegen.

Lageabweichungen: Zur Überprüfung der Lageabweichungen werden die Lageparameter der Ersatzelemente unter Berücksichtigung der Formabweichungen kombiniert. Die Ergebnisse werden dann auf die Einhaltung des Toleranzbereichs hin bewertet.

5.3 Anwendungsbeispiel: Formprüfung

In diesem Abschnitt wird die Formprüfung eines Objekts mit erheblichem Freiformflächenanteil demonstriert. Bei dem Objekt handelt es sich um einen Sandkern, welcher aus gesintertem Sand gefertigt ist. Sandkerne dienen dazu, beim Gießen von Metall Hohlräume freizuhalten. Der verwendete Sandkern dient zur Definition der Auslassventile eines Motorblocks. Nach dem Erstarren des Metalls werden die Sandkerne durch Rütteln zerstört und ausgewaschen.

Die Geometrie des verfügbaren CAD-Modells in diesem Beispiel stimmt leider nur näherungsweise mit dem tatsächlichen Objekt überein, so dass keine realistischen Schwellwerte verwendet werden konnten. Grundgedanke ist jedoch, dass die punktweise Verfügbarkeit von Genauigkeitsinformation bei der Entscheidung über die Qualität eines Prüflings berücksichtigt wird.

Dies geschieht durch das Ansetzen eines Tests, welcher über die Signifikanz von Abweichungen zwischen gemessener Oberfläche und CAD-Modell entscheidet.

Aus der Kovarianzmatrix Σ des Punktes wird die Unsicherheit der berechneten Abweichung σ_{dev} in Richtung auf den korrespondierenden Punkt des CAD-Modells berechnet und die Entscheidung über die Signifikanz der Abweichung gemäß folgender Tabelle gefällt:

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. $dev_i - t_{dev} > c\sigma_{dev_i}$ | inkompatibel |
| 2. $t_{dev} - c\sigma_{dev_i} < dev_i$ | möglicherweise inkompatibel |
| 3. $t_{dev} - c\sigma_{dev_i} > dev_i$ | kompatibel |

Die Konstante c legt dabei das Signifikanzniveau α fest. Unter der Annahme, dass die Abweichungen einer Normalverteilung genügen, entspricht $c = 3$ einem Signifikanzniveau von $\alpha \approx 99\%$.

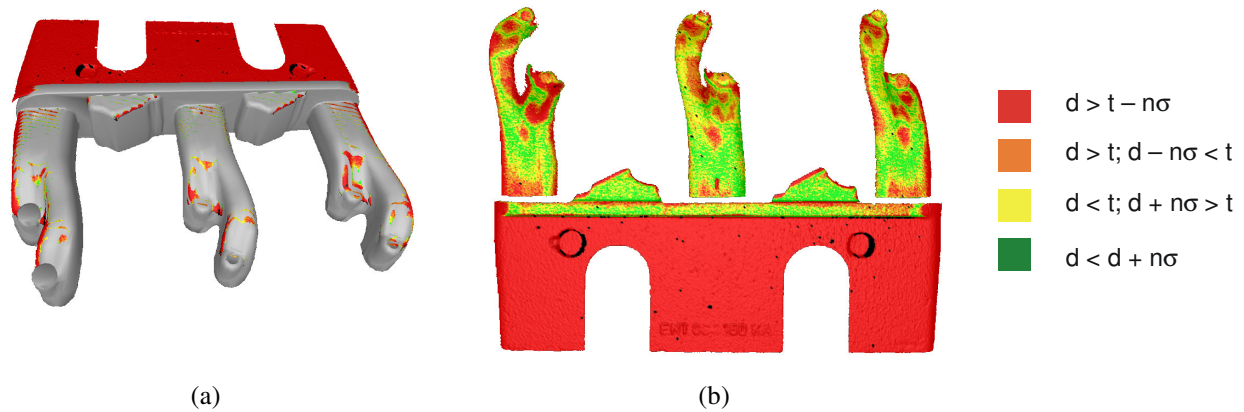


Abbildung 96: Soll-Ist-Vergleich unter Berücksichtigung der statistischen Sicherheit der Abweichungen. In den hell- und dunkelgelben Bereichen konnte die Entscheidung nicht mit der geforderten statistischen Sicherheit α getroffen werden.

5.4 Diskussion

In diesem Kapitel wurde der Bezug zur Mess- und Prüftechnik als mögliches Anwendungsgebiet der in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Verfahren hergestellt. Die Besonderheit dabei ist, dass unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Information über die Unsicherheit der abgeleiteten Oberflächenbeschreibungen die Signifikanz von Prüfergebnissen einer statistischen Prüfung unterzogen werden kann.

Für praktische Anwendungen müssen die zur Ableitung der Prüfergebnisse verwendeten Programme dahingehend modifiziert werden, dass sie diese zusätzliche Information auch tatsächlich berücksichtigen. Ausserdem ist mit Hilfe geeigneter Testkörper zu prüfen, inwieweit die berechneten Genauigkeiten mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

6 Ergebnisse der Oberflächenrekonstruktion

6.1 Beschreibung der Software

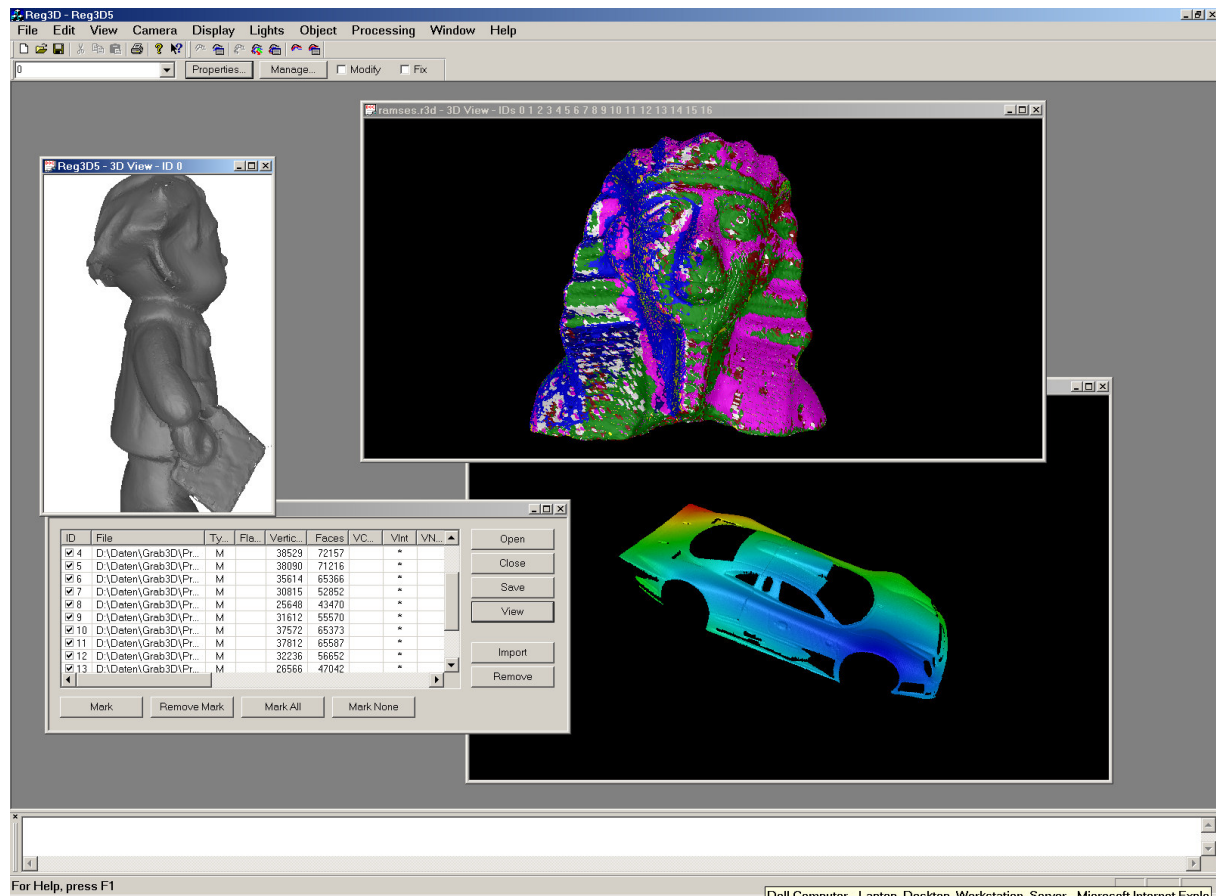


Abbildung 97: Bildschirmansicht einer Sitzung mit dem zur Registrierung und Objektrekonstruktion entwickelten Programm „Reg3D“.

Zur Demonstration und Prüfung der Verfahren zur Registrierung, Integration und Prüfung wurde ein weiteres Programm entwickelt. Das *Reg3D* genannte Programm erlaubt mehrere Datensätze über eine auf Microsoft Windows und OpenGL basierte, interaktive Benutzeroberfläche dreidimensional zu betrachten und zu manipulieren. Alle Parameter der Verfahren sind über Dialoge zugänglich. Zu den Möglichkeiten des Programms gehören:

Implementierung der Verfahren: Die Software realisiert die in den Kapiteln 3-5 beschriebenen Verfahren.

Interaktive Bestimmung der Näherungstransformation: Es ist möglich, die Datensätze beliebig interaktiv gegeneinander zu verschieben und zu rotieren.

Visualisierung des Fortschritts der Verfahren: Die Verfahren zur Registrierung arbeiten iterativ. Der Verlauf der Registrierung kann visuell durch die periodische Darstellung der Zwischenergebnisse nach einer beliebigen Zahl von Iterationen überprüft werden.

Abfrage der Daten: Die Primitive Scheitelpunkte und Dreiecke können mit der Maus angewählt und die dazugehörige Information (Farbe, Normalenrichtung, Kovarianzmatrix etc.) abgefragt werden.

Fehlersimulation: Das Programm erlaubt es, Fehler nach verschiedenen Fehlermodellen an den Daten anzubringen und die entsprechende Information über das Fehlermodell mit den Scheitelpunkten zu speichern und zu verwalten.

Extraktion von Teilflächen: Teile von Datensätzen lassen sich interaktiv markieren und extrahieren.

Verwaltung von Attributen: Mögliche Attribute von Objekten sind: Kovarianzmatrizen für Punkte / Transformationen, Scheitelpunktnormalen, Scheitelpunktfarbe (RGB), Scheitelpunktintensität, Flächennormalen, Flächenfarben und Objektfarbe.

Verschiedene Render-Modi: Für die Untersuchung der Daten sind verschiedene Darstellungsformen implementiert (Punktmodus, Gittermodus, Flächenmodus, Stereomodus). Darüberhinaus ist auch eine Funktion zur dynamischen Ausdünnung der Dreiecksflächen implementiert. Dadurch wird die Interaktion mit großen Datensätzen möglich.

Datenimport / -export: Das Programm verfügt über verschiedene Schnittstellen für den Datenimport / -export.

6.2 Überblick über die Datensätze

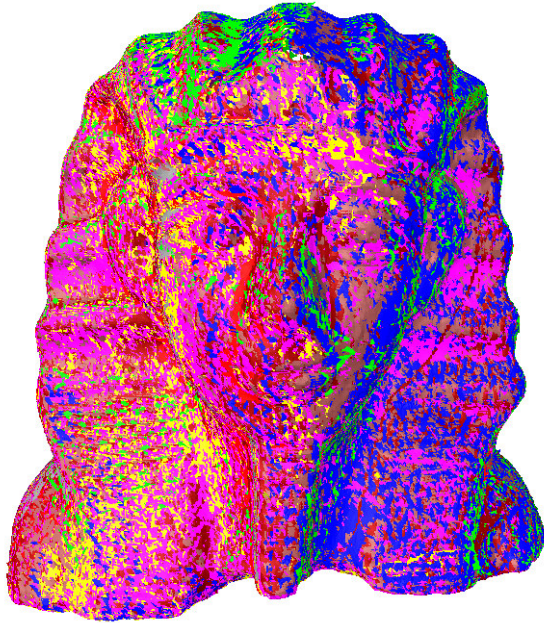
Die Datensätze wurden mittels der Software Grab3D unter Verwendung des Sensorsystems 1 (ABW Projektor, 1 Kamera mit kalibriertem Projektor) erfasst und mit der Software Reg3D weiterverarbeitet. Die angegebenen Zeiten wurden auf einer Dell Precision Workstation 530 mit 1,4 GHz Pentium 4 Xeon-Prozessor und 1 GB Hauptspeicher ermittelt.

Tabelle 10: Überblick über die prozessierten Datensätze

	<i>Ramses</i>	<i>Samdkern</i>	<i>Modellauto</i>	<i>Künstler</i>
Material	Sand / Kunstharz	Gesinterter Sand	Lackierter Kunststoff	Gips
Ausdehnung ($X \times Y \times Z$) [mm]	147 × 181 × 175	219 × 168 × 65	207 × 91 × 113	128 × 171 × 91
Ausgangsdaten				
Anzahl Datensätze	17	13	6	25
Anzahl Punkte	2 082 909	1 336 287	323 283	100 690
Anzahl Dreiecke	3 934 512	2 608 591	622 950	175 306
Auflösung [mm]	0,45	0,45	0,45	1
Registrierung				
Anzahl Verknüpfungspunkte	20 140	12 148	3655	7905
Anzahl Iterationen	35	50	50	150
Fehler vor Gesamtausgleichung	0.1282	0.0622	0.0955	0.1076
Fehler nach Gesamtausgleichung	0.0021	0.0069	0.0023	0.0020
Dauer [min:s] (Initialisierung / Iterationen)	11:03 / 3:18	7:40 / 9:00	1:40 / 3:34	2:40 / 28:40
Integration – Topologierekonstruktion				
Anzahl Punkte (vor / nach Netzoptimierung)	40 521 / 26 437	8 217 / 7 695	34 337 / 21 968	14 885 / 9 858
Anzahl Dreiecke (vor / nach Netzoptimierung)	79 469 / 51 280	15 102 / 14 060	64 556 / 39 818	20 832 / 17 858
Auflösung [mm]	2,3	3,4	1,15	2,3
Dauer [min:s]	67:20	20:56	24:54	13:24
Integration – Netzverdichtung				
Anzahl Punkte	1 214 406	453 414	146 036	255 353
Anzahl Dreiecke	1 238 727	459 636	163 882	263 259
Auflösung [mm]	0,6	0,6	0,5	0,6
Dauer [min:s]	24:48	6:50	1:20	4:16

6.3 Datensatz „Ramses“

Der Datensatz umfasst insgesamt 17 Ansichten einer aus Sand und Kunstharz gegossenen Figur. Die Erfassung erfolgte von allen Richtungen aus und weist nur wenige Lücken auf.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 98: Datensatz Ramses – Frontansicht: (a) Registrierte Datensätze nach der Mehrdatensatzregistrierung. Die Interpenetration der Datensätze zeigt, dass die Fehler gut verteilt sind. (b) Grobes Netz nach der Topologierekonstruktion. (c) Ergebnis der Netzverdichtung. (d) Darstellung des Ergebnis der Netzverdichtung mit Intensität pro Scheitelpunkt.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 99: Datensatz Ramses: (a) Seitenansicht in schattierter Darstellung. (b) Seitenansicht, dargestellt mit Intensität pro Scheitelpunkt. (c) Schattierte Darstellung mit Sicht auf die Bodenfläche. (d) Dieselbe Darstellung mit Intensität pro Scheitelpunkt.

6.4 Datensatz „Sandkern“

Das Objekt „Sandkern“ ist aus gesintertem Sand gefertigter Sandkern und weist in seinem vorderen Bereich einen hohen Freiformflächenanteil auf. Es wurde mit 13 Aufnahmen von verschiedenen Richtungen erfasst. Aufgrund seiner komplexen Struktur weist der Datensatz einige Lücken auf. Die Erfassung dieser Stellen in nahezu symmetrischen Objektbereichen zeigt, dass durch zusätzliche Aufnahmen eine Gesamterfassung erreicht werden könnte.

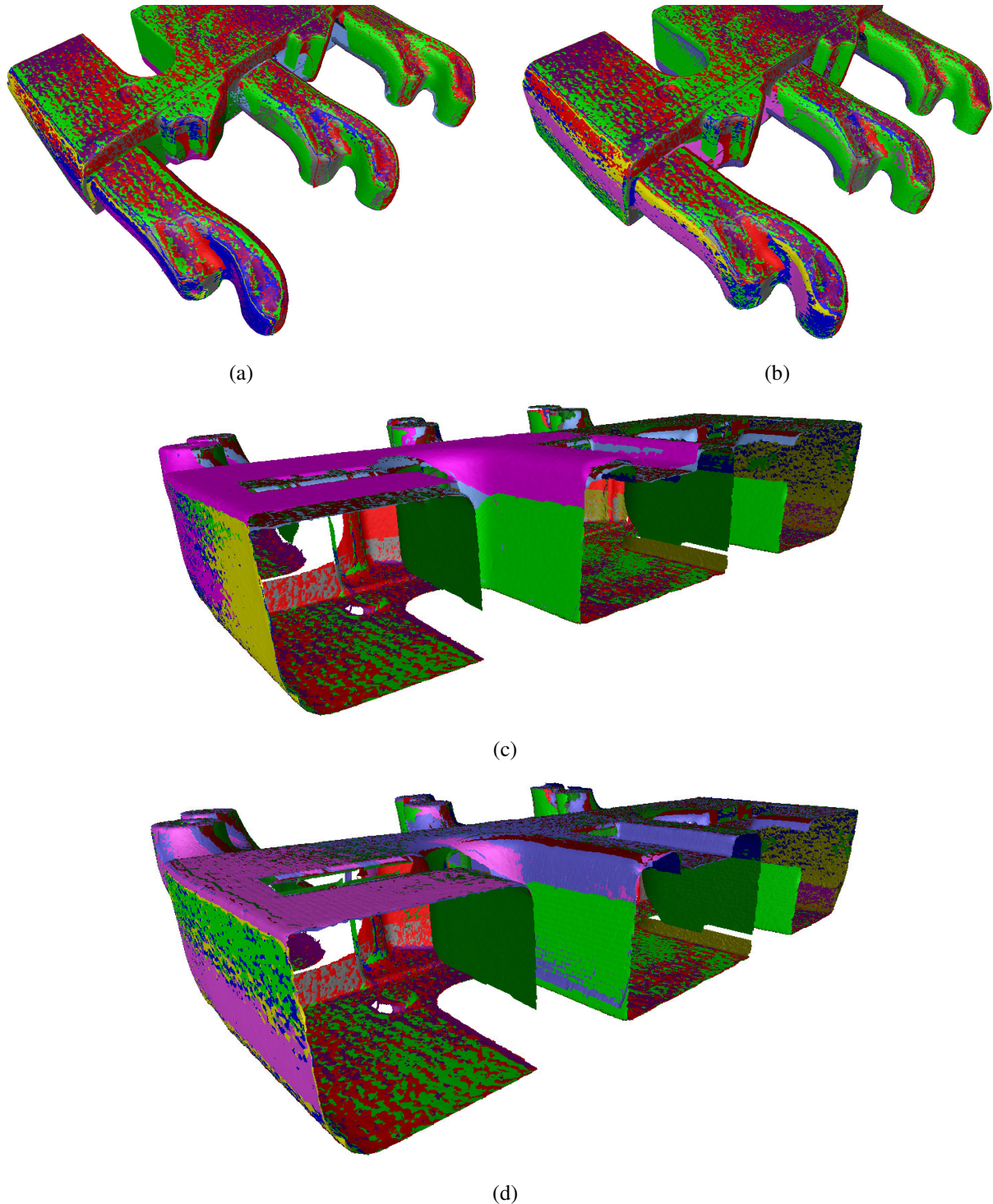
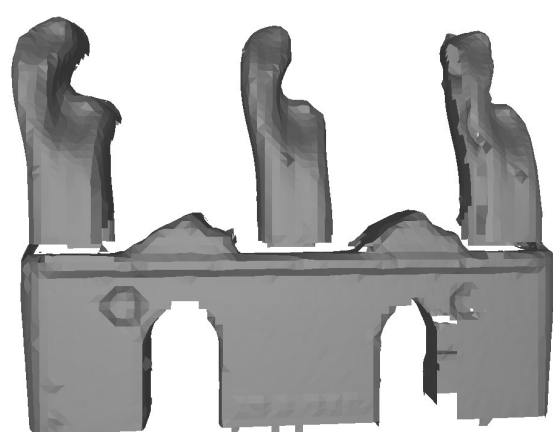
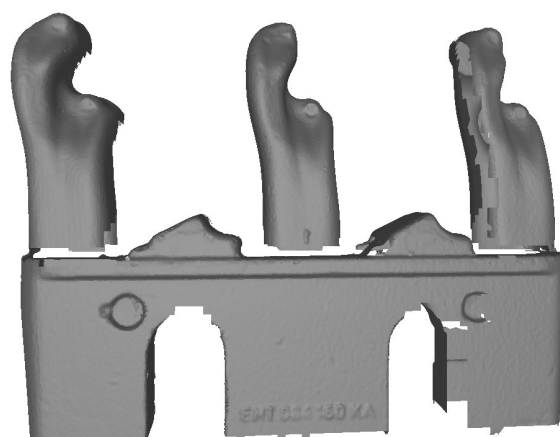


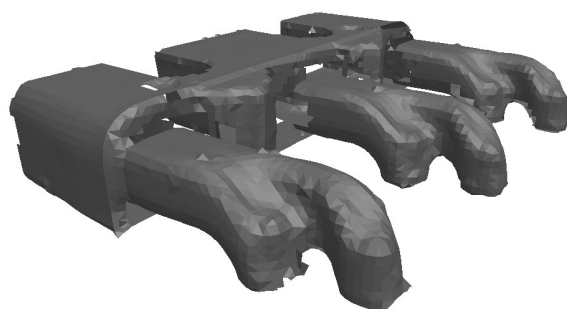
Abbildung 100: Datensatz „Sandkern“. (a) Ergebnis der paarweisen Registrierung. (b) Ergebnis der simultanen Registrierung der Datensätze. (c) Fehlerhafte Rekonstruktion der Bodenschicht nach der paarweisen Registrierung. (d) Korrekte Wiedergabe der Geometrie nach der Mehrdatensatzregistrierung.



(a)



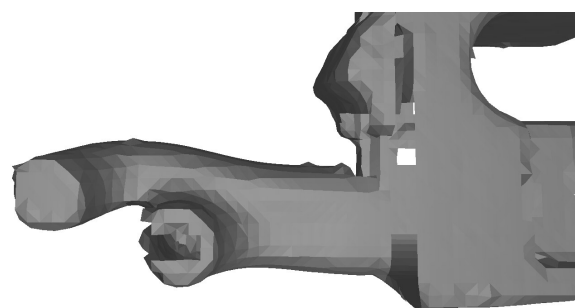
(b)



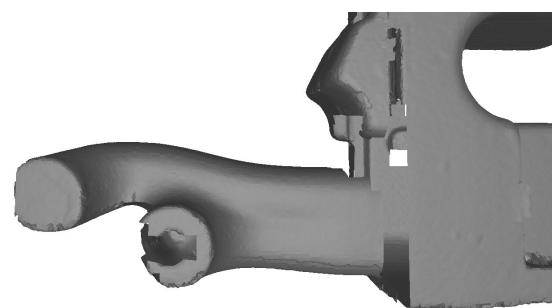
(c)



(d)



(e)

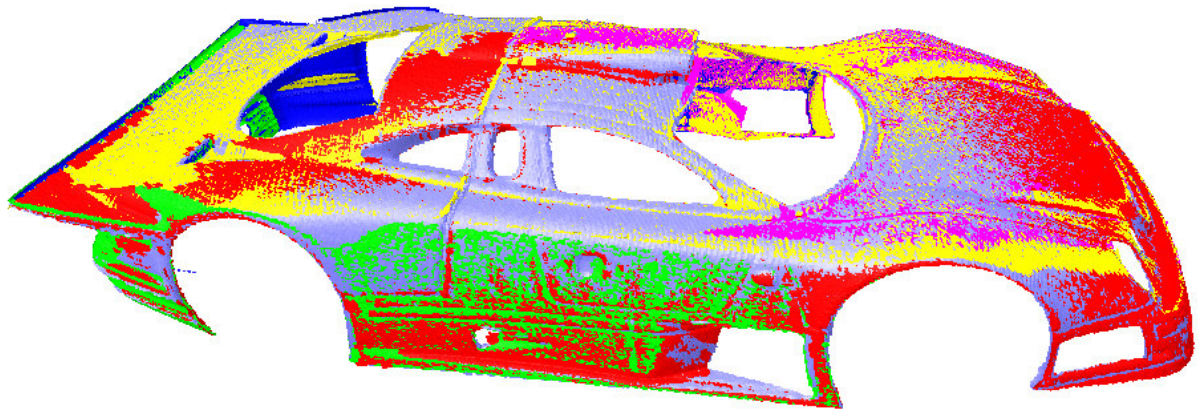


(f)

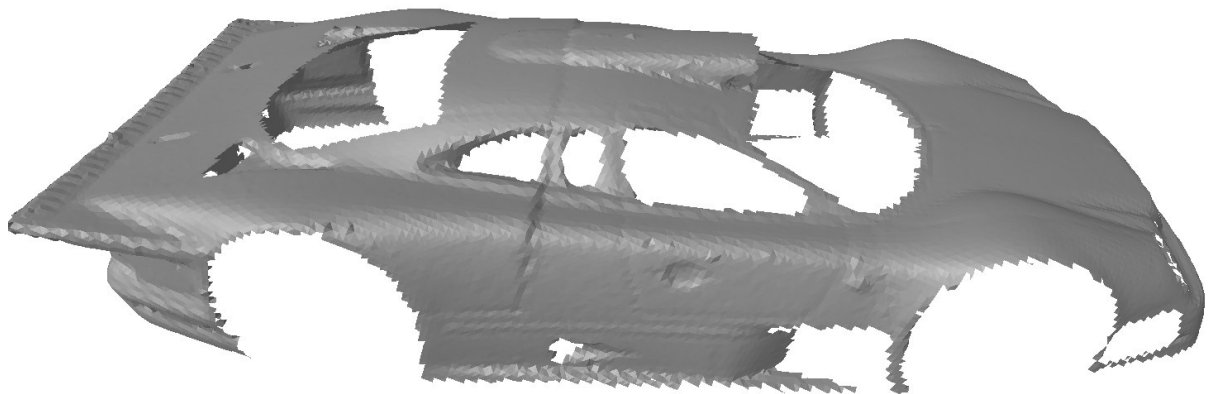
Abbildung 101: Datensatz „Sandkern“: (a), (c), (e) zeigen verschiedene Ansichten der Oberfläche nach der Topologie-rekonstruktion. (b), (d) und (f) zeigen die zugehörigen Ansichten nach der Netzverdichtung.

6.5 Datensatz „Modellauto“

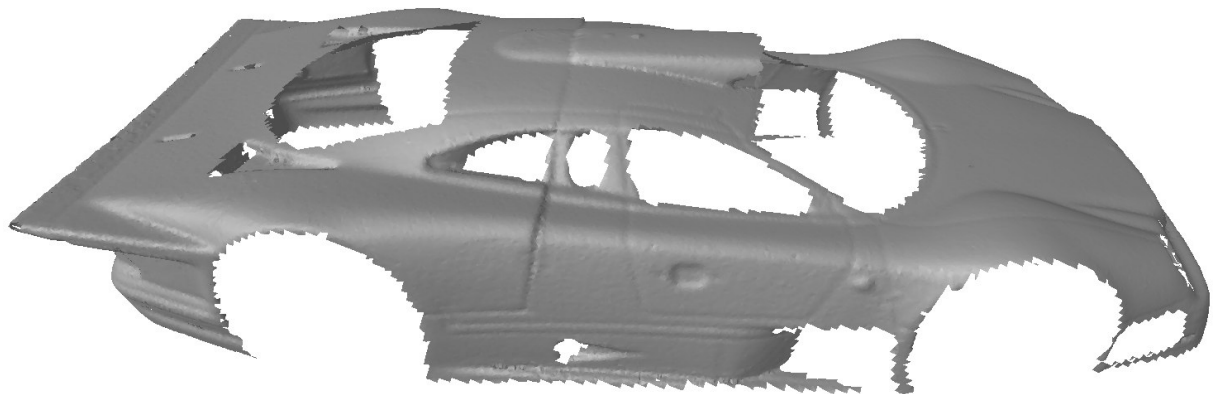
Der Datensatz besteht aus 7 Aufnahmen der Karosserie eines Kunststoff-Modellautos (Mercedes CLK). Das Objekt hat einen hohen Anteil an Freiformflächen. Es weist sehr detailreiche und dünne (z.B. Spoiler) Objektbereiche auf.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 102: Seitenansicht des Datensatzes “Modellauto” nach der paarweisen Registrierung (a), der Topologiekonstruktion (b) und der Netzverdichtung (c).

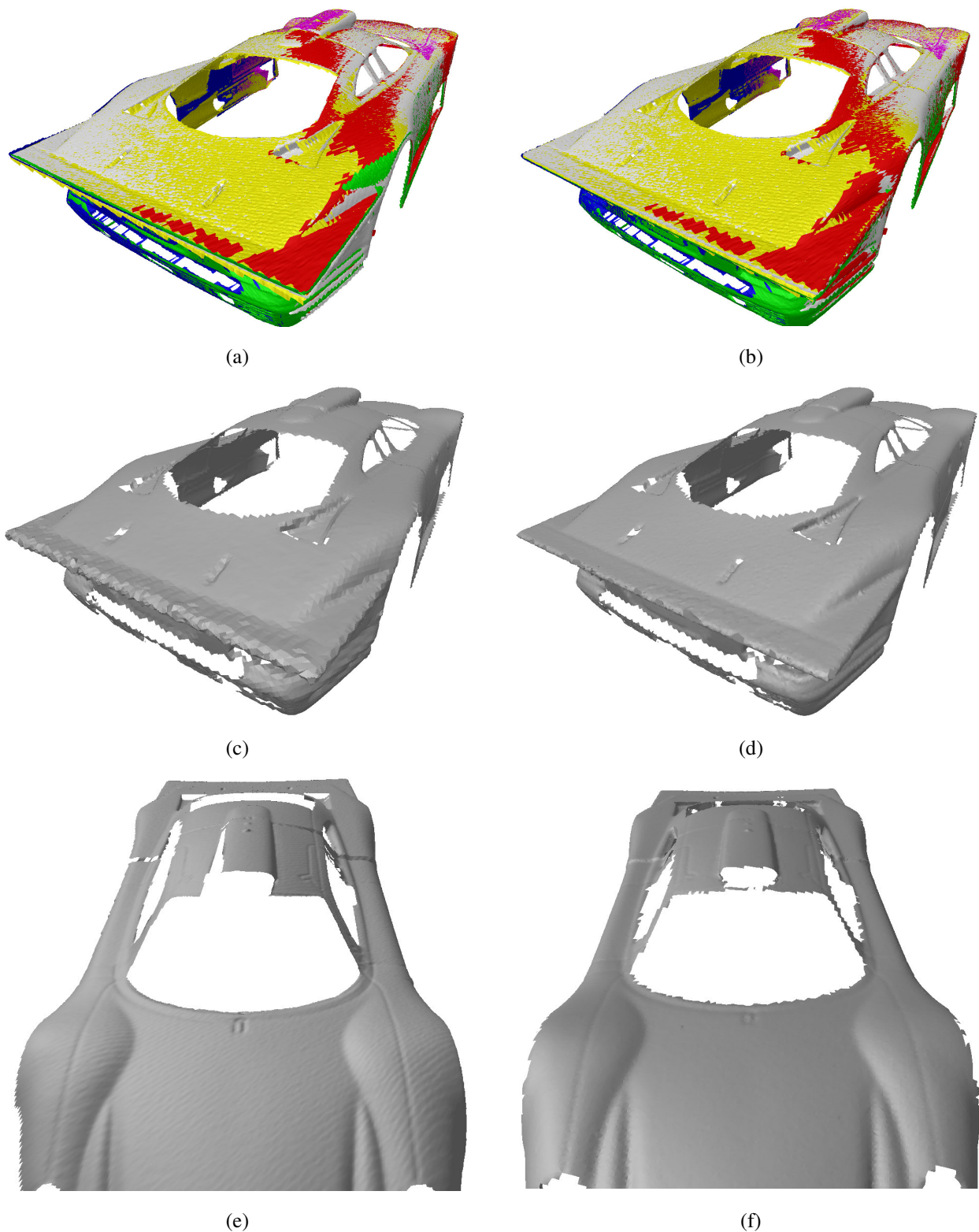


Abbildung 103: Datensatz „Modellauto“: (a) Detailansicht des Heckspoilers nach der paarweisen Registrierung. Die obere und untere Fläche durchdringen sich. (b) Nach der simultanen Registrierung aller Datensätze wurde die Geometrie korrekt wiederhergestellt. (c) Ergebnis der Topologierekonstruktion. (d) Ergebnis nach der Netzverdichtung. (e) Ansicht der triangulierten Oberfläche einer einzelnen Messung. Die schattierte Darstellung lässt eine geringfügige, periodische Struktur erkennen. (f) Durch die bei der Integration vorgenommene Mittelbildung im Überlappungsbereich ergibt sich eine glatte Oberfläche. Die relevanten Strukturen des Objekts bleiben dabei weitgehend erhalten. Die Objektränder erscheinen hingegen ausgefranst, da ihre Auflösung durch die Gitterweite bei der Topologierekonstruktion festgelegt wird.

6.6 Datensatz „Künstler“

Bei diesem Datensatz handelt es sich um eine Gipsfigur, welche sowohl detailreiche Bereiche, als auch glatte Bereiche besitzt. Der Datensatz umfasst insgesamt 25 Ansichten. Die Erfassung und Auwertung der Aufnahmen erfolgte vollautomatisch.

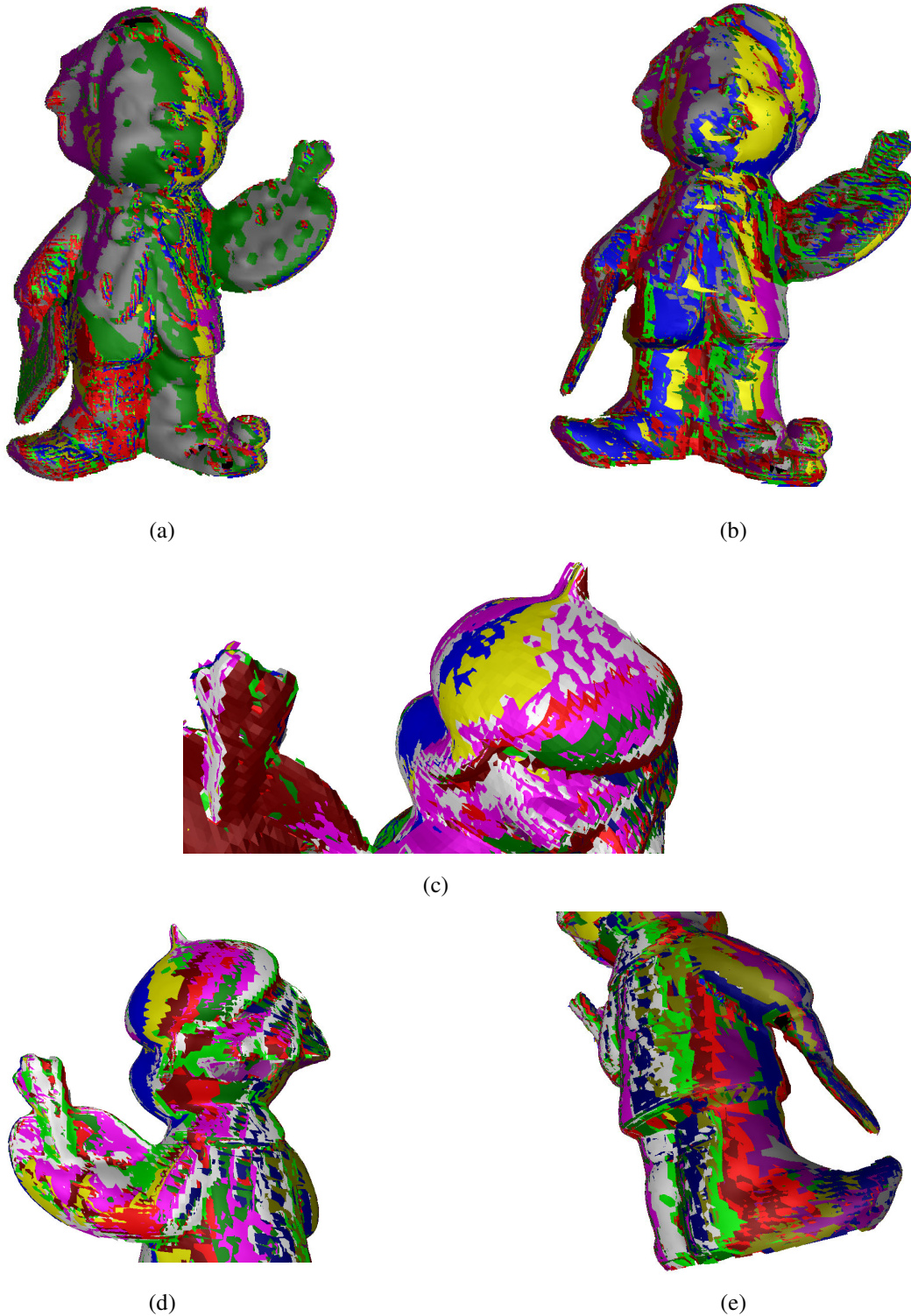


Abbildung 104: (a) Datensatz nach der paarweisen Registrierung. (b) Ergebnis der globalen Optimierung. (c) Zeigt verbleibende Restfehler nach der paarweisen Registrierung. (d) Detailaufnahme nach der Mehrdatensatzregistrierung: Die Hutspitze und die Pinsel zeigen, dass die Registrierung erfolgreich war. (e) Detailaufnahme: Nach der Mehrbildregistrierung ist die Geometrie des Buches korrekt wiedergegeben.



Abbildung 105: (a) Ergebnis der Topologierekonstruktion. (b) Ergebnis der Netzverdichtung. (c), (d) Detailaufnahmen des rekonstruierten Objekts.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine komplette Verarbeitungskette zur dreidimensionalen Oberflächenerfassung, -rekonstruktion und -prüfung vorgestellt. Die Datenerfassung basiert auf dem Prinzip der aktiven Triangulation mit strukturierter Beleuchtung und ermöglicht die Ableitung dichter Oberflächenbeschreibungen mit einer relativen Genauigkeit von bis zu ca. 1:20 000. Sind mehrere Messungen zur Erfassung eines Objekts notwendig, können diese mit Hilfe der entwickelten Verfahren in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert (registriert) und anschließend vereinigt (integriert) werden. Das Ergebnis der Integration bildet die Grundlage für den abschließenden Prüfschritt. Die Verarbeitungskette enthält damit die Schritte:

1. Datenerfassung und Systemkalibrierung
2. Registrierung
3. Integration
4. Prüfung

Eine Besonderheit stellt die durchgängige Berücksichtigung der Datenunsicherheit in allen Verarbeitungsschritten dar. Unter Verwendung einer exemplarischen Implementierung der beschriebenen Verfahren wurde die Generierung von fusionierten Modellen aus mehreren Millionen Messpunkten demonstriert.

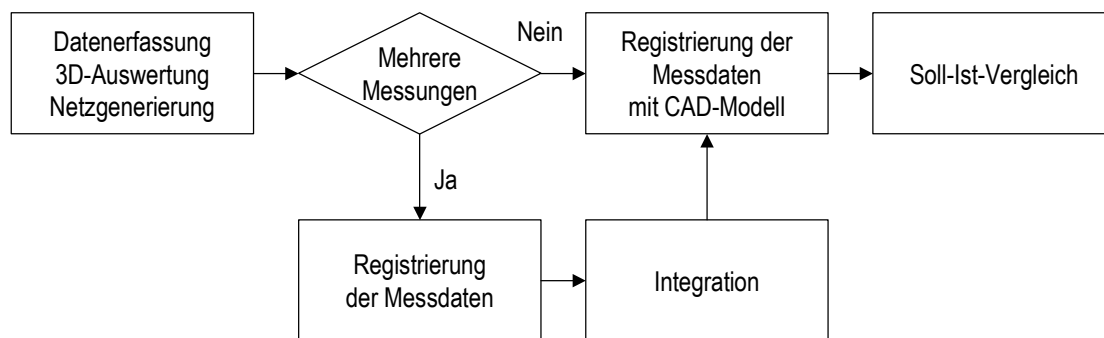


Abbildung 106: Verarbeitungskette für die industrielle Inspektion.

7.1 Datenerfassung und Systemkalibrierung

Die Datenerfassung erfolgt nach dem Prinzip der aktiven Triangulation mittels strukturierter Beleuchtung. Sie ermöglicht die Erfassung einer weiten Klasse technischer und natürlicher Objekte. Für die Musterprojektion und Bildaufzeichnung wurde ausschließlich Standardhardware verwendet. Unter der Annahme eines einfachen Reflexionsmodells (Lambertscher Reflektor) wird neben der Oberflächengeometrie auch der Reflexionsfaktor und, abhängig von der verwendeten Hardware, die Farbe der Oberfläche bestimmt. Die Auswertung erfolgt modellbasiert unter Verwendung etablierter Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie, welche auf Streifenprojektionssysteme übertragen wurden. Die Bestimmung der Parameter des zugrundeliegenden Modells erfolgt testfeldbasiert im Rahmen einer freien Bündelausgleichung. Während die Auswertung der Kalibrieraufnahmen vollautomatisch erfolgt, muss in dem realisierten System die Orientierung des Kalibrierfeldes zwischen den Aufnahmen manuell verändert werden. Durch die Verwendung neu entwickelter Streifenmuster können mehrere Kameras über einen gemeinsamen Projektor verknüpft werden, was die Benutzung von Projektoren mit instabiler innerer Orientierung ermöglicht. Die Datenerfassung kann durch die Verwendung einer Positioniereinheit vollautomatisch erfolgen, wobei verschiedene Konsistenzbedingungen die Zuverlässigkeit der Ergebnisse sicherstellen. Das Resultat der Datenerfassung bilden die Messpunkte, deren radiometrische Eigenschaften und deren Positionsunsicherheit, welche puntweise durch eine Kovarianzmatrix repräsentiert wird.

Zukünftige Verbesserungen sind vor allem durch eine Verbesserung der Hardware zu erwarten. Durch den Einsatz reflektiver LCD-Technologien wird ein höherer Kontrast der projizierten Muster möglich. Da sich die Ansteuerungslogik bei dieser Projektionstechnik hinter den Bildelementen befindet, weisen die Pixel einen höheren Füllfaktor auf. Probleme durch bewegte Teile wie bei der DMD-Technologie oder Moiré-Effekte wie bei der konventionellen LCD-Technik sind daher nicht zu befürchten. Wegen der kurzen Latenzzeit kann darüberhinaus die Messzeit durch eine schnellere Musterfolge verkürzt werden.

Um bei schwierigen Oberflächen (z.B. Glanz, stark variierender Reflexionskoeffizient) den Anteil gültiger Messwerte zu vergrößern, sind Maßnahmen zur Erhöhung des radiometrischen Dynamikbereichs des Sensorsystems notwendig. Ansätze hierzu ergeben sich einerseits durch die Verwendung neuartiger Kamertechnologien (CMOS-Kameras), andererseits durch eine enge Kopplung zwischen Musterprojektion (Intensität) und Bildakquisition (Variation von Blende und Belichtungszeit).

Für die direkte Erfassung von Farbinformation ist die Kombination der zur Messung verwendeten Monochromkameras mit einer zusätzlichen Farbkamera empfehlenswert.

Um die Kalibrierung vollständig zu automatisieren, wäre eine Aktorik mit mindestens drei rotatorischen Freiheitsgraden erforderlich.

Für eine einfachere Handhabung sollten zukünftige Systeme über ein leichtes, mobiles Design mit einer lichtstarken Projektionseinheit verfügen. Sie sollten stabil genug für den Einsatz an einer Positioniereinheit mit sechs Freiheitsgraden (Industrieroboter) sein. Dadurch wäre eine flexible, vollautomatische Kalibrierung und Objekterfassung möglich.

Es hat sich gezeigt, dass die Festlegung der idealen Positionierung des Sensors oft ein Problem darstellt. Insbesondere das Schließen von verbleibenden Lücken in den Messdaten bereitet erfahrungsgemäß Probleme. Softwareseitig ist daher ein Werkzeug wünschenswert, welches den Anwender unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen bei der Aufnahmeplanung unterstützt.

7.2 Registrierung

Zur Registrierung von Datensätzen wurden drei optimierte Varianten des Iterative-Closest-Point-Algorithmus [Besl und MacKay 1992] entwickelt. Sie ermöglichen die paarweise Registrierung von Datensätzen, die paarweise Registrierung von Datensätzen unter Verwendung von Intensitätsinformation und die simultane Registrierung mehrerer Datensätze. Das Kernstück der Verfahren ist ein Operator C , der zur Ermittlung korrespondierender Punkte dient. Er arbeitet in konstanter Zeit und bestimmt nächste Punkte auf C^0 -kontinuierlichen Oberflächen, dargestellt durch Dreiecksnetze. Verschiedene Konsistenzbedingungen machen den Operator robust gegenüber Fehlzuordnungen und ermöglichen die Registrierung von sich nur teilweise überlappenden Datensätzen. Bei der Berechnung der Transformationsparameter wird die Unsicherheit der Daten ebenso berücksichtigt, wie die durch die Definition von des Nächste-Punkte-Operators bedingte, laterale Unsicherheit in der Position der korrespondierenden Punkte, was zu einer deutlich schnelleren Konvergenz der Verfahren führt.

Verbesserungsansätze ergeben sich durch Möglichkeiten zum interaktiven Editieren der Dreiecksnetze. Darunter sind beispielsweise die von vielen kommerziellen Paketen bereitgestellten Werkzeuge zum Löschen von Objektteilen und Schließen von Lücken zu verstehen. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die Einpassung häufig anhand bestimmter, funktionskritischer Objektbereiche erfolgen sollte. Grund dafür sind Objektbereiche, deren Form entweder nicht relevant ist, oder sich sogar absichtlich ändert (z.B. Seriennummern in Form von Prägeschriften). Eine Lösung dieses Problems wäre durch die Festlegung von „Haftzonen“ und „antihaftbeschichteten“ Bereichen möglich.

Eine weiterer Ansatz für zusätzliche Untersuchungen ergibt sich in der gezielten Auswahl der Quellpunkte für die Registrierung. Abhängig von der Formulierung eines entsprechenden Operators, ist das gesamte Spektrum von der datengetriebenen Registrierung (wie sie weitgehend in dieser Arbeit betrieben wird) bis zur merkmalsbasierten Zuordnung der Datensätze möglich.

Die vollständige Erfassung der Objektoberfläche gestaltet sich vielfach ebenfalls schwierig. Während großflächige Objektbereiche in der Regel in mehreren Datensätzen enthalten sind, erfordern Objektteile im Bereich von Einbuchtun-

gen oft mehrmaliges, gezieltes Nachmessen. Abhilfe könnte durch eine weitreichende Integration von Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung und Registrierung in die Datenerfassung geleistet werden. Werden Lücken entdeckt, sollte der im vergangenen Abschnitt erwähnte Assistent zur Aufnahmeplanung Hinweise zur Durchführung der notwendigen Messungen geben.

Um die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, können verschiedene Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Die Ermittlung korrespondierender Punkte ist, da sie häufig durchgeführt wird und eine aufwändige Operation darstellt, für Optimierungen besonders geeignet. Ansätze ergeben sich einerseits durch die Parallelisierung der Berechnungen, andererseits könnte die allgemein gehaltene Implementierung des Nächste-Punkte-Operators durch eine problemspezifische Implementierung ersetzt werden. So könnte z.B. mit Hilfe der bekannten Sensorgeometrie die Suche nach dem nächsten Punkt durch die Ermittlung der Bildkoordinaten des in die Bildebene projizierten Quellpunktes mit anschließendem Auslesen der Punktkoordinaten aus den Koordinatenbildern ersetzt werden. Die derzeitige Implementierung weist zudem aufgrund ihrer Einbettung in eine Klassenbibliothek einen zusätzlichen Overhead auf.

Eine Untersuchung, inwiefern sich die entwickelten Verfahren und Optimierungen zur Übertragung auf verwandte Probleme wie die Registrierung von 3D-Kurven oder Volumendaten eignen, scheint ebenfalls sinnvoll.

7.3 Integration

Das entwickelte Verfahren zur Integration registrierter Datensätze arbeitet in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird zur Rekonstruktion der Topologie der Messpunkte ein grobes Dreiecksnetz abgeleitet. Dies geschieht über eine volumetrische Zwischenrepräsentation durch Anwenden des Marching-Cubes-Algorithmus [Lorensen und Cline 1987]. Nach einer Optimierung der Struktur des resultierenden Dreiecksnetzes werden die Scheitelpunkte in einem zweiten Schritt auf die ursprünglichen Datensätze zurückgerechnet. Anschließend wird das Netz durch wiederholtes Unterteilen der Dreiecke und anschließendes Rückrechnen solange verdichtet, bis die gewünschte Auflösung erreicht ist. Durch das Zurückrechnen auf die Ausgangsdaten bleibt der Beitrag der einzelnen Messpunkte identifizierbar und es kann deren voller Informationsgehalt (Kovarianzmatrix, Farbe, Reflexionsgrad) ausgeschöpft werden.

Der Behandlung der Flächenränder wurde beim derzeitigen Integrationsverfahren keine besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Weitergehende Untersuchungen sollten daher klären, wie z.B. Bohrungen und Aussparungen zuverlässig aus dem Datenmaterial rekonstruiert und von Bereichen mit fehlenden Messwerten unterschieden werden können.

Da die Integration größtenteils die selben Datenstrukturen und Funktionen wie die Registrierung verwendet, würden sich die dort beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten, insbesondere die Beschleunigung der Nächsten-Punkt-Suche, auch bei der Integration auswirken.

Für viele Anwendungen ist es notwendig, dass die erhaltenen Dreiecksnetze zur Verringerung der Datenmengen adaptiv ausgedünnt werden. Ein Ansatzpunkt für zukünftige Untersuchungen könnte daher auch sein, ob bereits bei der Verdichtung des zur Topologierekonstruktion verwendeten Netzes eine Unterteilung nur dann stattfindet soll, falls der Fehler in einer zu definierenden Metrik (welche z.B. auch die zusätzlichen Attribute mit einschließen kann) größer als eine festgelegter Schwellwert ist.

Die Qualität der Rekonstruktion hängt neben den Eingangsdaten auch von der Festlegung der Prozessierungsparameter wie Gitterabstand etc. ab. Aufgrund der für die Registrierung benötigten Rechenzeit ist keine interaktive Verarbeitung möglich. Die Festlegung dieser Parameter sollte daher durch spezielle Funktionen unterstützt werden. So ist es z.B. vorstellbar, dass das Ergebnis der Prozessierung anhand eines kleinen, interaktiv festgelegten Objektbereiches gezeigt wird, ähnlich einer Vorschaufunktion wie sie häufig von Bildverarbeitungspaketen bereitgestellt wird. Entspricht das Resultat nicht dem gewünschten Ergebnis, sollte ein Assistent bei der Änderung der Parameter behilflich sein.

7.4 Prüfung

Die entwickelten Techniken erlauben es, für jeden Datenpunkt dessen Positionsunsicherheit anzugeben. Dadurch ist es möglich, die Signifikanz von Abweichungen und die Kontrolliertheit von Merkmalen durch statistische Betrachtungen zu beurteilen.

Die Ableitung eines Prüfergebnisses erfolgt jedoch meist nicht anhand der Messdaten selbst, sondern mit Hilfe von Ersatzelementen wie Ebenen, Kugeln und Zylinder. Die Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Weiterverarbeitung der Messdaten macht daher eine Erweiterung der für die Prüfung verwendeten Programme erforderlich.

7.5 Gesamtsystem

Das Ziel dieser Arbeit war die Realisierung eines Gesamtsystems unter Verwendung eines durchgängigen Modells für die Datenunsicherheit. Mit dem realisierten System ist die Ableitung hochwertiger Oberflächenbeschreibungen möglich. Es baut auf den zur Verfügung stehenden Hardwarekomponenten auf und stellt naturgemäß nur eine von vielen Möglichkeiten zur Realisierung eines solchen Systems dar. Daher verbleibt eine Reihe offener Fragen:

- Welche Genauigkeit wird bei der Rekonstruktion komplexer Objekte tatsächlich erzielt und wie gut stimmen diese mit den berechneten Genauigkeitsmassen überein?
- Welchen Einfluß haben die bei der Prozessierung vernachlässigten Korrelationen?
- Wie groß ist der Einfluß von nicht modellierten, systematischen Restfehlern?
- Wie kann die vollständige Automatisierung aller Verarbeitungsschritte erreicht werden?
- Wie gut ist die Skalierbarkeit des Systems (andere Messbereiche, Objekte)?
- Welche Massnahmen sind notwendig, um Echtzeitfähigkeit zu erreichen?

Während die ersten drei Fragen von grundlegender Natur sind, setzen die restlichen Fragen eine anwendungsspezifische Betrachtung voraus.

8 Literatur

- Ahn, S. J. Kreisförmige Zielmarke. 4. ABW-Workshop Optische 3D-Formerfassung; Technische Akademie Esslingen. 1997.
- Altschuler, M. and Altschuler, B. R. Taboada J. Measuring surfaces spacecoded by a laser-projected dot matrix. *Imaging Applications for Automated Industrial Inspection and Assembly.*: SPIE; 1979.
- Amenta, N.; Choi, S., and Kolluri, R. The power crust. *ACM symposium on solid modeling and applications*; 2001.
- Arun, K. S.; Huang, T. S., and Blostein, S. D. Least-squares fitting of two 3-D point sets . *IEEE Trans. PAMI.* 1987; 9:698-700.
- Ayache, N. Artificial vision for mobile robots - stereo vision and multisensor perception. MIT-Press; 1991.
- Balz, M. and Gühring, J. Botanic shell structures. *IASS 2001*; Nagoya, Japan. IASS; 2001.
- Bergevin, R.; Soucy, M.; Gagnon, H., and Laurendeau, D. Towards a general multi-view registration technique. *IEEE Trans. PAMI.* 1996; 18(5):540-547.
- Besl, P. J. Active, optical imaging sensors. *Machine Vision and Applications.* 1988; 15:127-152.
- Besl, P. J. and MacKay, N. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1992; 14(2):239-256.
- Beyer, H. A. Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. *Mitteilungen Nr. 51*: ETH Zürich; 1992.
- Blais, F. and Rioux, M. Real-time numerical peak detector. *Signal Processing.* 1986; 11:145-155.
- Blais, G. and Levine, M. D. Registering multiview range data to create 3D computer objects. *IEEE Trans. PAMI.* 1995; 17(8):820-824.
- Bolle, R. M. and Vemuri, B. C. On three-dimensional surface reconstruction methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 1991; 13(1):1-13.
- Borgeat, L.; Laurendeau, D.; Dion, D., and Cayouette, F. Construction of a geometric model of a scene from local triangulations. *Vision, Modeling and Visualisation '99*; 1999.
- Boulanger, P.; Moron, V., and Redarce, T. High-speed and non-contact validation of rapid prototyping parts. *Rapid Product Development Technologies*; Boston, Mass., U.S.A. SPIE; 1996: 46-60.
- Bourke, P. Polygonising a scalar field [Web Page]. 1997.
- Brenner, C.; Böhm, J., and Gühring, J. Photogrammetric calibration and accuracy evaluation of a cross-pattern stripe projector. El-Hakim, S. F. and Grün, A. *Videometrics VI*; San Jose, CA. SPIE; 1999:164-172.
- Brown, D. C. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering.* 1971; 37(8):855-866.
- Böhm, J.; Brenner, C.; Gühring, J., and Fritsch, D. CAD-basierte Objekterkennung für ein multisensorielles Meßsystem. 'Mustererkennung 1999', 21. DAGM-Symposium; Germany. 1999.
- Chen, Y. and Medioni, G. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing.* 1992; 10(3):145-155.
- Curless, B. New methods for surface reconstruction from range images. Stanford University; 1997.
- Curless, B. and Levoy, M. Better optical triangulation through spacetime analysis. *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV)*; 1995: 987-994.
- Curless, B. and Levoy, M. A volumetric method for building complex models from range images. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH*; 1996.
- Denavit, J. and Hartenberg, R. S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics.* 1955; 22(2):215-221.
- DIN EN ISO 14253-1. : Geometrische Produktspezifikation (GPS). Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen. Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikation. 1999.
- Dold, J. A strategy for photogrammetric multiple camera calibration without additional object information. *IAPRS*; 1994: Part V, pp.65-70.

- Dorai, C.; Wang, G.; Jain, A. K., and Mercer, C. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction. *IEEE Trans. PAMI*. 1998; 20(1):83-89.
- Ebner, H. Self calibrating block adjustment. *IAPRS*; 1976: Part 3.
- Eggert, D. W.; Fitzgibbon, A. W., and Fisher, R. B. Simultaneous registration of multiple range views for use in reverse engineering. *Proc. of the 13th Int. Conf. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*; 1996: 243-247.
- Eggert, D. W.; Lorusso, A., and Fisher, R. B. Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. *Machine Vision and Applications*. 1997; 9:272-290.
- Everett, H. R. Survey of collision avoidance and ranging sensors for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*. 1989; 5:5-67.
- Foley, J. D.; van Dam, A.; Feiner, S. K., and Hughes, J. F. *Computer Graphics: principles and practice*. 1993; ISBN: 0-201-12110-7.
- Fraser, Clive S. Digital camera self-calibration. *ISPRS J. of Photogrammetry & Remote Sensing*. 1997; 52(4):149-159.
- Godding, R.; Lehmann, M., and Rawiel, G. Robot adjustment and 3-D calibration - photogrammetric quality control in daily use Grün/Kahmen. *Optical 3-D Measurement Techniques IV Heidelberg*: Wichmann Verlag; 1997: 158-165.
- Godin, G.; Rioux, M., and Baribeau, R. Three-dimensional registration using range and intensity information. *Videometrics III: SPIE*; 1994: 279-290.
- Gruber, M. and Häusler, G. Simple, robust and accurate phase-measuring triangulation. *Optik* 89. 1992; 118-122.
- GUM. Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1995.
- Haralick, R. and Shapiro, L. *Computer and Robot Vision - Volume I*. Addison Wesley.
- Häusler, G. How much 3D-information can we acquire? *3DIM 2001*; 2001: Oral Presentation.
- Hayati, S. and Mirmirani, M. Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators. *J. Robotic Systems*. 1985; 2(4):397-413.
- Hilton, A. and Illingworth, J. Multi-resolution geometric fusion. *3DIM 2001*; Ottawa. IEEE; 1997.
- Hinsken, L. Algorithmen zur Beschaffung von Näherungswerten für die Orientierung von beliebig im Raum angeordneten Strahlenbündeln. *DGK Reihe C, Heft 133*: Universität Bonn; 1987.
- Hoppe, H. Surface reconstruction from unorganized points: University of Washington; 1994.
- Horn, B. K. P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *J. Opt. Soc. Am.* 1987; 4(4):629-642.
- Horn, B. K. P. Relative Orientation. *Int. J. of Computer Vision*. 1990; 4:59-78.
- Horn, B. K. P.; Hilden, H. M., and Negahdaripour, S. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices. *J. Opt. Soc. Am. Ser. A*. 1988; 5:1127-1135.
- Hoscheck, J. and Lasser, D. *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Stuttgart: Teubner; 1992; ISBN: 3-519-12962-0.
- Hu, G. and Stockman, G. 3-D surface solution using structured light and constraint propagation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989; 11(4):390-402.
- ISO 10 360-2. Coordinate metrology - Part 2: Performance assessment of coordinate measuring machines. 1997.
- ISO 10012-1. Forderungen an die Qualitätssicherung für Meßmittel - Teil 1: Bestätigungssystem für Meßmittel. Berlin: Beuth; 1992.
- Jiang, X. and Bunke, H. *Dreidimensionales Computersehen: Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1997; ISBN: 3-540-60797-8.
- Johnson, A. and Hebert, M. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1999; 21(5):433-449.
- Johnson, A. E. and Kang, S. B. Registration and integration of textured 3D data. *Image and Vision Computing*. 1999; 17:135-147.
- Jokinen, O. and Haggrén, H. Statistical analysis of two 3-D registration and modeling strategies. *ISPRS J. of Photogrammetry & Remote Sensing*. 1998; 53:320-341.
- Karbacher, S. *Rekonstruktion und Modellierung von Flächen aus Tiefenbildern*. Shaker Verlag: Universität Erlangen; 1997.

- Kenefick, J.; Gyer, M., and Harp, B. Analytical self-calibration. *Photogrammetric Engineering*. 1972; 38(11):1117-1126.
- Kludas, T. Three dimensional surface reconstruction with the Zeiss photogrammetric industrial measurement system InduSURF Digital. SSPRS Intercommission Workshop "From Pixels to Sequences", IAPRS Vol. 30, Part 5W1; Zürich. 1995: 285-291.
- Langis, C.; Greenspan, M., and Godin, G. The parallel iterative closest point algorithm, *IEEE Computer Society*. 3DIM 2001; Quebec City (Canada). 2001: 195-202.
- Levoy, M.; Pulli, K.; Curless, B.; Rusinkiewicz, S. M.; Koller, D.; Pereira, L.; Ginzton, M.; Anderson, S.; Davis, J.; Ginsberg, J.; Shade, J., and Fulk, D. The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues. *Proc. SIGGRAPH*; 2000.
- Lorensen, W. E. and Cline, H. E. Marching Cubes: a high resolution 3D surface reconstruction algorithm. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH*; 1987: 163-169.
- Maas, H.-G. Robust automatic surface reconstruction with structured light. *IAPRS: ISPRS*; 1992: 709-713.
- MICO. MICO - Homepage [Web Page]. 2001. Available at: www.mico.org.
- Murray, R.; Li, Z., and Sastry, S. A mathematical introduction to robotic manipulation. Florida: CRC Press, Inc.; 1994; ISBN: 0-8493-7981-4.
- Neugebauer, P. Geometrical cloning of 3D objects via simultaneous registration of multiple range imagesSMA; 1997.
- Neumann, H. J. Koordinatenmesstechnik im industriellen Einsatz: zehn Jahre Innovation. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie; 2000; ISBN: 3-478-93212-2.
- Object Management Group, Inc. The common object request broker: architecture and specification; 2000.
- Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979; 9:62-66.
- Pennec, X. and Thirion, J.-P. A framework for uncertainty and validation of 3D registration methods based on points and frames. *Int. J. of Computer Vision*. 1997; 25(3):203-229.
- Pito, R. Automated surface acquisition using range cameras [PhD Thesis]: PhD Thesis, University of Pennsylvania; 1996.
- Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. *Numerical recipes in C*. Cambridge, NY: Cambridge University Press; 1992; ISBN: 0-521-43108-5.
- Pulli, K. Surface reconstruction and display from range and color data: University of Washington; c1997.
- Pulli, Kari. Multiview registration for large datasets. *Proc. of 2nd. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM'99)*; Ottawa, Canada. 1999: 160-168.
- Reubelt, T. Subpixelgenaue Lösung des Korrespondenzproblems für die optische 3D-Vermessung mit strukturierter Beleuchtung: Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart; 2001.
- Riechmann, W. (Volkswagen AG, R&D). Fast object recording by means of structured light and photogrammetric techniques. *ISPRS Intercommission Workshop "From Pixels to Sequences"*; Zürich. *ISPRS*; 1995: 195-200.
- Rioux, M.; Blais, G.; Beraldin, J.-A., and Boulanger, P. Range imaging sensors development at NRC laboratories. *Proc. of Workshop on Interpretation of 3D Scenes*; 1989: 154-160.
- Rusinkiewicz, S. M. Real-time acquisition and rendering of large 3D models: Stanford University; 2001.
- Rusinkiewicz, S. M. and Levoy, M. Efficient variants of the ICP algorithm. *3DIM 2001: IEEE*; 2001: 145-152.
- Salvi, J. An approach to coded structured light to obtain three dimensional information. Girona: University of Girona; 1998.
- Sanso, F. An exact solution of the roto-translation problem. *Photogrammetria*. 1973; 29:203-216.
- Schewe, H. Automatische photogrammetrische Karosserievermessung. *Bildmessung Und Luftbildwesen*. 1988; (1):16-24.
- Shrikhande, N. and Stockman, G. Surface orientation from a projected grid. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989; 11(6):650-655.
- Soucy, M. and Laurendeau, D. A general surface approach to the integration of a set of range views. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1995; 14(4):344-358.

- Stahs, T. and Wahl, F. Oberflächenvermessung mit einem 3D-Robotersensor. ZPF. 1990; 1990(6):190-202.
- Stahs, T. G. Wahl F. M. Fast and robust range data acquisition in a low-cost environment. Close-Range Photogrammetry meets Machine Vision: SPIE; 1990: 496-503.
- Stoddart, A. J.; Lemke, S.; Hilton, A., and Renn, T. Estimating Pose Uncertainty for Surface Registration. Image and Vision Computing. 1998; 16(2):111-120.
- Thirion, J.-P. The extremal mesh and the understanding of 3D surfaces. 1993(INRIA; Technical Report (RR 2149)).
- Torlegard, K. On the determination of interior orientation of close-up cameras under operational conditions: University of Stockholm; 1967.
- Trobina, M. Error model of a coded-light range sensor. ETH-Zürich; 1995; BIWI-TR_164.
- Trucco, E.; Fisher, R. B.; Fitzgibbon, A. W., and Naidu, D. K. Calibration, data consistency and model acquisition with laser strippers. Int. J. of Computer Integrated Manufacturing. 1998; 11(4):293-310.
- Tsai, R. Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; Miami Beach, USA. 1986: 364-374.
- Tsai's camera calibration source code Tsai, R. Y. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/rgw/www/TsaiCode.html>; 1986.
- Turk, G. and Levoy, M. Zippered polygon meshes from range images. SIGGRAPH '94; 1994: 311-318.
- Valkenburg, R. J. and McIvor, A. M. Calibrating a structured light system. Industrial Research Limited; 1995; Report 362.
- Valkenburg, R. J. and McIvor, A. M. Accurate 3D measurement using a structured light system. Industrial Research Limited; 1996; Report 576.
- VDI Technologiezentrum. Deutsche Agenda "Optische Technologien für das 21. Jahrhundert". 2001. ISBN: 3-00-006083-9.
- VDI/VDE 2617. Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten, Blatt 1-6. 1986.
- VDI/VDE 2634-1. Optische 3D-Meßsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung (Entwurf). 2000.
- VDI/VDE 2634-2. Optische 3D-Meßsysteme - Systeme mit flächenhafter Antastung (Entwurf). 2000.
- Wahl, F. M. A coded light approach for depth map acquisition Hartmann. Mustererkennung 1986 Berlin: Springer Verlag; 1986: 12-17.
- Weckenmann, A. and Gawande, B. Koordinatenmeßtechnik: Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage. München; Wien: Hanser; 1999; ISBN: 3-446-17991-7.
- Wester-Ebbinghaus, W. Ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern: DGK Reihe C, Nr. 289; 1983.
- Wheeler, M. D. and Ikeuchi, K. (School of Computer Science, Carnegie Mellon University). Iterative estimation of rotation and translation using the quaternion. Technical Report; 1995; CMU-CS-95-215.
- Williams, J. A. and Bennamoun, M. Multiple view 3D registration using statistical error models Girod, B.; Niemann, H., and Seidel, H.-P. Vision, Modeling and Visualisation '99; 1999: 83-90.
- Wiora, G. High resolution measurement of phase-shift amplitude and numeric object phase calculation. Vision Geometry IX; San Diego. SPIE; 2000. v. SPIE 4117).
- Wolf, K. Hochgenaue 3D-Vermessung mit codiertem Licht und Phasenshiftverfahren: Studienarbeit bei der Fakultät Elektrotechnik, Universität Stuttgart; 1996.

9 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Jens Gühring
Geburtsdatum	01.07.1973
Geburtsort	Oberndorf a.N.
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Familienstand	Verheiratet mit Melanie Gühring, geb. Gugel
Kinder	Kira Gühring

Schulbildung

1979-1983	Grundschule Vöhringen (Baden-Württemberg)
1983-1992	Albeck-Gymnasium Sulz a.N. (Abitur)

Zivildienst

1992 – 1993	Zivildienst
-------------	-------------

Akademische Ausbildung

1993 – 1997	Studium des Vermessungswesens an der Universität Stuttgart (Diplom)
-------------	---

Arbeitstätigkeit

1997 – 2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart im Sonderforschungsbereich 514 „Aktive Exploration mittels Sensor/Aktor-Kopplung für adaptive Meß- und Prüftechnik ” am Institut für Photogrammetrie.
ab Oktober 2000	Gruppenleiter der Forschungsgruppe „Optische Inspektion”
seit Juni 2001	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Siemens Corporate Research, Princeton, New Jersey, USA

Auslandsaufenthalt

Februar – März 1999	Gastaufenthalt in der Gruppe „Visual Information Technology“ des Institute for Information Technology, National Research Council, Ottawa, Canada
---------------------	--

10 Dank

Ich möchte allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen darf ich an dieser Stelle Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch für die Betreuung der Arbeit und für das produktive Umfeld am Institut für Photogrammetrie. Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi möchte ich für die Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Hinweise zur Ausarbeitung danken. Dank gilt allen lieben Kolleginnen und Kollegen für das immer angenehme Arbeitsklima am Institut und zahlreiche hilfreiche Diskussionen. Besonders nennen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Claus Brenner, der mir vor allem in der Anfangszeit wertvolle Hilfestellung gegeben hat.

Zum Abschluß möchte ich herzlich meiner Familie danken, vor allem meiner Frau Melanie und meiner Tochter Kira. Sie haben mir durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung Rückhalt und Freude gegeben.